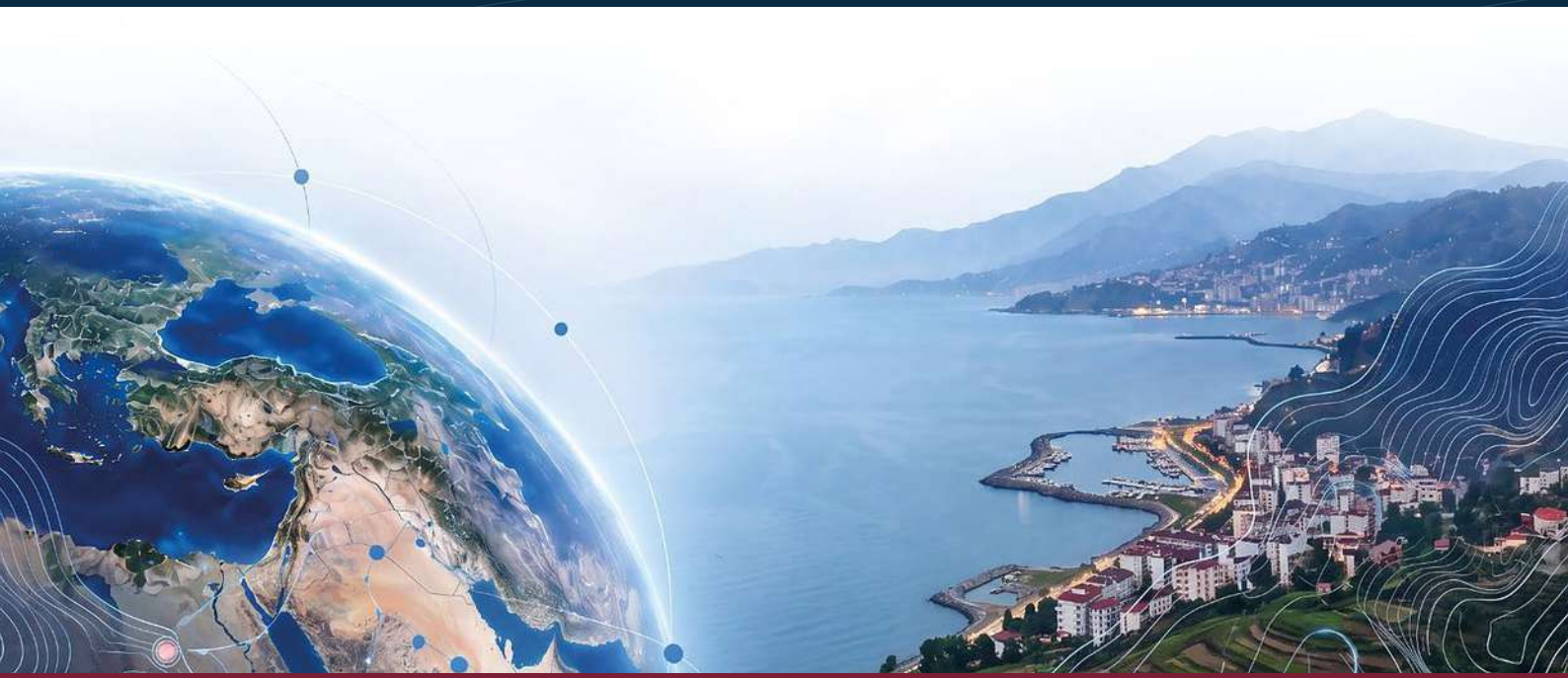
X. UZAKTAN ALGILAMA VE
COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ SEMPOZYUMU

TAM METİN

BİLDİRİLER KİTABI

15–17 EKİM 2026

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

UZAL-CBS 2026

X. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu

Tam Metin Bildiriler Kitabı

15–17 Ekim 2026 · Trabzon

KTÜ Prof. Dr. Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi

DÜZENLEYEN KURUMLAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi

EV SAHİBİ BÖLÜM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Harita Mühendisliği Bölümü

www.ktu.edu.tr/uzalcbs2026

TAM METİN BİLDİRİLER KİTABI

Yayın Künyesi

Editörler

Yayıncı

ISBN

Yayın tarihi

Yayın yeri

TRABZON 2026

Sempozyum

X. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, 15–17 Ekim 2026 tarihlerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi iş birliğiyle Trabzon'da gerçekleştirildi. KTÜ Harita Mühendisliği Bölümünün ev sahipliğindeki etkinlik, KTÜ Prof. Dr. Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi'nde düzenlendi.

Bilimsel program; uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri, fotogrametri, jeodezi ve coğrafi yapay zekâ alanlarındaki araştırmaları bir araya getirdi. Sempozyumda sözlü ve poster sunumların yanı sıra davetli konuşmalar, ödül töreni ve sosyal etkinlikler yer aldı.



Sempozyum katılımcıları · KTÜ Prof. Dr. Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi

Kaynak ve fotoğraf: KTÜ Harita Mühendisliği, "X. UZAL-CBS Sempozyumu Başarıyla Tamamlandı", 22 Ekim 2026.

KURULLAR

Onur ve Yürütme Kurulları

Onur Kurulu

Tahir Şahin
Trabzon Valisi

Ahmet Metin Genç
Trabzon Büyükşehir Belediye Başkanı

Prof. Dr. Hamdullah Çuvalcı
Karadeniz Teknik Üniversitesi Rektörü

Prof. Dr. Temel Varol
KTÜ Mühendislik Fakültesi Dekanı

Ali İpek
HKMO Yönetim Kurulu Başkanı

Prof. Dr. Hüsniye Ebru Çolak
HKMO Trabzon Şubesi Başkanı · KTÜ Öğretim Üyesi

Yürütme Kurulu

Prof. Dr. Derya Maktav
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz Sunar
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erkan Beşdok
Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Taşkın Kavzoğlu
Gebze Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin Topan
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Prof. Dr. Fatmagül Kılıç
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Süha Berberoğlu
Çukurova Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur Avdan
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Süleyman Sefa Bilgilioğlu
Aksaray Üniversitesi

Dr. Hüseyin Bayraktar
Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

Dr. Kaan Kalkan
Sekreterya · TÜBİTAK

KURULLAR

Düzenleme Kurulu

EŞ BAŞKANLAR

Prof. Dr. Derya Maktav
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Esra Tunç Görmüş
Karadeniz Teknik Üniversitesi

KURUL ÜYELERİ

Prof. Dr. Mualla Yalçınkaya
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Çetin Cömert
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Volkan Yıldırım
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsniye Ebru Çolak
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fevzi Karslı
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halil Akıncı
Artvin Çoruh Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz Güngör
Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Özlem Akar
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin Topan
Bülent Ecevit Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Dihkan
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Eminnur Topsakal Ayhan
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Volkan Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Gordana Kaplan
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ekrem Saralioğlu
Artvin Çoruh Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin Acar
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülten Kara
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Deniztan Ulutaş Karakol
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Dr. Kaan Kalkan
TÜBİTAK Uzay Enstitüsü

Arş. Gör. Dr. Cemre Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Arş. Gör. Dr. Fatih Terzi
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Arş. Gör. Süheyla Piltan Altaş
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Arş. Gör. Murat Bektaşoğlu
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Arş. Gör. Merve Ocak
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Öğr. Gör. Murat Bahadır
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

SEKRETARYA

Arş. Gör. Dr. Bura Adem Atasoy · Arş. Gör. Alper Tunga Akın · Arş. Gör. Alanur Yavuz

KURULLAR

Bilim Kurulu

1 / 3

Ali Levent Yağcı
Gebze Teknik Üniversitesi

Ali Özgün Ok
Hacettepe Üniversitesi

Aliihsan Şekertekin
Iğdır Üniversitesi

Alper Çabuk
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Alper Şen
Yıldız Teknik Üniversitesi

Arif Çağdaş Aydınoğlu
Gebze Teknik Üniversitesi

Arzu Erener
Kocaeli Üniversitesi

Aycan Murat Marangoz
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Aydan Yaman
Aksaray Üniversitesi

Ayhan Alkış
Yıldız Teknik Üniversitesi

Ayhan Ateşoğlu
Bartın Üniversitesi

Aziz Uğur Tona
Gümüşhane Üniversitesi

B. Baha Bilgilioğlu
Gümüşhane Üniversitesi

Bahadır Çelik
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Bayram Uzun
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Begüm Demir
Technische Universität Berlin

Berk Anbaroğlu
Hacettepe Üniversitesi

Bülent Bayram
Yıldız Teknik Üniversitesi

Çağlar Bayık
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Çetin Cömert
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Çiğdem Göksel
İstanbul Teknik Üniversitesi

Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Derya Öztürk
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Dursun Zafer Şeker
İstanbul Teknik Üniversitesi

Erkan Beşdok
Erciyes Üniversitesi

Erman Şentürk
Kocaeli Üniversitesi

Esra Gürbüz
Aksaray Üniversitesi

Esra Tunç Görmüş
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Eyüp Selim Köksal
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fatmagül Kılıç Gül
Yıldız Teknik Üniversitesi

Fevzi Karslı
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Filiz Bektaş Balçık
İstanbul Teknik Üniversitesi

Filiz Sunar
İstanbul Teknik Üniversitesi

Furkan Karlıtepe
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Füsun Balık Şanlı
Yıldız Teknik Üniversitesi

H. Bilgehan Makineci
Konya Teknik Üniversitesi

KURULLAR

Bilim Kurulu

2 / 3

H. Murat Yılmaz
Aksaray Üniversitesi

Hakan Akçın
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Hakan Karabörk
Konya Teknik Üniversitesi

Halil İbrahim Gündüz
Aksaray Üniversitesi

Halil İbrahim Şenol
Harran Üniversitesi

Hayrettin Acar
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Hüseyin Bayraktar
Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı

Hüseyin Topan
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Hüsniye Ebru Çolak
Karadeniz Teknik Üniversitesi

İlkay Buğdaycı
Necmettin Erbakan Üniversitesi

İsmail Çölkesen
Gebze Teknik Üniversitesi

İsmail Ercüment Ayazlı
Cumhuriyet Üniversitesi

İsmail Rakıp Karaş
Karabük Üniversitesi

Kaan Kalkan
Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu

Kadir Şahbaz
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

M. Can İban
Mersin Üniversitesi

Mehmet Ali Çullu
Harran Üniversitesi

Mehmet Ali Dereli
Giresun Üniversitesi

Mehmet Ali Yücel
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Mehmet Devrim Akça
Işık Üniversitesi

Mithat Derya Maktav
İstanbul Teknik Üniversitesi

Murat Selim Çepni
Kocaeli Üniversitesi

Murat Uysal
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Murat Yakar
Mersin Üniversitesi

Mustafa Hüsrevoğlu
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Mustafa Türker
Hacettepe Üniversitesi

Mustafa Ümit Gümüşay
Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi

Mustafa Üstüner
Samsun Üniversitesi

Naci Yastıklı
Yıldız Teknik Üniversitesi

Namık Kemal Sönmez
Akdeniz Üniversitesi

Nebiye Musaoğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

Niyazi Arslan
Çukurova Üniversitesi

Nizar Polat
Harran Üniversitesi

Nusret Demir
Akdeniz Üniversitesi

Okan Yıldız
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Onur Şatır
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

KURULLAR

Bilim Kurulu

3 / 3

Osman Sami Kırtıloğlu
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Ozan Arslan
Kocaeli Üniversitesi

Ozan Öztürk
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Ömer Gökberk Narin
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Özer Akyürek
Kocaeli Üniversitesi

Özgün Akçay
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Özlem Akar
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Resul Çömert
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Saygın Abdikan
Hacettepe Üniversitesi

Seda Terzi Türk
İstanbul Topkapı Üniversitesi

Sedat Doğan
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Sevda Zuhal Akyürek
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Sultan Kocaman Gökçeoğlu
Hacettepe Üniversitesi

Süha Berberoğlu
Çukurova Üniversitesi

Süleyman Sefa Bilgilioğlu
Aksaray Üniversitesi

Şinasi Kaya
İstanbul Teknik Üniversitesi

Taner Üstüntaş
Kocaeli Üniversitesi

Tarık Türk
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Taşkın Kavzoğlu
Gebze Teknik Üniversitesi

Tolga Bakırman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Uğur Avdan
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Uğur Murat Leloğlu
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Umut Güneş Sefercik
Gebze Teknik Üniversitesi

Volkan Yıldırım
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Volkan Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Yakup Emre Çoruhlu
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Yusuf Kurucu
Ege Üniversitesi

Zafer Aslan
İstanbul Aydın Üniversitesi

Zeynep Akbulut
Gümüşhane Üniversitesi

Ziya Usta
Artvin Çoruh Üniversitesi

KURUMSAL KATKILAR

Destekleyenler ve Sponsorlar

DESTEKLEYEN KURUMLAR

TÜBİTAK · Harita Genel Müdürlüğü · Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü · Karayolları Genel Müdürlüğü · Ortahisar Belediyesi · Trabzon Büyükşehir Belediyesi · TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

Diğer katkılar: Orman Genel Müdürlüğü · Akropol

PLATİN SPONSOR

ATAY

ALTIN SPONSORLAR

Nil Proje Harita ve Mühendislik Uygulamaları

NİK Sistem

GÜMÜŞ SPONSORLAR

INTELLI SOFTWARE

ESC MÜHENDİSLİK

Geoteknik

esri Türkiye

15–17 EKİM 2026

Program Özeti

15 EKİM · PERŞEMBE

08.30	Kayıt ve karşılama
09.00	Açılış töreni
Gün boyunca	Davetli konuşmalar
14.45–18.30	Paralel bilimsel oturumlar
19.00	Gala yemeği · KTÜ Sahil Tesisi

16 EKİM · CUMA

09.00–16.30	Paralel bilimsel oturumlar
11.00–12.15	Poster jüri değerlendirmesi
16.45–17.15	Ödül töreni ve kapanış

17 EKİM · CUMARTESİ

09.00–17.00	Uzungöl gezisi

Bilimsel oturumlar Uzungöl, Ayasofya ve Sümela salonlarında düzenlenmiştir.

BİLİMSEL PROGRAM

Davetli Konuşmalar

01 Kutup Bölgeleri ve Uzaktan Algılama Çalışmaları

Dr. Atilla Yılmaz

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi

02 İklim Krizini İzlemede Yeni Ufuklar: Uzaktan Algılama ve Yapay Zekâ Entegrasyonu (GeoAI)

Prof. Dr. Taşkın Kavzoğlu

Gebze Teknik Üniversitesi

03 Model-Based Machine Learning for Compressive SAR Imaging

Prof. Dr. Alin Achim

Bristol Üniversitesi

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

Uzaktan Algılama: Yapay Zeka

S01 ÇOK GÖREVLİ DERİN ÖĞRENME İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ HAVA GÖRÜNTÜLERİNDEN BİNA SEGMENTASYONU VE YÜKSEKLİK KESTİRİMİ 1–6
Danang Budi Susetyo; Tolga Bakırman; Bülent Bayram

S02 SENTINEL-1 SAR GÖRÜNTÜLERİNDE BİLİNEN PETROL SIZINTISI SAHNELERİNİN İKİLİ PİKSEL BÖLÜTLEMESİ İÇİN KARŞILAŞTIRMALI DERİN ÖĞRENME ÇERÇEVESİ 7–17
Melih Altay; Fatih Fehmi Şimşek; Saygın Abdikan

S03 UZAKTAN ALGILAMA VE AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKA ENTEGRASYONU İLE ALG PATLAMALARININ DERİN ÖĞRENME TABANLI TESPİTİ VE ANALİZİ 18–27
Mustafacan Saygı; Halil Nurullah Oruç; Osman Yavuz Altuntaş; Meltem Çelen; İsmail Çölkesen

S04 KLASİK VE KUANTUM TABANLI DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİNİN ARAZİ KULLANIMI VE ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 28–38
Fevzi Daş; Mitat Can Yıldız; Rüştü Çallı; Emirhan Özdemir; Aliihsan Şekertekin

S05 SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNDE FARKLI BULUT FİLTRELEME YÖNTEMLERİNİN ÇOKLU ÇALIŞMA ALANLARINDA KARŞILAŞTIRILMASI 39–41
Emirhan Özdemir

S06 DERİN ÖĞRENME TABANLI AYÇİÇEĞİ SEGMENTASYONU İÇİN AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 42–50
Esra Yıldırım; İsmail Çölkesen; Umut Güneş Sefercik

Fotogrametri: LiDAR ve 3B Modelleme

S07 YOL ORTA EKSENLERİNİN YARI OTOMATİK TESPİTİ 51–61
Ömer Canözü; Hayrettin Acar

S08 TOKAT DİJİTAL İKİZ PROJESİ: 360° PANORAMA, İHA-YERSEL FOTOGRAMETRİ VE 3B MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK KÜLTÜREL MİRASIN BELGELENMESİ 62–71
Cengiz Erdoğan; Talha Erdoğan; Gürcan Büyüksalih; Cem Gazioğlu

S09 BİNA ÇATI YÜZEYLERİNDEKİ YABANCI NESNELERİN OTOMATİK TESPİTİ 72–77
Emine Uzunalioğlu; Hayrettin Acar

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

2

Fotogrametri: LiDAR ve 3B Modelleme

S10 HAVA LIDAR SEMANTİK SEGMENTASYONUNDA NOKTA TABANLI DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 78–86
Hacer Kübra Sevinç; İsmail Rakıp Karaş

CBS, GeoAI ve 3B Mekansal Uygulamalar

S11 BÜYÜK DİL MODELİ İLE ÇOK KAYNAKLI ÇEVRESEL METİNLERDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN GEOVISUAL ANALİZİ İLE TÜRKİYE'DE KAHVERENGİ KOKARCANIN (HALYOMORPHA HALYS) İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE İLİŞKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 87–96
Pınar Kazaz; Çetin Cömert

S12 AÇIK KAYNAKLI 3B WEBCBS MİMARİSİ İLE AKILLI KAMPÜS DİJİTAL İKİZİNİN MODELLENMESİ: İTÜ-AYAZAĞA ÖRNEĞİ 97–106
Serdar Sakallı; Tahsin Yomralıoğlu

S13 MEZARLIK ALANLARININ ETKİN KULLANIMINA YÖNELİK WEB TABANLI BİR ARAYÜZ 107–109
Fatih Terzi; Alper Tunga Akın; Bura Adem Atasoy

S14 WEB TABANLI 3B COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNDE DİNAMİK VE GPU DESTEKLİ GÖRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ 110–112
Ziya Usta

S15 İSTANBUL'DA AKTİF YEŞİL ALAN YETERLİLİĞİNİN CBS VE MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ 113–115
Betül Güneş; Ahmet Tarık Torun

S16 BİR BİLGİ GRAFI TAMAMLAMA PROBLEMİ OLARAK 3B BİNA MODELLERİNİN GEOMETRİK İYİLEŞTİRMESİ 116–121
Alper Tunga Akın; Çetin Cömert

Uzaktan Algılama: İklim, Çevre ve Değişim Analizi

S17 LA PALMA VOLKANİK PATLAMASI SONRASI ARAZİ ÖRTÜSÜ VE KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ 122–129
Sidal Yıldırım; İlktan Gayretoğlu; Zehra Çetin

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

3

Uzaktan Algılama: İklim, Çevre ve Değişim Analizi

S18 **ARKTİK BÖLGEDE DENİZ BUZU SEGMENTASYONU İÇİN TOPLULUK VE DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ** 130–141

Melih Altay; Fatih Fehmi Şimşek; Saygın Abdikan

S19 **KENTSEL ISI ADASI VE YEŞİL ALAN ERİŞİLEBİLİRLİĞİNİN VERİ ODAKLI KARAR DESTEK YAKLAŞIMIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ** 142–144

Büşra Ertaş; Gökçe Betül Çakmak

S20 **HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMASINDA AŞIRI ÖĞRENME MAKİNESİ HİPERPARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON ALGORİTMALARIYLA AYARLANMASI** 145–154

Berra Nur Tunç; Selver Güngör; Ümit Haluk Atasever; Erkan Beşdok

Fotogrametri: LiDAR ve Görüntü İşleme

S21 **YERDEN GÖRÜNTÜYE RFM YÖNTEMİ KULLANILARAK PLÉIADES NEO ÜÇLÜ BİNDİRMELİ PANKROMATİK GÖRÜNTÜLERİNDEN ÜÇ BOYUTLU KOORDİNAT HESABI** 155–163

Hüseyin Topan; Kurtuluş Sedar Görmüş; Kazimierz Becek

S22 **TARİHİ HAVA FOTOĞRAFLARININ SINIFLANDIRILMASINDA GRİ DÜZEY EŞ OLUŞUM MATRİSLERİNİN KATKISININ İNCELENMESİ** 164–171

Ömer Gökberk Narin; Çağlar Bayık; Aliihsan Şekertekin; Saygın Abdikan; Füsun Balık Şanlı

S23 **TERMAL ORTOMOZAİK ÜRETİMİNDE BÜTÜNLEŞİK VE BAĞIMSIZ VERİ İŞLEME STRATEJİLERİNİN GEOMETRİK DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ** 172–175

Ersin Onay; Samed Furkan Talas; İlyas Aydın; Umut Güneş Sefercik

S24 **YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ORTOFOTOLARDAN ÇATI SEGMENTASYONUNDA RESNET ENCODER KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ** 176–183

Sibel Canaz Sevgen

S25 **MOBİL LIDAR NOKTA BULUTLARININ DENETİMSİZ ALAN ADAPTASYONU İLE SINIFLANDIRILMASI** 184–191

Eray Sevgen

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

4

Fotogrametri: LiDAR ve Görüntü İşleme

S26 NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN BİNA SINIR GEOMETRİSİNİN OTOMATİK DÜZGÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK YENİ BİR ALGORİTMANIN GELİŞTİRİLMESİ VE TİCARİ YAZILIMLARA ENTEGRASYONU — 192–205

Fevzi Karslı; Erhan Coşkun; Mustafa Dihkan; Emirhan Özdemir; Fevzi Daş; Murat Bahadır; Ahmad Shakib Sahak; Feride Seçil Yıldırım; Fatih Tunahan Dinçer

CBS, Afet ve Karar Destek Sistemleri

S27 MALATYA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ KENT BİLGİ SİSTEMİ YENİDEN YAPILANDIRMA SÜRECİ — 206–219

İnan Doğan; Halil İbrahim İnan

S28 ASKERÎ LOJİSTİKTE OTONOM KARA ARAÇLARI İÇİN SEMANTİK İTERATİF SKOR YAYILIM ALGORİTMASI (S-ISPA) TABANLI GÜZERGÂH OPTİMİZASYONU — 220–230

Korcan Alpan; Hüseyin Pehlivan

S29 HARİTA HİÇ KAPANMASIN: AÇIK KAYNAKLI SİSTEMLERLE KESİNTİSİZ VE GERÇEK ZAMANLI MEKÂNSAL VERİ YÖNETİMİ — 231–239

Deniz Gökduman

S30 İKLİM KAYNAKLI AFET RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDECBS VE YAPAY ZEKA (GEOAI) TABANLI KENTSEL ISI ADASI ETKİSİ ANALİZİ — 240–248

Zeynep Vuran; Rümeysa Dolunay; Zeynep Ceyda Karakaya; Muhammed Oğuzhan Mete

S31 UZAY ARAZİSİ YÖNETİMİNDE 4B-COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TABANLI UZAY KADASTROSU YAKLAŞIMI — 249–258

Nihal Yüksel; Tahsin Yomralıoğlu

S32 FREKANS ORANI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN HEYELAN DUYARLILIK HARİTASI KULLANILARAK ORMAN YOLU AĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ: TRABZON ÖRNEĞİ — 259–268

Taha Yasin Hatay

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

5

Uzaktan Algılama: Tarım, Orman ve Görüntü Analizi

S33 **GÖKTÜRK-1 DESTEKLİ TRANSFER ÖĞRENME İLE SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNİN SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNÜN ARTIRILMASI** 269–273

Hilal Adıyaman Varul; Yunus Emre Varul; Hasan Güner; Berna Daştan; Mustafa Emre Akçal; Tolga Bakırman; Nebiye Musaoğlu; Bülent Bayram

S34 **ÇOK ZAMANLI UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİ KULLANILARAK KAR DERİNLİĞİ TAHMİNİ** 274–284

Abbas Han Tanış; Filiz Sunar

S35 **EGE VE GÜNEY MARMARA'DA ZEYTİN ALANLARININ 2005-2025 DÖNEMİNDEKİ MEKANSAL DAĞILIMININ RASTGELE ORMAN VE GLOBAL SHAP İLE ANALİZİ** 285–294

Elif Özlem Yılmaz; Muhammed Yusuf Öztürk; Alihan Teke; Taşkın Kavzoğlu

S36 **ÇOK ZAMANLI SENTINEL-2 VERİLERİ KULLANILARAK TARIMSAL ÜRÜN VE KAVAK PLANTASYONLARININ DERİN ÖĞRENME TABANLI HARİTALANMASI VE KULLANICI DOSTU ARAYÜZ TASARIMI** 295–297

Berat Çeliktepe; İsmail Çölkesen; Muhammed Yusuf Öztürk

S37 **UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ KULLANILARAK ORMAN YANGIN ALANLARINDA BİTKİ VE TOPRAK DEĞİŞİMLERİNİN ZAMANSAL ANALİZİ: 2021 MANAVGAT ORMAN YANGINI ÖRNEĞİ** 298–298

Betül Kırımlıoğlu; Esra Tunç Görmüş

S38 **GOOGLE ALPHAEARTH FOUNDATIONS EMBEDDING VERİ SETİNİN ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ** 299–301

Eren Can Seyrek; Murat Uysal

Uzaktan Algılama: Orman, Yangın ve Makine Öğrenmesi

S39 **DNBR KILAVUZLU ZAYIF DENETİMLİ ÖĞRENME VE SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNİ KULLANARAK DERİN ÖĞRENME TABANLI YANMIŞ ALAN HARİTALAMA** 302–308

Sohaib K M Abujayyab; Şüheda Semih Açmalı; Mesut Özdağ; İsmail Rakıp Karaş

S40 **TÜRKİYE'DE KAYIN ORMANLARININ MEKÂNSAL DAĞILIMININ UZAKTAN ALGILAMA TABANLI SINIFLANDIRMA İLE HARİTALANMASI** 309–317

Hande Okurlar; Resul Çömert; Alper Ahmet Özbey; Hasan Burak Özmen; Nebi Bilir; Mustafa Üstüner; Gordana Kaplan

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

6

Uzaktan Algılama: Orman, Yangın ve Makine Öğrenmesi

S41 **FISTIK (PİSTACİA VERA) AĞAÇLARININ SEGFORMER İLE SEMANTİK SEGMENTASYONU** 318–325

Şeyma Akça

S42 **UZAKTAN ALGILAMA VE CA-ANN MODELİ İLE ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMİNİN ZAMANSAL-MEKANSAL ANALİZİ VE GELECEK PROJEKSİYONU: ARTVİN İLİ ÖRNEĞİ** 326–336

Cemile Koca; Osman Salih Yılmaz; Çağlar Kıvanç Kaymaz

S43 **1D-CNN TABANLI HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMASINDA AĞIRLIK BAŞLATMANIN ROLÜ VE BATCH NORMALIZATION İLE ETKİLEŞİMİ** 337–347

Selver Güngör; Berra Nur Tunç; Ümit Haluk Atasever; Erkan Beşdok

CBS: GeoAI ve Akıllı Şehirler

S44 **AFET RİSKLERİNİN AZALTILMASINDA ÖLÇEKLER ARASI EŞGÜDÜMÜN SAĞLANMASI: CBS TABANLI BÖLGESEL AFET YÖNETİŞİMİ YAKLAŞIMI OLARAK “BARAP” MODELİ** 348–357

Tahsin Yomralıoğlu; Fatih Terzi; Orhan Tatar

S45 **ORMAN VE ENERJİ GÜVENLİĞİ İÇİN UZAKTAN ALGILAMA VE CBS DESTEKLİ YANGIN YÖNETİMİ** 358–360

Nebiye Musaoğlu; Gülşen Taşkın; Ertuğrul Bilgili; Kadir Alperen Coşkuner; Hüseyin Kaya; Gizem Aytaç

S46 **DİL MODELLERİNDE HİYERARŞİK MEKÂNSAL YANILGILAR: TÜRKİYE İL VE İLÇELERİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR İNCELEME** 361–371

Abdulkadir Memduhoğlu

S47 **ARAZİ VE ARSA DÜZENLEMELERİNDE DAĞITIM VE TAHSİS SONUÇLARININ CBS TABANLI KONTROLÜ VE ANALİZİ** 372–379

İsa Tütüncü; Volkan Yıldırım; Fatih Terzi; Bura Adem Atasoy; Bayram Uzun

S48 **TESCİL HARİCİ ALANLARIN CBS TABANLI ANALİZİ VE GEOMETRİK UYGUNLUK MODELİ** 380–387

Hüseyin Tek; Halil İbrahim İnan

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

7

CBS: GeoAI ve Akıllı Şehirler

S49 **AKILLI ŞEHİRLER KAPSAMINDA ENGELLİ BİREYLER İÇİN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK ASANSÖRLÜ ÜST GEÇİTLERİN TESPİTİ: TRABZON ÖRNEĞİ** 388–400

Yarensu Peker; Buse Aytaç; Zeynep Nur Derelioğlu

Uzaktan Algılama: Orman, Yangın ve Makine Öğrenmesi

S50 **SENTINEL-2 DERİN SÜPER-ÇÖZÜNÜRLÜK ÜRÜNÜNÜN (S2DR3) RADYOMETRİK TUTARLILIĞININ FARKLI ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ: ADANA ÖRNEĞİNDE SU, ORMAN, ŞEHİR VE TARIM ALANLARI ÜZERİNE KARŞILAŞTIRMALI BİR ANALİZ** 401–413

Fatih Fehmi Şimşek; Melih Altay; Mustafa Üstüner; Kaan Kalkan; Gökhan Kurt

S51 **MAKARNALIK BUĞDAYDA VERİM VE STABİLİTEYE DAYALI SELEKSİYON İÇİN ÇOKLU SENSÖRLÜ YÜKSEK VERİMLİ FENOTİPLEME** 414–415

Remzi Özkan; Merve Bayhan; Yunus Aktar; Shawn C. Kefauver

S52 **UZAKTAN ALGILAMA KULLANILARAK KIZILÇAM (PİNUS BRUTİA TEN.) ORİJİN PERFORMANSININ BELİRLEYİCİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ** 416–418

Alper Ahmet Özbey; Gordana Kaplan

S53 **POTANSİYEL HEYELAN RİSKİ TAŞIYAN FINDIK ALANLARININ MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TESPİTİ** 419–430

Fatih Kadı

S54 **KONYA KAPALI HAVZASI'NDA KARASAL YÜZEY–ATMOSFER ETKİLEŞİMLERİNİN, DÜŞEY TERMOFİZİKSEL DİNAMİKLERİN VE BİYOFİZİKSEL TAMPONLAMANIN ERA5-LAND VE MODIS VERİLERİYLE İNCELENMESİ (2000–2025)** 431–440

Seda Terzi Türk; Emine Tanır Kayıkçı; Esra Tunç Görmüş

S55 **ORMANLIK ALANLARDA FARKLI LIDAR ALGILAYICILARININ KARŞILAŞTIRILMASI; ANTALYA/TAŞAĞIL ÖRNEĞİ** 441–447

Göktuğ Yaşar Çukurlu; Furkan Veziro; Namık Kemal Sönmez; Nusret Demir

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

8

Spektral Analiz ve Çevresel Uzaktan Algılama

S56 **ASTER VE LANDSAT UYDU GÖRÜNTÜLERİ İLE CROSTA VE PCA TEKNİKLERİ KULLANILARAK ZEOLİTLEŞME ALANLARININ GEE PLATFORMUNDA BELİRLENMESİ: DEMİRCİ AKDERE ÖRNEĞİ** 448–450

Elif Evcin; Rabia Çakar; Gülsüm Uçum; Erhan Şener; Osman Salih Yılmaz

S57 **SENTINEL-2 SRF TABANLI SPEKTRAL SENSÖR BOZUNUM MODELİ İLE RED-EDGE VE SWIR SANAL BANT REKONSTRÜKSİYONU** 451–454

Sena Erdur Harman; Uğur Avdan

S58 **AFŞİN-ELBİSTAN TERMİK SANTRALİ EMİSYONLARININ UYDU VERİLERİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE İZLENMESİ** 455–463

Çağrı Kapusuz; Halil İbrahim Gündüz; Osman Orhan

S59 **UZAKTAN ALGILAMA TABANLI SPEKTRAL İNDEKSLERLE KAMPÜS EKOSİSTEMLERİNDE YEŞİL ALAN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN ZAMANSAL VE MEKÂNSAL ANALİZİ** 464–474

Korcan Alpan

S60 **HAVRAN ALTIN MADENİ SAHASINDA MADENCİLİK VE REHABİLİTASYON SÜREÇLERİNİN UZAKTAN ALGILAMA İLE DEĞERLENDİRİLMESİ** 475–485

Seda Kara; Filiz Sunar

CBS Uygulamaları ve Mekansal Bilgi Sistemleri

S61 **TERRASCANE: GOOGLE EARTH ENGINE TABANLI AÇIK ERİŞİMLİ BİR UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ PLATFORMU: MİMARİ, YÖNTEM VE BARTIN ÖRNEK UYGULAMASI** 486–499

Cumhur Eren Bilal; Fidan Şevval Bulut; Ayhan Ateşoğlu

S62 **METEOROLOJİK KURAKLIK ANALİZİ SÜRECİNİN UML DİYAGRAMLARIYLA MODELLENMESİ** 500–504

Bekir Taştan

S63 **CBS TABANLI AKILLI ŞEHİR ALTYAPILARINDA IOT GÜVENLİĞİ: TEHDİT ANALİZİ, GİZLİLİK RİSKLERİ VE STRATEJİK SAVUNMA YAKLAŞIMLARI** 505–512

Mevlüt Sevinç; Şüheda Semih Açmalı

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

9

CBS Uygulamaları ve Mekansal Bilgi Sistemleri

S64 **E-ÇED RAPORLARININ COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE ANALİZİ** 513–519

Nurhayat Çubukçu; Fatih Döner

S65 **KENTSEL TOPLU ULAŞIMDA CBS TABANLI GERÇEK ZAMANLI YOLCU BİLGİLENDİRME SİSTEMİ: TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ AKUS ÖRNEĞİ** 520–522

Osman Duman; Osman Yavuzyılmaz

S66 **COĞRAFİ İŞARETLİ TARIM ÜRÜNLERİNİN MEKÂNSAL BOYUTU VE ARAZİ YÖNETİMİNDEKİ YERİ** 523–525

Nihal Genç; Hüsniye Ebru Çolak

Jeodezik ve Uydu Tabanlı Deformasyon İzleme

S67 **BARAJ DEFORMASYONLARININ SENTINEL-1 INSAR ZAMAN SERİLERİ İLE TAHMİNİ: LSTM, XGBOOST VE ARIMA YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ** 526–528

Çağlar Bayık; Ömer Gökberk Narin; Suat Coşkun; Eren Gürsoy Özdemir; Saygın Abdikan; Füsun Balık Şanlı

S68 **DOĞU ANADOLU FAY ZONU VE CİVARINDAKİ SİSMİK AKTİVİTELERİN YERELEKTRİK DEĞİŞİMLERE ETKİLERİNİN DERİN ÖĞRENME TABANLI ANALİZİ: DEPREM ERKEN UYARI SİSTEMİ ÖN ÇALIŞMASI** 529–530

Mustafa Ulukavak

S69 **GNSS VADASE YAKLAŞIMI İLE ELDE EDİLEN 1 HZ YER DEĞİŞTİRMELERİNİN KO-SİSMİK ZAMANDA İVMEÖLÇER VERİLERİYLE SPEKTRAL KARŞILAŞTIRILMASI** 531–540

Muhammed Ali Aytemür; Mualla Yalçınkaya

S70 **GÖKÇEADA KIYI HEYELANINDA UZUN DÖNEMLİ DEFORMASYON VE YÜZEY DEĞİŞİMLERİNİN ÇOK KAYNAKLI UYDU VERİLERİ İLE ANALİZİ** 541–544

Fatih Bursalı; R. Cüneyt Erenoğlu; Ahmet Batuhan Polat; Oya Erenoğlu

S71 **YERALTI DOĞAL GAZ DEPOLAMA TESİSİNİN INSAR TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ** 545–546

Ahmet Batuhan Polat; Füsun Balık Şanlı; Özgün Akçay

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

10

CBS, Konumsal Altyapılar ve Afet Yönetimi

S72 **GÖRSEL-DİL MODELLERİ ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN KENTSEL ENVANTERİ ÇIKARABİLİR Mİ? YOLO-WORLD VE SAM 3 KARŞILAŞTIRMASI** 547–555

Batuhan Kılıç; Onur Can Bayrak

S73 **MOBİL HARİTALAMA TEKNOLOJİLERİ KULLANILARAK MEZARLIK BİLGİ SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI VE CBS ENTEGRASYONU** 556–564

Can Ekin Yıldız; Hüseyin Candan; Savaş Çolak; Özge Tuştaş Dalgıç; Doğukan Ünlü; Kayra Çelikkaya; Murat Tuna Gürbüz

S74 **DOCKER İLE KONUMSAL VERİ İŞLEME MİMARİSİ** 565–573

Rıdvan Öztürk; Orhan Kurt

S75 **VERİ KISITLI BÖLGELERDE TAŞKIN ERKEN UYARISI İÇİN MEVSİMSEL KIRILGANLIK ÇERÇEVESİ** 574–584

Sertaç Kantekin; Melek Horoz

S76 **PLAN KARARLARI VE MÜLKİYET VERİLERİNİN E-PLAN OTOMASYON SİSTEMİ ÜZERİNDE BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR MODEL ÖNERİSİ*** 585–588

Engin Türkmen; Mehmet Alkan

S77 **14 MAYIS 2024 JEOMANYETİK FIRTINASININ MUTLAK GNSS KONUM DOĞRULUĞUNA ETKİSİNİN IGS İSTASYONLARI KULLANILARAK İNCELENMESİ** 589–594

Ayşen Aslan; Leyla Çakır; Ertan Gökalp

Radar, Hidroloji ve Uydu Uygulamaları

S78 **SWOT UYDUSUNDAN HAVZA NEHİR DEŞARJI TAHMİNİ İÇİN FİZİK-DESTEKLİ DENETİMSİZ ÖĞRENME** 595–596

Yunus Kaya

S79 **SDGSAT-1 GLIMMER YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GECE IŞIKLARI VERİLERİYLE KENTSEL YAPI VE AYDINLATMA TÜRLERİNİN ANALİZİ: TRABZON ÖRNEĞİ** 597–607

Rabia Beyza Türkmen; Sima Aydın; Fethullah Polat; Funda Yüzlükoğlu; Kazım Kaba; İlham Nasıroğlu; Cahit Yeşilyaprak; H. Mustafa Kandırmaz

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

11

Radar, Hidroloji ve Uydu Uygulamaları

S80 **MARMARİS ORMAN YANGINLARININ HOTSPOT ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRMESİ (2000–2024)** 608–618

Gülten Kara; Tuğçe Kalfa

S81 **SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK PLANETSCOPE GÖRÜNTÜLERİNİN YAPAY ZEKÂ TABANLI SPEKTRAL ZENGİNLEŞTİRİLMESİ** 619–628

Osman Yavuz Altuntaş; İsmail Çölkesen

Uzaktan Algılama ve Çevresel İzleme Uygulamaları

S82 **MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KENTSEL TAŞKIN RİSKİNİN ÇOK BOYUTLU DEĞERLENDİRİLMESİ: BÜYÜKÇEMECE ÖRNEĞİ, İSTANBUL** 629–631

Gülşah Kılıç; Filiz Bektaş Balçık

S83 **KÜRESEL TOPRAK ÜSTÜ BİYOKÜTLE VERİ SETİ KULLANILARAK MANAVGAT ORMAN YANGINI SONRASI KARBON VE TOPRAK ÜSTÜ BİYOKÜTLE DİNAMİKLERİNİN ZAMANSAL ANALİZİ** 632–642

Fidan Şevval Bulut; Cumhur Eren Bilal; Beyza Türkel; Ayhan Ateşoğlu

S84 **GRACE & GRACE-FO YERALTI SUYU DEPOLAMA ANOMALLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÖLÇEK İNDİRGEMESİ** 643–645

Şeyma Akça; Dilek Eren Akyüz; Fusun Balık Şanlı

S85 **ULUSAL UZAKTAN ALGILAMA ARŞİV ALTYAPISI** 646–654

Yasemin Kılıç

S86 **TÜRKİYE ULUSAL GÖZLEMEVLERİNİN ERZURUM MERKEZ YERLEŞKESİNDE SP02-L GÜNEŞ FOTOMETRESİNİN KALİBRASYONU VE AEROSOL OPTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ** 655–663

Fethullah Polat; İsmail Hakkı Gökgöz; Kazım Kaba; Cahit Yeşilyaprak

Mekansal Bilgi Teknolojileri, Fotogrametri ve Jeodezik Uygulamalar

S87 **GÖK MEKANİĞİ VE ULUSAL UYDULAR** 664–670

Orhan Kurt

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

12

Mekansal Bilgi Teknolojileri, Fotogrametri ve Jeodezik Uygulamalar

S88 TARİHİ YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (TYBM)'NİN KÜLTÜR VARLIKLARINI KORUMA VE RESTORASYON SÜREÇLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI 671–681
Esra Semiz; Naci Yastıklı; Uzay Yergün

Poster Bildiriler

P01 ULUSAL UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİ ENTEGRE YÖNETİMİ: LİDER KURUMLARIN ORTAK VİZYONU VE TEMATİK ÇÖZÜMLEMELER 683–684
Fulya Battal Şamiloğlu; Ahmet Örcün; Reyhan Yıldız Aydoğan; Tuğba Yeşilnacar

P02 SENTINEL-2 TABANLI SPEKTRAL İNDEKS VE DOKU ANALİZİ İLE DEPREM SONRASI HASAR ÖN DEĞERLENDİRMESİ: HATAY ÖRNEĞİ 685–694
Seda Kara; Taner Yılmaz

P03 UZAKTAN ALGILAMA VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ANKARA'DA SU KIRILGANLIĞININ MEKANSAL ANALİZİ 695–697
Yeter Canbolat; Sema Karataş; Ahmet Tarık Torun

P04 CBS İLE KENTSEL ISI ADASI ANALİZLERİ İÇİN METEOROLOJİK VERİ İŞLEME EKLENTİSİ GELİŞTİRİLMESİ 698–704
İsmail Sefa Esgün; Deniz Demirhan; Himmet Karaman

P05 YEREL YÖNETİMLERDE CBS TABANLI ALTYAPI KOORDİNASYON VE KAZI YÖNETİMİ: TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ AYKOME ÖRNEĞİ 705–713
Osman Duman; Osman Yavuzyılmaz

P06 KENTSEL TAŞKIN RİSKİNİN CBS VE HEC-RAS ENTEGRASYONU İLE ANALİZİ: KAYSERİ İLİ DOĞU BÖLGESİ ÖRNEĞİ 714–715
Merve Ercan; Fatih Mehmet Durmuşçelebi; Emre Karadaş; Selman Sal

P07 BİREYSEL AĞAÇ TACI SEGMENTASYONU İÇİN SÜPERPİKSEL TABANLI ÇEKİRDEK TESPİT YAKLAŞIMI 716–720
Sude Gül Yel; Esra Tunç Görmüş

P08 SENTINEL-2 VERİLERİYLE MEYVE BAHÇESİ TÜRÜ SINIFLANDIRMASINDA RASTGELE ORMAN VE TABNET'İN KARŞILAŞTIRILMASI: BURSA ÖRNEĞİ 721–729
Mine Nur Gürbulak

BİLDİRİLER · SAYFA ARALIKLARI

İçindekiler

13

Poster Bildiriler

P09 **GAZİANTEP KÜLTÜREL VE GASTRONOMİ ODAKLI İKİ GÜNLÜK TURİZM ROTALARININ CBS TABANLI OPTİMİZASYONU** 730–739

Semih Sami Akay

P10 **KASTAMONU MERKEZ YERLEŞİME UYGUNLUK ANALİZİ(CBS TABANLI ÇOK KRİTERLİ DEĞERLENDİRME)** 740–743

Emel Yeşil; Bekir Taştan

P11 **KARBON YUTAK ALANLARIN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ** 744–747

Murat Nas; Fatih Döner

P13 **SINIRLARI ZORLAYAN KENT: BODRUM ORMAN KAYIPLARI VE KENTSEL YAYILIMIN 24 YILLIK DİJİTAL KARNESİ** 748–750

Anıl Yusuf Aytekin; Bekir Taştan

P14 **GNSS VADASE YÖNTEMİ İLE İVMEÖLÇERLERDEN ELDE EDİLEN YER DEĞİŞTİRMELERİN KO-SİSMİK ENERJİ KARŞILAŞTIRMASI** 751–759

Muhammed Ali Aytemür; Mualla Yalçınkaya

P15 **AĞAÇ TABANLI MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE EGE BÖLGESİ ORMAN YANGINI DUYARLILIK MODELLEMESİ VE SHAP TABANLI AÇIKLANABİLİRLİK ANALİZİ** 760–762

İbrahim Çetin; Süleyman Sefa Bilgilioğlu; Ozan Öztürk; Burhan Baha Bilgilioğlu; Dursun Zafer Şeker

P16 **KARADENİZ BÖLGESİ İKLİM PARAMETRELERİNİN TEK DEĞİŞKENLİ LSTM MODELLERİ İLE TAHMİNİ** 763–769

Nursena Paslı; Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz

01

Sözlü Bildiriler

88 BİLDİRİ

ÇOK GÖREVLİ DERİN ÖĞRENME İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ HAVA GÖRÜNTÜLERİNDEN BİNA SEGMENTASYONU VE YÜKSEKLİK KESTİRİMİ

Danang Budi SUSETYO[1,2], Tolga BAKIRMAN[3], Bülent BAYRAM[4]

[1]Yüksek Mühendis, Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, danang.susetyo@std.yildiz.edu.tr
[2]National Research and Innovation Agency (BRIN), 10340, Cakarta, Endonezya, danang.budi.susetyo@brin.go.id
[3]Doç.Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, bakirman@yildiz.edu.tr
[4]Prof.Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, bayram@yildiz.edu.tr

ÖZET

Yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama görüntülerinden bina bilgilerinin otomatik olarak elde edilmesi, kent modelleme, afet yönetimi ve coğrafi bilgi sistemleri gibi birçok uygulama açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bina segmentasyonu ile bina yükseklik kestiriminin tek bir derin öğrenme modeli içerisinde birlikte gerçekleştirilebildiği çok görevli öğrenme yaklaşımları değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar, 5 cm mekânsal çözünürlüğe sahip ISPRS Potsdam veri seti üzerinde gerçekleştirilmiş; giriş verisi olarak yalnızca RGB görüntüler kullanılmıştır. Ortak kodlayıcı yapısına sahip U-Net++ tabanlı üç farklı mimari oluşturulmuş ve görevler arası özellik paylaşım stratejilerinin performansa etkisi incelenmiştir. İlk senaryoda temel çok görevli yapı kullanılırken, ikinci senaryoda çok ölçekli özellik çıkarımını güçlendirmek amacıyla Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) modülü eklenmiş, üçüncü senaryoda ise Task-Specific Feature Separation Module (TFSM) ve Cross-task Feature Fusion Module (CFFM) ile görevler arası etkileşim artırılmıştır. Modeller; bina segmentasyonu için Ortalama Hata (OH), Kesinlik, Duyarlılık, F1-Score ve Intersection over Union (IoU), yükseklik kestirimi için ise Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ASPP modülünün segmentasyon performansını %97.6 OA ve %90.4 IoU seviyesine yükseltirken, yükseklik kestiriminde de 3.084 m MAE ve 4.295 m RMSE ile en başarılı sonuçları sağladığını göstermiştir. Ayrıca, eğitimde kullanılmayan Göktürk-1 görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen ek uygulama, modelin farklı bir sensör ve mekânsal çözünürlükteki verilere yeniden eğitim uygulanmadan aktarılabilirliğine ilişkin nitel bir gösterim sunmuştur. Buna karşın, daha karmaşık görev etkileşim mekanizmalarının mevcut deneylerde ek performans artışı sağlamadığı belirlenmiştir. Çalışma, çok görevli öğrenme yaklaşımlarının bina segmentasyonu ve yükseklik kestiriminin birlikte gerçekleştirilmesinde umut vadettiğini ortaya koyarken, yükseklik kestiriminin doğruluğunun artırılması amacıyla daha güçlü kodlayıcı mimariler ve görev ağırlıklı kayıp fonksiyonlarının gelecekte araştırılması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Çok görevli öğrenme, Bina segmentasyonu, Bina yükseklik kestirimi, Derin öğrenme, Uzaktan algılama

ABSTRACT

BUILDING SEGMENTATION AND HEIGHT ESTIMATION FROM HIGH-RESOLUTION AERIAL IMAGERY USING MULTI-TASK DEEP LEARNING

Automatic extraction of building information from very high-resolution remote sensing imagery plays a critical role in numerous applications, including urban modeling, disaster management, and geographic information systems. This study evaluates multi-task deep learning approaches for the simultaneous building segmentation and building height estimation within a unified neural network. Experiments were conducted on the ISPRS Potsdam dataset with a spatial resolution of 5 cm, using only RGB imagery as input. Three U-Net++-based architectures with a shared encoder were designed to investigate the influence of different task interaction strategies. The first scenario employed a baseline multi-task architecture without explicit task interaction. In the second scenario, an Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module was incorporated to enhance multi-scale feature extraction, while the third scenario further integrated the Task-Specific Feature Separation Module (TFSM) and Cross-task Feature Fusion Module (CFFM) to strengthen task-specific representation learning and cross-task feature interaction. Model performance was evaluated using Overall Accuracy (OA), Precision, Recall, F1-score, and Intersection over Union (IoU) for building segmentation, together with Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) for height estimation. The experimental results demonstrate that the ASPP-enhanced architecture achieved the best overall performance, reaching 97.6% OA and 90.4% IoU for building segmentation, while reducing the height estimation errors to 3.084 m MAE and 4.295 m RMSE. In contrast, the incorporation of TFSM and CFFM did not provide additional performance improvements under the current experimental settings. In addition, an application to a previously unseen Göktürk-1 image demonstrated the qualitative transferability of the model to data acquired by a different sensor and at a different spatial resolution without retraining or fine-tuning. The findings indicate that multi-scale feature extraction effectively benefits both segmentation and height estimation tasks, whereas more sophisticated task interaction mechanisms do not necessarily yield further gains. Future work will focus on improving height estimation accuracy by

employing more powerful encoder backbones and weighted multi-task loss strategies to achieve a better balance between the segmentation and regression tasks.

Keywords: Multi-task learning, Building segmentation, Building height estimation, Deep learning, Remote sensing

1. GİRİŞ

Yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama görüntülerinden bina bilgilerinin otomatik olarak elde edilmesi, son yıllarda uzaktan algılama ve bilgisayarlı görü alanlarında yoğun olarak çalışılan konular arasında yer almaktadır (Bakirman vd. 2022). Bina segmentasyonu; kent planlama, üç boyutlu şehir modelleme, nüfus tahmini, afet yönetimi, altyapı planlaması ve coğrafi bilgi sistemleri gibi birçok uygulama için temel veri üretimini sağlamaktadır (Agca vd. 2024). Derin öğrenme tabanlı semantik segmentasyon yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte bina sınırlarının yüksek doğrulukla belirlenmesi mümkün hale gelmiş olsa da, birçok uygulamada yalnızca bina sınırlarının belirlenmesi yeterli olmamaktadır. Özellikle üç boyutlu şehir modellerinin oluşturulması, bina hacimlerinin hesaplanması, güneş enerjisi potansiyel analizleri, kentsel siluet modelleme ve afet sonrası hasar değerlendirme çalışmaları için bina yükseklik bilgilerinin de güvenilir biçimde elde edilmesi gerekmektedir (Kakeooi ve Baleghi, 2024). Geleneksel olarak bina yükseklikleri LiDAR verileri, stereo fotogrametrik üretimler veya Sayısal Yüzey Modelleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak bu verilerin üretimi yüksek maliyet gerektirmekte, her bölge için güncel olarak bulunmamakta ve birçok ülkede düzenli olarak güncellenememektedir (Chen vd. 2023). Bu nedenle son yıllarda bina segmentasyonu ve yükseklik kestiriminin tek bir derin öğrenme modeli içerisinde birlikte ele alınmasına yönelik çalışmalar önem kazanmaya başlamıştır.

Çok görevli öğrenme (Multi-Task Learning, MTL) yaklaşımları, ortak mekânsal özelliklerden yararlanarak birden fazla görevin aynı ağ üzerinde eş zamanlı öğrenilmesini mümkün kılmakta ve görevler arasındaki ilişkilerin performansa olan etkisinin araştırılmasına olanak sağlamaktadır (Mao vd. 2023). Örneğin LIGHT, bina çıkarımı ve yükseklik kestirimini ortak bir ağ içerisinde birleştirerek görevler arasında Gated Cross Task Interaction mekanizması aracılığıyla bilgi alışverişi sağlamıştır (Mao vd., 2023). HGDNet ise yükseklik hiyerarşisinden yararlanan yardımcı bir görev ve çift çözücü yapısı ile iki görev arasındaki ilişkiden yararlanmayı amaçlamıştır (Lu vd., 2023). Bu çalışmalar ağırlıklı olarak yeni görev etkileşim mekanizmalarının veya daha gelişmiş ağ mimarilerinin geliştirilmesine odaklanırken, bu çalışmanın temel farklılığı farklı özellik paylaşım stratejilerinin kontrollü ve kademeli bir deneysel çerçevede karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla ortak kodlayıcı ve bağımsız çözücülerden oluşan temel mimariye sırasıyla çok ölçekli bağlamsal özellik çıkarımı (ASPP) ve görev-özgü özellik ayrıştırma ile çapraz görev özellik füzyonunu sağlayan TFSM ve CFFM modülleri eklenmiş; böylece çok ölçekli bağlam bilgisinin ve görevler arası etkileşimin her iki görevin performansına katkısı ayrı aşamalarda incelenmiştir. Ayrıca, farklı mimari karmaşıklıkların performans üzerindeki etkisi doğrudan karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, çok yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinden bina segmentasyonu ile bina yükseklik kestiriminin birlikte gerçekleştirildiği çok görevli derin öğrenme mimarileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı görev etkileşim stratejilerinin her iki görevin performansı üzerindeki etkisini incelemek ve ortak özellik paylaşımının bina segmentasyonu ile yükseklik kestirimi arasındaki ilişkiye katkısını ortaya koymaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında deneyler için ISPRS tarafından yayımlanan Potsdam veri seti kullanılmıştır. Veri seti, 5 cm mekânsal çözünürlüğe sahip gerçek ortofotolar ile bunlara karşılık gelen Sayısal Yüzey Modeli (DSM) verilerini içermektedir. Görüntüler RGB ve yakın kızılötesi bantlarını içerecek şekilde sunulmasına rağmen bu çalışmada yalnızca RGB bantları kullanılmıştır. Böylece modelin yalnızca görünür bantlardan öğrenme kapasitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Segmentasyon görevinde yalnızca bina sınıfı dikkate alınmış, diğer tüm sınıflar arka plan olarak değerlendirilmiştir. Yükseklik referansları ise veri setinde bulunan normalize edilmiş Sayısal Yüzey Modelinden (nDSM) elde edilmiş ve desimetre cinsinden verilen yükseklik değerleri metreye dönüştürülerek regresyon çıktısı olarak kullanılmıştır.

Veri hazırlama aşamasında eğitim sürecinin daha verimli yürütülebilmesi amacıyla tüm görüntüler 512×512 piksel boyutlarında alt parçalara ayrılmıştır. Veri seti eğitim, doğrulama ve test kümeleri olacak şekilde düzenlenmiştir. Eğitim ve doğrulama setleri için yamalar, bindirme ve dolgu uygulanmadan çıkarılmıştır. Buna karşılık, çıkarım sırasında daha düzgün mozaikleme sonuçları elde etmek amacıyla test verilerinden yama çıkarılırken %50 örtüşme ve yansıma dolgusu uygulanmıştır. Böylelikle eğitim kümesi için 2.178, doğrulama kümesi için 726, test kümesi için ise 1694 görüntü parçası elde edilmiştir (Şekil 1). Böylece hem segmentasyon hem de yükseklik kestirimi görevleri aynı örnekler üzerinden eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Eğitim sürecinde ortak giriş görüntüsü kullanılarak iki farklı çıktı üretilmiş; ilk çıktı bina segmentasyon haritasını, ikinci çıktı ise sürekli yükseklik değerlerini temsil etmiştir. Böylece model, aynı mekânsal özelliklerden yararlanarak hem sınıflandırma hem de regresyon problemini birlikte çözmektedir.

Deneysel çalışmalarda, ortak kodlayıcı yapısına sahip U-Net++ mimarisi temel model olarak seçilmiş ve önerilen bileşenlerin katkısını kademeli olarak değerlendirmek amacıyla üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1, ortak bir kodlayıcı ve segmentasyon ile yükseklik kestirimi görevlerine ait iki bağımsız çözücüden oluşmaktadır. Bu senaryoda görevler arasında herhangi bir açık özellik etkileşimi veya bilgi paylaşım mekanizması bulunmamakta; her iki çözücü, ortak kodlayıcı tarafından üretilen özellikleri bağımsız olarak işleyerek görev-özgü gösterimler öğrenmektedir. Böylece Senaryo 1, yalnızca ortak özellik gösteriminin sağladığı faydayı değerlendiren temel çok görevli öğrenme yapısını temsil etmektedir.

Senaryo 2'de, Senaryo 1'deki mimari korunarak kodlayıcının darboğaz bölümüne Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) modülü eklenmiştir. ASPP, farklı genişleme oranlarına sahip paralel evrişim katmanları aracılığıyla özellikleri farklı mekânsal ölçeklerde işleyerek çok ölçekli bağlamsal bilgilerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Modül; bir adet 1×1 evrişim, 6, 12 ve 18 genişleme oranlarına sahip üç adet 3×3 atrous evrişim ve global bağlam bilgisini elde etmek üzere global ortalama havuzlama dalından oluşmaktadır. Bu dallardan elde edilen özellikler birleştirilerek çözücülere aktarılmaktadır. ASPP'nin eklenmesiyle özellikle farklı boyut ve mekânsal yayılıma sahip binaların bulunduğu karmaşık kentsel dokularda, hem bina sınırlarının hem de yükseklikle ilişkili mekânsal bağlamın daha etkin biçimde temsil edilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla Senaryo 1 ile Senaryo 2 arasındaki temel fark, görevler arası etkileşim eklenmeden, ortak özellik gösterimine çok ölçekli bağlamsal bilginin dahil edilmesidir.



Şekil 1. ISPRS Potsdam veri setindeki eğitim, validasyon ve test setleri dağılımı

Senaryo 3'te, Senaryo 2'de kullanılan ASPP modülü korunmuş ve buna ek olarak TFSM ile CFFM bileşenleri eklenmiştir. TFSM, ASPP tarafından üretilen ortak çok ölçekli özelliklerden segmentasyon ve yükseklik kestirimi görevleri için ayrı görev-özgü gösterimler oluşturmakta ve kanal bazlı dikkat ağırlıkları aracılığıyla her görev açısından daha anlamlı özelliklerin öne çıkarılmasını sağlamaktadır. TFSM sonrasında kullanılan CFFM ise iki göreve ait özellikler arasında seçici bilgi alışverişi gerçekleştirerek bir görevin özelliklerinin diğer görevin gösterimini desteklemesine olanak tanımaktadır. Bu yapı sayesinde, ortak özelliklerin doğrudan paylaşılmasından kaynaklanabilecek gereksiz veya görev açısından uygun olmayan bilgi aktarımının azaltılması ve görevler arasındaki tamamlayıcı bilgiden yararlanılması hedeflenmiştir. Böylece Senaryo 3, çok ölçekli bağlamsal özellik gösterimine ek olarak görev-özgü özellik ayrıştırma ve çapraz görev bilgi paylaşımını içeren en kapsamlı mimariyi temsil etmektedir.

Bu doğrultuda, deneysel senaryolar Senaryo 1 → Senaryo 2 → Senaryo 3 şeklinde kademeli olarak tasarlanmış olup, her aşamada yalnızca ilgili yeni bileşenlerin eklenmesiyle elde edilen katkının izole biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Senaryolar arasındaki mimari farklılıkların etkisi; toplam öğrenilebilir parametre sayısı, hesaplama maliyeti ve segmentasyon ile yükseklik kestirimi performansındaki değişimler üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, ASPP'nin çok ölçekli bağlam bilgisinin, TFSM'nin görev-özgü özellik modülasyonunun ve CFFM'nin çapraz görev bilgi paylaşımının toplam model performansına sağladığı katkının ve bunun getirdiği hesaplama yükünün ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. hedeflenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tüm deneylerde, senaryolar arasındaki karşılaştırmanın tutarlı biçimde gerçekleştirilebilmesi amacıyla aynı eğitim parametreleri ve eğitim stratejisi kullanılmıştır. Modeller Adam optimizasyon algoritması ve 4 örneklemden oluşan batch boyutu kullanılarak toplam 30 epoch boyunca eğitilmiştir. Eğitim sürecinde doğrulama kümesi üzerinde elde edilen en yüksek IoU değerine sahip model ağırlıkları en iyi model olarak kaydedilmiş ve test aşamasında bu model kullanılmıştır. Dolayısıyla raporlanan sonuçlar son epoch'a ait modelden ziyade, eğitim süreci boyunca en yüksek doğrulama IoU değerini sağlayan model ağırlıklarına dayanmaktadır.

Eğitim sırasında veri çeşitlendirme amacıyla %50 olasılıkla yatay çevirme veri artırma yöntemi uygulanmıştır. Kodlayıcı olarak kullanılan ResNet34, ImageNet üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklarla başlatılmıştır. Segmentasyon

ve yükseklik kestirimi görevleri için sırasıyla Dice Loss ve Smooth L1 Loss kayıp fonksiyonları kullanılmıştır. Üç deney senaryosunda da aynı optimizasyon, veri çeşitlendirme, ağırlık başlatma ve kayıp fonksiyonu ayarları kullanılarak, senaryolar arasındaki performans farklılıklarının temel olarak mimari değişikliklerden kaynaklanması sağlanmıştır.

Modellerin performansları bina segmentasyonu için Ortalama Hata (OH), Kesinlik, Duyarlılık, F1-Skoru ve Intersection over Union (IoU) metrikleri, yükseklik kestirimi için ise Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 1). Elde edilen sonuçlara göre temel çok görevli mimari (Senaryo 1) %97.4 OH ve %89.7 IoU değeri ile 3.314 m MAE ve 4.652 m RMSE üretmiştir. Bottleneck katmanına ASPP modülünün eklendiği Senaryo 2, segmentasyon performansını %97.6 OH ve %90.4 IoU değerine yükseltirken, yükseklik kestiriminde de 3.084 m MAE ve 4.295 m RMSE ile en başarılı sonuçları vermiştir. Buna karşılık ASPP ile birlikte TFSM ve CFFM modüllerinin kullanıldığı Senaryo 3'te %97.4 OH ve %89.5 IoU elde edilirken, yükseklik kestirimi 3.183 m MAE ve 4.379 m RMSE olarak gerçekleşmiştir.

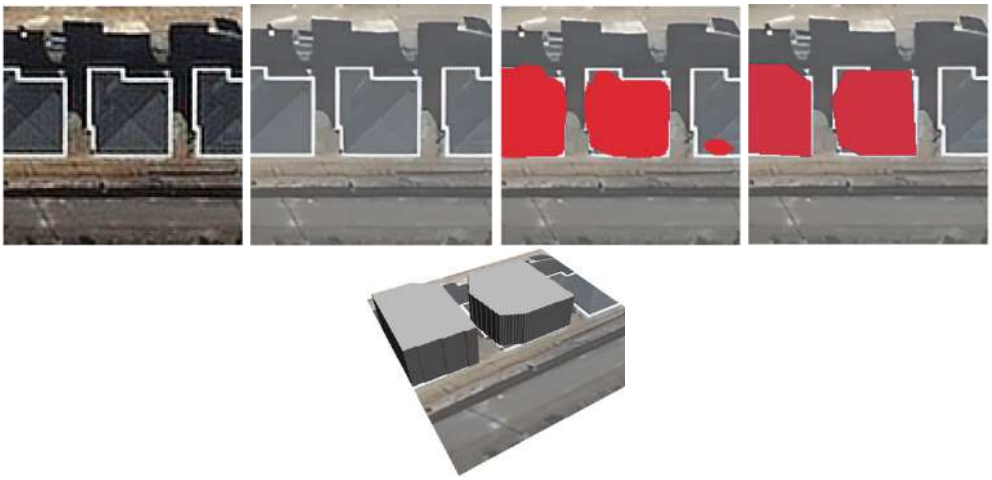
Sonuçlar, çok ölçekli özellik çıkarımının hem segmentasyon hem de yükseklik kestirimi açısından olumlu katkı sağladığını, ancak görevler arası özellik ayrıştırma ve çapraz özellik füzyonunun mevcut deneylerde beklenen düzeyde ek performans kazancı oluşturmadığını göstermektedir. ASPP'nin sağladığı iyileşme, modülün farklı genişleme oranları aracılığıyla farklı mekânsal ölçeklerde bağlamsal bilgiyi ortak özellik gösterimine dahil etmesiyle açıklanabilir (Xing vd. 2022). TFSM ve CFFM, ASPP tarafından oluşturulan çok ölçekli ortak temsil üzerine doğrudan eklenmiştir. Dolayısıyla mevcut sonuçlar, görevler arası özelliklerin daha fazla ayrıştırılması ve yeniden füzyonunun, özellikle zaten çok ölçekli bağlam bilgisiyle zenginleştirilmiş bir ortak gösterim üzerinde, her iki görev için de yararlı olmayabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu durumun kesin nedenini belirlemek için farklı kayıp ağırlıkları, daha uzun eğitim veya modül bazlı ek ablasyon deneylerine ihtiyaç vardır.

Çizelge 1. ISPRS Potsdam test verisetinde hesaplanan doğruluk sonuçları

Senaryo	OH	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Skoru	IoU	MAE	RMSE
Senaryo 1	%97.4	%94.7	%94.5	%94.6	%89.7	3.314 m	4.652 m
Senaryo 2	%97.6	%95.1	%94.8	%95.0	%90.4	3.084 m	4.295 m
Senaryo 3	%97.4	%95.2	%93.7	%94.5	%89.5	3.183 m	4.379 m

Özellikle bina segmentasyonu yüksek doğruluk seviyelerine ulaşmasına rağmen, yükseklik kestiriminde yaklaşık 3 m seviyesindeki ortalama hata değerleri uygulamaların önemli bir kısmı için hâlen iyileştirilmesi gereken bir performansa işaret etmektedir. Senaryo 2'de elde edilen 3.084 m MAE ve 4.295 m RMSE değerleri, Senaryo 1'e göre sırasıyla 0.230 m ve 0.357 m'lik iyileşme sağlamasına rağmen, ISPRS Potsdam veri setinde literatürde bildirilen güçlü sonuçların gerisindedir. Örneğin SCE-Net-50 ve SCE-Net-101 sırasıyla 1.191 m ve 1.168 m MAE değerleri bildirirken, BAMTL-101 için 1.223 m MAE raporlanmıştır. Daha yakın tarihli Knowledge-Guided Multi-Task Network çalışmasında ise Potsdam için 1.027 m MAE ve 2.107 m RMSE elde edilmiştir. (Xing vd. 2022, Liv d. 2025).

Modelin farklı sensör ve mekânsal çözünürlük koşullarındaki kullanılabilirliğini görsel olarak incelemek amacıyla, eğitimde kullanılmayan 0.5 m mekânsal çözünürlüklü bir Göktürk-1 görüntüsü üzerinde ek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Görüntü, Real-ESRGAN (Wang vd., 2021) modelinin önceden eğitilmiş ağırlıkları kullanılarak 2× süper çözünürlük işleminden geçirilmiş ve 0.25 m piksel aralığına sahip görüntü elde edilmiştir. Potsdam veri setinde en başarılı performansı veren Senaryo 2 (ASPP) model, herhangi bir yeniden eğitim veya ince ayar uygulanmadan bu görüntüye uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda ana bina yapılarının kısmen tutarlı biçimde segmentasyona tabi tutulabildiği, tahmin edilen yüksekliklerin bina maskeleriyle birleştirilmesiyle anlamlı üç boyutlu bina temsillerinin oluşturulabildiği görülmüştür (Şekil 2). Bu uygulama, nicel bir doğruluk değerlendirmesi yapılmamış olmakla birlikte, modelin farklı bir sensör ve önemli ölçüde farklı bir mekânsal çözünürlükteki görüntülere aktarılabilirliğine ilişkin nitel bir gösterim sunmaktadır.



Şekil 2. Göktürk-1 görüntüsüne Senaryo 2 modelinin uygulanması. Sırasıyla: ham Göktürk-1 görüntüsü, Real-ESRGAN çıktısı, ham model çıktısı, işlenmiş gibi, yükseklik entegre edilmiş final çıktının 3B görünümü

4. SONUÇ

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, bina segmentasyonu ile yükseklik kestiriminin ortak bir derin öğrenme modeli içerisinde birlikte gerçekleştirilebildiğini ve çok ölçekli özellik çıkarımının her iki göreve de katkı sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, yükseklik kestiriminin doğruluğunun artırılması çalışmanın temel geliştirme alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, eğitimde kullanılmayan Göktürk-1 görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen ek uygulama, modelin farklı bir sensör ve mekânsal çözünürlükteki verilere yeniden eğitim veya ince ayar gerektirmeden uygulanabileceğine ilişkin nitel bir gösterim sunmuştur. Bu doğrultuda gelecek çalışmalarda daha güçlü temsil öğrenme kapasitesine sahip encoder mimarilerinin (örneğin ConvNeXt, Swin Transformer veya benzeri güncel omurgaların) kullanılması, segmentasyon ve yükseklik kestirimi görevleri arasındaki dengeyi daha etkin sağlayabilmek amacıyla görev ağırlıklı (weighted multi-task) kayıp fonksiyonlarının araştırılması ve farklı kayıp ağırlıklandırma stratejilerinin performansa etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Bu geliştirmelerin özellikle yükseklik kestirimi doğruluğunu artırarak çok görevli öğrenme tabanlı bina bilgi çıkarım sistemlerinin daha güvenilir ve genellenebilir hale getirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi bünyesinde yürütülen FBG-2026-7810 kodlu “GÖKTÜRKSR Milli Uydu Görüntüleri için Derin Öğrenme Tabanlı Süper Çözünürlük Teknolojilerinin Geliştirilmesi” başlıklı proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Agca, M., Yucel, A., Kaya, E., Daloglu, A. İ., Kayalık, M., Yetkin, M., & Yalcın, F. (2024). Machine learning algorithms for building height estimations using ICESat-2/ATLAS and Airborne LiDAR data. Earth Science Informatics, 17(6), 5123–5134. https://doi.org/10.1007/s12145-024-01429-w

Bakirman, T., Komurcu, I., & Sertel, E. (2022). Comparative analysis of deep learning based building extraction methods with the new VHR Istanbul dataset. Expert Systems with Applications, 202. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117346,

Chen, Y., Yan, Q., & Huang, W. (2023). MFTSC: A Semantically Constrained Method for Urban Building Height Estimation Using Multiple Source Images. Remote Sensing, 15(23). https://doi.org/10.3390/rs15235552

Kakooei, M., & Baleghi, Y. (2024). Mapping Building Heights at Large Scales Using Sentinel-1 Radar Imagery and Nighttime Light Data. Remote Sensing, 16(18). https://doi.org/10.3390/rs16183371

Li, M., Wang, G., Li, T., Yang, Y., Li, W., Liu, X., & Liu, Y. (2025). Knowledge-Guided Multi-Task Network for Remote Sensing Imagery. Remote Sensing, 17(3), 496. https://doi.org/10.3390/rs17030496

Lu, C., Cao, N., Zhang, P., Liu, T., Peng, B., Liu, G., ... & Wang, T. (2023, July). Hgdnet: A height-hierarchy guided dual-decoder network for single view building extraction and height estimation. In IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 758-761). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282148

Mao, Y., Sun, X., Huang, X., & Chen, K. (2023). Light: Joint Individual Building Extraction and Height Estimation from Satellite Images Through a Unified Multitask Learning Network. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2023-July, 5320–5323. https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10281565

Wang, X., Xie, L., Dong, C., & Shan, Y. (2021, October). Real-esrgan: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data. In 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW) (pp. 1905-1914). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00217

Xing, S., Dong, Q., & Hu, Z. (2022). SCE-Net: Self- and Cross-Enhancement Network for Single-View Height Estimation and Semantic Segmentation. Remote Sensing, 14(9), 2252. https://doi.org/10.3390/rs14092252

SENTİNEL-1 SAR GÖRÜNTÜLERİNDE BİLİNEN PETROL SIZINTISI SAHNELERİNİN İKİLİ PİKSEL BÖLÜTLEMESİ İÇİN KARŞILAŞTIRMALI DERİN ÖĞRENME ÇERÇEVESİ

Melih ALTAY[1], Fatih Fehmi ŞİMŞEK[2], Saygın ABDİKAN[3]

[1] Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, melihaltay17@hacettepe.edu.tr
[2] TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, 06800, Ankara, fehmi.simsek@tubitak.gov.tr
[3] Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, sayginabdikan@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinden deniz petrol sızıntısı izleme, çevre koruma, deniz güvenliği ve acil müdahale operasyonları açısından kritik bir işlev üstlenmektedir. Sentinel-1 verileri, küresel kapsama alanı, her hava koşulunda görüntüleme yeteneği ve açık veri politikası sayesinde büyük ölçekli petrol sızıntısı gözetiminin operasyonel temelini oluşturmaktadır. Ne var ki güçlü deniz durumu değişkenliği, speckle gürültüsü ve gemi izleri ile düşük rüzgâr alanları gibi görünür-benzer (look-alike) olgular güvenilir petrol sızıntısı çıkarımını hâlâ güçleştirmektedir. Bu çalışmada, önceden sızıntı içerdiği bilinen Sentinel-1 SAR sahneleri üzerinde piksel düzeyinde ikili semantik bölütleme gerçekleştiren, birleşik ve operasyonel odaklı bir çerçeve önerilmektedir; sahne düzeyinde sızıntı varlığının tespiti (detection) çalışmanın kapsamı dışındadır. Problem, birden fazla görünür-benzer sınıf açıkça tanımlanmak yerine iki sınıflı bir bölütleme görevi (petrol sızıntısı - deniz yüzeyi) biçiminde kurgulanmıştır. Özdeş eğitim koşulları altında Tam Evrişimli Ağ (FCN), U-Net, DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net olmak üzere dört derin öğrenme mimarisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sızıntı sahneleri içinde doğal olarak beliren tipik yanlış alarmları bastırmaya yönelik morfolojik tanımlayıcılara ve AIS destekli doğrulamaya dayanan fiziksel güdümlü bir iyileştirme stratejisi tasarlanmış; ancak bu değerlendirme sızıntı içermeyen sahnelerdeki özgüllüğü (yanlış pozitif oranını) kapsamamaktadır. Deneyler, sahne bağımsız bölme stratejisiyle kamuya açık bir Sentinel-1 veri kümesi üzerinde yürütülmüştür. Çerçeve; hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve petrol sızıntısına özgü Kesişim/Birleşim (IoU) metrikleriyle değerlendirilmiş; petrol sızıntısı IoU değeri birincil performans göstergesi olarak benimsenmiştir. Dikkat U-Net 0,825 petrol sızıntısı IoU ve 0,904 F1 skoru ile en yüksek genel bölütleme başarımını sergilemekte olup bu farkın DeepLabV3+'a (IoU: 0,817) göre istatistiksel olarak anlamlı olduğu Wilcoxon işaretli sıra testiyle doğrulanmıştır (p = 0,034); DeepLabV3+ ise en yüksek hassasiyete ulaşmaktadır (0,921; F1 skoru: 0,899).

Anahtar Sözcükler: petrol sızıntısı, SAR, ikili semantik bölütleme, DeepLabV3+, Dikkat U-Net

ABSTRACT

A COMPARATIVE DEEP LEARNING FRAMEWORK FOR BINARY PIXEL-LEVEL SEGMENTATION OF KNOWN OIL SPILL SCENES IN SENTINEL-1 SAR IMAGERY

Marine oil spill monitoring using Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery plays a crucial role in environmental protection, maritime safety, and emergency response operations. Sentinel-1 data constitute the operational backbone of large-scale oil spill surveillance due to their global coverage, all-weather imaging capability, and open data policy. Nevertheless, reliable oil spill extraction remains challenging because of strong sea-state variability, speckle noise, and the frequent occurrence of look-alike phenomena such as ship wakes and low-wind areas. This study proposes a unified, operationally oriented framework for pixel-level binary segmentation of Sentinel-1 SAR scenes already known to contain oil spills; scene-level spill detection is outside the scope of this work. The problem is formulated as a two-class segmentation task (oil spill versus sea surface) without explicitly introducing multiple look-alike classes. Four deep learning architectures — FCN, U-Net, DeepLabV3+, and Attention U-Net — are comparatively evaluated under identical training conditions. A physically guided refinement strategy based on morphological descriptors and AIS-supported validation is introduced to suppress false alarms that arise within spill-positive scenes; specificity on spill-free scenes is not assessed in this evaluation. Experiments are conducted on a publicly available Sentinel-1 dataset using a scene-independent split strategy. The framework is evaluated using precision, recall, F1-score, and oil-spill-specific IoU. Attention U-Net achieves the highest oil spill IoU (0.825) and F1-score (0.904); a Wilcoxon signed-rank test confirms that this improvement over DeepLabV3+ (IoU: 0.817) is statistically significant (p = 0.034), while DeepLabV3+ provides the highest precision (0.921) and strong robustness (F1-score: 0.899).

Keywords: oil spill, SAR, binary semantic segmentation, DeepLabV3+, Attention U-Net

1. GİRİŞ

Deniz petrol kirliliği, kıyı ekosistemlerine, deniz biyoçeşitliliğine ve denizcilik ekonomilerine yönelik en ağır antropojenik tehditlerden birini oluşturmaktadır. Büyük kazara sızıntılar ve yasadışı deşarjlar, özellikle çevresel açıdan hassas kıyı bölgelerinde uzun süreli ekolojik bozulmaya ve önemli sosyoekonomik kayıplara neden olmaktadır (Fingas, 2017). Petrol sızıntılarının hızlı ve güvenilir biçimde tespit edilmesi, acil müdahale ve azaltma stratejilerinin desteklenmesi açısından zorunludur.

Uydu uzaktan algılaması, bölgesel ve küresel ölçekteki operasyonel petrol sızıntısı izlemesinde birincil araç konumuna gelmiştir. Mevcut algılama yöntemleri arasında SAR, güneş aydınlatmasından bağımsız çalışması ve bulut örtüsü ile atmosfer koşullarından yalnızca sınırlı ölçüde etkilenmesi nedeniyle petrol sızıntısı gözetiminde en güvenilir teknoloji olarak kabul görmektedir (Brekke ve Solberg, 2005; Solberg vd., 2007). Petrol filmleri deniz yüzeyindeki kısa yerçekimi ve kılcal dalgaları söndürerek radar geri saçılımını azaltır; bu durum SAR görüntülerinde karanlık oluşumlar biçiminde gözlemlenmektedir.

Bu avantajlara karşın SAR tabanlı petrol sızıntısı tespiti güç olmayı sürdürmektedir. Gemi izleri, biyojenik filmler, yağsı buz (grease ice) oluşumları, yağmur hücreleri ve düşük rüzgâr alanları gibi görünür-benzer olgular petrol lekelerine görsel açıdan benzer geri saçılım imzaları üretmektedir (Singha vd., 2013; Alpers vd., 2017). İçsel speckle gürültüsü ve geri saçılım yoğunluğunun rüzgâr hızı ile geliş açısına olan güçlü bağımlılığı da güvenilir ayrımı daha da zorlaştırmaktadır. Topouzelis vd. (2016) tarafından yürütülen araştırma, ikili polarizasyonlu SAR verilerinin petrol sızıntısı tespitinde kullanımını incelemiş ve çift kanal özellik bütünleşiminin tekli polarizasyon sistemlerine kıyasla sınıflandırma doğruluğunu belirgin biçimde artırabileceğini ortaya koymuştur.

Doku analizi ve klasik makine öğrenmesi sınıflandırıcılarına dayanan geleneksel eşikleme ve özellik güdümlü yaklaşımlar SAR petrol sızıntısı tespiti için kapsamlı biçimde araştırılmıştır (Brekke ve Solberg, 2005; Topouzelis vd., 2009). Ancak bu yöntemlerin başarımı, karmaşık uzamsal örüntüleri modelleme kapasitelerinin sınırlılığı nedeniyle heterojen deniz durumları ve çeşitli sahnelere uygulandığında çoğu zaman düşmektedir.

Son yıllarda derin evrişimsel sinir ağları (CNN) uzaktan algılama uygulamalarında semantik bölütleme başarımını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Zhu vd., 2017; Ma vd., 2019). FCN (Long vd., 2015), U-Net (Ronneberger vd., 2015) ve DeepLabV3+ (Chen vd., 2018) gibi mimariler SAR görüntü analizi ve deniz hedefi tespitinde umut verici sonuçlar sergilemiştir. Bununla birlikte yakın dönem çalışmaların büyük çoğunluğu, petrol sızıntısı haritalamayı ayrı görünür-benzer sınıflar tanımlayarak çok sınıflı bir bölütleme problemi olarak ele almaktadır. Bu formülasyon algoritma geliştirme açısından değerli olmakla birlikte, hızlı müdahale için yalnızca güvenilir petrol sızıntısı maskelerinin gerektiği gerçekçi operasyonel senaryoları tam olarak yansıtmamaktadır. Üstelik görünür-benzer olguların piksel düzeyinde etiketlenmesi emek yoğun ve sıkça belirsiz bir işlemdir; bu durum çok sınıflı eğitim stratejilerinin küresel izleme sistemleri için ölçeklenmesini kısıtlamaktadır.

Bu çalışmada 'tespit' (detection) ve 'bölütleme' (segmentation) kavramları literatürde sıklıkla birbirinin yerine kullanılmakla birlikte burada bilinçli olarak ayrıştırılmaktadır. Operasyonel bir petrol sızıntısı izleme zinciri tipik olarak iki ardışık aşamadan oluşur: (i) geniş bir SAR sahnesi içinde sızıntı varlığının/yokluğunun sahne veya bölge düzeyinde belirlenmesi (tespit) ve (ii) sızıntı içerdiği önceden bilinen veya belirlenen bir sahne içinde sızıntının sınırlarının piksel düzeyinde çıkarılması (bölütleme). Bu çalışma yalnızca ikinci aşamayı ele almaktadır: petrol sızıntısı tespiti ikili semantik bölütleme görevi olarak yeniden kurgulanmakta, deneyler önceden sızıntı içerdiği bilinen test alanları üzerinde piksel düzeyinde bölütleme başarımını değerlendirmektedir. Sahne düzeyinde sızıntı varlığı sınıflandırması (dar anlamıyla tespit) bu çalışmanın kapsamı dışındadır ve bu sınırlılık sonuçların yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Görünür-benzer bastırma, fiziksel olarak yorumlanabilir bir bölütleme sonrası iyileştirme stratejisi aracılığıyla ele alınmaktadır; ancak bu iyileştirmenin sızıntı içermeyen sahnelerdeki yanlış pozitif oranı üzerindeki etkisi bu çalışmada sınanmamıştır (bkz. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar bölümü). Bu tasarım, derin öğrenme metodolojisini pratik operasyonel gereksinimler ve veri kullanılabilirlik kısıtlarıyla daha iyi örtüştürmeyi hedeflemektedir.

1.1 İlgili Çalışmalar

SAR tabanlı petrol sızıntısı tespitini ele alan birçok derin öğrenme çalışması çoğunlukla çok sınıflı bölütleme formülasyonları benimsemiştir. Krestenitis vd. (2019), dört semantik sınıf (deniz yüzeyi, petrol sızıntısı, gemi ve görünür-benzer) içeren özel bir Sentinel-1 veri kümesi üzerinde U-Net mimarisini uygulamış; atlama bağlantılı kodlayıcı-çözücü ağların geleneksel yaklaşımları geride bıraktığını göstermiştir. Ancak çok sınıflı formülasyon kapsamlı piksel düzeyinde etiketleme gerektirmekte ve operasyonel gereksinimlerle doğrudan örtüşmemektedir.

Hasimoto-Beltran vd. (2023), Sentinel-1 görüntülerinden okyanus petrol sızıntısı tespiti için çok kanallı bir derin öğrenme bölütleme çerçevesi önermiş; çoklu giriş kanallarının ayrımı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Güçlü tespit başarımına karşın sahne bağımsız bölme stratejisi benimsenmemiş olması iyimser genelleme tahminlerine yol açabilmektedir. Zhu vd. (2022), karmaşık deniz durumu koşullarında sınır çizimi doğruluğunu artırmak amacıyla yardımcı sınır denetimi içeren bağlamsal-sınır bir tespit ağı önermiştir; ancak görünür-benzer bastırma son işlemde açıkça ele alınmamaktadır.

Chen ve Wang (2022), ikili polarizasyon kanalları ile yardımcı rüzgâr hızı bilgisiyle güçlendirilmiş Dikkat U-Net modelini Sentinel-1 verilerine uygulamış ve fizik temelli özellik artırımının bölütleme doğruluğunu yükselttiğini göstermiştir. Ancak yardımcı meteorolojik girdilere bağımlılık doğrudan operasyonel dağıtımı kısıtlamaktadır.

Mevcut çalışmada kullanılan kıyaslama veri kümesi (Trujillo-Acatitla vd., 2024a) ile bu veri kümesini tanıtan iki aşamalı derin öğrenme çalışması (Trujillo-Acatitla vd., 2024b) yakın dönemde yayımlanmış olup, söz konusu kıyaslamayı kullanan bağımsız çalışma sayısı hâlâ sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu kıyaslama üzerinde birden fazla derin öğrenme mimarisinin sistematik karşılaştırmalı değerlendirmesini fiziksel güdümlü görünür-benzer iyileştirme stratejisiyle birleştiren ilk çalışmalar arasındadır. Temsili yöntemlere ilişkin karşılaştırmalı genel bakış Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. SAR tabanlı petrol sızıntısı tespiti için temsili derin öğrenme yöntemlerine karşılaştırmalı genel bakış. Trujillo-Acatitla vd. (2024b), aynı veri kümesini tanıtan özgün çalışma olarak referans amacıyla listelenmiş olup raporlanan başarım değerleri için özgün çalışmaya başvurulmalıdır.

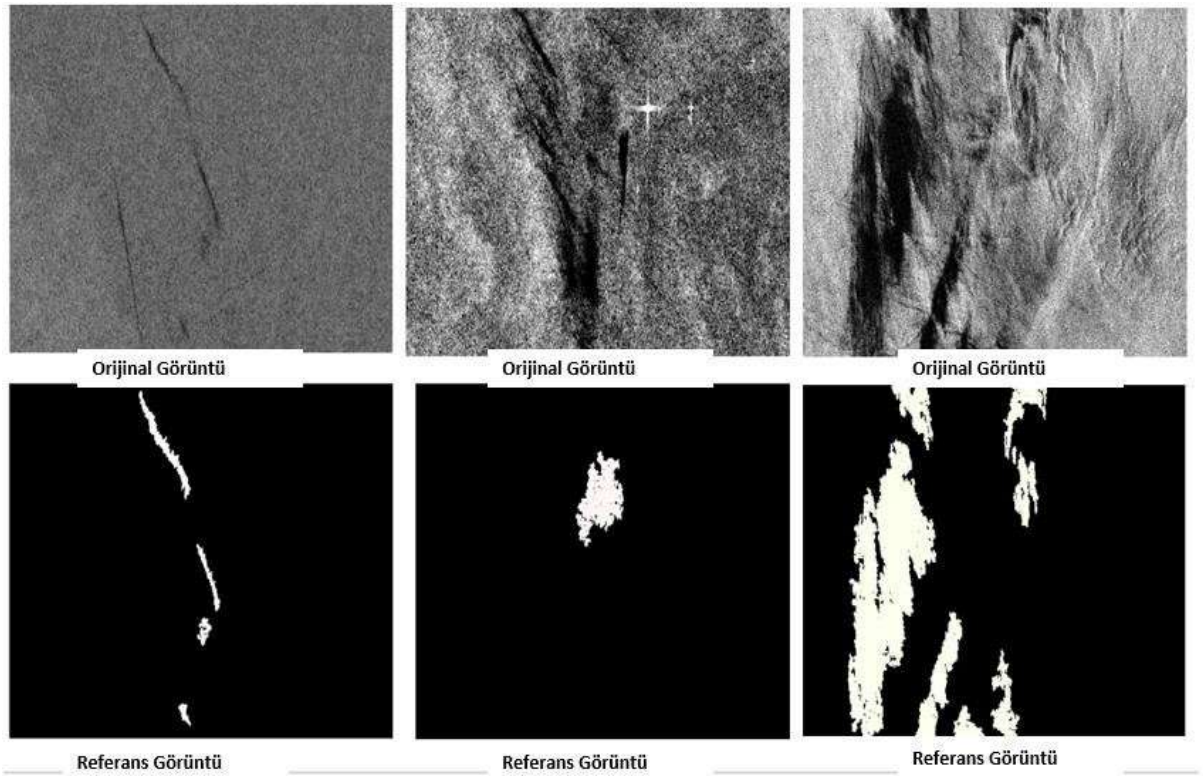
Çalışma	Veri Kümesi	Mimari	Pet. Sız. IoU (yakl.)	Gör.-Ben. İşleme
Krestenitis vd., 2019	Özel Sentinel-1	U-Net	~0,72	Ayrı gör.-ben. sınıfı
Hasimoto-Beltran vd., 2023	Özel Sentinel-1	Çok kanallı DL bölütleme	~0,68	Çok kanallı füzyon
Zhu vd., 2022	Kamuya açık Sentinel-1	Bağlamsal-Sınır CNN	~0,71	Yok
Chen ve Wang, 2022	Özel Sentinel-1	Dikkat U-Net	~0,79	Rüzgâr hızı artırımı
Trujillo-Acatitla vd., 2024b	Trujillo-Acatitla vd., 2024a	İki aşamalı DL (sınıflandırma + bölütleme)	—	Sahne sınıflandırma aşaması
Bu çalışma	Trujillo-Acatitla vd., 2024a	FCN / U-Net / DeepLabV3+ / Dikkat U-Net	**0,825**	Morfolojik + AIS doğrulaması

2. VERİ VE ÖN İŞLEME

2.1 Veri Kümesi Tanımı

Deneyler, "Sentinel-1 SAR Oil Spill Image Dataset for Train, Validate, and Test Deep Learning Models – Part I" başlıklı kamuya açık veri kümesi kullanılarak yürütülmüştür (Trujillo-Acatitla vd., 2024a). Bu veri kümesi, üç bölümden oluşan çok aşamalı bir kıyaslamanın yalnızca petrol sızıntısı sahnelerini içeren ilk bölümünü temsil etmekte olup eğitim ve doğrulama amaçlı tasarlanmıştır. Veri kümesi, İnterferometrik Geniş Şerit (IW) tarama modunda elde edilen ve sigma-naught (σ^o) geri saçılım değerleri desibel (dB) cinsinden ifade edilen 1.200 Sentinel-1 C-bandı SAR görüntü yamasından oluşmaktadır. Her görüntünün uzamsal boyutu 2048 × 2048 piksel olup iki polarizasyon kanalı (VV ve VH) içermekte ve 2048 × 2048 × 2 boyutunda bir görüntü tensörü elde edilmektedir.

Her SAR görüntüsü için aynı uzamsal boyutta (2048 × 2048 piksel) karşılık gelen piksel düzeyinde bir referans maskesi sunulmaktadır. Maskeler ikildir: petrol sızıntısı pikselleri 1, arka plan (deniz yüzeyi) pikselleri ise 0 ile etiketlenmiştir. Tüm görüntüler ve maskeler GeoTIFF formatında dağıtılmaktadır. Veri kümesi iki ana dizinde düzenlenmiştir: petrol sızıntısı sahnelerine ait 1.200 Sentinel-1 SAR σ^o görüntüsü içeren 01_Train_Val_Oil_Spill_images ile 1.200 ikili referans maskesini barındıran 01_Train_Val_Oil_Spill_mask. Bu bölümün yalnızca petrol sızıntısı bulunan sahneleri içerdiği belirtilmelidir; dolayısıyla arka plan sınıfı petrol sızıntısı sahneleri içinde beliren çevreleyen deniz yüzeyini ve olası görünür-benzer yapıları da kapsamaktadır. Yalnızca görünür-benzer yapılar içeren ve sızıntı içermeyen sahneler, aynı kıyaslamanın II. ve III. bölümlerinde yer almaktadır. Çeşitli coğrafi konumlardan seçilmiş temsili örnekler ve karşılık gelen referans maskeleri Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Veri kümesinin farklı bölgelerinden seçilmiş temsili SAR giriş görüntüleri ve karşılık gelen referans maskeleri. İkili maskelerde beyaz bölgeler petrol sızıntısı piksellerini, siyah bölgeler deniz yüzeyini göstermektedir.

2.2 Yama Üretimi ve Veri Kümesi Bölünmesi

Özgün görüntülerin büyük uzamsal boyutu (2048 × 2048 piksel) nedeniyle her görüntü, ağ eğitiminden önce örtüşmeyen 256 × 256 piksel boyutunda yamalara ayrılmış; böylece sahne başına 64 yama elde edilmiştir (2048 / 256 = 8; 8 × 8 = 64). Uzamsal sızıntıyı ve aşırı iyimser başarım tahminlerini önlemek amacıyla sahne düzeyinde bölme stratejisi benimsenmiştir (Zhu vd., 2017; Ma vd., 2019). Aynı 2048 × 2048 görüntüden türetilen yamalar yalnızca tek bir alt kümeye atanmıştır. 1.200 sahne 840 eğitim, 120 doğrulama ve 240 test sahnesi biçiminde bölünmüştür (%70 / %10 / %20). Bu bölünme tam olarak 53.760 eğitim, 7.680 doğrulama ve 15.360 test yaması üretmekte olup toplamda 76.800 yama elde edilmektedir.

3. YÖNTEM

3.1 İkili Bölütleme Formülasyonu

Çok sınıflı yaklaşımların aksine tüm pikseller ya petrol sızıntısı ya da deniz yüzeyi olarak sınıflandırılmaktadır. Görünür-benzer olgular örtük biçimde arka plan sınıfına dahil edilmektedir. Bu formülasyon, güvenilir petrol sızıntısı maskelerinin acil müdahalede birincil ürün olduğu operasyonel gereksinimleri doğrudan yansıtmaktadır.

3.2 Bölütleme Mimarileri

Dört evrişimsel sinir ağı mimarisi değerlendirilmektedir. FCN, uçtan uca yoğun tahmin yeteneğine sahip temel bir tam evrişimli bölütleme çerçevesini temsil etmektedir (Long vd., 2015). U-Net, ince uzamsal ayrıntıların ve sınır bilgisinin korunmasına olanak tanıyan, atlama bağlantılı simetrik bir kodlayıcı-çözücü yapıyı kullanmaktadır (Ronneberger vd., 2015). DeepLabV3+, uzamsal açıdan heterojen petrol lekesi yapılarının yakalanması için özellikle yararlı olan çok ölçekli bağlamsal bilgiyi elde etmek amacıyla boşluklu (atrous) evrişimler ve Boşluklu Uzamsal Piramit Havuzlama (ASPP) modülü içermektedir (Chen vd., 2018).

Dikkat U-Net, standart U-Net mimarisini atlama bağlantılarına dikkat kapıları ekleyerek genişletmektedir (Oktay vd., 2018). Bu kapılar, petrol sızıntısı örüntüleri içermesi daha olası uzamsal bölgeleri ön plana çıkarmakta ve önemsiz arka plan aktivasyonlarını seçici biçimde bastırmaktadır. SAR perspektifinden değerlendirildiğinde dikkat mekanizması, petrol filmleriyle ilişkili fiziksel açıdan anlamlı düşük geri saçılım örüntülerini güçlendiren ve rüzgâr değişkenliğinden kaynaklanan karmaşanın etkisini azaltan yumuşak bir uzamsal süzgeç işlevi görmektedir. Mimarilerin göreli model büyüklükleri (parametre sayıları) Şekil 6'da kabarcık boyutlarıyla gösterilmektedir.

3.3 Eğitim Stratejisi ve Kayıp Fonksiyonu

İkili bölütleme şiddetli sınıf dengesizliği barındırmaktadır; zira petrol sızıntısı pikselleri toplam görüntü alanının küçük bir kesrini oluşturmaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla eğitim kümesindeki ters sınıf frekansına dayalı ağırlıklı ikili çapraz entropi kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. Tüm modeller Adam iyileştirici ile, 1×10^{-4} öğrenme hızı, 8 toplu iş boyutu ve doğrulama IoU değerine dayalı 15 dönemlik sabırla en iyi ağırlıkların kaydedildiği (model checkpointing) bir düzenle 100 dönem boyunca eğitilmiştir. Erken durdurma ölçütü yalnızca nihai ağırlıkların seçiminde kullanılmış; Şekil 3 ve Şekil 4'teki eğriler, tam yakınsama davranışını göstermek amacıyla 100 dönemin tamamı için çizdirilmiştir. Adil karşılaştırma amacıyla özdeş eğitim yapılandırması tüm mimarilere uygulanmıştır.

3.4 Fiziksel Güdümlü Görünür-Benzer Bastırma ve İyileştirme

Eğitim sırasında açık görünür-benzer sınıflarının yokluğunu telafi etmek amacıyla ikili bölütlemenin ardından fiziksel güdümlü bir iyileştirme aşaması uygulanmaktadır. Tahmin edilen maskelerden bağlı petrol sızıntısı aday bölgeleri çıkarılmakta; her bölge için, bölgenin ikinci dereceden merkezî momentlerinden türetilen eşdeğer elipsin ana eksen uzunluğunun küçük eksen uzunluğuna oranı olarak tanımlanan uzama oranı (E = L_ana / L_küçük) hesaplanmaktadır; bu çalışmada uzama oranı ile ana-küçük eksen oranı aynı büyüklüğü ifade etmekte olup filtreleme kuralında kullanılan tek morfolojik tanımlayıcıdır. Morfolojik iyileştirme, yama düzeyindeki tahminlerin özgün 2048 × 2048 piksel sahne boyutunda yeniden birleştirilmesinin (stitching) ardından sahne düzeyinde uygulanmakta; böylece birden fazla yama sınırını kesen uzun yapılar tek bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Gemi izleri ve doğrusal rüzgâr güdümlü yapılar tipik olarak aşırı yüksek uzama ve çok düşük alan-uzunluk oranları sergilerken gerçek petrol lekeleri daha düzensiz ve uzamsal açıdan sürekli örüntüler oluşturma eğilimindedir (Singha vd., 2013; Alpers vd., 2017). Yanlış alarmları filtrelemek için kullanılacak uzama oranı eşiği, doğrulama kümesi üzerinde F1-skorunu maksimize edecek şekilde sistematik bir ızgara arama (grid search) stratejisiyle ampirik olarak 8,0 şeklinde saptanmıştır. Bu optimal eşiği aşan bölgeler olası görünür-benzer yapılar olarak işaretlenmekte ve nihai petrol sızıntısı maskesinden çıkarılmaktadır. Sabit ve küresel bir eşik değerinin benimsenmesi yöntemi basit ve yeniden üretilebilir kılmakla birlikte önemli bir ödünleşimi de beraberinde getirmektedir: yüzey akıntıları veya rüzgâr kayması nedeniyle uzamış, ince ve dar şeritler biçiminde beliren gerçek petrol sızıntıları da yüksek uzama oranı sergileyebilmekte; bu durumda sabit eşik, gerçek sızıntı bölgelerinin görünür-benzer olarak yanlış sınıflandırılıp maskeden çıkarılmasına, dolayısıyla yanlış negatiflerin artmasına yol açabilmektedir. Bu çalışmada eşik sahne bağımsız ve sabit tutulmuş olup deniz durumuna, rüzgâr rejimine veya sahne özelinde uyarlanabilen (adaptif) bir eşikleme stratejisi benimsenmemiştir; bu husus Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar bölümünde bir sınırlılık olarak ayrıca ele alınmaktadır. Gemi kaynaklı yanlış alarmları doğrulamak amacıyla, sahnelerin elde ediliş tarih ve konumlarıyla eşleştirilen kamuya açık AIS gemi yörüngesi kayıtları yalnızca çevrimdışı doğrulama ve hata analizi için kullanılmakta olup çıkarım sürecini etkilememektedir. Bu çevrimdışı doğrulama sürecinde Global Fishing Watch (GFW) veri tabanından sağlanan açık erişimli AIS kayıtları temel alınmış olup, SAR görüntüsünün çekim zamanı ile AIS sinyalleri arasında en fazla ±15 dakikalık bir zaman penceresi kabul edilerek doğrusal uzamsal enterpolasyon ile eşleştirme sağlanmıştır; bu sayede önerilen çerçevenin tam operasyonel bağımsızlığı korunmaktadır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 Değerlendirme Metrikleri

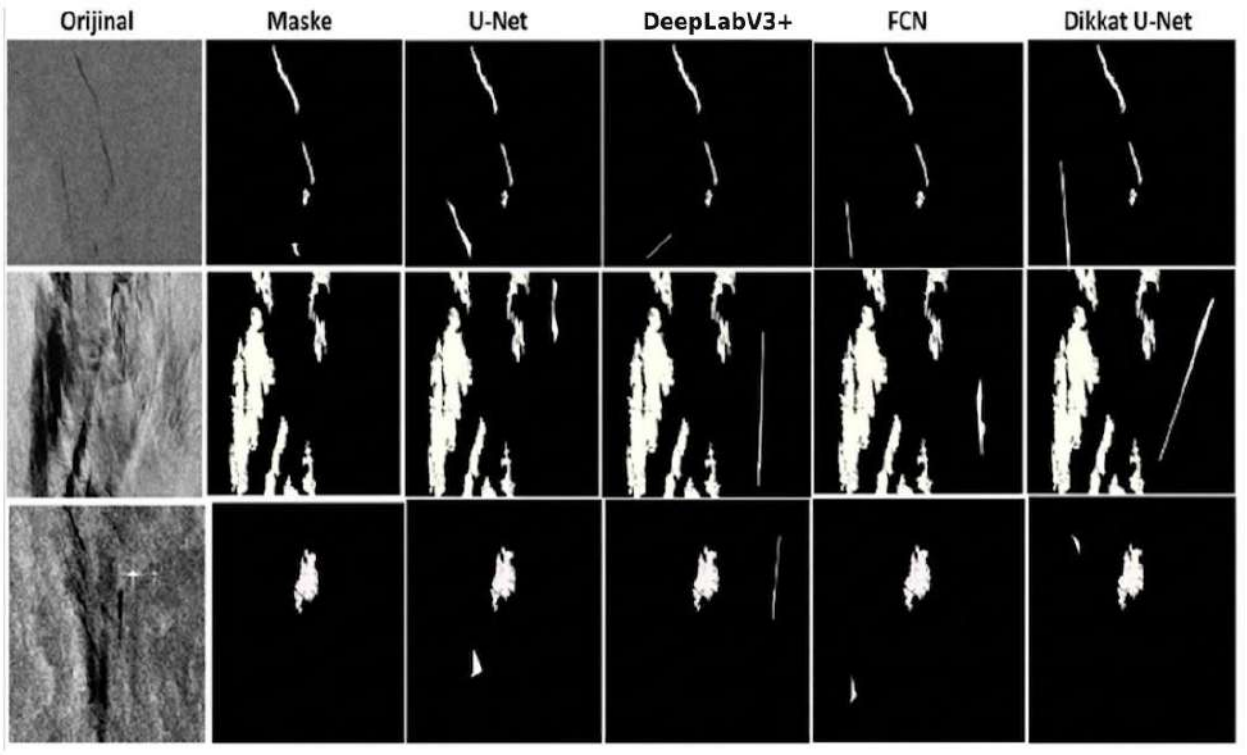
Petrol sızıntısı ve deniz yüzeyi pikselleri arasındaki güçlü sınıf dengesizliği nedeniyle genel doğruluk ve ortalama Kesişim/Birleşim (mIoU) metrikleri bölütleme başarımına ilişkin yanıltıcı göstergeler üretebilmektedir. Bu nedenle tüm mimariler için hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve petrol sızıntısına özgü IoU raporlanmaktadır. Petrol sızıntısı IoU değeri; tahmin edilen ve referans petrol sızıntısı bölgeleri arasındaki örtüşmeyi hem yanlış pozitif hem de yanlış negatiflere ceza vererek doğrudan ölçtüğünden birincil performans göstergesi olarak benimsenmiştir.

4.2 Niceliksel Sonuçlar

Değerlendirilen mimarilerin niceliksel başarımı Çizelge 2'de özetlenmektedir. Çizelge, özdeş deneysel koşullar altında bölütleme doğruluğunun doğrudan ve yeniden üretilebilir biçimde karşılaştırılmasına olanak tanımak amacıyla her model için hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve petrol sızıntısı IoU değerlerini sunmaktadır (her sütunun en yüksek değeri kalın yazılmıştır). Çizelge 2'deki değerler, fiziksel güdümlü morfolojik iyileştirme uygulandıktan sonraki nihai çerçeve çıktısına ait olup yeniden birleştirilmiş 2048 × 2048 piksel test sahneleri üzerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Değerlendirilen mimarilerin ikili bölütleme performansı.

Model	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 Skoru	Petrol Sız. IoU
FCN	0,847	0,763	0,803	0,671
U-Net	0,892	0,831	0,860	0,755
DeepLabV3+	**0,921**	0,878	0,899	0,817
Dikkat U-Net	0,914	**0,894**	**0,904**	**0,825**

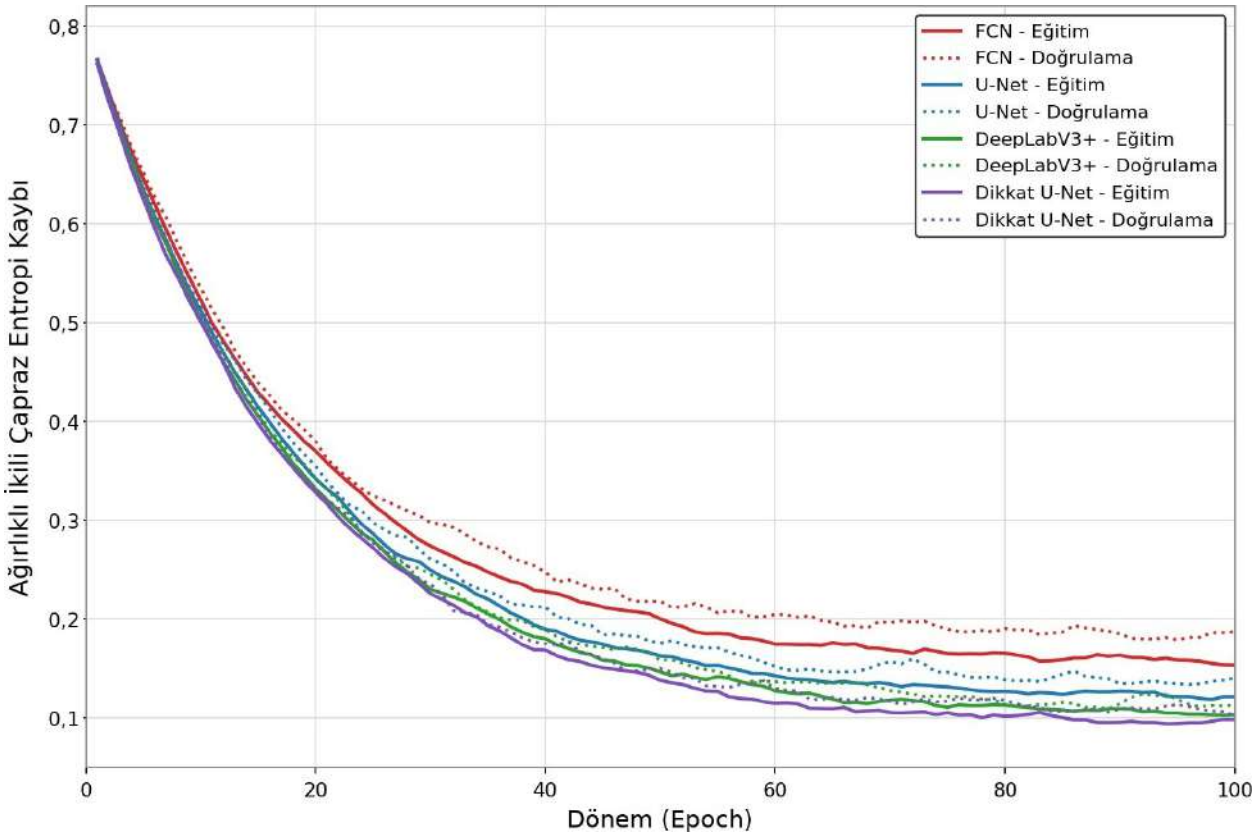


Şekil 2. Çeşitli test sahneleri için petrol sızıntısı bölütleme sonuçlarının nitel karşılaştırması. Sütunlar soldan sağa özgün SAR giriş görüntüsünü, referans maskesini ve U-Net, DeepLabV3+, FCN ile Dikkat U-Net tahmin çıktılarını temsil etmektedir.

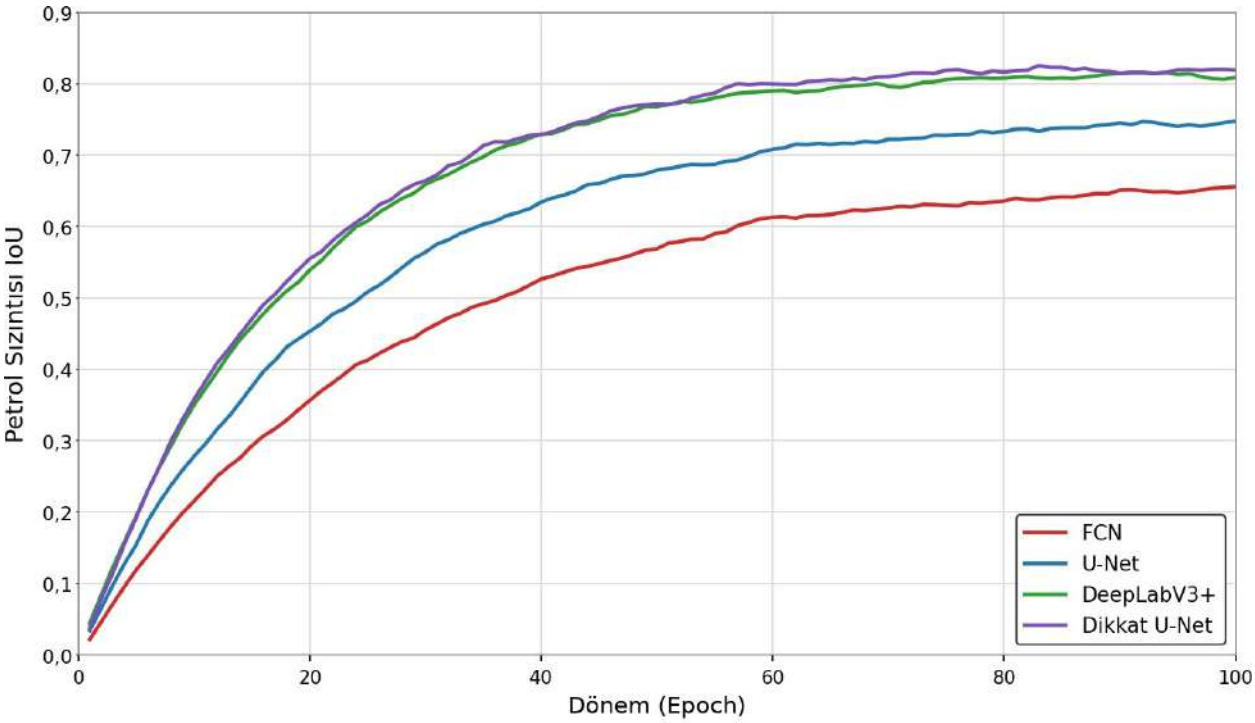
4.3 Karşılaştırmalı Başarım Analizi

Sonuçlar açıkça göstermektedir ki kodlayıcı-çözücü tabanlı tüm mimariler FCN taban çizgisini belirgin biçimde geride bırakmaktadır. FCN, 0,803 F1 skoru ve 0,671 petrol sızıntısı IoU değeriyle parçalı ve düşük kontrastlı leke bölgelerini sınırlandırma konusunda sınırlı bir yetenek sergilemektedir. U-Net, 0,860 F1 skoru ve 0,755 petrol sızıntısı IoU değerine ulaşarak bölütleme kalitesini belirgin ölçüde iyileştirmektedir; bu iyileşme atlama bağlantılarının SAR görüntülerinde uzamsal ayrıntıları korumadaki etkinliğini doğrulamaktadır.

DeepLabV3+, değerlendirilen modeller arasında en yüksek hassasiyete (0,921) ve yüksek bir F1 skoruna (0,899) ulaşmaktadır. 0,817 petrol sızıntısı IoU değeri, heterojen leke örüntüleri ve geniş kapsamlı petrol oluşumlarının yakalanmasında çok ölçekli bağlamsal modellemenin katkısını doğrulamaktadır. En yüksek genel petrol sızıntısı sınırlandırma başarımı 0,825 petrol sızıntısı IoU ve 0,904 F1 skoru ile Dikkat U-Net tarafından elde edilmektedir. Standart U-Net'e kıyasla petrol sızıntısı IoU değerindeki artış (0,755'ten 0,825'e) uzamsal dikkat mekanizmalarının arka plan karmaşasını bastırma ve ince, parçalı petrol lekesi yapılarını güçlendirmedeki etkinliğini kanıtlamaktadır. Buna ek olarak, en başarılı iki model olan DeepLabV3+ (IoU: 0,817) ve Dikkat U-Net (IoU: 0,825) arasındaki performans farkının istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek amacıyla, 240 test sahnesinin her biri için birleştirilmiş 2048 × 2048 piksel maskeler üzerinden hesaplanan sahne düzeyindeki petrol sızıntısı IoU değerleri üzerinden parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıra testi (Wilcoxon signed-rank test) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ($p = 0{,}034 < 0{,}05$), Dikkat U-Net'in sağladığı iyileşmenin %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve gözlemlenen farkın rastlantısal olmadığını doğrulamaktadır.



Şekil 3. Değerlendirilen modellerin karşılaştırmalı eğitim ve doğrulama kayıp yörüngeleri; dönemler boyunca eğitim dinamiklerini ve yakınsama örüntülerini göstermektedir.



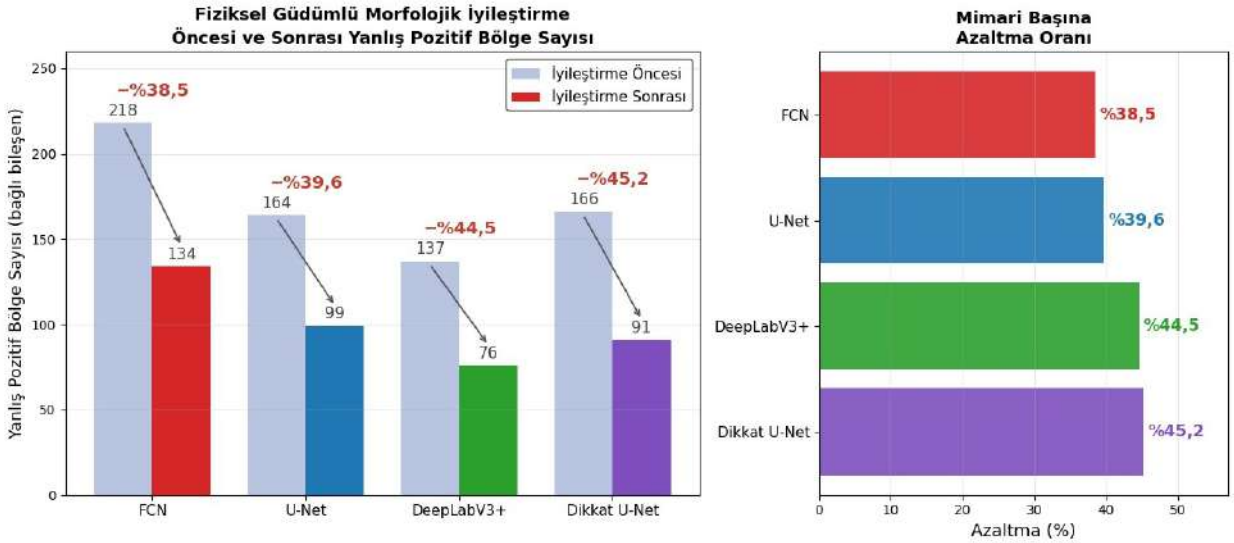
Şekil 4. Doğrulama kümesi üzerinde hesaplanan petrol sızıntısı IoU cinsinden öğrenme eğrileri; değerlendirilen mimarilerin yakınsama davranışını ve nihai bölütleme başarımını ön plana çıkarmaktadır.

Kayıp eğrileri FCN, U-Net, DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net'in özdeş koşullar altındaki yakınsama davranışını sergilemektedir. Kodlayıcı-çözücü mimariler, FCN taban çizgisine kıyasla daha hızlı yakınsama ve daha düşük nihai doğrulama kaybı sergilemektedir. Eğitim ve doğrulama eğrileri arasında belirgin bir sapmanın bulunmaması sahneler arası etkin genellemeye işaret etmektedir.

4.4 Görünür-Benzer Bastırma ve AIS Destekli Doğrulama

Eğitim veri kümesinin (I. bölüm) yalnızca petrol sızıntısı etiketleri barındırmasına karşın, bu sahnelerin etiketlenmemiş arka planında (deniz yüzeyi sınıfı) doğal olarak bulunan rüzgâr hücreleri ve gemi dümen suları gibi yapılar, modeller tarafından sıklıkla petrol sızıntısı olarak (yanlış pozitif) tahmin edilmiştir. Nitel inceleme, DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net'in gemi izleri ile rüzgâr güdümlü çizgiler gibi bu tür görünür-benzer örüntülerle petrol lekeleri arasındaki karışıklığı başarıyla azalttığını ortaya koymaktadır.

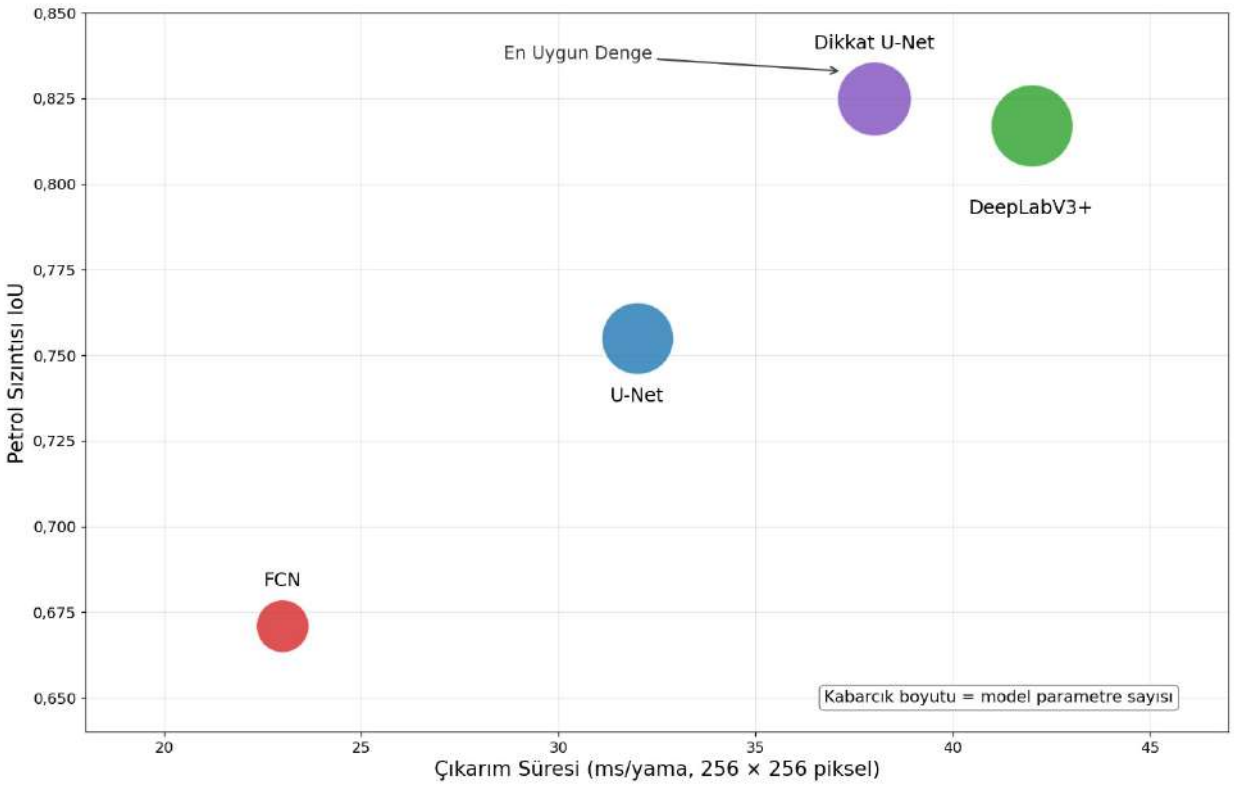
Fiziksel güdümlü iyileştirme modülünün uygulanmasının ardından uzun şekilli yanlış tespitler belirgin ölçüde azalmaktadır. AIS gemi yörüngesi verileriyle gerçekleştirilen örtüşme analizi, tüm test sahnelerinde bastırılan uzun şekilli yapıların büyük çoğunluğunun etkin denizcilik güzergâhlarıyla çakıştığını doğrulamakta ve stratejinin fiziksel geçerliliğini güçlendirmektedir. Fiziksel güdümlü morfolojik iyileştirmenin yanlış alarm bastırması üzerindeki niceliksel etkisi Şekil 5'te sunulmaktadır. Şekil 5'teki yanlış pozitif sayıları piksel sayısı değil, birleştirilmiş test sahnelerinde bağlı bileşen analiziyle belirlenen yanlış pozitif aday bölge sayılarıdır. Bu doğrulama yalnızca petrol sızıntısı içeren sahneler içinde beliren görünür-benzer yapılarla sınırlıdır; sızıntı içermeyen sahnelerdeki yanlış pozitif davranışı bu çalışmada ayrıca değerlendirilmemiştir (bkz. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar bölümü).



Şekil 5. Test kümesinde fiziksel güdümlü morfolojik iyileştirme öncesi ve sonrasındaki yanlış pozitif bölge (bağlı bileşen) sayılarının karşılaştırması. Tüm mimariler yanlış alarmlarda belirgin azalma (%38–%45) sergilemekte olup Dikkat U-Net en yüksek oransal azaltmaya (%45,2), DeepLabV3+ ise en düşük nihai sayıya (76 yanlış pozitif bölge) ulaşmaktadır.

4.5 Operasyonel Değerlendirmeler ve Aktarılabilirlik

DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net, FCN ve U-Net'e kıyasla daha yüksek hesaplama karmaşıklığı getirmekle birlikte 256 × 256 piksellik yama başına ortalama çıkarım süresi (yaklaşık 23–42 ms/yama; tüm modeller için aynı donanım üzerinde ölçülmüştür) gerçek zamana yakın operasyonel izleme sistemleri için uygun düzeyde kalmaktadır. İkili formülasyon etiketleme çabasını azaltmakta ve çerçevenin yeni coğrafi bölgelere hızla genişletilmesini kolaylaştırmaktadır. Sentinel-1 görüntülerinin münhasır kullanımı, Copernicus açık veri politikası sayesinde küresel uygulanabilirlik ve uzun vadeli sürdürülebilirlik sağlamaktadır (Torres vd., 2012). Bölütleme doğruluğu ile hesaplama gereksinimleri arasındaki denge Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Petrol sızıntısı IoU değeri ile model karmaşıklığı (toplam parametre sayısı) arasındaki dengeyi gösteren hesaplama verimliliği analizi. Kabarcık boyutu model parametre sayısına, yatay eksen ise 256 × 256 piksellik yama başına çıkarım gecikmesine (ms/yama) karşılık gelmektedir. "En uygun denge" etiketi Dikkat U-Net modelini işaret etmektedir.

4.6 Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Çalışmanın bazı sınırlılıkları açıkça belirtilmelidir. İlk olarak, deneyler kıyaslama veri kümesinin yalnızca petrol sızıntısı sahnelerini içeren I. bölümü üzerinde yürütülmüştür; adanmış görünür-benzer ve sızıntı içermeyen sahneler (II. ve III. bölümler) değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Bu durumun doğrudan bir sonucu olarak, önerilen fiziksel güdümlü iyileştirme stratejisinin sızıntı içermeyen (gerçek negatif) sahnelerdeki yanlış pozitif oranı bu çalışmada ölçülmemiştir; dolayısıyla çalışmada elde edilen 'yanlış alarm bastırma' başarımı yalnızca petrol sızıntısı sahneleri içinde doğal olarak beliren görünür-benzer yapılarla sınırlıdır ve çerçevenin sızıntı içermeyen sahneler üzerindeki özgüllüğü (specificity) henüz sistematik olarak sınanmamıştır. Gerçekte petrol sızıntısı içeren sahnelerin, sızıntı içermeyen sahnelere kıyasla çok daha az sayıda olduğu göz önüne alındığında, bu sınırlılık önerilen çerçevenin operasyonel güvenilirliğinin tam olarak ortaya konması açısından önemlidir; kıyaslamanın tüm bölümlerini birlikte kullanan bir değerlendirme bu boşluğu doğrudan giderecektir. İkinci olarak, AIS tabanlı doğrulama çevrimdışı ve bütünleyici niteliktedir; AIS kayıtlarının kapsama ve zamansal eşleşme kalitesi, doğrulanabilen yanlış alarm oranını etkileyebilir. Üçüncü olarak, görünür-benzer bastırma aşamasında kullanılan 8,0 uzama oranı eşiği doğrulama kümesinde sabit ve küresel olarak belirlenmiştir; bu seçim, yüzey akıntıları veya rüzgâr kayması nedeniyle doğal olarak uzamış ince sızıntı şeritlerinin görünür-benzer olarak yanlış sınıflandırılıp maskeden çıkarılmasına, dolayısıyla ince veya uzun petrol sızıntılarının kaçırılmasına yol açabilir; ayrıca farklı deniz durumu rejimlerinde eşiğin yeniden ayarlanması gerekebilir. Dördüncü olarak, DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net arasındaki metrik farklar (petrol sızıntısı IoU'da 0,825'e karşı 0,817) görece küçüktür; bu çalışmada 240 test sahnesi üzerinden yürütülen Wilcoxon işaretli sıra testi bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermekle birlikte ($p = 0,034$), etki büyüklüğünün pratik/operasyonel önemi ayrıca değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalar; kıyaslamanın üç bölümünü birlikte kullanan kapsamlı bir görünür-benzer ve özgüllük değerlendirmesini, sahneye veya deniz durumuna uyarlanabilen adaptif eşikleme stratejilerini, girdi olarak kullanılan ham VV ve VH kanallarına ek olarak polarimetrik oran ve fark indislerinin (örn. VV/VH oranı) özellik olarak entegrasyonunu ve sınır duyarlı kayıp fonksiyonlarını kapsayabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Sentinel-1 SAR görüntülerinden deniz petrol sızıntısı tespiti için fiziksel olarak yorumlanabilir ve operasyonel açıdan gerçekçi bir ikili derin öğrenme çerçevesi sunulmuştur. Petrol sızıntısı haritalama görevi ikili bölütleme problemi olarak yeniden kurgulanarak öğrenme tabanlı çıkarım ile fiziksel güdümlü görünür-benzer

bastırma birbirinden ayrıştırılmış; bu yaklaşım emek yoğun çok sınıflı etiketleme gereksinimini ortadan kaldırırken tipik SAR yapıları karşısındaki dayanıklılığı sürdürmektedir.

FCN, U-Net, DeepLabV3+ ve Dikkat U-Net'in karşılaştırmalı değerlendirmesi, çok ölçekli bağlamsal modelleme ile uzamsal dikkat mekanizmalarının düşük sinyal-gürültü oranlı SAR koşullarında petrol sızıntısı sınırlandırması için tamamlayıcı avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır. Dikkat U-Net en yüksek petrol sızıntısı IoU değerini (0,825) ve en yüksek F1 skorunu (0,904) elde etmekte olup bu üstünlüğün DeepLabV3+'a (IoU: 0,817) göre istatistiksel olarak anlamlı olduğu Wilcoxon işaretli sıra testiyle doğrulanmıştır ($p = 0,034$); DeepLabV3+ ise geniş ve heterojen leke yapıları için en yüksek hassasiyeti (0,921) ve güçlü bir dayanıklılığı sergilemektedir. Bu çalışmada elde edilen bölütleme ve görünür-benzer bastırma başarımı, yalnızca sızıntı içerdiği önceden bilinen sahneler üzerinde değerlendirilmiştir; çerçevenin sızıntı içermeyen sahnelerdeki özgüllüğü sınanmamış olup bu, önerilen çözümün operasyonel izleme sistemlerine tam entegrasyonundan önce ele alınması gereken bir sınırlılık olarak kabul edilmelidir. Bu sınırlılığın giderilmesi kaydıyla önerilen çerçeve, büyük ölçekli operasyonel petrol sızıntısı izleme için ölçeklenebilir ve aktarılabilir bir çözüm sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2224-B Yurt İçi Bilimsel Etkinliklere Katılımı Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Alpers, W., Holt, B. ve Zeng, K., 2017. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. Remote Sensing of Environment, 201, 133–147.

Brekke, C. ve Solberg, A.H.S., 2005. Oil spill detection by satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment, 95(1), 1–13.

Chen, L.-C., Papandreou, G., Schroff, F. ve Adam, H., 2018. Encoder–decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. ECCV 2018, 801–818.

Chen, Y. ve Wang, Z., 2022. Marine oil spill detection from SAR images based on attention U-Net model using polarimetric and wind speed information. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(19), 12315.

Fingas, M., 2017. Oil Spill Science and Technology. 2. bs. Oxford, Birleşik Krallık: Gulf Professional Publishing (Elsevier).

Hasimoto-Beltran, R., Canul-Ku, M., Díaz Méndez, G.M., Ocampo-Torres, F.J. ve Esquivel-Trava, B., 2023. Ocean oil spill detection from SAR images based on multi-channel deep learning semantic segmentation. Marine Pollution Bulletin, 188, 114651.

Krestenitis, M., Orfanidis, G., Ioannidis, K., Avgerinakis, K., Vrochidis, S. ve Kompatsiaris, I., 2019. Oil spill identification from satellite images using deep neural networks. Remote Sensing, 11(15), 1762.

Long, J., Shelhamer, E. ve Darrell, T., 2015. Fully convolutional networks for semantic segmentation. CVPR 2015, 3431–3440.

Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G. ve Johnson, B.A., 2019. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 152, 166–177.

Oktay, O., Schlemper, J., Le Folgoc, L., Lee, M., Heinrich, M., Misawa, K., Mori, K., McDonagh, S., Hammerla, N.Y., Kainz, B., Glocker, B. ve Rueckert, D., 2018. Attention U-Net: Learning where to look for the pancreas. Medical Imaging with Deep Learning (MIDL) 2018.

Ronneberger, O., Fischer, P. ve Brox, T., 2015. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. MICCAI 2015, 234–241.

Singha, S., Bellerby, T. ve Trieschmann, O., 2013. Satellite oil spill detection using artificial neural networks. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 6(6), 2355–2363.

Solberg, A.H.S., Brekke, C. ve Husøy, P.O., 2007. Oil spill detection in SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(3), 746–755.

Topouzelis, K., Papakonstantinou, A. ve Karathanassi, V., 2016. Investigation of dual-polarimetric SAR data for oil spill detection. Remote Sensing, 8(4), 301.

Topouzelis, K., Stathakis, D. ve Karathanassi, V., 2009. Investigation of genetic algorithms contribution to feature selection for oil spill detection. International Journal of Remote Sensing, 30(3), 611–625.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M. ve Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, 120, 9–24.

Trujillo-Acatitla, R., Tuxpan-Vargas, J., Ovando-Vázquez, C. ve Monterrubio-Martínez, E., 2024a. Sentinel-1 SAR oil spill image dataset for train, validate, and test deep learning models. Part I [Veri kümesi]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.8346860

Trujillo-Acatitla, R., Tuxpan-Vargas, J., Ovando-Vázquez, C. ve Monterrubio-Martínez, E., 2024b. Marine oil spill detection and segmentation in SAR data with two steps deep learning framework. Marine Pollution Bulletin, 204, 116549.

Zhu, Q., Zhang, Y., Li, Z., Yan, X., Guan, Q., Zhong, Y., Zhang, L. ve Li, D., 2022. Oil spill contextual and boundary-supervised detection network based on marine SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1–10.

Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G.-S., Zhang, L., Xu, F. ve Fraundorfer, F., 2017. Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(4), 8–36.

UZAKTAN ALGILAMA VE AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKA ENTEGRASYONU İLE ALG PATLAMALARININ DERİN ÖĞRENME TABANLI TESPİTİ VE ANALİZİ

Mustafacan SAYGI[1], Halil Nurullah ORUÇ[2], Osman Yavuz ALTUNTAŞ[3], Meltem ÇELEN[4], İsmail ÇÖLKESEN[5]

[1]Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli, msaygi@gtu.edu.tr
[2]Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli, horuc@gtu.edu.tr
[3]Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 41400, Gebze, Kocaeli, oyavuzaltuntas@gtu.edu.tr
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli, mkocal@gtu.edu.tr
[5]Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 41400, Gebze, Kocaeli, icolkesen@gtu.edu.tr

ÖZET

Ötrofikasyon baskısı altındaki göl ekosistemlerinin izlenmesinde geleneksel saha yöntemlerinin sınırlı kalması, uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımların kullanımını giderek daha önemli hâle getirmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin kapalı havza göllerinden biri olan Burdur Gölü'nde 1984-2024 döneminde meydana gelen alg patlamalarının uzun dönemli tespiti ve haritalanmasının yanı sıra, bu oluşumları etkileyen parametre gruplarının göreli katkılarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Landsat ve Sentinel-2 çok zamanlı multispektral uydu görüntülerine ait Yüzen Alg İndeksi (FAI) ve Sentinel-2 Yüzen Alg Patlaması İndeksi (SFABI) kullanılarak oluşturulan etiket veri setleri üzerinde U-Net derin öğrenme modelleri eğitilmiş; modeller bağımsız test bölgelerinde sırasıyla %94,91 ve %91,53 genel doğruluk sağlamıştır. Geliştirilen modeller 96 uydu görüntüsü üzerinde uygulanmış, elde edilen haritalar üzerinden yapılan zamansal ve mekânsal analizler sonucunda Burdur Gölü'nde kümülatif olarak 1000 km²'nin üzerinde alg patlaması alanı tespit edilmiştir. Alg oluşumlarının en yoğun olarak haziran ayında (680,75 km²) gerçekleştiği, en kritik yılın ise 364,06 km² ile 2021 olduğu belirlenmiştir. Alg patlamalarının ağırlıklı olarak gölün güney kesiminde, Boz ve Buğduz çaylarının giriş yaptığı bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Alg patlamalarını etkileyen parametrelerin belirlenmesi amacıyla Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeli kullanılarak 46 alt havzaya ait aylık su kalitesi parametreleri elde edilmiş, bu veriler meteorolojik parametrelerle birleştirilerek altı aylık zamansal gecikme penceresi altında AdaBoost makine öğrenmesi algoritması ile eğitilmiştir. Parametreler besi elementleri, su kalite, hidroloji ve meteorolojik parametreler olmak üzere dört gruba ayrılmış ve bu gruplardan oluşturulan dokuz senaryo karşılaştırılmıştır. Tüm parametrelerin kullanıldığı senaryoda bağımsız test veri setinde %89,74 genel doğruluk ve alg patlaması sınıfı için %92,00 F-skor değeri elde edilmiştir. McNemar testi sonuçları, meteorolojik parametreleri içermeyen senaryoların tüm parametrelerin kullanıldığı senaryodan anlamlı biçimde farklılaştığını; meteorolojik parametreler ile besi elementlerinin birlikte kullanıldığı senaryonun ise istatistiksel olarak eşdeğer başarım sağladığını göstermiştir. Elde edilen bulgular, uzaktan algılama, havza ölçekli modelleme ve makine öğrenmesinin bütünleşik kullanımının, veri kısıtı bulunan göl sistemlerinde erken uyarı süreçlerine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alg Patlaması, Derin Öğrenme, Havza Modellemesi, Makine Öğrenmesi, Uzaktan Algılama.

ABSTRACT

INTEGRATING REMOTE SENSING AND EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DEEP LEARNING-BASED DETECTION AND ANALYSIS OF ALGAL BLOOMS

The limited applicability of conventional field-based monitoring in lake ecosystems under eutrophication pressure has increased the importance of remote sensing and artificial intelligence-based approaches. This study aims to detect and map algal blooms in Lake Burdur, a closed-basin lake in Türkiye, over the 1984-2024 period, and to quantify the relative contribution of environmental parameter groups to bloom occurrence. Label datasets were generated from multi-temporal Landsat and Sentinel-2 imagery using the Floating Algae Index (FAI) and the Sentinel-2 Floating Algal Bloom Index (SFABI), and were used to train U-Net deep learning models, which achieved overall accuracies of 94.91% and 91.53% on independent test regions, respectively. The trained models were applied to 96 satellite images, and the resulting maps revealed a cumulative bloom area exceeding 1000 km². Blooms were most extensive in June (680.75 km²), while 2021 was the most critical year (364.06 km²). Blooms were mainly concentrated in the southern basin, where the Boz and Buğduz streams enter the lake. Monthly water-quality variables for 46 subbasins were simulated with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), combined with meteorological variables, and used to train an AdaBoost classifier under a six-month temporal lag window. The predictors were divided into nutrient, water-quality, hydrological and meteorological groups, and nine scenarios derived from these groups were compared. The scenario including all parameter groups reached an overall accuracy of 89.74% and an F-score of 92.00% for the bloom class on the independent test set. McNemar tests indicated that scenarios excluding meteorological parameters differed significantly from the full model, whereas the combination of meteorological parameters and nutrients performed statistically equivalently to it. The findings show that integrating remote sensing, catchment-scale modeling and machine learning can support early-warning efforts in data-scarce lake systems.

Keywords: Algal Bloom, Catchment Modeling, Deep Learning, Machine Learning, Remote Sensing.

1. GİRİŞ

Alg patlamaları; ötrofikasyon baskısı altındaki göl sistemlerinde ekosistem işleyişini bozan, suyun kullanım potansiyelini düşüren ve içme suyu kaynaklarını tehdit eden su kalitesi sorunlarından biridir (Paerl ve Otten, 2013;

Huisman vd., 2018). Bu oluşumlar yalnızca göl içi fiziksel ve biyokimyasal koşullarla değil aynı zamanda besin maddesi taşınımı, hidrolojik girdiler, arazi kullanımı değişimi ve iklim değişkenliği gibi havza ölçekli süreçlerle de şekillenmektedir (Scavia vd., 2021). Bununla birlikte pek çok göl sisteminde uzun dönemli yerinde alg gözlemleri ile sürekli dış yük girdileri eksik ya da hiç bulunmamakta olup bu durum tahmin ve erken uyarı yaklaşımlarının geliştirilmesini sınırlamaktadır.

Uzaktan algılama, geniş alanlarda tekrarlı gözlem imkânı sunması nedeniyle alg patlamalarının izlenmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu kapsamda Yüzen Alg İndeksi (FAI) ve Sentinel-2 görüntüleri için geliştirilen Yüzen Alg Patlaması İndeksi (SFABI) gibi spektral indeksler, uygulama kolaylıkları nedeniyle öne çıkmaktadır (Hu, 2009; Saygi vd., 2025). Ancak indeks tabanlı yaklaşımların eşik değer tayinine bağlı olması ve farklı uydu görüntülerinde, dönem veya çalışma alanlarına uygulanmasında yeniden kalibrasyon gerektirebilmektedir. Bu limitasyonlar, alg patlaması tespitinde yapay zeka tabanlı yaklaşımların kullanımını yaygınlaştırmıştır (Colkesen vd., 2025).

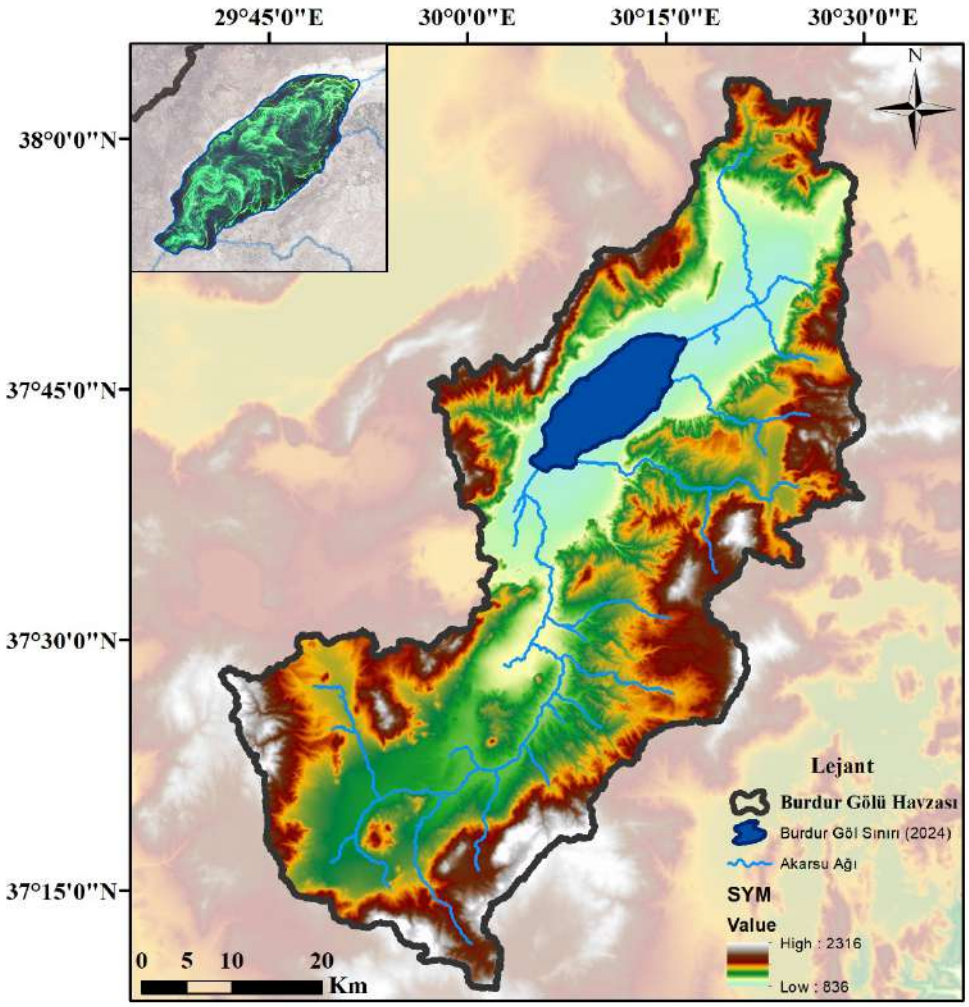
Alg patlamalarının tespitinin yanı sıra tahmin edilmesine yönelik çalışmalarda, meteorolojik koşullar ve besin maddesi yükleri açıklayıcı değişken olarak kullanılmaktadır. Havza ölçekli hidrolojik ve su kalitesi modelleri, noktasal ve yayılı kaynaklı besin maddesi yollarının ayrıştırılmasına olanak tanımakta ve sürekli gözlem bulunmayan sistemlerde fiziksel temelli girdi üretebilmektedir (Celen vd., 2014). Öte yandan bu yaklaşımda üretilen değişkenlerin sayıca fazla olması ve aralarındaki yüksek korelasyon, hangi parametre gruplarının model başarımına gerçekte katkı sağladığının belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Değişken gruplarının sistematik biçimde modele dâhil edilip çıkarılmasına dayanan senaryo analizi ise bu katkının nicelendirilmesine ve daha az sayıda parametreyle benzer başarımın elde edilip edilemeyeceğinin sınanmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, Burdur Gölü'nde alg patlamalarının uzun dönemli tespiti ve bu oluşumları etkileyen parametre gruplarının belirlenmesi amacıyla uydu tabanlı derin öğrenme, havza ölçekli hidrolojik ve su kalitesi modellemesi ile makine öğrenmesini bir araya getiren bütünleşik bir yaklaşım sunulmaktadır. Uydu görüntülerinden üretilen uzun dönemli alg patlaması kayıtlarının hedef değişken olarak kullanılması, tahmin değişkenlerinin doğrudan uydu görüntülerinden değil havza ölçekli SWAT modeli çıktıları ile meteorolojik verilerden türetilmesi ve parametre gruplarının katkısının senaryo analizi ile istatistiksel olarak sınanması çalışmanın özgün yanını ortaya koymaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Burdur Gölü, Türkiye'nin güneybatısında yer alan ve Ramsar kapsamında uluslararası öneme sahip sulak alan olarak tanımlanan kapalı havza gölü konumunda bulunmaktadır (Şekil 1). Bölgede Akdeniz ile İç Anadolu iklimleri arasında geçiş özelliği gösteren, sıcak ve kurak yazlar ile soğuk ve yağışlı kışlarla karakterize edilen bir iklim hâkimdir. Ortalama derinliği 30 m, en büyük derinliği ise 61 m olan göl, Türkiye'nin en derin göllerinden biridir (Kocasarı vd., 2015).

Göl yüzey alanı 1987 yılından bu yana yaklaşık %42 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Havzadaki antropojenik besin maddesi girdileri ağırlıklı olarak evsel atıksu ve tarımsal drenajdan kaynaklanmaktadır. Burdur kent merkezinin atıksuyu biyolojik arıtma tesisinde arıtıldıktan sonra göle deşarj edilmekte ve havzadaki diğer yerleşimlerin atıksuları ise doğrudan yerel akarsulara verilmektedir. Tarım alanları havzanın yaklaşık %44'ünü kapsamakta ve tarımsal faaliyetler göle yönelik önemli bir besin maddesi kaynağı oluşturmaktadır (NHYP, 2020).



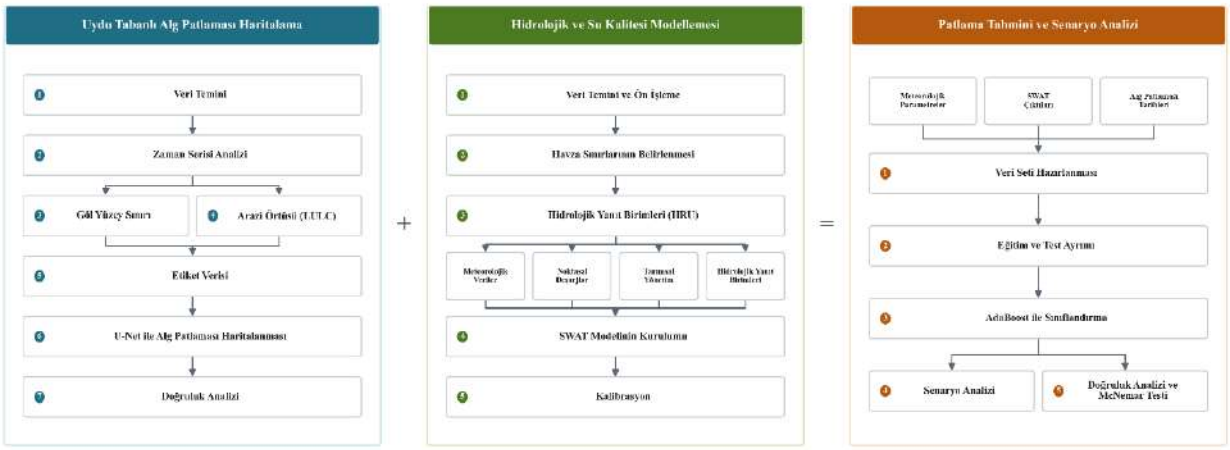
Şekil 1. Burdur Gölü havzasına ilişkin çalışma alanı.

Çalışmada, uzaktan algılama ve havza ölçekli analizler için iki farklı veri grubu kullanılmıştır. Uzaktan algılama verileri kapsamında Landsat 4-5 TM, Landsat 8-9 OLI ve Sentinel-2 MSI görüntüleri alg patlaması gerçekleşen tarihlerin belirlenmesi, derin öğrenme modellerinin eğitilmesi, uzun dönemli alg patlaması haritalarının üretilmesi ve SWAT modeline girdi oluşturacak arazi kullanımı/arazi örtüsü haritalarının elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda 1987-2010 döneminden 7 adet Landsat 4-5 TM, 2016-2021 döneminden 8 adet Landsat 8-9 OLI ve 2016-2024 döneminden 81 adet Sentinel-2 MSI olmak üzere toplam 96 adet alg patlaması gözlemlenen uydu görüntüsü kullanılmıştır.

Havza ölçekli analizler için ise topoğrafya, toprak, arazi kullanımı, meteoroloji, hidroloji, su kalitesi, tarımsal yönetim ve noktasal deşarj verilerinden oluşmaktadır. Havzanın topoğrafik yapısı, orman ve bina etkilerini azaltarak daha doğru arazi temsili sağlayan 30 m çözünürlüklü FABDEM sayısal yükseklik modeli ile temsil edilmiştir (Hawker vd., 2022). Meteorolojik veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) ait 27 istasyondan derlenmiş, veri boşlukları MSX küresel veri tabanı ile tamamlanmıştır. Debi ve su kalitesi gözlemleri, havzadaki üç izleme istasyonu için Devlet Su İşleri'nden (DSİ) temin edilmiştir.

3. YÖNTEM

Çalışmanın yöntemi, uydu görüntülerinden elde edilen uzun dönemli alg patlaması kayıtlarının havza ölçekli çevresel değişkenlerle ilişkilendirilmesi esasına dayanmakta olup üç temel aşamadan oluşmaktadır: (i) derin öğrenme ile uydu görüntülerinden uzun dönemli alg patlamalarının tespiti ve haritalanması, (ii) SWAT modeli ile havza ölçekli hidrolojik ve su kalitesi süreçlerinin simülasyonu ve (iii) su kalitesi ve meteorolojik parametreler kullanılarak alg patlaması oluşumlarının makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi ve parametre gruplarının katkısının senaryo analizi ile değerlendirilmesi (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmada izlenilen yöntem adımlarına ilişkin iş-akış şeması.

3.1. Alg Patlaması Tarihlerinin Belirlenmesi ve U-Net ile Haritalanması

Alg patlaması tarihleri, Google Earth Engine (GEE) platformunda FAI ve SFABI zaman serisi analizleriyle belirlenmiştir. Tespit güvenilirliğini artırmak amacıyla görüntü koleksiyonuna alan, zaman ve bulut filtrelemesinden oluşan üç aşamalı bir filtre işlemi uygulanmıştır. Spektral indekslere dayalı gerçekleştirilen zaman serilerindeki anomaliler yalancı renk kombinasyonuna sahip görüntüler kullanılarak görsel yorumlama ile doğrulanmıştır. Alg patlaması gözlemlenen tarihler kullanılarak eğitilen derin öğrenme modeli eğitimi için gerekli etiket veri setinin üretilmesinde Landsat görüntüleri için FAI, Sentinel-2 görüntüleri için SFABI kullanılmıştır. Göl sınırı dışındaki pikseller maskelendikten sonra gri seviye indeks haritaları, Jenks Natural Breaks (JNB) eşik değer algoritması kullanılarak ikili etiketler (Su ve alg patlaması) oluşturulmuştur.

Alg patlaması alanlarının belirlenmesinde, kodlayıcı-kod çözücü yapısına sahip evrişimsel sinir ağı mimarisi olan U-Net kullanılmıştır (Ronneberger vd., 2015). Kodlayıcı kısmında 3×3 evrişim, toplu normalleştirme, ReLU aktivasyonu ve 2×2 maksimum havuzlama işlemleriyle bağlamsal öznitelikler çıkarılırken kod çözücü yolunda 2×2 yukarı örnekleme ve atlama bağlantılarıyla aktarılan yüksek çözünürlüklü özellikler birleştirilerek uzamsal çözünürlük yeniden oluşturulmaktadır. Landsat ve Sentinel-2 görüntülerinin mekânsal ve spektral özelliklerindeki farklılık nedeniyle ayrı modeller eğitilmiştir. Model eğitimi aşamasında 14 Landsat ve 30 Sentinel-2 görüntüsü kullanılmış olup yamalar (patchler) %60 eğitim ve %40 doğrulama olacak şekilde rastgele bölünmüştür.

3.2. Havza Ölçekli Hidrolojik ve Su Kalitesi Modellemesi

Havzadaki hidrolojik süreçlerin ve kirletici taşınımının benzetimi için SWAT modeli kurulmuştur. Model kurulumu havza ayrıştırma, hidrolojik tepki birimi (HRU) üretimi, zamansal girdi veri setlerinin entegrasyonu ve tarımsal yönetim süreçlerinin tanımlanması aşamalarından oluşmaktadır. HRU'lar, AKAÖ, toprak tipi ve eğim sınıflarının benzersiz kombinasyonlarına göre üretilmiş; eğim sınıfları <%2, %2-6, %6-12, %12-20 ve >%20 olarak tanımlanmıştır. Havzada 15 rezervuar ve 20 noktasal kaynak, ilgili alt havzalara atanmıştır. 1984-2024 dönemini kapsayan 13 adet çok zamanlı AKAÖ haritası Rastgele Orman algoritmasıyla üretilmiş ve CORINE arazi örtüsü sınıflandırmasıyla bütünleştirilerek 27 temsili sınıf elde edilmiştir.

Yağış-akış benzetiminde Soil Moisture Condition yöntemi, potansiyel evapotranspirasyon hesabında ise Priestley-Taylor yöntemi tercih edilmiştir. Arazi kullanımı değişiminin ve meteorolojik değişkenliğin havza tepkileri üzerindeki zamansal etkisini koruyabilmek amacıyla döneme özgü parametre kalibrasyonu uygulanmamış; model, yerel havza koşullarını temsil eden fiziksel temelli girdilerle parametrelendirilerek bağımsız akım ve su kalitesi gözlemleriyle değerlendirilmiştir. Model çıktılarından, 46 alt havza için aylık çözünürlükte 12 hidrolojik ve su kalitesi değişkeni (CBOD, çözünmüş oksijen (ÇO), akım, mineral fosfor (MINP), NH4-N, NO2-N, NO3-N, organik azot, organik fosfor, sediment, toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP)) elde edilmiştir.

3.3. Veri Setinin Hazırlanması

Makine öğrenmesi modellerinin eğitilmesinde hedef değişken, aylık ölçekte alg patlaması oluşumu (var/yok) olarak tanımlanmıştır. Alg patlaması görülen aylar, uydu tabanlı tespit sonuçlarından patlama görülmeyen aylar ise uydu zaman serisinde herhangi bir anomalinin belirlenmediği dönemlerden seçilmiştir. Nitekim 54 patlama ve 55 patlama olmayan ay olmak üzere toplam 109 örnekten oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Eğitim ve test veri setleri arasında zamansal bağımsızlığın korunması amacıyla 2021 öncesi aylar eğitim (70 örnek), 2021 ve sonrası aylar ise bağımsız test (39 örnek) veri seti olarak ayrılmıştır.

Makine öğrenmesi algoritmalarının performansı, özniteliklerin sayısal aralıklarındaki farklılıklardan etkilenebildiğinden, model eğitimi öncesinde tüm öznitelikler minimum-maksimum normalleştirmesi kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Test veri setine ilişkin bilginin eğitim aşamasına sızmasını önlemek amacıyla bu işlem yalnızca

eğitim veri seti üzerinde uyarlanmış, aynı dönüşüm test veri setine uygulanmıştır. Tahmin değişkenleri, SWAT modelinden elde edilen 12 hidrolojik ve su kalitesi değişkeni ile bu değişkenlerden türetilen iki besin maddesi oranından (çözünmüş inorganik azotun inorganik fosfora oranı ve toplam azotun toplam fosfora oranı) oluşmaktadır. Meteorolojik değişkenler kapsamında yağış ve bağıl nem doğrudan kullanılmış olup sıcaklık, solar radyasyon ve rüzgâr hızı ise atmosferik parametrelerin farklı bileşenlerini temsil eden dört farklı indeks olarak kullanılmıştır. Sıcaklık farkı kısa dönemli termal değişkenliğin büyüklüğünü, su durgunluğu sıcak ve durgun atmosferik koşulları, termal tabakalaşma solar radyasyon ile rüzgâr hızı arasındaki dengeyi ve logaritmik solar radyasyon-rüzgâr hızı indeksi (L-SWR) bu dengeyi logaritmik ölçekte ifade etmektedir. Elde edilen tahmin değişkenleri, kaynaklarına ve fiziksel anlamlarına göre besi elementleri, su kalite parametreleri, hidroloji parametreleri ve meteorolojik parametreler olmak üzere dört gruba ayrılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Makine öğrenmesi algoritmasının eğitiminde kullanılan parametrelere ilişkin gruplandırma.

Parametre Grubu	Parametreler
Besi Elementleri	NO2-N, NH4-N, NO3-N, organik azot, organik fosfor, MINP, TN, TP, DIN/MINP, TN/TP
Su Kalite Parametreleri	ÇO ve CBOD
Hidroloji Parametreleri	Debi ve sediment
Meteorolojik Parametreler	Yağış, bağıl nem, SF, TT, SD ve L-SWR

3.4. AdaBoost Algoritması ve Senaryo Analizi

Alg patlaması oluşumunun tahmininde, sınırlı büyüklükteki veri setlerinde görece kararlı sonuçlar üretebilmesi nedeniyle AdaBoost makine öğrenmesi algoritması tercih edilmiştir. AdaBoost, zayıf sınıflandırıcıların ardışık biçimde eğitildiği ve her adımda bir önceki adımda yanlış sınıflandırılan örneklerin ağırlığının artırıldığı bir artırma yöntemidir (Freund ve Schapire, 1997). Bu ağırlıklandırma mekanizması sayesinde algoritma, sınıflar arasındaki sınıra yakın konumlanan ve ayırt edilmesi güç olan örneklere odaklanmaktadır. Nihai karar ise eğitilen zayıf sınıflandırıcıların ağırlıklı birleşimi ile üretilmektedir (Colkesen ve Ozturk, 2022).

Parametre gruplarının model başarımına katkısının ayrı ayrı değerlendirilebilmesi amacıyla senaryo analizi de çalışmaya dahil edilmiştir. Bu yaklaşımda, tüm parametrelerin birlikte kullanıldığı referans model ile belirli parametre gruplarının modelden çıkarıldığı ya da tek başına kullanıldığı modeller aynı koşullar altında karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Tablo 1'de yer alan dört parametre grubundan dokuz senaryo oluşturulmuştur (Tablo 2). İlk dört senaryo parametre gruplarının tek başına kullanıldığı durumları, S5 senaryosu yalnızca SWAT kaynaklı parametrelerin birlikte kullanıldığı durumu, S6-S8 senaryoları meteorolojik parametrelerin her bir SWAT grubuyla ikili kombinasyonlarını, S9 senaryosu ise tüm parametre gruplarının birlikte kullanıldığı durumu temsil etmektedir. Objektif bir değerlendirme gerçekleştirebilmek adına senaryolar arasında yalnızca modele verilen öznitelik kümesi değiştirilmiş olup eğitim ve test veri setleri, normalizasyon yaklaşımı ve model parametreleri sabit tutulmuştur.

Tablo 2. Senaryo analizinde kullanılan senaryolar ve parametre grupları.

Senaryo	Parametre Grupları
S1	Besi Elementleri
S2	Hidroloji Parametreleri
S3	Su Kalite Parametreleri
S4	Meteorolojik Parametreler
S5	S1 + S2 + S3
S6	S4 + S1
S7	S4 + S2
S8	S4 + S3
S9	S4 + S5

3.5. Doğruluk Analizi

SWAT model performansı, Moriasi vd. (2007) tarafından önerilen ölçütler doğrultusunda belirlilik katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimliliği (NSE) ve yüzde yanlılık (PBIAS) ile değerlendirilmiştir. Derin öğrenme ve makine öğrenmesi modellerinin başarımı ise hata matrisleri üzerinden hesaplanan F-skor ve genel doğruluk (GD) ölçütleri ile

analiz edilmiştir. Erken uyarı uygulamalarında alg patlaması görülen ve görülmeyen dönemlere ilişkin hataların farklı sonuçlar doğurması nedeniyle, GD'nin yanı sıra her iki sınıf için F-skor değerleri ayrı ayrı raporlanmıştır.

Senaryolar arasında elde edilen başarım farklarının rastlantısal olup olmadığının belirlenmesi amacıyla McNemar testi uygulanmıştır. Test, karşılaştırılan iki modelin aynı test örneklerinde farklı karar ürettiği durumları (uyumsuz çiftleri) esas almakta ve bu farklılıkların modellerden biri lehine anlamlı biçimde yığılıp yığılmadığını sınamaktadır. Test veri setinin sınırlı büyüklüğü nedeniyle ki-kare yaklaşımı yerine kesin binom testi tercih edilmiştir. Tüm parametre gruplarının kullanıldığı S9 senaryosu referans alınarak sekiz karşılaştırma yapıldığından, çoklu karşılaştırmadan kaynaklanan birinci tip hata birikimini sınırlamak amacıyla Holm düzeltmesi uygulanmış ve anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

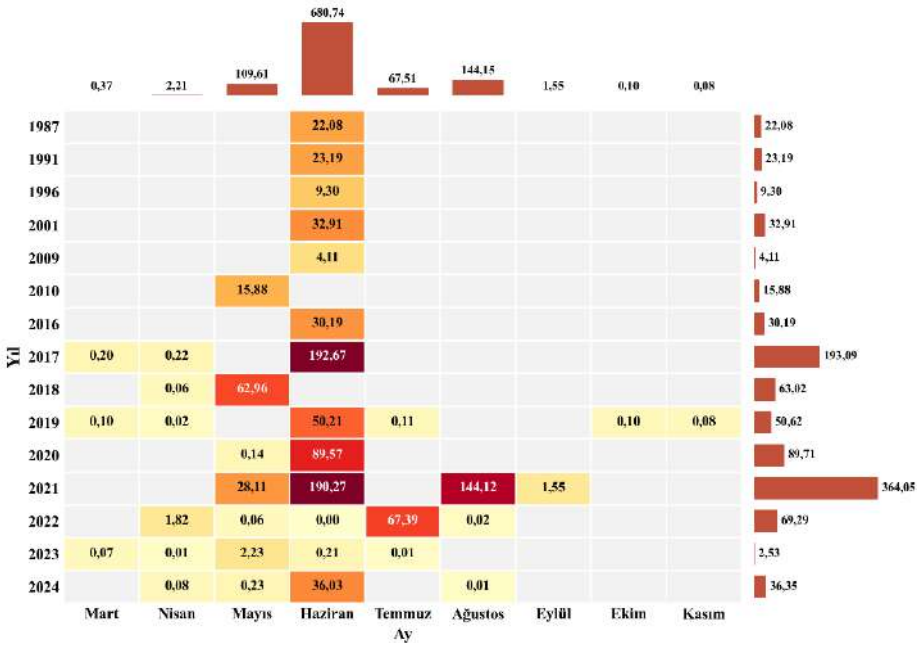
4.1. Hidrolojik ve Su Kalitesi Modelinin Performans Analizi

Ölçülen ve benzetimi yapılan aylık akım değerlerinin karşılaştırılması, modelin hem yağışlı hem de kurak dönemlerde genel akım desenlerini makul ölçüde temsil ettiğini göstermektedir. Üç debi gözlem istasyonunda R^2 değerleri 0,69-0,77 aralığında elde edilmiştir. En yüksek başarım, NSE değeri 0,67'ye ulaşan ve havzanın kuzeydoğu çıkışına yakın konumlanan D10A027 istasyonunda gözlenmiştir. Bunu D10A013 istasyonu (NSE = 0,61) izlerken, E10A013 istasyonunda NSE değeri 0,42 ile daha düşük kalmıştır. İstasyonlar arasındaki farklılıklar, kümülatif yukarı havza katkıları, tarımsal su alımları ve kısa süreli yüksek akım olaylarına ilişkin ötelenme belirsizlikleriyle ilişkilendirilebilir.

Su kalitesi değişkenlerinde de ana zamansal desenler kabul edilebilir düzeyde temsil edilmiştir. 101800001 numaralı istasyonda hidrolojik taşınım süreçleriyle yakından ilişkili parametrelerde görece tutarlı sonuçlar elde edilmiştir (NO_3-N için $R^2 = 0,65$, NSE = 0,53; TN için $R^2 = 0,63$, NSE = 0,58; sediment için $R^2 = 0,62$, NSE = 0,54). 101800004 numaralı istasyonda ise besin maddesi değişkenlerinde görece kararlı bir başarım gözlenmiştir (TN için $R^2 = 0,65$, NSE = 0,60; NO_3-N için $R^2 = 0,67$, NSE = 0,56). ÇO ve NH_4-N gibi hızlı tepki veren parametrelerde elde edilen düşük NSE değerleri, aylık zamansal çözünürlükte temsil edilmesi güç olan hızlı biyokimyasal süreçlerden kaynaklanmaktadır. Genel olarak SWAT modeli, çalışmanın amacına uygun düzeyde havzanın baskın akım, besin maddesi ve sediment dinamiklerini temsil etmiştir.

4.2. Alg Patlamalarının Uzun Dönemli Tespiti

Derin öğrenme modellerinin eğitim aşamasında kullanılmayan test görüntüleri üzerinde Landsat ve Sentinel-2 U-Net modelleri için sırasıyla %94,91 ve %91,53 genel doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Alg patlaması sınıfı için F-skor değerleri Landsat'ta %96,08, Sentinel-2'de ise %93,18 olarak hesaplanmış olup bu sonuçlar, test görüntülerinde alg patlaması piksellerinin yüksek doğrulukta ve hassas bir şekilde sınıflandırılabildiğini göstermektedir. Eğitilen modeller 96 uydu görüntüsüne uygulanarak yaklaşık kırk yıllık dönem için alg patlaması frekans haritaları üretilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Burdur Gölü yüzey alanı ve alg patlaması dağılımındaki 1987-2024 dönemine ait değişimler (km^2).

Göl morfolojisindeki belirgin değişim nedeniyle frekans haritaları hem 1987 yılına ait en geniş tarihsel göl sınırı (Şekil 3a) hem de 2024 yılına ait güncel sınır (Şekil 3b) kullanılarak üretilmiştir. 1987 sınırı, alg patlamalarının yalnızca güney havzayla sınırlı olmadığını bu alanlar tamamen kuruyana kadar gölün kuzey kesimlerinde de patlamaların

gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra göl yüzey alanı 1987'de yaklaşık 205 km² iken 2024'te 117 km²'ye gerilemiştir.

Üretilen haritalar üzerinden yapılan zamansal analizler sonucunda, çalışma dönemi boyunca kümülatif olarak 1000 km²'nin üzerinde alg patlaması alanı belirlenmiştir. Aylık dağılım incelendiğinde en yoğun oluşumların haziran ayında (680,75 km²), yıllık dağılımda ise en kritik yılın 364,06 km² ile 2021 olduğu tespit edilmiştir. Yüzey alanındaki belirgin azalmaya rağmen alg patlamalarının ağırlıklı olarak güney havzada yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, göle en önemli dış besin maddesi girdisini sağlayan Boz ve Buğduz çaylarının giriş konumlarıyla tutarlı bir davranış sergilemektedir. Ayrıca havzada baskın olan kuzey-güney yönlü rüzgâr rejiminin, alg patlamalarının gölün güney kısmına taşınmasına ve burada birikmesine katkı sağladığı düşünülmektedir.

4.3. Parametre Gruplarının Model Performansına Etkisinin Analizi

Uydu görüntülerinden elde edilen alg patlaması gerçekleşen tarihler ile havza ölçekli ve meteorolojik parametrelerin birlikte kullanıldığı modelin test veri setindeki performansı, dokuz senaryo üzerinden değerlendirilmiştir. Senaryolara ait sınıf bazlı F-skor ve GD değerleri Tablo 3'te yer almaktadır. Parametre gruplarının tek başına kullanıldığı senaryolarda GD değerleri, besi elementleri için %61,54, hidroloji parametreleri için %66,67 ve su kalite parametreleri için %64,10 seviyesinde kalmıştır. Bu üç grubun birlikte kullanıldığı S5 senaryosunda başarım %76,92'ye yükselmiş olup yalnızca meteorolojik parametrelerin kullanıldığı S4 senaryosunda elde edilen %84,62 değerinin altında kalmıştır. Meteorolojik parametrelerin herhangi bir SWAT parametre grubuyla birlikte kullanılması durumunda GD değerleri %84,62 ile %88,33 aralığına yükselmiştir. En yüksek performans, tüm parametre gruplarının kullanıldığı S9 senaryosunda %89,74 GD ve alg patlaması sınıfı için %92,00 F-skor değeriyle elde edilmiştir.

Çizelge 3. Senaryolara göre sınıf bazlı F-skor ve genel doğruluk değerleri.

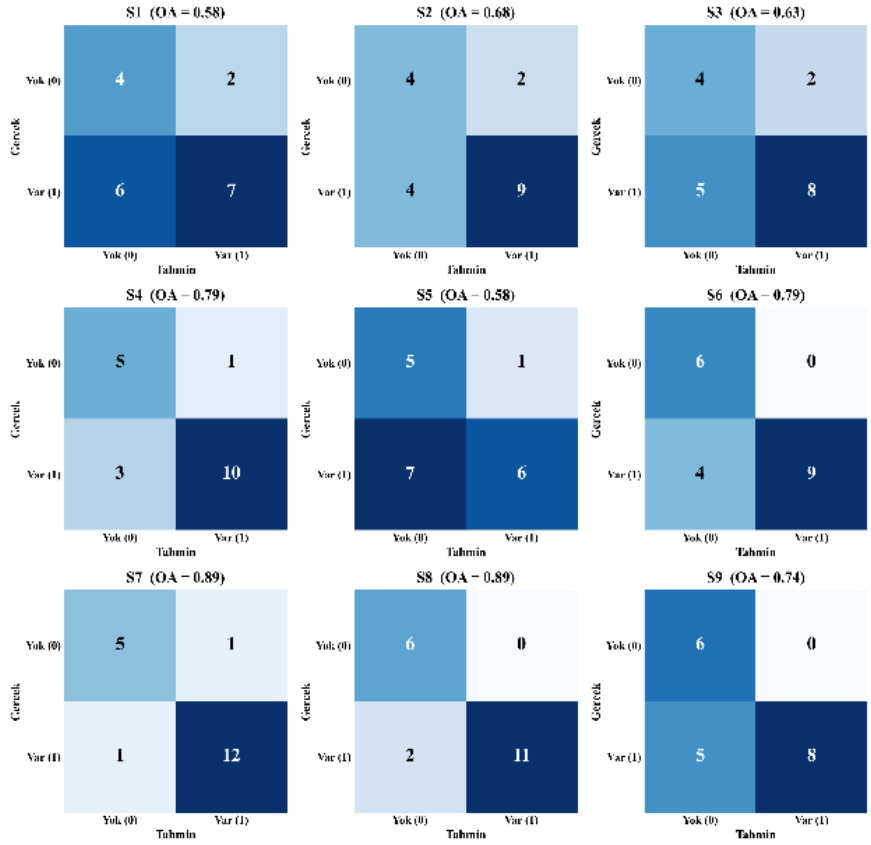
Senaryo	F-Skor (%)		GD (%)
	Alg Patlaması Var	Alg Patlaması Yok	
S1	65,12	57,14	61,54
S2	69,77	62,86	66,67
S3	66,67	61,11	64,10
S4	87,50	80,00	84,62
S5	80,00	72,73	76,92
S6	90,64	84,52	88,33
S7	89,36	83,87	87,18
S8	88,00	78,57	84,62
S9	92,00	85,71	89,74

Senaryolar arasındaki performans farklarının istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığı, tüm parametre gruplarının kullanıldığı S9 senaryosu referans alınarak McNemar testi ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre S9 senaryosu, tek bir SWAT parametre grubunun kullanıldığı S1 ($p = 0,0034$), S2 ($p = 0,0117$) ve S3 ($p = 0,0020$) senaryolarından anlamlı biçimde farklılaşmaktadır. Buna karşılık meteorolojik parametreleri içeren S4, S6, S7 ve S8 senaryoları ile tüm SWAT parametre gruplarını birleştiren S5 senaryosunda anlamlı bir fark belirlenememiştir. Özellikle S6 ve S7 senaryolarında elde edilen $p = 1,0000$ değeri, bu senaryoların test veri setinde S9 senaryosuyla neredeyse tümüyle aynı kararları ürettiğini göstermektedir.

Çizelge 4. Tüm parametre gruplarının kullanıldığı S9 senaryosu ile diğer senaryolar arasında yapılan McNemar testi sonuçları.

Senaryo Çifti	p-Value	Anlamlılık ($\alpha = 0,05$)
S9 – S1	0,0034	Anlamlı
S9 – S2	0,0117	Anlamlı değil
S9 – S3	0,0020	Anlamlı
S9 – S4	0,6250	Anlamlı değil
S9 – S5	0,1250	Anlamlı değil
S9 – S6	1,0000	Anlamlı değil
S9 – S7	1,0000	Anlamlı değil
S9 – S8	0,6250	Anlamlı değil

Senaryoların ürettiği hataların hangi sınıfta yoğunlaştığının belirlenebilmesi amacıyla, her senaryo için test veri setine ilişkin hata matrisleri incelenmiştir (Şekil 4). SWAT parametre gruplarının tek başına kullanıldığı senaryolarda hataların büyük bölümünün yanlış negatif niteliğinde olduğu görülmektedir. Test dönemindeki 24 alg patlaması gözleminden 10'u S1, 9'u S2 ve 10'u S3 senaryosunda tespit edilememiştir. Meteorolojik parametrelerin modele dâhil edilmesiyle kaçırılan patlama sayısı belirgin biçimde azalmış olup S4 ve S7 senaryolarında 3'e, S6 ve S8 senaryolarında 2'ye, S9 senaryosunda ise 1'e gerilemiştir. Buna karşılık alg patlaması görülmeyen sınıfa ait yanlış pozitif sayısı senaryolar arasında 2 ile 5 arasında dar bir aralıkta kalmıştır. Bu durum, meteorolojik parametrelerin başlıca katkısının patlama olaylarının yakalanması yönünde olduğunu, patlama görülmeyen dönemlerin ayırt edilmesinde ise parametre grupları arasında belirgin bir farklılık bulunmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Farklı senaryolara göre eğitilen makine öğrenmesi algoritmasının test veri setine ilişkin hata matrisleri.

Senaryolar arasında elde edilen bu farklılıklar göz önünde bulundurulduğunda, çalışma alanında alg patlamalarının zamanlamasının büyük ölçüde meteorolojik ve fiziksel koşullarla ilişkili olduğu görülmektedir. Havza genelinde besi elementi yüklerinin sürekli olarak yüksek seyretmesi, bu parametrelerin tek başlarına patlama dönemlerini ayırt edici bir sinyal taşımamasına yol açmış olabileceği düşünülmektedir. Diğer taraftan besi elementlerinin meteorolojik parametrelerle birlikte kullanılması (S6), yalnızca meteorolojik parametrelerin kullanılmasına (S4) kıyasla başarımı artırmıştır. Bu sonuç, besi elementlerinin belirleyici olmamakla birlikte tamamlayıcı bir bilgi taşıdığına işaret etmektedir. Ayrıca, S6 ve S7 senaryolarında McNemar testinde kullanılan uyumsuz çift sayısının sırasıyla 1 ve 3 olması, bu karşılaştırmalarda testin ayırt etme gücünün sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle anlamlı fark belirlenememesi, söz konusu senaryoların S9 senaryosuyla eşdeğer olduğunun kanıtı olarak değil, mevcut örneklem büyüklüğünde farkın ayırt edilemediği biçiminde yorumlanabilmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, Burdur Gölü'nde alg patlamalarının uzun dönemli tespiti ve bu oluşumları etkileyen parametre gruplarının belirlenmesi amacıyla uydu tabanlı derin öğrenme, havza ölçekli hidrolojik ve su kalitesi modellemesi ile makine öğrenmesini bütünleşik olarak ele alan bir yaklaşım önerilmiştir. Landsat ve Sentinel-2 görüntüleri üzerinde eğitilen U-Net modelleri, test görüntülerinde yüksek doğrulukta alg patlamalarının hassas biçimde haritalanabildiğini göstermiştir.

Elde edilen sonuçlarda, göl yüzeyinde yaklaşık 40 yıllık periyotta 1000 km²'nin üzerinde alg patlamasının mevcudiyetini ortaya koymuş olup en yoğun oluşumların haziran ayında ve en kritik yılın 2021 olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, alg patlamalarının ağırlıklı olarak Boz ve Buğduz çaylarının giriş yaptığı güney havzada yoğunlaşması, dış besin maddesi girdilerinin alg patlamalarının göl yüzey alanındaki dağılımları üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir.

SWAT modelinden elde edilen havza ölçekli değişkenler ile meteorolojik verilerin birlikte kullanıldığı AdaBoost modeli, test veri setinde %89,74 genel doğruluk sağlamıştır. Parametre gruplarının katkısının değerlendirildiği senaryo analizi, meteorolojik parametrelerin model başarımındaki belirleyici bileşen olduğunu ortaya koymuştur. Besi elementleri, su kalite ve hidroloji parametreleri tek başlarına kullanıldığında nispeten düşük performans göstermiş ancak besi elementlerinin meteorolojik parametrelerle birlikte kullanılması performansı artırarak bu grubun tamamlayıcı bir bilgi taşıdığını göstermiştir. Meteorolojik parametreler ve besi elementlerinden oluşan 16 parametreli modelin, 20 parametreli tüm özelliklerin kullanıldığı modelle istatistiksel olarak eşdeğer başarım sağlaması, operasyonel erken uyarı uygulamalarında daha az sayıda parametreyle çalışılabileceğine işaret etmektedir.

Çalışmanın en önemli limitasyonları arasında aylık gözlem sayısının görece az olması, patlama görülmeyen ayların seçiminde kış aylarının öne çıkması nedeniyle mevsimsel bir seçim yanlılığının bulunabilmesi ve SWAT kaynaklı tahmin değişkenlerine ilişkin belirsizliğin makine öğrenmesi aşamasına yayılması yer almaktadır. Ayrıca test veri setinin 39 gözlemden oluşması, senaryolar arasındaki küçük başarım farklarının istatistiksel olarak ayırt edilebilmesini sınırlamaktadır. Bu nedenle önerilen yaklaşım, tam anlamıyla bir tahmin sistemi değil, erken uyarı geliştirmeye yönelik bir çerçeve olarak değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalarda daha yüksek zamansal çözünürlüklü yerinde ve uzaktan algılama gözlemlerinin dâhil edilmesi ile yaklaşımın farklı göl sistemlerine transfer edilebilirliğinin incelenmesi hedeflenmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 124Y295 numaralı "Burdur Gölü'ndeki Alg Patlamalarının Havza Özellikleri ile Entegre Edilerek Uydu Görüntüleri ve Derin Öğrenme Teknikleri ile Araştırılması ve Transfer Edilebilir Bir Tahminleme Yöntemi Geliştirilmesi" başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.

Çelekli, A. ve Zariç, Ö.E., 2026. Ecoregional assessment of Turkish lakes using phytoplankton metrics and multimetric approaches. *Aquatic Sciences*, 88: 91.

Celen, M., Karpuzcu, M., Onkal Engin, G., Tetzlaff, B. ve Wendland, F., 2014. Modelling total phosphorus input pathways in the Porsuk reservoir catchment in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 72(12): 5019-5034.

Colkesen, I., Saygi, M., Ozturk, M.Y. ve Altuntas, O.Y., 2025. U-shaped deep learning networks for algal bloom detection using Sentinel-2 imagery: Exploring model performance and transferability. *Journal of Environmental Management*, 381: 125152.

Colkesen, I., & Ozturk, M. Y. 2022. A comparative evaluation of state-of-the-art ensemble learning algorithms for land cover classification using WorldView-2, Sentinel-2 and ROSIS imagery. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(10), 942.

Freund, Y. ve Schapire, R.E., 1997. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, 55(1): 119-139.

Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C. ve Neal, J., 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2): 024016.

Hu, C., 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2118-2129.

Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H. ve Visser, P.M., 2018. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 16: 471-483.

Kocasarı, F.S., Güllé, İ., Kocasarı, S., Pekkaya, S. ve Mor, F., 2015. The occurrence and levels of cyanotoxin nodularin from Nodularia spumigena in the alkaline and salty Lake Burdur, Turkey. *Journal of Limnology*, 74(3): 520-529.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. ve Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.

NHYP, 2020. *Havza Koruma Eylem Planlarının Nehir Havza Yönetim Planlarına Dönüştürülmesi için Teknik Yardım Projesi*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

Paerl, H.W. ve Otten, T.G., 2013. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 65: 995-1010.

Ronneberger, O., Fischer, P. ve Brox, T., 2015. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Münih, Almanya, syf: 234-241.

Saygi, M., Colkesen, I. ve Celen, M., 2025. Efficient detection of floating algal blooms using Sentinel-2 imagery: The introduction of the SFABI index. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-6, syf: 251-258.

Scavia, D., Wang, Y.C., Obenour, D.R., Apostel, A., Basile, S.J., Kalcic, M.M. ve Steiner, A.L., 2021. Quantifying uncertainty cascading from climate, watershed, and lake models in harmful algal bloom predictions. *Science of the Total Environment*, 759: 143487.

Śliwińska-Wilczewska, S., Cieszyńska, A., Konik, M., Maculewicz, J. ve Latała, A., 2019. Environmental drivers of bloom-forming cyanobacteria in the Baltic Sea: Effects of salinity, temperature, and irradiance. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219: 139-150.

Wang, Q., Wang, T., Zhao, S., Yang, K., Wen, X., Zhao, M. ve Zhang, B., 2023. Comprehensive meteorological factors analysis and lag correlation study for cyanobacterial blooms in shallow plateau lake. *Ecological Indicators*, 153: 110394.

KLASİK VE KUANTUM TABANLI DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİNİN ARAZİ KULLANIMI VE ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Fevzi DAŞ[1], Mitat Can YILDIZ[2], Rüştü ÇALLI[3], Emirhan ÖZDEMİR[4], Aliihsan ŞEKERTEKİN[5]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, fevzi.das@igdir.edu.tr
[2]Öğr. Gör., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, mcan.yildiz@igdir.edu.tr
[3]Öğr. Gör., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, rustu.calli@igdir.edu.tr
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr
[5]Prof. Dr., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, aliihsan.sekertekin@igdir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul'un Arnavutköy ilçesindeki Sazlıdere Barajı çevresinde belirlenen çalışma alanı için Sentinel-2 L2A uydu görüntülerinden türetilen beş spektral indeks (NDVI, NDWI, NDBI, EVI, BSI) kullanılarak Kuantum Destekli Vektör Makinesi (QSVM) ile klasik Destek Vektör Makinesi (SVM) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Referans etiketler ise Google Dynamic World veri setinden sağlanmıştır. Su, Bitki, Tarım ve Kentsel sınıflarının her birinden 100 piksel örneklenmiştir. Toplam 400 pikselin %80'i (320 piksel) eğitim, %20'si (80 piksel) test verisi olarak kullanılmıştır. Beş indeks, yalnızca eğitim setine fit edilen bir StandardScaler ile normalize edilip yine yalnızca eğitim setine fit edilen bir Temel Bileşen Analizine (PCA) tabi tutulmuştur. PC1 ve PC2 toplam varyansın %98,88'ini açıkladığından QSVM'de 2 qubit kullanılmıştır. Klasik SVM'de RBF çekirdeği kullanılmış ve C hiperparametresi beş katlı çapraz doğrulama ile belirlenmiştir. Bu model ile %91,25 doğruluk elde edilmiştir. QSVM için Qiskit FidelityQuantumKernel kullanılarak ZZFeatureMap (reps=1, 2) ve ZFeatureMap (reps=1, 2) şeklinde dört konfigürasyon test edilmiştir. Bu dört konfigürasyonda açı kodlama aralığı sabit tutulmuş ([-π,π]) ve en iyi sonucu ZFeatureMap (reps=1) %68,75 doğrulukla vermiştir. Beşinci bir QSVM konfigürasyonunda açı kodlama aralığı ve C hiperparametresi birlikte, yine sızıntısız bir tarama ile seçilmiştir. Bu konfigürasyon (ZFeatureMap, reps=1, açı=π/16, C=10000) %88,75 doğruluğa ulaşmış ve klasik SVM'den yalnızca 2.5 puan geride kalmıştır. Aynı 80 örneklik test kümesi çalışma boyunca birden fazla kez kullanılmıştır. Bu nedenle sonuçlar bağımsız bir doğrulama değil, karşılaştırmalı bir değerlendirme olarak yorumlanmalıdır. Elde edilen sonuçlar, gürültüsüz bir kuantum kernel simülasyonunda dahi kodlama ve hiperparametre seçiminin QSVM performansını belirlediğini göstermektedir. Kernel hesaplama maliyeti ise donanım gürültüsünden bağımsız, yapısal bir ölçeklenebilirlik kısıtı oluşturmaktadır. Özellik boyutunun etkisini ayırmak için klasik SVM yalnızca PC1-PC2 ile de eğitilmiştir. Bu model de %88.75 doğruluk elde etmiş; tahminleri en iyi QSVM konfigürasyonuyla birebir örtüşmüştür.

Anahtar Sözcükler: arazi örtüsü sınıflandırması, destek vektör makineleri (SVM), kuantum destek vektör makineleri (QSVM), kuantum makine öğrenmesi (QML), Sentinel-2

ABSTRACT

COMPARISON OF LAND USE AND LAND COVER CLASSIFICATION PERFORMANCES OF CLASSICAL AND QUANTUM-BASED SUPPORT VECTOR MACHINES

In this study, a Quantum Support Vector Machine (QSVM) and a classical Support Vector Machine (SVM) were comparatively evaluated using five spectral indices (NDVI, NDWI, NDBI, EVI, and BSI) derived from Sentinel-2 L2A satellite imagery for the study area defined around the Sazlıdere Dam in the Arnavutköy district of Istanbul. Reference labels were obtained from the Google Dynamic World dataset. A total of 100 pixels were sampled from each of the Water, Vegetation, Agriculture, and Urban classes. Of the 400 pixels, 80% (320 pixels) were used for training and 20% (80 pixels) for testing. The five indices were normalized using a StandardScaler fitted only on the training set and then subjected to Principal Component Analysis (PCA), also fitted only on the training set. Since PC1 and PC2 explainedIn this study, a Quantum Support Vector Machine (QSVM) and a classical Support Vector Machine (SVM) were comparatively evaluated using five spectral indices (NDVI, NDWI, NDBI, EVI, and BSI) derived from Sentinel-2 L2A satellite imagery for the study area defined around the Sazlıdere Dam in the Arnavutköy district of Istanbul. 98.88% of the total variance, two qubits were used in the QSVM. For the classical SVM, an RBF kernel was used, and the C hyperparameter was determined through five-fold cross-validation. This model achieved an accuracy of 91.25%. For the QSVM, four configurations were tested using Qiskit's FidelityQuantumKernel: ZZFeatureMap (reps=1, 2) and ZFeatureMap (reps=1, 2). For these four configurations, the angle-encoding range was fixed at [-π, π], and the best result was obtained with ZFeatureMap (reps=1), achieving an accuracy of 68.75%. In a fifth QSVM configuration, the angle-encoding range and the C hyperparameter were jointly selected using a leakage-free search procedure. This configuration (ZFeatureMap, reps=1, angle=π/16, C=10000) achieved an accuracy of 88.75%, only 2.5 percentage points lower than the classical SVM. The same test set of 80 samples was used multiple times throughout the study. Therefore, the results should be interpreted as a comparative evaluation rather than an independent validation. The findings show that, even in a noiseless quantum kernel simulation, encoding and hyperparameter selection play a decisive role in QSVM performance. Kernel computation cost, however, represents an inherent scalability constraint independent of hardware noise. To isolate the effect of feature dimensionality, the classical SVM

was also trained using only PC1 and PC2. This model also achieved an accuracy of 88.75%, and its predictions were identical to those of the best-performing QSVM configuration.

Keywords: land cover classification, quantum machine learning (QML), quantum support vector machines (QSVM), Sentinel-2, support vector machines (SVM)

1. GİRİŞ

Arazi örtüsünün doğru ve güncel biçimde haritalanması; kentsel büyümenin izlenmesi, tarım alanlarının yönetimi, doğal kaynakların planlanması ve iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Uzaktan algılama verilerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırılması bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Destek Vektör Makineleri (SVM), yüksek boyutlu spektral verilerde güçlü genelleme yeteneği göstermesi ve sınırlı sayıda eğitim örneğiyle çalışabilmesi nedeniyle uzaktan algılama çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Mountrakis vd., 2011; Melgani ve Bruzzone, 2004).

Kuantum hesaplama, makine öğrenmesi problemleri için yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Özellikle kuantum çekirdek yöntemleri, veriyi yüksek boyutlu Hilbert uzaylarına aktararak karmaşık örüntülerin sınıflandırılmasında avantaj sağlama potansiyeline sahiptir (Biamonte vd., 2017; Havlíček vd., 2019; Schuld ve Killoran, 2019). Kuantum Destek Vektör Makinesi (QSVM) yaklaşımı ilk olarak Rebentrost vd. (2014) tarafından büyük veri sınıflandırmasında kuantum hızlandırması amacıyla önerilmiştir. Havlíček vd. (2019) ise günümüzün gürültülü ara ölçekli kuantum (NISQ) sistemlerinde uygulanabilecek kuantum çekirdek tabanlı bir yaklaşım geliştirmiştir. Bununla birlikte, kuantum yöntemlerinin pratikte ne ölçüde avantaj sağlayabileceği ve hangi veri türleri ile kodlama yöntemlerinde başarılı olabileceği henüz açık değildir (Preskill, 2018; Cerezo vd., 2021).

Bu çalışmada, Sentinel-2 çok bantlı uydu görüntülerinden türetilen spektral indeksler kullanılarak QSVM ile klasik SVM'nin arazi örtüsü sınıflandırma performansı karşılaştırılmaktadır. Çalışma, gerçek kuantum donanımı (QPU) yerine, Qiskit FidelityQuantumKernel kullanılarak gürültüsüz bir kuantum simülasyonu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burada gözlemlenen iki kısıt vardır: eğitim Gram matrisinin yaklaşık $O(n^2)$ sayıda ikili kernel değerlendirmesi gerektirmesi ve sonuçların kodlama/hiperparametre seçimine duyarlı olması. Bu kısıtlar NISQ donanımına özgü gürültü etkilerinden bağımsızdır. Gerçek donanım gürültüsünün etkisi bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Çalışmanın temel katkısı iki yönlüdür. Birincisi, küçük ölçekli ve dört sınıflı gerçek bir uzaktan algılama veri setinde birden fazla kuantum özellik haritasının sızıntısız bir metodolojiyle karşılaştırılmasıdır. İkincisi ise, açı kodlama aralığı ile C hiperparametresinin birlikte seçiminin model performansı üzerindeki etkisinin nicel olarak ortaya konmasıdır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Klasik makine öğrenmesi yöntemleri, uzaktan algılamada arazi örtüsü sınıflandırması için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Destek Vektör Makineleri, çekirdek hilesi (kernel trick) sayesinde doğrusal olarak ayrılamayan sınıfları yüksek boyutlu bir uzayda ayırabilir. Bu özellik sayesinde hiperspektral ve çok bantlı uydu görüntüsü sınıflandırmasında yaygın biçimde kullanılmıştır (Cortes ve Vapnik, 1995; Melgani ve Bruzzone, 2004). Mountrakis vd. (2011), SVM'nin uzaktan algılamadaki uygulamalarını gözden geçirmiştir. Bu çalışmaya göre SVM, sınırlı eğitim örneğiyle ve yüksek boyutlu özellik uzaylarında dahi kararlı performans göstermektedir. Araştırmacılar bunu SVM'nin bu alandaki popülerliğinin temel nedeni olarak sunmuştur.

Kuantum makine öğrenmesinin teorik temelleri de son yıllarda çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Biamonte vd. (2017), kuantum makine öğrenmesi alanını kapsamlı biçimde gözden geçirmiş ve kuantum hesaplamanın makine öğrenmesi görevlerinde sağlayabileceği avantajları tartışmıştır. Havlíček vd. (2019), günümüzde yaygın olarak kullanılan kuantum çekirdek sınıflandırma yaklaşımını önermiştir. Bu yaklaşımda veri, kuantum bir özellik haritası aracılığıyla yüksek boyutlu bir Hilbert uzayına gömülür. Çekirdek fonksiyonu olarak da bu uzaydaki kuantum durumları arasındaki fidelity ($|\langle\varphi(x)|\varphi(z)\rangle|^2$) kullanılır. Bu çalışmada kullanılan FidelityQuantumKernel yaklaşımı da aynı temele dayanmaktadır. Schuld ve Killoran (2019), kuantum özellik haritalarını "kuantum Hilbert uzaylarında öznitelik mühendisliği" perspektifinden ele almıştır. Araştırmacılar, farklı kodlama stratejilerinin (örneğin açı kodlama, dolanıklık yapısı) elde edilen çekirdek fonksiyonunun ayırt ediciliğini nasıl etkilediğini incelemiştir. Bu çalışmadaki ZFeatureMap/ZZFeatureMap karşılaştırması ve açı-kodlama taraması, bu perspektifle doğrudan ilişkilidir.

Preskill (2018), mevcut NISQ döneminin donanımsal kısıtlarını tanımlamıştır. Bu kısıtlar arasında gürültü, sınırlı qubit sayısı ve sınırlı devre derinliği yer almaktadır. Cerezo vd. (2021) ise devre parametrelerinin eğitilmesine dayanan kuantum algoritmalarının pratikte karşılaştığı eğitilebilirlik ve ölçeklenebilirlik sorunlarını gözden geçirmiştir. Bu çalışmadaki QSVM çekirdek hesaplaması devre parametrelerinin eğitimini içermemektedir. Dolayısıyla bu ailenin doğrudan bir üyesi değildir. Yine de ölçeklenebilirlik tartışması bu çalışmayla ilgilidir. Huang vd. (2021), kuantum makine öğrenmesi modellerinin performansının yalnızca devre tasarımına değil, eğitim verisinin miktarına ve yapısına

da güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, mevcut çalışmadaki sınırlı örneklem büyüklüğünün (400 piksel) bir sınırlama olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

Kuantum makine öğrenmesi, uzaktan algılamaya henüz sınırlı sayıda çalışmayla uygulanmıştır ve bu çalışmalar çoğunlukla kavram-kanıtlama (proof-of-concept) niteliğindedir. Zaidenberg vd. (2021), kuantum makine öğrenmesinin uzaktan algılama görüntü sınıflandırmasındaki potansiyel avantajlarını kavramsal düzeyde tartışmıştır. Yazarlar ayrıca mevcut açık kaynaklı kuantum platformlarının pratik darboğazlarına (qubit sayısı, simülasyon süresi) değinmiştir. Delilbasic vd. (2021), bu çalışmayla aynı problem ailesine giren bir çalışma yapmıştır: çeşitli QSVM formülasyonlarını uzaktan algılama veri setleri üzerinde sınamış ve klasik SVM ile karşılaştırmıştır.

Otgonbaatar ve Datcu (2022), Sentinel-2 tabanlı EuroSAT veri setini parametreli kuantum kapılarıyla sınıflandırmış ve 17 qubit kullanan bir model geliştirmiştir. Bu, kuantum makine öğrenmesi uygulamalarında qubit sayısının hâlâ küçük tutulduğunu gösteren bir örnektir. Sebastianelli vd. (2022), kuantum katmanlarını klasik evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisiyle birleştiren hibrit bir yaklaşımı yine EuroSAT verisi üzerinde değerlendirmiştir. EuroSAT'ın bitki, kentsel ve su alt kümelerinde ayrı eğitilen ince (fine-grained) sınıflandırıcılar için %94-99 aralığında doğruluk ve F1-skoru elde etmişlerdir. Bütünleşik kaba-ince (coarse-to-fine) sınıflandırma sistemi için ise her iki metrikte %97 bildirmişlerdir. Ancak bu çalışma kuantum çekirdek tabanlı değildir. Çalışma, parametreli kuantum devrelerinin bir sinir ağı katmanı olarak kullanıldığı farklı bir mimari ailesine (hibrit QNN) aittir. Bu nedenle mevcut çalışmayla doğrudan karşılaştırılamaz.

Literatürde kuantum makine öğrenmesinin uzaktan algılama verilerine uygulanabileceğini gösteren çalışmalar bulunmakla birlikte, bu alandaki araştırmalar henüz sınırlıdır. Özellikle kodlama hiperparametrelerinin (açı aralığı gibi) performans üzerindeki etkisinin sızıntısız bir metodolojiyle sistematik olarak nicelleştirildiği çalışmalar azdır. Bu çalışma, dört farklı kuantum özellik haritası konfigürasyonunu karşılaştırarak ve açı-kodlama aralığı × C hiperparametresi taraması yaparak bu boşluğa katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

3. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

Çalışma alanı, İstanbul'un Arnavutköy ilçesindeki Sazlıdere Barajı çevresinde belirlenmiştir (28.610°D–28.690°D, 41.150°K–41.210°K). Alan; baraj gölünün bir bölümünün yanı sıra bitki örtüsü, tarım ve kentsel/çıplak alanları içermektedir. Bu çeşitlilik, farklı arazi örtüsü sınıflarının aynı çalışma alanında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. NDVI, NDWI, NDBI, EVI ve BSI indekslerinin çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı.

Ana veri kaynağı olarak Google Earth Engine (GEE) üzerinden erişilen Copernicus Sentinel-2 L2A (atmosferik düzeltmeli) ürünü kullanılmıştır (Gorelick vd., 2017). 26 Temmuz 2023 tarihli, T35TPF karo numaralı, bulut oranı %5'in altında olan bir sahne seçilmiştir. B2 (mavi), B3 (yeşil), B4 (kırmızı), B8 (yakın kızılötesi), B11 ve B12 (kısa dalga kızılötesi) bantları kullanılmıştır. Bantlar 20 m mekânsal çözünürlüğe yeniden örneklenmiş ve EPSG:32635 koordinat sisteminde indirilmiştir. Çalışma alanı 343 × 341 pikselden oluşmaktadır. Toplam 116.963 pikselin 112.421'inde tüm bantlar için geçerli değer bulunmaktadır.

Referans sınıf etiketleri Google Dynamic World (DW) veri setinden elde edilmiştir (Brown vd., 2022). Dynamic World, Sentinel-2 görüntüleriyle eş zamanlı ve piksel tabanlı arazi örtüsü bilgisi sağlamaktadır. Böylece farklı tarihlere ait veri kaynaklarının kullanılmasından kaynaklanabilecek zamansal uyumsuzluk azaltılmıştır. Bununla birlikte, Dynamic World etiketlerinin otomatik sınıflandırmaya dayandığı ve etiket hataları içerebileceği göz önünde

bulundurulmalıdır. DW'nin orijinal 9 sınıfı, çalışmanın dört sınıflı şemasına aşağıda Çizelge 1'de gösterildiği gibi yeniden eşlenmiştir:

Çizelge 1. DW sınıflarının çalışmanın dört sınıflı şemasına eşlenmesi.

Sınıf ID	Sınıf Adı	DW Kaynak Sınıfları
0	Su	{0, 3} (water, flooded_vegetation)
1	Bitki	{1, 2, 5} (trees, grass, shrub_and_scrub)
2	Tarım	{4} (crops)
3	Kentsel	{6, 7} (built, bare)

4. YÖNTEM

4.1. Ön İşleme ve Özellik Mühendisliği

Sentinel-2 bant değerleri 10.000'e bölünerek yüzey yansıtım değerlerine dönüştürülmüştür. Ardından NDVI, NDWI, NDBI, EVI ve BSI olmak üzere beş spektral indeks hesaplanmıştır. NDVI, yakın kızılötesi ve kırmızı bantlar kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Tucker, 1979) :NDVI = (B8 − B4) / (B8 + B4) (1)

Su alanlarının belirlenmesinde yeşil ve yakın kızılötesi bantlara dayanan NDWI kullanılmıştır (McFeeters, 1996):

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8) \quad (2)$$

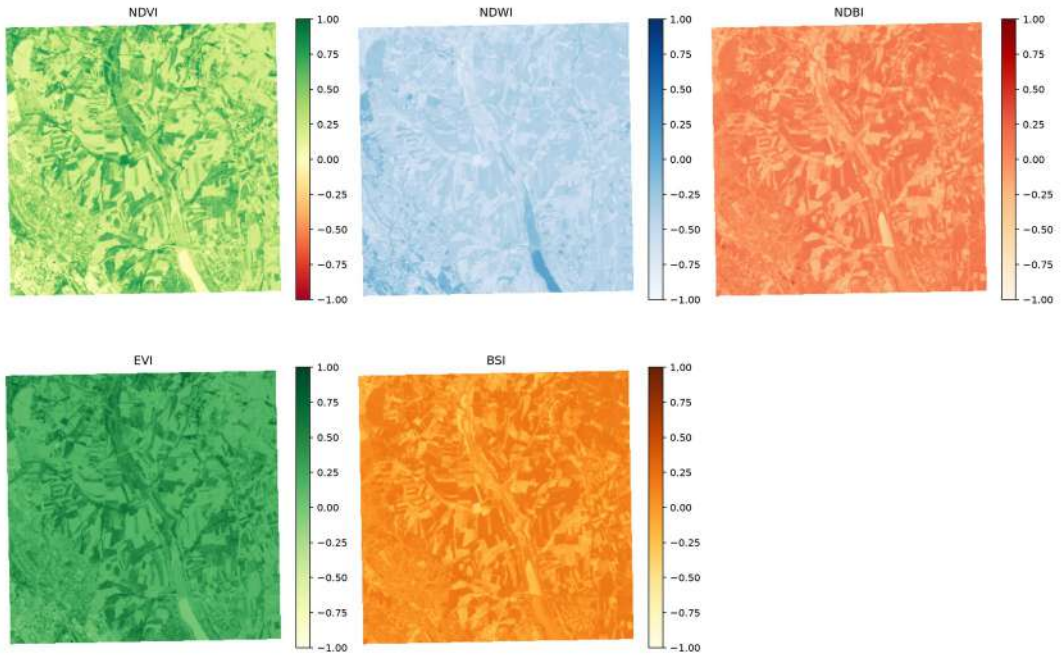
Yapılaşmış alanların belirlenmesi için NDBI hesaplanmıştır (Zha vd., 2003):

$$NDBI = (B11 - B8) / (B11 + B8) \quad (3)$$

Bitki örtüsünün değerlendirilmesinde EVI kullanılmış ve elde edilen değerler −1 ile 1 aralığında sınırlandırılmıştır (Huete vd., 2002): $EVI = 2.5 \times (B8 - B4) / (B8 + 6B4 - 7.5B2 + 1)$ (4)

Son olarak, çıplak toprak ile kentsel alanların ayrımını desteklemek amacıyla BSI hesaplanmıştır (Rikimaru vd., 2002): $BSI = ((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2))$ (5)

Denklem (1)–(5) kullanılarak hesaplanan beş spektral indeksin çalışma alanındaki uzamsal dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.

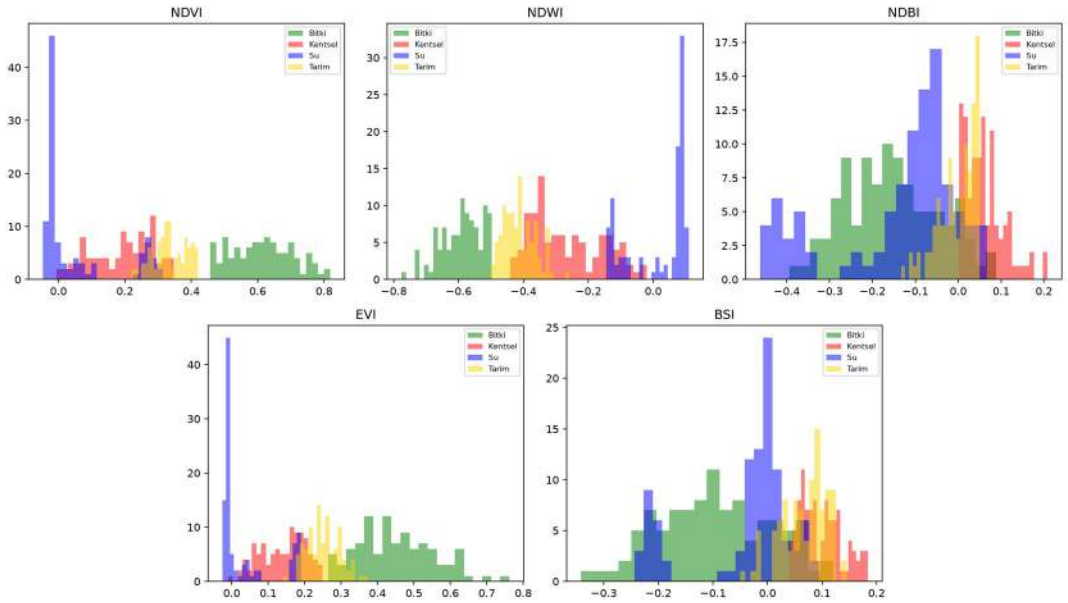


Şekil 1. NDVI, NDWI, NDBI, EVI ve BSI indekslerinin çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı.

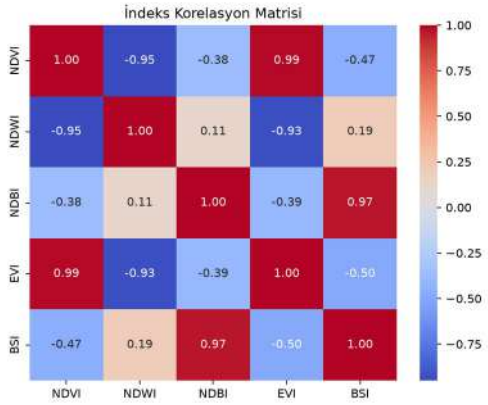
4.2. Örnekleme

Her sınıf için spektral saflık eşikleri uygulanmıştır. Bu eşikler yalnızca ilgili sınıfın kendi DW-etiketli piksellerine uygulanmıştır. Su (NDWI > −0.15), Bitki (NDVI > 0.45), Tarım (0.20 ≤ NDVI ≤ 0.42 ve NDBI < 0.05), Kentsel (NDBI > 0.00 ve NDVI < 0.35). Bu eşikleri karşılayan piksellerden sınıf başına en fazla 100 olacak şekilde rastgele

örnekleme yapılmıştır (RANDOM_SEED=42). Toplam 400 piksel örneklenmiştir (4 sınıf × 100). Uygulamada tüm sınıflar için eşiği karşılayan piksel sayısı 100'ün üzerinde kalmıştır. Bu nedenle eşik gevşetme yedek mekanizmasına ihtiyaç duyulmamıştır (Şekil 2, Şekil 3). Bu, bilinçli bir spektral saflık örneklemesi stratejisi olup ilgili sınırlama Bölüm 6'da tartışılmıştır.



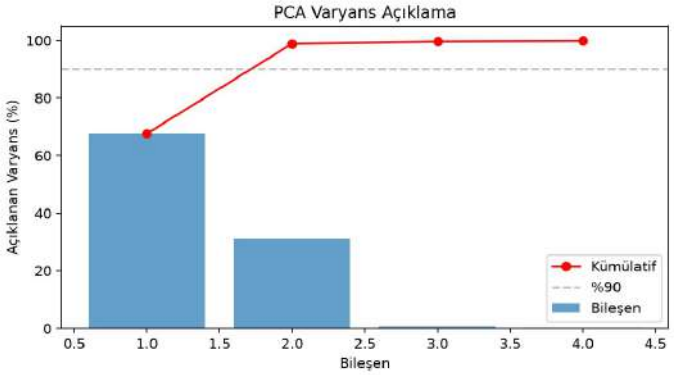
Şekil 2. Örneklenen 400 pikselin sınıf başına beş indeks üzerindeki histogram dağılımı.



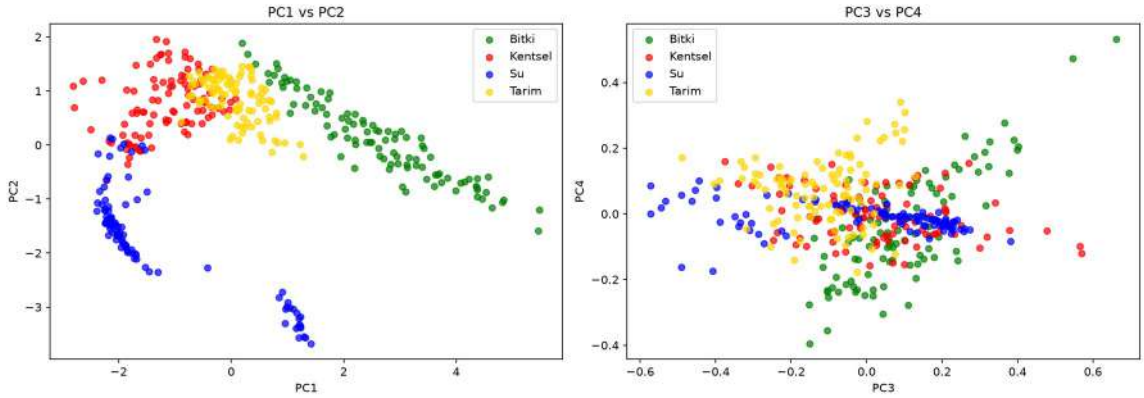
Şekil 3. Beş spektral indeks arasındaki Pearson korelasyon matrisi (örneklenen 400 piksel üzerinden). NDVI-EVI (r=0.99) ve NDBI-BSI (r=0.97) arasındaki yüksek korelasyon, bu indeks çiftlerinin kısmen örtüşen bilgi taşıdığını göstermektedir.

4.3. Boyut İndirgeme

Veri sızıntısını önlemek amacıyla eğitim/test ayrımı, PCA'dan önce ve ham beş indeks üzerinde yapılmıştır. Ayrım %80/%20 oranında, sınıf oranı korunarak (stratified) ve RANDOM_SEED=42 ile gerçekleştirilmiştir (320 eğitim / 80 test piksel, sınıf başına 80/20). Beş indeks önce yalnızca eğitim setine fit edilen bir StandardScaler ile normalize edilmiştir. Ardından yine yalnızca eğitim setine fit edilen bir PCA'ya (n_components=4) tabi tutulmuştur. Bu dönüşüm daha sonra hem eğitim hem test setine transform olarak uygulanmıştır. PC1 ve PC2 birlikte toplam varyansın %98.88'ini açıklamaktadır (PC1 tek başına ~%68, PC2 ~%31). Klasik SVM modelinde PC1–PC4'ün tümü kullanılmıştır. QSVM'de ise qubit sayısı özellik sayısına eşit olduğundan yalnızca PC1 ve PC2 kullanılmıştır (2 qubit). PC3 ve PC4'ün sınıfları görsel olarak ayırt etmediği gözlemlenmiştir (Şekil 4, Şekil 5).



Şekil 4. PCA bileşenlerinin (eğitim setine fit edilmiş) tekil ve kümülatif açıkladığı varyans oranları.



Şekil 5. Örneklenen piksellerin PC1-PC2 (solda) ve PC3-PC4 (sağda) uzaylarındaki dağılımı, sınıf bazında renklendirilmiştir. PC1-PC2 uzayında dört sınıf görsel olarak büyük ölçüde ayrışırken, PC3-PC4 uzayında sınıflar iç içe geçmiştir — bu, QSVM'de yalnızca PC1/PC2'nin kullanılması kararını desteklemektedir.

4.4. Model Eğitimi ve Hiperparametre Arama Metodolojisi

Klasik SVM için StandardScaler, PCA(n_components=4) ve SVC(kernel="rbf", gamma="scale") adımları tek bir sklearn.Pipeline içine alınmıştır. C hiperparametresi {0.1, 1, 10, 100} ızgarasında 5-katlı GridSearchCV ile yalnızca eğitim verisi üzerinde aranmıştır. Pipeline yapısı sayesinde her CV fold'unda StandardScaler ve PCA, o fold'un kendi eğitim kısmıyla yeniden fit edilmiştir. Böylece fold'lar arası veri sızıntısı önlenmiştir. En iyi sonuç C=100 ile elde edilmiştir (5-fold CV doğruluğu ≈0.934). Bu model tüm eğitim setine (320 örnek) yeniden fit edilmiş ve ortak 80 örneklik test kümesi üzerinde değerlendirilmiştir.

QSVM için Qiskit Machine Learning kütüphanesinin FidelityQuantumKernel sınıfı kullanılmıştır (Sahin vd., 2025). Bu sınıf, gürültü modeli veya donanım simülasyonu içermeyen, ideal (noiseless) statevector hesaplamasına dayanır (Python 3.14.7, scikit-learn 1.9.0, Qiskit 2.5.0, Qiskit Machine Learning 0.9.0). Beş deney yürütülmüştür. İlk dördü, açı kodlama aralığı sabit [-π,π] olan ZZFeatureMap (reps=1,2) ve ZFeatureMap (reps=1,2) konfigürasyonlarıdır (C ızgarası {0.1,1,10,100}). Beşincisi ise açı kodlama aralığının da hiperparametre olarak dahil edildiği ZFeatureMap (reps=1, açı=π/16, C=10000) konfigürasyonudur. Bu konfigürasyon iki adımda belirlenmiştir. Önce 4.6'daki geniş ortak tarama (9×9), açı ve C'yi birlikte tarayarak bu kombinasyonu tek en iyi nokta olarak bulmuştur. Ardından bu sonuç, diğer dört deneyle tutarlı bir muhasebe sağlamak amacıyla doğrulanmıştır. Bu doğrulama, C'nin aynı yöntemle ve daha dar bir ızgarada ({100,1000,10000,100000}) pipeline içinde yeniden hesaplanmasıyla yapılmıştır.

QSVM'de C seçimi, kuantum kernel matrisinin yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle klasik SVM'den farklı yürütülmüştür. Bu amaçla StratifiedKFold ile 5 katlı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Her fold'da StandardScaler, PCA, MinMaxScaler ve kuantum kernel yalnızca eğitim verisi kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Kernel matrisi C'den bağımsız olduğundan her fold için bir kez hesaplanarak tüm C değerlerinde kullanılmıştır. Seçilen C ile nihai model 320 eğitim örneği üzerinde eğitilmiş ve ortak 80 örneklik test kümesinde değerlendirilmiştir. Her iki model için raporlanan eğitim süresi, çapraz doğrulama ile hiperparametre seçimi ve nihai model eğitiminin toplamını kapsamaktadır. Beşinci QSVM konfigürasyonunda bu süre yalnızca seçilen π/16 açısındaki C seçimi ve nihai eğitimi içermektedir. Bölüm 4.6'da açıklanan 81 kombinasyonluk açı×C taramasının süresi bu değere dahil edilmemiştir.

4.5. Değerlendirme Metrikleri

Tüm modeller aynı 80 örneklik test kümesinde değerlendirilmiştir. Değerlendirmede şu metrikler kullanılmıştır: genel doğruluk (accuracy), ağırlıklı F1-skoru (f1_weighted), Cohen kappa katsayısı, sınıf bazında Producer's Accuracy (PA,

recall) ve User's Accuracy (UA, precision). PA, karışıklık matrisinin satır bazında normalize edilmesiyle hesaplanmıştır. UA ise sütun bazında normalize edilmesiyle hesaplanmıştır.

4.6. Açı Kodlama Aralığı × C Taraması (Beşinci QSVM Konfigürasyonu)

İlk dört QSVM deneyi (sabit [-π,π] açılı) klasik SVM'nin gerisinde kalmıştır. Bunun üzerine açı kodlama aralığının performansa etkisini incelemek için ayrı bir tarama betiği geliştirilmiş ve elle çalıştırılmıştır. Betik, ZFeatureMap (reps=1) için 9 açı (π/16–π) ve 9 C değeri (0.001–100000) kombinasyonunu taramıştır. Tarama yalnızca eğitim verisi üzerinde, 4.4'te açıklanan fold-içi yeniden-fit (leakage-free) prensibiyle yapılmış ve her kombinasyon için 5-katlı CV doğruluğu hesaplanmıştır. En yüksek CV doğruluğu (0.9125) açı=π/16 ve C=10000 ile elde edilmiştir. Bu konfigürasyon beşinci QSVM deneyi olarak resmi pipeline'a eklenmiş ve C değeri 4.4'te açıklandığı şekilde yeniden hesaplanarak doğrulanmıştır. Bu sonuç, sürekli parametre uzayında kanıtlanmış bir yerel maksimum değil, yalnızca taranan ayrık ızgaradaki en iyi noktadır.

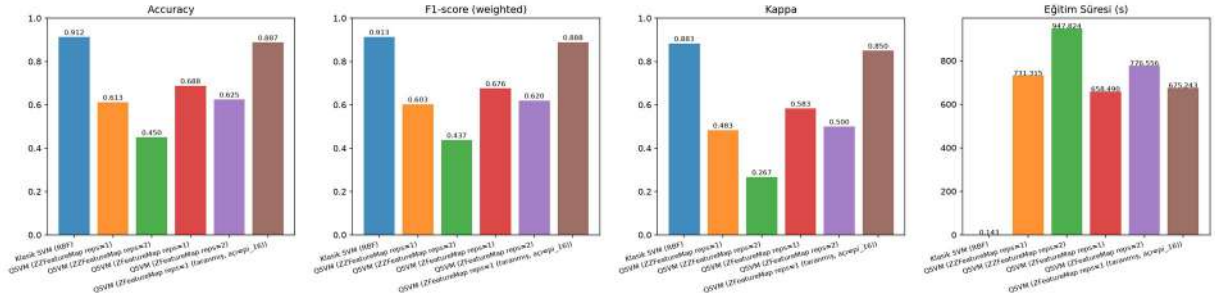
5. BULGULAR

Klasik SVM ve beş farklı QSVM konfigürasyonunun performansları aynı 80 örnekten oluşan test kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Model karşılaştırmalarında doğruluk, ağırlıklı F1-skoru, Cohen kappa katsayısı, eğitim süresi ve tahmin süresi dikkate alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 2 ve Şekil 6'da sunulmuştur. Aynı test kümesi birden fazla model için kullanıldığından sonuçlar bağımsız doğrulama yerine karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Model performans karşılaştırması.

Model	Accuracy	F1 (ağırlıklı)	Kappa	Eğitim Süresi*	Tahmin Süresi
Klasik SVM (RBF, C=100)	%91,25	0,9129	0,8833	0,14 s	0,0005 s
QSVM — ZZFeatureMap reps=1 (açı=π, C=10)	%61,25	0,6029	0,4833	731,31 s	62,99 s
QSVM — ZZFeatureMap reps=2 (açı=π, C=10)	%45,00	0,4375	0,2667	947,82 s	79,07 s
QSVM — ZFeatureMap reps=1 (açı=π, C=1)	%68,75	0,6758	0,5833	658,49 s	59,69 s
QSVM — ZFeatureMap reps=2 (açı=π, C=10)	%62,50	0,6200	0,5000	776,56 s	68,86 s
QSVM — ZFeatureMap reps=1 (taranmış, açı=π/16, C=10000)	%88,75	0,8885	0,8500	675,24 s	57,34 s

*Eğitim süresi, hiperparametre (C) seçimi için yapılan fold-içi çapraz doğrulama ile nihai modelin eğitim süresinin toplamıdır. Taranmış konfigürasyon için 4.6'da açıklanan açı×C tarama maliyeti bu değere dahil değildir.



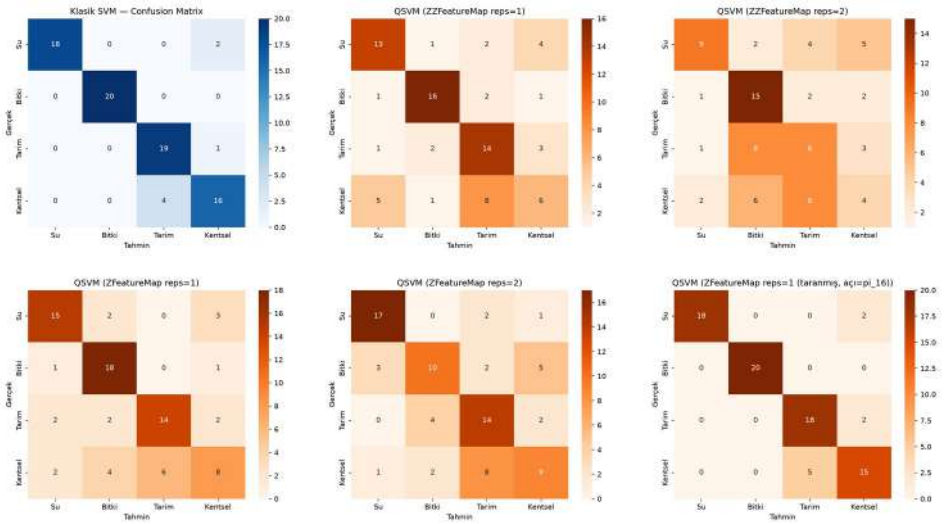
Şekil 6. Çizelge 2'deki altı modelin accuracy, F1-skoru (ağırlıklı), kappa ve eğitim süresi (s) bazında görsel karşılaştırması.

Klasik SVM, %91,25 doğruluk, 0,9129 F1-skoru ve 0,8833 kappa değeriyle en yüksek performansı göstermiştir. Modelin eğitim süresi 0,14 saniye, tahmin süresi ise 0,0005 saniye olarak ölçülmüştür. Sabit açı kodlaması kullanılan QSVM modellerinde doğruluk %45,00 ile %68,75 arasında değişmiştir. Bu modeller arasında en yüksek doğruluk, ZFeatureMap ve reps=1 konfigürasyonuyla %68,75 olarak elde edilmiştir.

Açı kodlama aralığı ile C hiperparametresinin birlikte tarandığı QSVM modeli belirgin bir performans artışı sağlamıştır. ZFeatureMap, reps=1, açı=π/16 ve C=10000 konfigürasyonu %88,75 doğruluk, 0,8885 F1-skoru ve 0,8500 kappa değerine ulaşmıştır. Böylece en iyi QSVM modeli ile klasik SVM arasındaki doğruluk farkı 2,5 puana düşmüştür. Ayrıca sabit açı kodlamalı en iyi QSVM modeline göre 20 puanlık doğruluk artışı elde edilmiştir.

Klasik SVM ile QSVM arasındaki karşılaştırmada özellik sayısının etkisini incelemek amacıyla klasik SVM yalnızca PC1 ve PC2 kullanılarak yeniden eğitilmiştir. Bu durumda klasik SVM'nin doğruluğu %88,75'e düşmüştür. Ayrıca 80 test örneği için üretilen tahminlerin tamamı en iyi QSVM modelinin tahminleriyle aynı olmuştur. Bu sonuç, iki model arasındaki performans farkında kullanılan temel bileşen sayısının etkili olabileceğini göstermektedir.

Sabit açı kodlamalı QSVM modellerinde devre yapısı ve derinliğine bağlı olarak önemli performans farklılıkları görülmüştür. ZFeatureMap reps=1 modeli %68,75 doğrulukla bu gruptaki en iyi sonucu vermiştir. ZZFeatureMap için reps=1 ve reps=2 modellerinin doğrulukları sırasıyla %61,25 ve %45,00 olmuştur. ZFeatureMap için reps değeri 2'ye çıkarıldığında doğruluk %62,50'ye düşmüştür. Dolayısıyla her iki özellik haritasında da devre derinliğinin artması doğrulukta düşüşle sonuçlanmıştır.

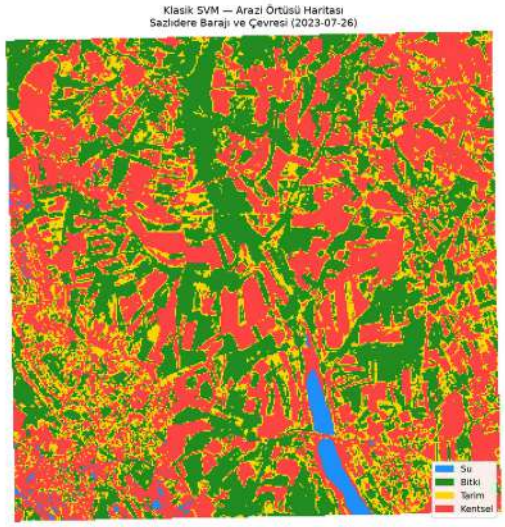


Şekil 7. Klasik SVM ve beş QSVM konfigürasyonunun karışıklık matrisleri (yukarıdan aşağıya, soldan sağa: Klasik SVM (RBF, C=100); QSVM ZZFeatureMap reps=1 (açı=π, C=10); QSVM ZZFeatureMap reps=2 (açı=π, C=10); QSVM ZFeatureMap reps=1 (açı=π, C=1); QSVM ZFeatureMap reps=2 (açı=π, C=10); QSVM ZFeatureMap reps=1 (taranmış, açı=π/16, C=10000) — en iyi QSVM konfigürasyonu).

Çizelge 3. Sınıf bazında Producer's Accuracy (PA) / User's Accuracy (UA) (%).

Model	Su PA/UA	Bitki PA/UA	Tarım PA/UA	Kentsel PA/UA
Klasik SVM	90,0 / 100,0	100,0 / 100,0	95,0 / 82,6	80,0 / 84,2
QSVM — ZZFeatureMap reps=1	65,0 / 65,0	80,0 / 80,0	70,0 / 53,8	30,0 / 42,9
QSVM — ZZFeatureMap reps=2	45,0 / 69,2	75,0 / 48,4	40,0 / 36,4	20,0 / 28,6
QSVM — ZFeatureMap reps=1	75,0 / 75,0	90,0 / 69,2	70,0 / 70,0	40,0 / 57,1
QSVM — ZFeatureMap reps=2	85,0 / 81,0	50,0 / 62,5	70,0 / 53,8	45,0 / 52,9
QSVM — ZFeatureMap reps=1 (taranmış)	90,0 / 100,0	100,0 / 100,0	90,0 / 78,3	75,0 / 78,9

Sınıf bazındaki sonuçlar Çizelge 3 ve Şekil 7'de verilmiştir. Klasik SVM'de Su ve Bitki sınıfları yüksek doğrulukla ayrılmıştır. Kentsel sınıf ise %80 Producer's Accuracy (PA) ile en düşük değeri göstermiştir. Benzer durum QSVM modellerinde de görülmüş ve Kentsel sınıfı sabit açı kodlamalı modellerde %20–45 arasında PA değerleri almıştır. En iyi QSVM modelinde bu değer %75'e yükselmiştir. Su ve Bitki sınıflarında ise en iyi QSVM modeli %90 ve üzeri PA ve User's Accuracy (UA) değerlerine ulaşmıştır.En yüksek doğruluğu sağlayan klasik SVM modeli kullanılarak çalışma alanındaki 112.421 geçerli piksel sınıflandırılmıştır. Sonuçlara göre alanın %41,7'si Kentsel, %36,0'ı Bitki, %21,0'i Tarım ve %1,4'ü Su olarak sınıflandırılmıştır. Kentsel sınıf, Dynamic World veri setindeki built ve bare sınıflarının birleşiminden oluştuğundan yalnızca yapılaşmış alanları temsil etmemektedir. Elde edilen arazi örtüsü sınıflandırma haritası Şekil 8'de sunulmuştur.QSVM ile tüm çalışma alanının sınıflandırılması ise yüksek kuantum çekirdek hesaplama maliyeti nedeniyle gerçekleştirilmemiştir. Her yeni pikselin 320 eğitim örneğiyle karşılaştırılması gerektiğinden, test sürelerine dayalı tahmini tam alan sınıflandırma süresi yaklaşık 22–31 saat olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Klasik SVM (RBF, C=100) ile üretilen Sazlıdere Barajı çevresinde belirlenen çalışma alanının arazi örtüsü sınıflandırma haritası.

6. TARTIŞMA

Klasik SVM, en iyi QSVM konfigürasyonuna kıyasla hem daha yüksek doğruluk (%91,25 vs. %88,75) hem de çok daha kısa eğitim ve tahmin süresi sergilemiştir (bkz. Çizelge 2). Kuantum kernel tabanlı SVM'de eğitim Gram matrisinin oluşturulması ~O(n_train²), yeni örnekler üzerindeki tahmin maliyeti ise ~O(n_train × n_query) düzeyindedir. Tam alan sınıflandırmasının bu çalışmada atlanmasının nedeni budur. Her iki durumda da ölçeklenebilirlik ciddi bir kısıt oluşturmaktadır. Bu sınırlama, çalışmada kullanılan gürültüsüz kuantum simülasyonundan bağımsızdır.

Doğruluk farkının kaynağını sınamak amacıyla bir kontrol deneyi yapılmıştır (bkz. Bulgular). Bu deneyde klasik SVM, QSVM ile aynı iki bileşenle (PC1-PC2) sınırlandırılmıştır. Bu durumda doğruluk da %88,75'e düşmüştür. Bu modelin 80 test tahmininin tamamı en iyi QSVM konfigürasyonuyla birebir örtüşmüştür. Bu bulgu, Klasik SVM (PC1-PC4) ile QSVM (PC1-PC2) arasındaki performans farkı büyük ölçüde boyut indirgeme ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Ancak sonuç tek bir test kümesine dayandığından genel bir çıkarım olarak değerlendirilmemelidir.

QSVM sonuçları, özellik haritası ve hiperparametre seçiminin model performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sabit [-π,π] açı aralığının kullanıldığı dört QSVM modelinde doğruluk %45,00 ile %68,75 arasında değişmiştir. ZFeatureMap ve reps=1 sabit tutulup açı kodlama aralığı ile C birlikte optimize edildiğinde doğruluk %88,75'e yükselmiştir. Bu sonuç, açı kodlama aralığının QSVM performansı açısından önemli olduğunu göstermektedir. Bulgular, kuantum özellik haritalarının kodlama stratejisine duyarlı olduğunu belirten Schuld ve Killoran (2019) ile uyumludur.

Devre derinliği (reps) arttığında hem ZFeatureMap hem de ZZFeatureMap modellerinde doğruluk düşmüştür. Bu durum, kuantum kernel yöntemlerinde bildirilen üstel yoğunlaşma (exponential concentration) problemiyle ilişkili olabilir (Thanasilp vd., 2024). Ancak bu çalışma yalnızca iki qubit ile yürütülmüştür. Bu nedenle gözlenen performans düşüşünün doğrudan üstel yoğunlaşmadan kaynaklandığı söylenemez.

Çalışmanın önemli sınırlamalarından biri örneklem büyüklüğüdür. Toplam 400 pikselin 320'si eğitim için kullanılmıştır. Bu nedenle sonuçların daha büyük veri setlerine ve farklı coğrafi alanlara genellenebilirliği sınırlıdır. Bu durum, kuantum makine öğrenmesi performansının veri miktarı ve yapısına bağlı olduğunu gösteren Huang vd. (2021) ile uyumludur. Ayrıca örnekleme için kullanılan NDVI, NDWI ve NDBI indeksleri aynı zamanda model girdileri arasında yer almaktadır. Rastgele piksel ayrımı da mekânsal otokorelasyonu tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Bu nedenlerle sonuçlar geniş ölçekli bir genellemeden çok pilot bir karşılaştırma olarak değerlendirilmelidir.

Aynı 80 örneklik test kümesinin farklı model ve konfigürasyonların değerlendirilmesinde kullanılması da diğer bir sınırlamadır. Farklı tarama aşamalarında en iyi olarak belirlenen üç QSVM konfigürasyonu bu test kümesinde aynı 71 örneği doğru, aynı 9 örneği yanlış sınıflandırmıştır. Bu durum belirli parametre değerlerinde benzer sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Ancak sınırlı sayıdaki konfigürasyona ve tek bir test kümesine dayandığından genel bir parametre kararlılığı olarak yorumlanmamalıdır.

Bununla birlikte, açı kodlama aralığı ve C hiperparametresi uygun şekilde seçildiğinde QSVM'nin %88,75 doğrulukla klasik SVM'ye yakın bir performans göstermesi dikkat çekicidir. Bu sonuç, kuantum kernel yöntemlerinin uzaktan

algılama verilerinde uygulanabilir olduğunu gösteren önceki çalışmalarla uyumludur (Delilbasic vd., 2021; Zaidenberg vd., 2021). Bulgular aynı zamanda özellik haritası ve kodlama parametrelerinin veri yapısına uygun seçilmesinin QSVM performansı açısından önemli olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Sentinel-2 verileriyle arazi örtüsü sınıflandırmasında QSVM ve klasik SVM yöntemleri karşılaştırılmıştır. QSVM deneyleri gürültüsüz bir kuantum simülatörü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Klasik SVM %91,25 doğrulukla en yüksek performansı göstermiştir. Sabit açı kodlamalı QSVM modellerinde en yüksek doğruluk, ZFeatureMap ve reps=1 konfigürasyonuyla %68,75 olarak elde edilmiştir.

Açı kodlama aralığı ile C hiperparametresinin birlikte optimize edildiği QSVM modeli ise %88,75 doğruluğa ulaşmıştır. Böylece klasik SVM ile arasındaki doğruluk farkı 2,5 puana düşmüştür. Klasik SVM yalnızca PC1 ve PC2 ile eğitildiğinde de %88,75 doğruluk elde etmiş ve iki modelin test tahminleri tamamen örtüşmüştür. Bu sonuçlar, QSVM performansının kullanılan özellik sayısının yanı sıra açı kodlama aralığı ve hiperparametre seçimine de duyarlı olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda şu yönler araştırılabilir. Birincisi, gerçek kuantum donanımına (QPU) taşıma ve hata azaltma (error mitigation) tekniklerinin etkisinin ölçülmesidir. Bu çalışmada gözlenen sonuçların gürültüsüz bir simülasyona ait olduğu unutulmamalıdır. İkincisi, daha büyük ve mekânsal olarak ayrılmış (spatially held-out) eğitim/test veri setleriyle genellenebilirliğin sınanmasıdır. Bu çalışmada aynı test kümesi birden fazla karşılaştırma için kullanılmıştır. Bu durum genellenebilirlik testini engellemektedir. Üçüncüsü, BSI gibi eklenen özelliklerin katkısını izole eden sistematik ablation deneyleridir. Dördüncüsü, veri tipine özgü kuantum özellik haritası tasarımıdır. Bu kapsamda açı kodlama aralığının sürekli bir hiperparametre olarak optimize edilmesi önerilebilir; bu çalışmada yalnızca ayrık bir ızgara kullanılmıştır. Beşincisi, reps artışıyla gözlenen performans düşüşünün üstel yoğunlaşma (Thanasilp vd., 2024) ile ilişkisinin test edilmesidir. Bu ilişki farklı qubit sayılarında sistematik olarak sınanmalıdır.

KAYNAKLAR

Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N. ve Lloyd, S., 2017. Quantum machine learning. Nature, 549(7671): 195-202.

Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., ... ve Tait, A. M., 2022. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data, 9(1): 251.

Cerezo, M., Arrasmith, A., Babbush, R., Benjamin, S. C., Endo, S., Fujii, K., ... ve Coles, P. J., 2021. Variational quantum algorithms. Nature Reviews Physics, 3(9): 625-644.

Cortes, C. ve Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. Machine Learning, 20(3): 273-297.

Delilbasic, A., Cavallaro, G., Willsch, M., Melgani, F., Riedel, M. ve Michielsen, K., 2021. Quantum Support Vector Machine Algorithms for Remote Sensing Data Classification. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), syf: 2608-2611.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. ve Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202: 18-27.

Havlíček, V., Córcoles, A. D., Temme, K., Harrow, A. W., Kandala, A., Chow, J. M. ve Gambetta, J. M., 2019. Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. Nature, 567(7747): 209-212.

Huang, H.-Y., Broughton, M., Mohseni, M., Babbush, R., Boixo, S., Neven, H. ve McClean, J. R., 2021. Power of data in quantum machine learning. Nature Communications, 12: 2631.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. ve Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1-2): 195-213.

McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7): 1425-1432.

Melgani, F. ve Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(8): 1778-1790.

Mountrakis, G., Im, J. ve Ogole, C., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3): 247-259.

Otgonbaatar, S. ve Datcu, M., 2022. Classification of Remote Sensing Images With Parameterized Quantum Gates. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19: 1-5.

Preskill, J., 2018. Quantum computing in the NISQ era and beyond. Quantum, 2: 79.

Rebentrost, P., Mohseni, M. ve Lloyd, S., 2014. Quantum support vector machine for big data classification. Physical Review Letters, 113: 130503.

Rikimaru, A., Roy, P. S. ve Miyatake, S., 2002. Tropical forest cover density mapping. Tropical Ecology, 43(1): 39-47.

Sahin, M. E., Altamura, E., Wallis, O., Wood, S. P., Dekusar, A., Millar, D. A., Imamichi, T., Matsuo, A. ve Mensa, S., 2025. Qiskit Machine Learning: an open-source library for quantum machine learning tasks at scale on quantum hardware and classical simulators. arXiv:2505.17756.

Schuld, M. ve Killoran, N., 2019. Quantum machine learning in feature Hilbert spaces. Physical Review Letters, 122(4): 040504.

Sebastianelli, A., Zaidenberg, D. A., Spiller, D., Le Saux, B. ve Ullo, S., 2022. On Circuit-Based Hybrid Quantum Neural Networks for Remote Sensing Imagery Classification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15: 565-580.

Thanasilp, S., Wang, S., Cerezo, M. ve Holmes, Z., 2024. Exponential concentration in quantum kernel methods. Nature Communications, 15: 5200.

Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2): 127-150.

Zaidenberg, D. A., Sebastianelli, A., Spiller, D., Le Saux, B. ve Ullo, S. L., 2021. Advantages and Bottlenecks of Quantum Machine Learning for Remote Sensing. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), syf: 5680-5683.

Zha, Y., Gao, J. ve Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3): 583-594.

SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNDE FARKLI BULUT FİLTRELEME YÖNTEMLERİNİN ÇOKLU ÇALIŞMA ALANLARINDA KARŞILAŞTIRILMASI

Emirhan ÖZDEMİR[1]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr

ÖZET

Optik uydu görüntüleri, arazi örtüsü sınıflandırması, tarımsal izleme, doğal afet yönetimi ve çevresel değişimlerin belirlenmesi gibi çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Li vd., 2022; Singh & Biswas, 2025). Ancak atmosferik koşullar, özellikle bulut ve bulut gölgeleri, optik uydu verilerinin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bulutlardan etkilenmiş görüntüler analiz sonuçlarında hatalara neden olmakta, zamansal veri sürekliliğini azaltmakta ve büyük veri analizlerinde ek işlem yükü oluşturmaktadır (Xu vd., 2019). Bu nedenle uydu görüntülerinde bulutların doğru bir şekilde tespit edilmesi ve filtrelenmesi uzaktan algılama çalışmalarının en önemli ön işlem adımlarından biri olarak kabul edilmektedir (Shi vd., 2016).

Sentinel-2 görevinde bulut tespiti amacıyla farklı veri setleri ve algoritmalar kullanılmaktadır. Bunlar arasında görüntü meta verilerinde yer alan Cloudy_Pixel_Percentage bilgisi, Scene Classification Layer (SCL), QA60 kalite bandı, MSK_CLDPRB bulut olasılık katmanı, Sentinel-2 Cloud Probability veri seti ve son yıllarda geliştirilen Cloud Score+ yaklaşımı öne çıkmaktadır (Nagy vd., 2021; Sanchez vd., 2024; Cheng vd., 2026).

Bu çalışmanın amacı, Sentinel-2 görüntülerinde kullanılan farklı bulut filtreleme yöntemlerinin performanslarını farklı coğrafi koşullara sahip çalışma alanlarında karşılaştırmak ve kullanılabilir görüntü sayıları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında Ağrı Dağı, Ankara/Elmadağ, Trabzon/Of ve İstanbul/Kadıköy bölgeleri çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu alanlar yüksek dağlık topoğrafya, iç kesim karasal iklim, nemli Karadeniz iklimi ve yoğun kentleşme gibi farklı çevresel özellikleri temsil etmektedir.

Analizlerde 01 Ocak 2024 – 01 Ocak 2025 tarihleri arasında elde edilen Sentinel-2 Seviye-2A görüntüleri kullanılmıştır. Tüm işlemler Google Earth Engine platformunda geliştirilmiş bir iş akışı ile gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada çalışma alanlarını kapsayan Sentinel-2 görüntü koleksiyonları oluşturulmuş, ardından her yöntem için bulutlu pikseller belirlenmiştir. SCL yöntemi kapsamında bulut, ince bulut, yüksek olasılıklı bulut, bulut gölgesi ve kar sınıfları kullanılmıştır. QA60 yönteminde bit tabanlı bulut ve sirrus bayrakları değerlendirilmiştir. Cloud Score+ yaklaşımında "cs" bandı kullanılarak 0.5 eşik değeri uygulanmıştır. MSK_CLDPRB ve Cloud Probability veri setlerinde ise sırasıyla %20 ve %30 olasılık eşikleri kullanılmıştır.

Her görüntü için yalnızca çalışma alanı içerisindeki bulutlu piksel oranı değil, aynı zamanda görüntünün tamamını temsil eden Scene düzeyindeki bulutluluk da hesaplanmıştır. Böylece bulut filtreleme yöntemlerinin yalnızca görüntü sayısı üzerindeki etkisi değil, görüntü genelindeki bulutluluk ile belirli bir çalışma alanındaki bulutluluk arasındaki fark da değerlendirilmiştir. Bu kapsamda görüntüler, %1, %5 ve %10 bulutluluk eşiklerine göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca görüntü seçiminde yaygın olarak kullanılan Cloudy_Pixel_Percentage metadata değeri Scene düzeyinde bir referans ölçütü olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, yöntemler ve çalışma alanları arasında belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Örneğin Ağrı Dağı çalışma alanında %1 bulutluluk eşiğinde QA60 yöntemi çalışma alanı içerisinde 141 görüntü sağlarken, SCL, MSK_CLDPRB, Cloud Probability ve Cloud Score+ yöntemleri sırasıyla 35, 111, 67 ve 73 görüntü sağlamıştır. Aynı eşikte Scene düzeyindeki görüntü sayıları ise sırasıyla 78, 10, 48, 29 ve 38 olarak belirlenmiştir. Bu durum, özellikle çalışma alanının görüntünün tamamına kıyasla daha az bulutlu olduğu durumlarda, yalnızca Scene düzeyindeki bulutluluk bilgisinin görüntünün belirli bir çalışma alanındaki kullanılabilirliğini yeterince temsil etmeyebileceğini göstermektedir.

Ankara/Elmadağ bölgesinde de benzer bir eğilim gözlenmiş ve %1 eşiğinde çalışma alanı içerisindeki kullanılabilir görüntü sayıları SCL, QA60, MSK_CLDPRB, Cloud Probability ve Cloud Score+ için sırasıyla 103, 172, 136, 110 ve 125 olarak belirlenmiştir. Trabzon/Of bölgesinde yüksek bulutluluk koşullarına rağmen çalışma alanı içerisindeki görüntü sayılarının Scene düzeyindeki değerlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İstanbul/Kadıköy bölgesinde ise yöntemler arasındaki farklılıkların yanı sıra, bazı eşiklerde çalışma alanı ve Scene düzeyindeki görüntü sayıları arasında daha sınırlı farklar belirlenmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde QA60 yaklaşımının tüm çalışma alanlarında en yüksek görüntü erişilebilirliğini sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte QA60 yönteminin yüksek görüntü sayısı üretmesi, bazı ince bulutların veya yarı saydam atmosferik etkilerin gözden kaçabileceğini düşündürmektedir. MSK_CLDPRB, Cloud Probability ve Cloud Score+ yöntemleri daha seçici davranarak daha düşük sayıda görüntü üretmiş, ancak bulut tespitinde daha hassas bir yaklaşım sunmuştur. SCL yöntemi ise özellikle çalışma alanlarının çevresel ve topoğrafik özelliklerine bağlı olarak değişken sonuçlar vermiştir.

Çalışmada ayrıca Scene ve çalışma alanı düzeyindeki bulutluluk karşılaştırmalarının yöntem performansının değerlendirilmesinde önemli olduğu görülmüştür. Özellikle küçük veya heterojen çalışma alanlarında, görüntünün tamamına ait metadata değerinin doğrudan çalışma alanındaki gerçek bulutluluğu temsil etmeyebileceği belirlenmiştir. Bu nedenle Sentinel-2 görüntülerinin zamansal analizler için seçilmesinde yalnızca Scene düzeyindeki bulutluluk bilgilerinin kullanılmasının yerine, çalışma alanına özgü piksel tabanlı bulut analizlerinin dikkate alınmasının daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışma bulguları, Sentinel-2 verileri kullanılarak gerçekleştirilen zamansal analizlerde seçilecek bulut filtreleme yönteminin elde edilen veri miktarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Araştırmacıların çalışma amaçlarına bağlı olarak görüntü sayısı ile görüntü kalitesi arasındaki dengeyi ve çalışma alanına özgü bulutluluk koşullarını birlikte dikkate alarak uygun yöntemi seçmeleri gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı yılların değerlendirilmesi, bulut filtreleme yöntemlerinin doğruluk analizlerinin gerçekleştirilmesi ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlarla karşılaştırılması önerilmektedir.

Anahtar Sözcükler: bulut maskeleme, Google Earth Engine, Sentinel-2, uzaktan algılama

COMPARISON OF DIFFERENT CLOUD FILTERING METHODS IN SENTINEL-2 IMAGERY ACROSS MULTIPLE STUDY AREAS

Emirhan ÖZDEMİR[1]

[1]Assist. Prof., Iğdır University, Department of Architecture and Urban Planning, 76000, Iğdır, Türkiye, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr

ABSTRACT

Optical satellite imagery is widely used in numerous applications, including land-cover classification, agricultural monitoring, natural disaster management, and the detection of environmental changes (Li et al., 2022; Singh & Biswas, 2025). However, atmospheric conditions, particularly clouds and cloud shadows, significantly limit the usability of optical satellite data. Cloud-contaminated imagery may introduce errors into analysis results, reduce temporal data continuity, and increase the computational burden in large-scale data processing (Xu et al., 2019). Therefore, accurate detection and filtering of clouds in satellite imagery are considered among the most important preprocessing steps in remote sensing studies (Shi et al., 2016).

Several datasets and algorithms are available for cloud detection in the Sentinel-2 mission. Among these, the Cloudy_Pixel_Percentage information provided in image metadata, the Scene Classification Layer (SCL), the QA60 quality band, the MSK_CLDPRB cloud probability layer, the Sentinel-2 Cloud Probability dataset, and the recently developed Cloud Score+ approach are widely used (Nagy et al., 2021; Sanchez et al., 2024; Cheng et al., 2026).

The aim of this study is to compare the performance of different cloud filtering methods used for Sentinel-2 imagery across study areas characterized by different geographical conditions and to investigate their effects on the number of usable images. Four study areas were selected: Mount Ararat, Elmadağ in Ankara, Of in Trabzon, and Kadıköy in Istanbul. These areas represent different environmental conditions, including high-mountainous terrain, continental inland climate, humid Black Sea climate, and dense urbanization.

Sentinel-2 Level-2A imagery acquired between 1 January 2024 and 1 January 2025 was used in the analyses. All processing steps were implemented using a workflow developed on the Google Earth Engine platform. First, Sentinel-2 image collections covering the study areas were generated, after which cloudy pixels were identified for each method. For the SCL method, cloud, thin cirrus, high-probability cloud, cloud shadow, and snow classes were considered. In the QA60 method, bit-based cloud and cirrus flags were evaluated. For the Cloud Score+ approach, a threshold of 0.5 was applied to the "cs" band. For the MSK_CLDPRB and Cloud Probability datasets, cloud probability thresholds of 20% and 30%, respectively, were applied.

For each image, not only the proportion of cloudy pixels within the study area but also the cloudiness at the Scene level, representing the entire image, was calculated. Thus, the analysis evaluated not only the effects of different cloud filtering methods on the number of usable images but also the differences between scene-wide cloudiness and cloudiness within a specific study area. In this context, images were compared using cloudiness thresholds of 1%, 5%, and 10%. In addition, the Cloudy_Pixel_Percentage metadata value, which is commonly used for image selection, was evaluated as a Scene-level reference measure.

The results revealed substantial differences among the methods and study areas. For example, for the Mount Ararat study area, at the 1% cloudiness threshold, the QA60 method provided 141 usable images within the study area, whereas the SCL, MSK_CLDPRB, Cloud Probability, and Cloud Score+ methods provided 35, 111, 67, and 73 images, respectively. At the same threshold, the corresponding numbers at the Scene level were 78, 10, 48, 29, and 38. This indicates that, particularly when the study area is less cloudy than the image as a whole, Scene-level cloudiness information alone may not adequately represent the usability of an image for a specific study area.

A similar pattern was observed in the Elmadağ study area. At the 1% threshold, the numbers of usable images within the study area were 103, 172, 136, 110, and 125 for SCL, QA60, MSK_CLDPRB, Cloud Probability, and Cloud Score+, respectively. In the Trabzon/Of study area, despite the generally high cloudiness conditions, the number of usable images within the study area was higher than the corresponding Scene-level values. In the Kadıköy study area, differences among the methods were also observed, while the differences between study-area-level and Scene-level image counts were more limited at some thresholds.

Overall, the results indicate that the QA60 approach provided the highest image availability across all study areas. However, the high number of images retained by QA60 may also indicate that some thin clouds or semi-transparent atmospheric effects may not be detected. The MSK_CLDPRB, Cloud Probability, and Cloud Score+ methods were more selective and therefore produced fewer usable images, but they provided a more sensitive approach to cloud detection. The SCL method, in contrast, produced more variable results depending on the environmental and topographic characteristics of the study areas.

The comparison between Scene-level and study-area-level cloudiness was also found to be important for evaluating the performance of cloud filtering methods. Particularly for small or heterogeneous study areas, metadata values representing the entire Scene may not directly reflect the actual cloudiness within the target study area. Therefore, rather than relying solely on Scene-level cloudiness information when selecting Sentinel-2 imagery for temporal analyses, pixel-based cloud assessments specific to the study area may provide a more appropriate basis for image selection.

The findings demonstrate that the choice of cloud filtering method can substantially affect the amount of available data in temporal analyses based on Sentinel-2 imagery. Researchers should therefore consider the balance between image quantity and image quality, together with study-area-specific cloud conditions, when selecting an appropriate filtering approach according to the objectives of their study. Future studies should evaluate additional years, perform quantitative accuracy assessments of cloud filtering methods, and compare these approaches with machine-learning-based methods..

Keywords: cloud filtering, Google Earth Engine, remote sensing, Sentinel-2

KAYNAKÇA

Cheng, R., Xiao, C., & Xiang, M. (2026). Spatio-temporal patterns and underlying drivers of pixel-based Sentinel-2 cloud probability in Mainland Southeast Asia. Geo-spatial Information Science, 1-16.

Li, Z., Shen, H., Weng, Q., Zhang, Y., Dou, P., & Zhang, L. (2022). Cloud and cloud shadow detection for optical satellite imagery: Features, algorithms, validation, and prospects. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 188, 89-108.

Nagy, D., Warshavsky, Z., & Hughes, L. H. (2021, July). Improved Image Aggregation for Large-Scale Cloud-Free Image Creation. In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (pp. 3889-3892). IEEE.

Sanchez, C., Mena, F., Charfuelan, M., Nuske, M., & Dengel, A. (2024, July). Assessment of sentinel-2 spatial and temporal coverage based on the scene classification layer. In IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 4099-4103). IEEE.

Shi, M., Xie, F., Zi, Y., & Yin, J. (2016, July). Cloud detection of remote sensing images by deep learning. In 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 701-704). IEEE.

Singh, R., Pal, M., & Biswas, M. (2025). Cloud detection methods for optical satellite imagery: A comprehensive review. Geomatics, 5(3), 27.

Xu, M., Jia, X., Pickering, M., & Jia, S. (2019). Thin cloud removal from optical remote sensing images using the noise-adjusted principal components transform. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 149, 215-225.

DERİN ÖĞRENME TABANLI AYÇİÇEĞİ SEGMENTASYONU İÇİN AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Esra YILDIRIM[1], İsmail ÇÖLKESEN[2], Umut Güneş SEFERCİK[3],

[1]Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, esrayildirim@gtu.edu.tr
[2]Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, icolkesen@gtu.edu.tr
[3]Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, sefercik@gtu.edu.tr

ÖZET

Ayçiçeği çiçek tablalarının doğru ve hızlı biçimde tespit edilmesi, verim tahmini, fenolojik gelişim takibi ve hassas tarım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. İnsansız hava araçları (İHA) ile elde edilen yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntüler ve derin öğrenme yaklaşımları bireysel ürün tespiti amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak derin öğrenme modellerinin karar verme süreçlerinin kara kutu yapısında olması, model güvenilirliğinin değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Son yıllarda, derin öğrenme modellerinin karar verme mekanizmalarını daha şeffaf ve yorumlanabilir hale getirmeyi amaçlayan Açıklanabilir Yapay Zekâ (AYZ) yaklaşımları ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, İHA ortomozaiklerinden ayçiçeği segmentasyonunda U-Net modelinin karar mekanizması sınıf aktivasyon haritalama (class activation mapping-CAM) tabanlı Grad-CAM, Score-CAM ve Ablation-CAM yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, Sakarya ili Arifiye ilçesindeki deneysel ayçiçeği tarlasında üretilen 1,5 cm konumsal çözünürlükte ortomozaik veri üzerinde oluşturulan veri seti ile U-Net modeli eğitilmiş ve test edilmiştir. Bağımsız test alanında model 0,876 Birleşim üzerinde Kesişim (IoU), 0,934 F-Skor değerleri elde etmiştir. Modelin karar verme mekanizması, CAM tabanlı AYZ yöntemleri ile dört farklı strateji kapsamında nicel olarak değerlendirilmiştir. S1 stratejisinde yöntemler tarafından vurgulanan pikseller görüntüden maskelenerek çıkarılırken, S2 stratejisinde arka plan maskelenerek yalnızca vurgulanan pikseller korunmuştur. Her iki stratejide elde edilen görüntüler tahmin için yeniden U-Net modeline verilerek segmentasyon performansındaki değişim incelenmiştir. S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinde ise vurgulanan pikseller sırasıyla zemin gerçeği ve model tahmin maskesiyle birleştirilmiştir. Ablation-CAM, S1 stratejisinde IoU değerini 0,0003'e düşürerek model kararında kritik rol oynayan bölgeleri en etkili biçimde tanımlarken, S2 stratejisinde vurgulanan piksellerin korunmasıyla 0,842 IoU elde ederek bu bölgelerin model tahminini sürdürmek için gerekli bilgiyi büyük ölçüde taşıdığını ortaya koymuştur. Grad-CAM ise S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinde sırasıyla 0,889 ve 0,854 IoU değerleriyle en yüksek performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, Grad-CAM tarafından vurgulanan piksellerin zemin gerçeği ve model tahmin maskeleriyle birleştirildiğinde segmentasyon performansının korunmasına daha fazla katkı sağladığını göstermektedir. Çalışma sonuçları, AYZ yöntemlerinin nicel stratejilerle analiz edilmesinin derin öğrenme tabanlı segmentasyon modellerinin açıklanabilirliği ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Açıklanabilir yapay zekâ (AYZ), sınıf aktivasyon haritalama, derin öğrenme, ayçiçeği segmentasyonu.

ABSTRACT

EVALUATION OF EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR DEEP LEARNING-BASED SUNFLOWER SEGMENTATION

Accurate and rapid detection of sunflower heads is of great importance for yield estimation, phenological development monitoring, and precision agriculture applications. High spatial resolution imagery acquired using unmanned aerial vehicles (UAVs) and deep learning approaches has been widely used for individual plant detection. However, the black-box nature of deep learning models makes it difficult to assess model reliability. In recent years, Explainable Artificial Intelligence (XAI) approaches have emerged to make the decision-making mechanisms of deep learning models more transparent and interpretable. In this study, the decision-making process of the U-Net model for sunflower head segmentation from UAV orthomosaics was comparatively analyzed using the class activation mapping (CAM) based Grad-CAM, Score-CAM, and Ablation-CAM methods. For this purpose, the U-Net model was trained and tested using a dataset created from an orthomosaic with a spatial resolution of 1.5 cm, produced over an experimental sunflower field in the Arifiye district of Sakarya Province, Türkiye. In the independent test area, the model achieved an Intersection over Union (IoU) and F-score of 0.876 and 0.934, respectively. The decision-making mechanism of the model was quantitatively evaluated using CAM-based XAI methods under four different strategies. In the S1 strategy, the pixels highlighted by the methods were masked, whereas in the S2 strategy, the background was masked and the highlighted pixels were retained. The images generated under both strategies were fed into the U-Net model for prediction, and the resulting changes in segmentation performance were examined. In the S3-XAI-GT and S3-XAI-PM strategies, the highlighted pixels were combined with the ground-truth mask and the model prediction mask, respectively. Ablation-CAM most effectively identified the regions that played a critical role in the model's decision by reducing the IoU to 0.0003 under S1, while achieving an IoU of 0.842 through the preservation of the highlighted pixels under S2, thereby demonstrating that these regions retained most of the information required to sustain the model prediction. Grad-CAM achieved the highest performance under the S3-XAI-GT and S3-XAI-PM strategies, with IoU values of 0.889 and 0.854, respectively. These results indicate that the pixels highlighted by Grad-CAM contributed more to preserving segmentation performance when combined with the ground-truth and model-prediction masks. The results of the

study demonstrate that analyzing XAI methods through quantitative strategies is critically important for the explainability and reliability of deep learning-based segmentation models.

Keywords: Explainable artificial intelligence (XAI), class activation mapping (CAM), deep learning, sunflower segmentation.

1. GİRİŞ

Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.), bitkisel yağ üretimi başta olmak üzere gıda sektörü ve tarım sanayisi açısından stratejik öneme sahip yağlı tohum ürünlerinden biridir. Üretim alanlarında bitki gelişiminin, çiçeklenmenin ve tabla oluşumunun izlenmesi, ürün verimindeki mekânsal farklılıkların belirlenmesi ve etkin biçimde yönetilmesi açısından önem taşımaktadır. Geleneksel arazi gözlemlerine dayalı yöntemler geniş alanlarda yoğun emek ve zaman gerektirmekte, ölçümlerin tekrarlanabilirliği gözlemciye bağlı olarak değişebilmektedir. İnsansız hava araçları (İHA), santimetre düzeyindeki mekânsal çözünürlükleri, esnek veri toplama imkânları ve tarla ölçeğinde sürekli gözlem yapabilmeleri nedeniyle tarımsal ürün gelişiminin hızlı ve hassas biçimde izlenmesini mümkün kılmaktadır (Agüera Vega vd., 2015; Bouguettaya vd., 2022). İHA görüntülerinden ayçiçeği tablalarının bireysel olarak belirlenmesi, bitki sayısının, mekânsal dağılımının ve tabla alanına ilişkin bilgilerin elde edilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu sayede bölgedeki bitki yoğunluğu, fenolojik gelişim, tarla içi heterojenlik ve verimle ilişkili özellikler incelenebilmektedir. Ancak tarla ortamındaki değişken aydınlatma koşulları, toprak ve bitki örtüsü arasındaki karmaşık doku ilişkileri ve tablaların farklı boyut ve yönelimlerde bulunması, bireysel ürün tespitini zorlaştıran faktörler arasında yer almaktadır.

Derin öğrenme yaklaşımları nesnelere ilişkin renk, doku, şekil ve mekânsal bağlam özelliklerini doğrudan girdi verisinden öğrenebilmekte ve bu sayede tarımsal ürün tespitinde geleneksel yöntemlerden üstün performans göstermektedir. Özellikle piksel düzeyinde sınıflandırmaya dayanan semantik segmentasyon yaklaşımları ayçiçeği tablalarının konumlarının ve sınırlarının ayrıntılı biçimde belirlenmesi için uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde ayçiçeği tablalarının belirlenmesine yönelik güncel çalışmalarda U-Net tabanlı mimarilerle segmentasyon ve sayım (Bai vd., 2025), YOLO tabanlı modellerle farklı gelişim evrelerindeki tablaların tespiti (Jing vd., 2024), RGB görüntüler ile yükseklik verilerinin entegre kullanıldığı çok modlu yaklaşımlar (Dong vd., 2025) ve tespit sonuçlarının verim tahminiyle ilişkilendirilmesi (Iamchuen vd., 2026) gibi analizler ele alınmıştır. Daha güncel çalışmalarda ise ayçiçeği tablalarının çok zamanlı İHA ortomozaiklerinden evrişimsel sinir ağı ve transformatör tabanlı yaklaşımlarla yüksek performansta belirlenebildiği ortaya konmuştur (Yildirim vd., 2026a; Yildirim vd., 2026b). Bu çalışmalar, derin öğrenme modellerinin ayçiçeği tespiti ve segmentasyonundaki başarımını ortaya koymasına rağmen, uygulanan geleneksel doğruluk değerlendirme yöntemleri modellerin tahminlerinde etkili olan mekânsal ve anlamsal örüntüler hakkında sınırlı bilgi sunmaktadır. Derin yapay sinir ağlarının yüksek boyutlu içsel temsilleri, karar verme sürecinin anlaşılabilirliğini kısıtlamakta ve benzer doğruluk değerleri sunan modellerin farklı karar verme mekanizmaları geliştirebilmesine neden olmaktadır (Taskin vd., 2024). Özellikle tarımsal görüntülerde hedef sınıf ile arka plan arasında görülen spektral ve dokusal benzerlikler, model tahminlerinin bağlamsal özelliklerden etkilenme olasılığını artırmaktadır.

Açıklanabilir Yapay Zekâ (AYZ), model tahminlerinde etkili olan özelliklerin belirlenerek model davranışının yorumlanabilirliğini ve güvenilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda sınıf aktivasyon haritalama (class activation mapping-CAM) tabanlı yöntemler, hedef sınıf tahmininde etkili olan özelliklerin görüntü üzerindeki mekânsal dağılımını ortaya koymaktadır. Bu yöntemler arasında Grad-CAM, hedef sınıfa ilişkin gradyanları kullanarak özellik haritalarını ağırlıklandırırken, Score-CAM, aktivasyon haritalarının ileri yayılım sonucunda hedef skorda oluşturduğu değişimi esas almaktadır. Ablation-CAM ise özellik haritalarını kanal düzeyinde devre dışı bırakarak her bir kanalın model kararındaki etkisini belirlemektedir (Selvaraju vd., 2017; Wang vd., 2020; Desai ve Ramaswamy, 2020). Bu yöntemlerin farklı açıklama mekanizmalarına dayanması, model kararlarının karşılaştırmalı biçimde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ancak CAM haritalarının görsel nitelikleri, açıklamaların model kararına bağlılığını ve hedef sınıfla mekânsal uyumunu tek başına ortaya koymamaktadır. Bu nedenle aktivasyon haritalarında tanımlanan bilginin model çıktısı üzerindeki etkisinin piksel düzeyinde ölçülmesi gerekmektedir. Hammoud vd. (2026), CAM tabanlı açıklamaların semantik segmentasyonda piksel düzeyinde nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla S1, S2, S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerini içeren kapsamlı bir değerlendirme çerçevesi geliştirmiştir. Ancak İHA görüntülerinden tarımsal ürün segmentasyonunda farklı CAM yöntemlerini bu stratejiler altında karşılaştıran çalışmalar literatürde sınırlı kalmaktadır.

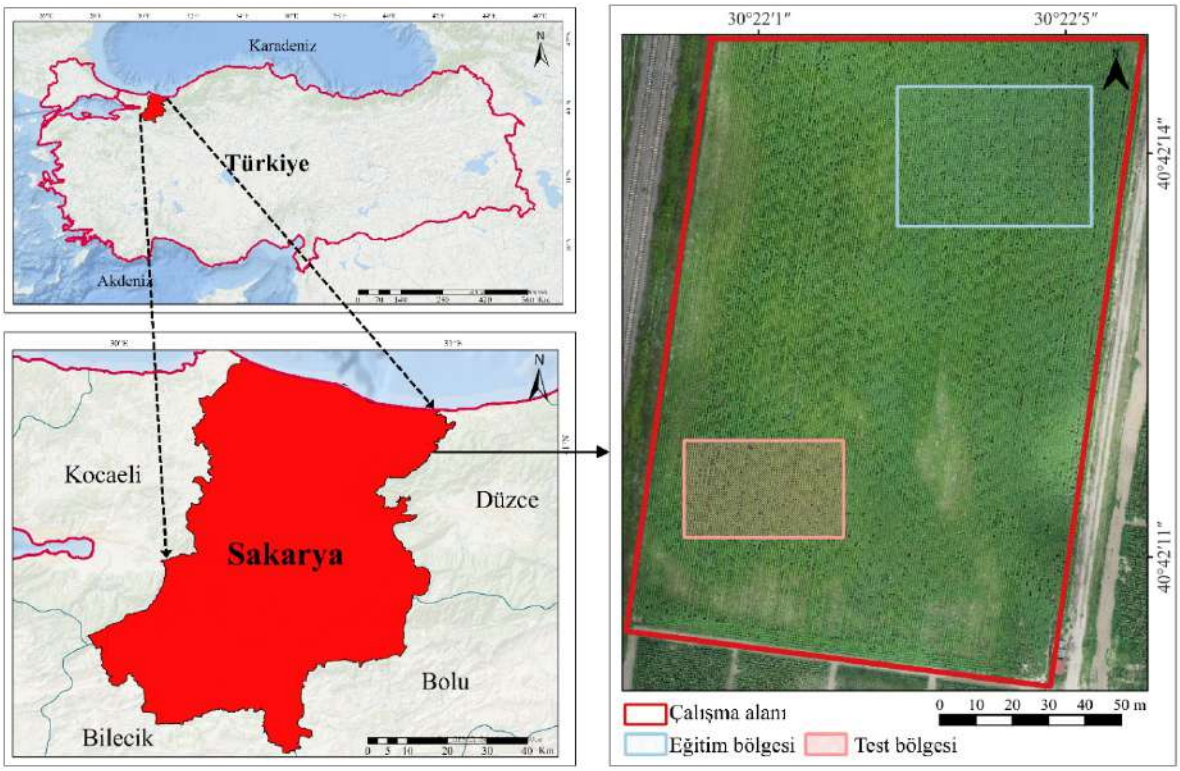
Bu çalışmada, İHA ortomozaiklerinden bireysel ayçiçeği tablalarının segmentasyonunda U-Net modelinin karar verme mekanizması Grad-CAM, Score-CAM ve Ablation-CAM yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma alanından üretilen veri setiyle eğitilen modelin segmentasyon performansı, mekânsal olarak bağımsız test alanında değerlendirilmiştir. Ardından AYZ analizi için uygulanan S1 stratejisinde CAM tarafından vurgulanan pikseller görüntüden maskelenerek çıkarılmış ve segmentasyon performansındaki düşüş ölçülmüştür. S2 stratejisinde arka plan maskelenerek vurgulanan pikseller korunmuş ve bu görüntüler üzerinden elde edilen model performansı değerlendirilmiştir. S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinde CAM maskeleri sırasıyla zemin gerçeği ve model tahmin maskeleriyle birleştirilmiş ve oluşturulan görüntüler yeniden U-Net modeline verilerek segmentasyon sonuçları incelenmiştir. Bu yönüyle çalışma, CAM yöntemlerinin ayçiçeği segmentasyonunda U-Net kararlarına etki

eden mekânsal bilgiyi tanımlama başarısını farklı stratejilerle nicel olarak değerlendirmekte ve tarımsal uygulamalarda model kararlarının şeffaflığının ve güvenilirliğinin değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Çalışma alanı, Sakarya ili Arifiye ilçesinde bulunan Kirazca Tarımsal Araştırma Alanı içerisindeki deneysel ayçiçeği tarlaları arasında yer almaktadır. Çalışma alanında ekimden 106 gün sonra ayçiçeği tablalarının belirginleştiği 29 Ağustos 2022 tarihinde İHA uçuşları gerçekleştirilmiştir. Bu dönem, çiçek tablalarının morfolojik gelişimlerini büyük ölçüde tamamladığı ve görüntü üzerinden belirgin biçimde ayırt edilebildiği gelişim evresine karşılık gelmektedir. RGB hava fotoğrafları, 20 MP Sony Exmor kameraya sahip DJI Phantom 4 Pro V2 İHA ile 50 m uçuş yüksekliğinde elde edilmiştir. Uçuş planı, %80 boyuna ve %60 enine bindirme oranlarıyla kuzey-güney ve doğu-batı yönlü rotaları içerecek şekilde çift-grid modda ve 70° bakış açısıyla gerçekleştirilmiştir. Hava fotoğrafları Agisoft Metashape yazılımında Hareketten Yapı (Structure from Motion–SfM) yaklaşımıyla işlenmiş, görüntü yöneltme işlemlerinin ardından yoğun nokta bulutu ve sayısal yüzey modeli oluşturularak 1,5 cm konumsal çözünürlüğe sahip RGB ortomozaik üretilmiştir.

Oluşturulan ortomozaiğin bir bölümü modelin eğitimi ve doğrulaması için ayrılmış ve bu bölgeden mekânsal olarak ayrık diğer bir bölümü ise bağımsız test alanı olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Bu alanlardaki ayçiçeği tablaları ortomozaik üzerinde manuel olarak etiketlenmiş ve elde edilen vektör veriler ikili raster maskelere dönüştürülmüştür. Ayçiçeği tablalarını temsil eden pikseller hedef sınıf, görüntüdeki geri kalan diğer pikseller ise arka plan sınıfı olarak tanımlanmıştır. Ortomozaik ile karşılık gelen zemin gerçeği maskesi, 128 × 128 piksel boyutlu eşlenik görüntü-maske parçalarına ayrılmıştır. Eğitim alanında oluşturulan veri seti %80 eğitim ve %20 doğrulama alt veri setlerine ayrılmış ve böylece nihai veri setinde 1.498 eğitim, 374 doğrulama ve 252 test görüntüsü elde edilmiştir. Test örneklerinin eğitim ve doğrulama alanlarından mekânsal olarak ayrılmasıyla doğrudan konumsal örtüşmenin önüne geçilmiş ve model performansının daha önce görülmemiş görüntü parçaları üzerinde değerlendirilmesi sağlanmıştır. AYZ analizleri ise bağımsız test veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanında tasarlanan eğitim ve test bölgeleri.

3. METODOLOJİ

3.1. U-Net

U-Net, piksel düzeyinde sınıflandırma için geliştirilen kodlayıcı-kod çözücü yapısına sahip bir semantik segmentasyon mimarisidir (Ronneberger vd., 2015). Kodlayıcı bölümünde ardışık evrişim ve havuzlama işlemleriyle görüntünün anlamsal özellikleri çıkarılırken, kod çözücü bölümünde özellik haritaları aşamalı olarak üst örneklenerek giriş görüntüsünün mekânsal çözünürlüğüne yeniden ulaşılmaktadır. İki bölüm arasındaki atlama bağlantıları, kodlayıcıda elde edilen yüksek çözünürlüklü mekânsal özellikleri karşılık gelen kod çözücü katmanlarına aktararak

nesne sınırlarının ve küçük ölçekli ayrıntıların korunmasını sağlamaktadır. Bu mimari, farklı ölçeklerde öğrenilen anlamsal ve mekânsal bilgilerin birlikte kullanılmasına olanak tanıması nedeniyle boyut ve yönelim bakımından değişkenlik gösteren nesnelerin segmentasyonuna uygun bir yapı sunmaktadır. Bu çalışmada U-Net mimarisi, 128 × 128 × 3 boyutundaki RGB görüntülerin analizine uygun olacak şekilde yapılandırılmıştır. Modelin kodlayıcı bölümünde sırasıyla 32, 64, 128 ve 256 filtre içeren evrişim blokları kullanılmış, düzeyler arasındaki boyut azaltma işlemi 2 × 2 maksimum havuzlama ile gerçekleştirilmiştir. Darboğaz katmanında filtre sayısı 512'ye çıkarılmıştır. Her evrişim bloğu, ardışık iki adet 3 × 3 evrişim katmanı ile bu katmanları izleyen toplu normalizasyon ve ReLU aktivasyon işlemlerinden oluşmuştur. Aşırı öğrenme riskini azaltmak amacıyla her bloğun ilk aktivasyon katmanından sonra 0,2 oranında dropout uygulanmıştır. Kod çözücü bölümünde özellik haritaları bilineer enterpolasyonla üst örneklenmiş ve atlama bağlantıları aracılığıyla karşılık gelen kodlayıcı özellikleriyle birleştirilmiştir. Ağın son katmanında kullanılan 1 × 1 evrişim ve sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile her pikselin ayçiçeği tablası sınıfına ait olma olasılığını gösteren ikili bir olasılık haritası üretilmiştir.

3.2. Açıklanabilir Yapay Zekâ (AYZ) Yöntemleri

Açıklanabilir Yapay Zekâ (AYZ), derin öğrenme modellerinin tahmin süreçlerinde rol oynayan özniteliklerin ve karar mekanizmalarının analiz edilmesini sağlayan yöntemleri kapsamaktadır. Bu çalışmada kullanılan sonradan açıklama yöntemleri, model eğitimi tamamlandıktan sonra mimariye müdahale etmeksizin belirli bir tahmine katkı sağlayan girdileri veya içsel özellikleri görünür hâle getirmektedir. Böylece modelin tahmin performansının yanı sıra kararlarının yorumlanabilirliği, tutarlılığı ve güvenilirliği de incelenebilmektedir (Barredo Arrieta vd., 2020). Bu doğrultuda kullanılan sınıf aktivasyon haritalama (CAM) tabanlı teknikler, evrişimsel katmanlarda üretilen özellik haritalarını hedef sınıfa olan katkılarına göre ağırlıklandırarak mekânsal önem haritaları oluşturmaktadır. Modelin giriş görüntüsü üzerinde odaklandığı bölgeleri gösteren bu haritalar, önem ağırlıklarının hesaplanma biçimine göre gradyan tabanlı, ileri yayılım skoruna dayalı veya ablasyon tabanlı yaklaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu yöntemler arasında Grad-CAM, modelin seçilen evrişim katmanında üretilen özellik haritaları ile hedef sınıf skorunun bu haritalara göre değişimini ifade eden gradyanları kullanmaktadır. Ardından bu gradyanların ortalaması alınır ve modelin hedef sınıfa ilişkin kararında etkili olan görüntü alanlarını gösteren sınıfa özgü bir ısı haritası oluşturulur (Selvaraju vd., 2017). Score-CAM, özellik haritalarının önemini gradyanlar yerine ileri yayılım sonucunda hedef sınıf skorunda meydana gelen değişime göre belirleyen bir yöntemdir. Seçilen katmandaki aktivasyon haritaları giriş görüntüsü boyutuna ölçeklendirilerek maske olarak uygulanmakta ve her maskelenmiş görüntü yeniden modele verilmektedir. Elde edilen hedef skorlar kanal ağırlıklarını oluşturmakta, bu ağırlıklarla birleştirilen aktivasyon haritaları sonucunda sınıfa özgü ısı haritası üretilmektedir (Wang vd., 2020). Ablation-CAM ise seçilen evrişim katmanındaki özellik kanallarını ayrı ayrı devre dışı bırakarak her kanalın hedef sınıf tahmini üzerindeki etkisini belirleyen bir yöntemdir. Kanalın çıkarılması sonucunda hedef sınıf skorunda oluşan azalma, ilgili özellik haritasının önem ağırlığı olarak kullanılmaktadır. Hesaplanan ağırlıklarla birleştirilen özellik haritaları, model kararında etkili olan görüntü bölgelerini gösteren sınıfa özgü bir yerelleştirme haritası oluşturmaktadır (Desai ve Ramaswamy, 2020). Bu çalışmada Grad-CAM, Score-CAM ve Ablation-CAM yöntemleri U-Net modelinin piksel düzeyindeki segmentasyon çıktısına uygulanmış ve yöntemlerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla tüm CAM haritaları aynı hedef katman ve test veri setinin tamamı kullanılarak üretilmiştir.

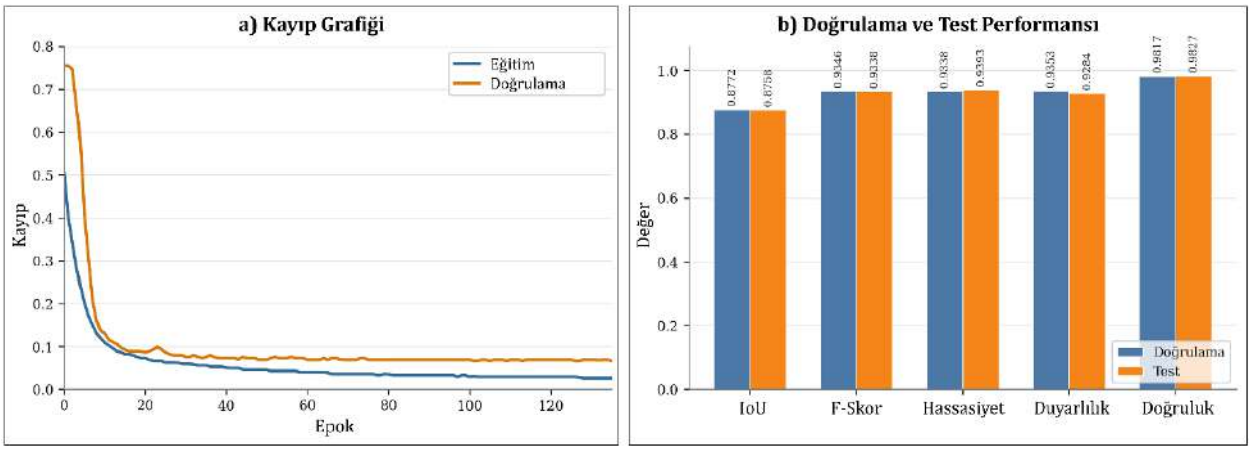
3.3. AYZ Yöntemlerinin Değerlendirme Stratejileri

Bu çalışmada, CAM tabanlı AYZ yöntemlerinin nicel olarak karşılaştırılması amacıyla Hammoud vd. (2026) tarafından semantik segmentasyon için önerilen değerlendirme çerçevesi kullanılmıştır. Bu çerçeve, CAM haritalarında vurgulanan piksellerin segmentasyon performansı üzerindeki etkisini farklı maskeleme koşullarında inceleyen S1-Arka Plan, S2-Vurgulanan Bölgeler, S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinden oluşmaktadır. S1 stratejisinde CAM tarafından vurgulanan pikseller görüntüden çıkarılarak arka plan korunmuştur. S2 stratejisinde arka plan maskelenmiş ve görüntüde vurgulanan pikseller korunmuştur. S3 stratejilerinde ise CAM maskesi, zemin gerçeği veya model tahmin maskesiyle birleştirilerek hedef sınıf pikselleri ile model kararına katkı sağlayabilecek komşu pikseller birlikte korunmuştur. Bu strateji, CAM maskesinin zemin gerçeğiyle birleştirildiği S3-XAI-GT ve U-Net tahmin maskesiyle birleştirildiği S3-XAI-PM olmak üzere iki biçimde uygulanmıştır. Maskeleme işlemlerinden önce CAM haritaları [0,1] aralığında normalleştirilmiş ve ikili maskelere dönüştürülmüştür. Ortak eşik değerinin belirlenmesi amacıyla doğrulama kümesinde CAM haritalarındaki piksel değerleri tek bir histogramda toplanarak bu histograma Otsu yöntemi uygulanmış ve belirlenen eşik değeri sabit tutularak test kümesinde bütün yöntemlerde kullanılmıştır (Otsu, 1979). Dört değerlendirme stratejisi kapsamında oluşturulan görüntüler yeniden U-Net modeline verilmiş ve elde edilen tahminler zemin gerçeğiyle karşılaştırılmıştır. Performansın ölçülmesinde IoU ve F-Skor metrikleri kullanılmıştır. S1 stratejisindeki düşük değerler, CAM tarafından belirlenen piksellerin çıkarılmasının model performansında daha büyük bir azalmaya neden olduğunu, S2 stratejisindeki yüksek değerler ise vurgulanan piksellerin segmentasyon tahminini sürdürmek için gerekli bilgiyi taşıdığını ifade etmektedir. S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerindeki yüksek değerler ise hedef sınıf pikselleri ile CAM tarafından vurgulanan komşu piksellerin birlikte korunmasının model performansını koruduğunu göstermektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

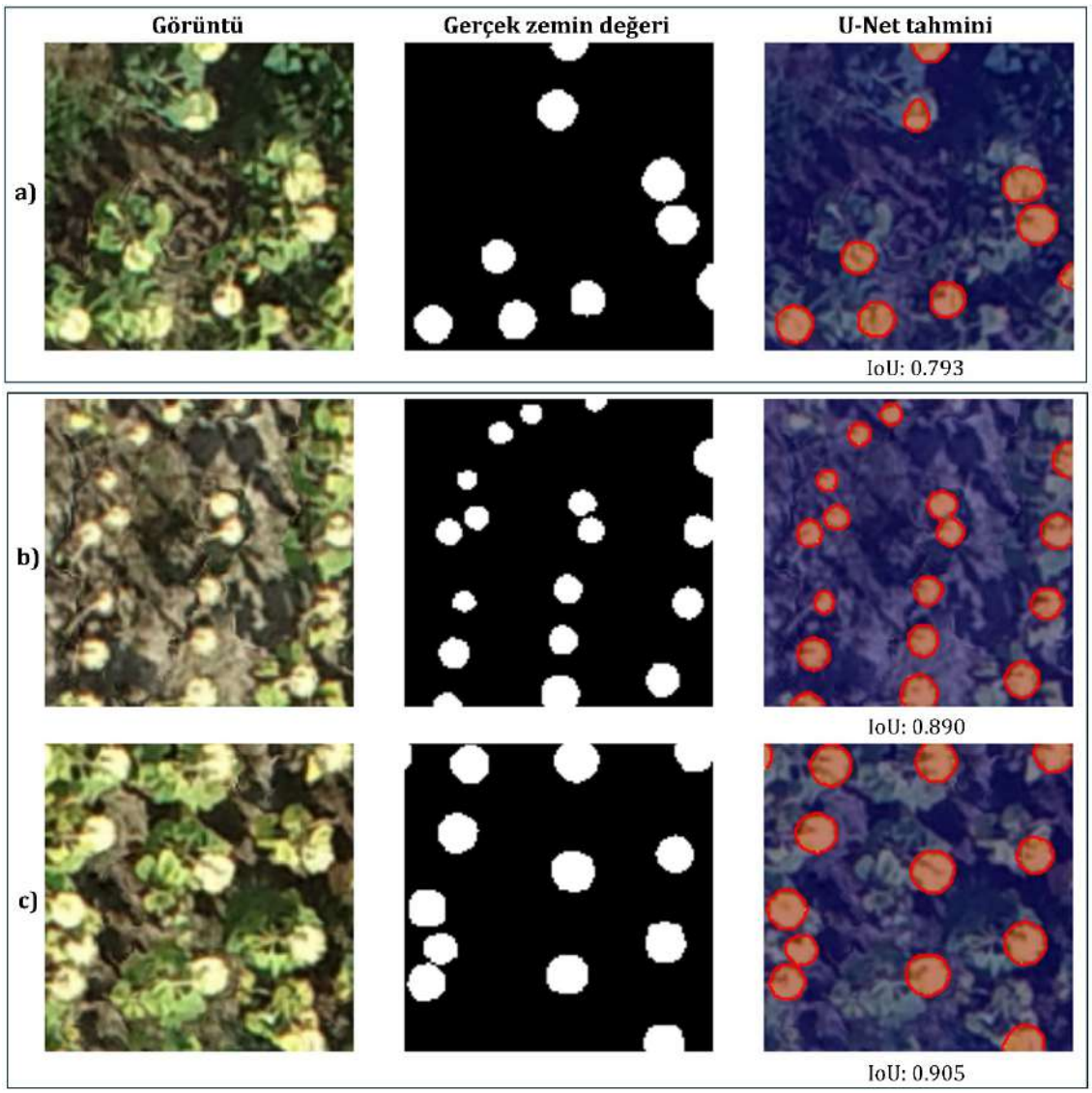
4.1. U-Net Performans Analizi

Çalışmada U-Net modelinin eğitimi ve değerlendirilmesi Google Colab Pro ortamında NVIDIA Tesla A100 GPU kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model eğitiminde Adam optimizasyonu, 0,001 başlangıç öğrenme oranı ve 0,0001 ağırlık çürüme katsayısı kullanılmıştır. Kayıp fonksiyonu olarak Dice kaybı kullanılmış, yığın boyutu 64 ve maksimum eğitim süresi 500 epok olarak ayarlanmıştır. Doğrulama kaybının 30 epok boyunca iyileşmemesi durumunda erken durdurma uygulanmış ve en düşük doğrulama kaybının elde edildiği model ağırlıkları kaydedilmiştir. Eğitim sürecinde IoU, F-Skor, hassasiyet, duyarlılık ve doğruluk metrikleri izlenmiş ve model çıktı olasılıkları 0,5 eşik değeri kullanılarak ikili segmentasyon maskelerine dönüştürülmüştür. Şekil 2a'daki kayıp eğrileri, eğitim ve doğrulama kayıplarının ilk epoklarda belirgin biçimde azaldığını ve sonraki epoklarda kararlı bir düzeye ulaştığını göstermektedir. Doğrulama kaybında sürekli bir artış görülmemesi, modelin belirgin bir aşırı öğrenme eğilimi göstermeden yakınsadığını işaret etmektedir. Model, doğrulama ve bağımsız test veri setlerinde sırasıyla 0,877 ve 0,876 IoU ile 0,935 ve 0,934 F-Skor değerlerine ulaşmıştır (Şekil 2b). İki veri setinden elde edilen metrikler arasındaki farkın sınırlı kalması, modelin segmentasyon performansını bağımsız test alanında büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir.



Şekil 2. U-Net modelinin (a) kayıp eğrileri ve (b) segmentasyon performansı.

U-Net modelinin segmentasyon performansı, bağımsız test veri setinden seçilen ve farklı hedef büyüklüğü, yoğunluğu, arka plan karmaşıklığı ve görüntü kalitesi koşullarını temsil eden üç örnek üzerinden nitel olarak incelenmiştir. Şekil 3a'daki ayçiçeği tablaları belirgin ve görece büyük olmasına rağmen spektral olarak çevredeki yapraklarla benzerlik göstermektedir. Burada model, tablaların büyük bölümünü hassas olarak tespit edebilmiş, ancak tabla sınırlarının yapraktan yeterince ayrılamaması tahmin maskelerinde bazı sınırlandırma hatalarına neden olmuştur. Bu sınır farklılıkları sonucunda görüntüye ait IoU değeri 0,793 olarak elde edilmiştir. Şekil 3b'de ise ortomozaik üretiminden kaynaklanan görüntü bozulmaları tablaların belirginliğini azaltmıştır. Model, görüntüdeki tablaların büyük bölümünü doğru biçimde tespit etmiş, ancak görüntünün üst kenarında bir kısmı kırpılmış olan bir tabla tahmin edilememiştir. Şekil 3c'deki görüntünün diğer örneklere göre daha net olması ve arka planın daha az karmaşık olması tablaların çevredeki bitki örtüsünden daha kolay ayrılmasını sağlamıştır. Tahmin maskesinin zemin gerçeğiyle büyük ölçüde örtüşmesi sonucunda seçilen örnekler arasındaki en yüksek IoU değeri olan 0,905'e ulaşılmıştır. Bu örnekler, segmentasyon performansının tabla büyüklüğünün yanı sıra hedeflerin yaprak nesnelerinden ayrılabilirliği, görüntü bozulmaları ve görüntü sınırında yer alma durumundan da etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 3. U-Net modelinin test veri setindeki örnek segmentasyon sonuçları.

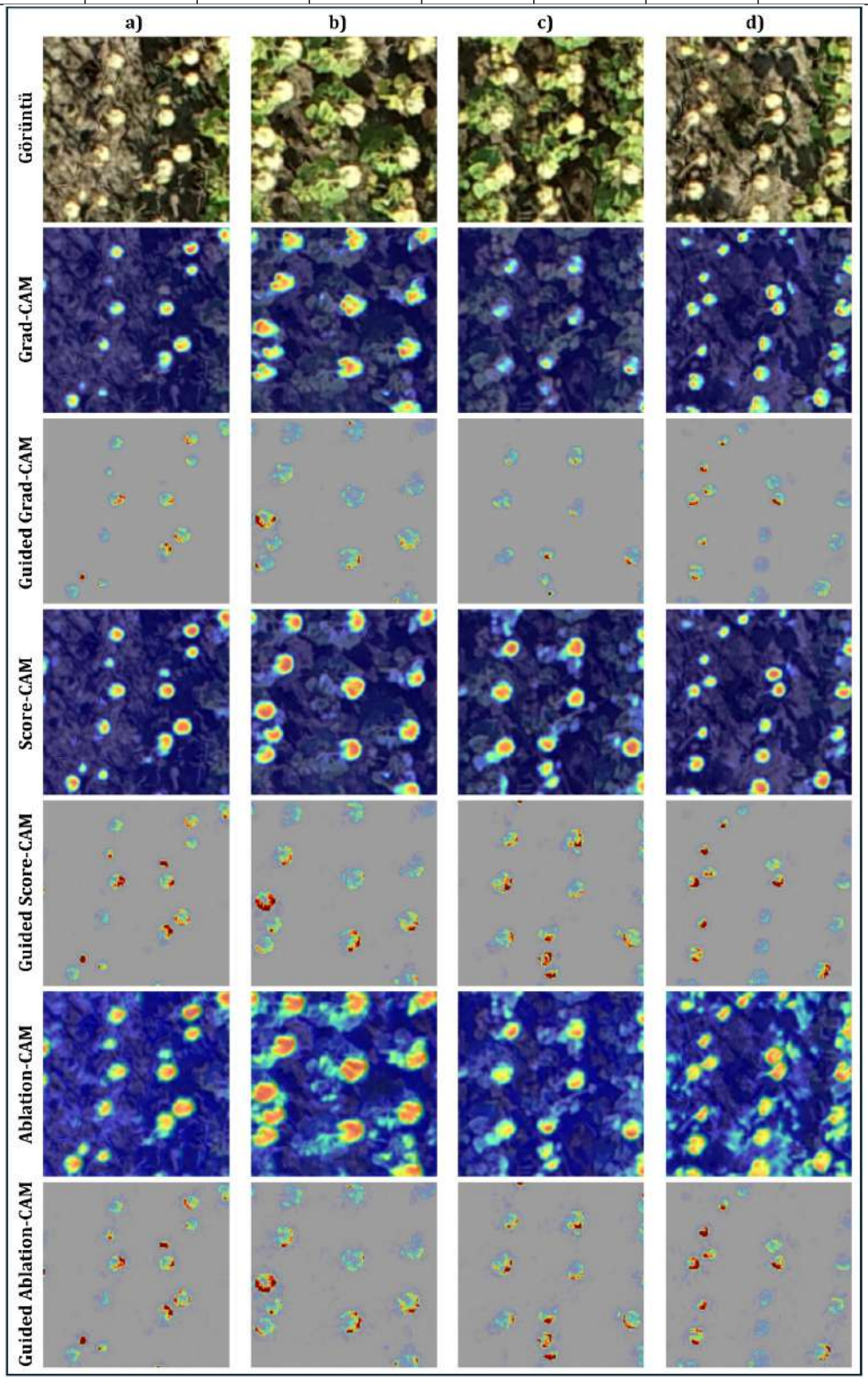
4.2. CAM Tabanlı AYZ Yöntemlerinin Nitel ve Nicel Analizi

CAM tabanlı AYZ yöntemlerinin model kararında etkili görüntü bölgelerini belirleme performansı, dört değerlendirme stratejisi kapsamında IoU ve F-Skor metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir (Tablo 1). Düşük değerlerin daha başarılı kabul edildiği S1 stratejisinde Ablation-CAM, 0,0003 IoU ve 0,0005 F-Skor ile model performansında en büyük düşüşü göstermiştir. Score-CAM'de de performans büyük ölçüde azalırken, Grad-CAM daha yüksek değerler üretmiştir. Grad-CAM'de daha yüksek değerlerin elde edilmesi, vurgulanan pikseller çıkarıldıktan sonra tahmini destekleyen bilginin bir bölümünün görüntüde korunduğunu göstermektedir. Yalnızca vurgulanan piksellerin korunduğu S2 stratejisinde ise Ablation-CAM, 0,8415 IoU ve 0,9139 F-Skor ile en yüksek performansa ulaşmış ve bu yöntemi Score-CAM izlemiştir. Bu sonuçlar, Ablation-CAM tarafından vurgulanan bölgelerin model tahmini açısından etkili bilgilerin önemli bir bölümünü içerdiğini göstermektedir. CAM maskelerinin zemin gerçeği ve model tahmin maskeleriyle birleştirildiği S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinde ise Grad-CAM sırasıyla 0,8888 ve 0,8538 IoU ile en yüksek performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, Grad-CAM tarafından vurgulanan piksellerin ilgili maskelerle birlikte kullanıldığında segmentasyon performansının korunmasına daha fazla katkı sağladığını göstermektedir.

CAM sonuçlarının görsel yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla Guided Backpropagation kullanılarak Guided Grad-CAM, Guided Score-CAM ve Guided Ablation-CAM görselleştirmeleri üretilmiştir. Guided sürümler nitel değerlendirmede, özgün CAM haritaları ise nicel analizlerde kullanılmıştır. Dört test örneği üzerinden gerçekleştirilen görsel incelemede Grad-CAM ve Score-CAM aktivasyonlarının büyük ölçüde ayçiçeği tablaları üzerinde yoğunlaştığı, Ablation-CAM'in ise çevredeki bitki dokusunu da kapsayan daha geniş ve dağınık aktivasyonlar oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4). Guided görselleştirmeler, tabla sınırları ve iç dokularla ilişkili piksel düzeyindeki katkıları daha belirgin hâle getirmiştir. Ablation-CAM'in geniş aktivasyon alanları S1 ve S2 sonuçlarıyla, Grad-CAM'in hedef sınıfa odaklanan aktivasyonları ise S3 sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

Tablo 1. CAM tabanlı AYZ yöntemlerinin farklı değerlendirme stratejilerine göre nicel sonuçları.

AYZ Yöntemi	S1		S2		S3-XAI-GT		S3-XAI-PM	
	IoU	F-Skor	IoU	F-Skor	IoU	F-Skor	IoU	F-Skor
Grad-CAM	0,3459	0,5140	0,4892	0,6570	0,8888	0,9411	0,8538	0,9211
Score-CAM	0,0030	0,0060	0,7933	0,8848	0,8773	0,9346	0,8503	0,9191
Ablation-CAM	0,0003	0,0005	0,8415	0,9139	0,8485	0,9180	0,8433	0,9150



Şekil 4. CAM yöntemlerinin örnek test görüntüleri üzerindeki görselleştirmeleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü İHA ortomozaiklerinden ayçiçeği tablalarının segmentasyonunda U-Net modelinin karar verme mekanizması CAM tabanlı AYZ yöntemleriyle incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre Ablation-CAM, S1 stratejisinde IoU değerini 0,0003'e düşürerek segmentasyon performansında en büyük düşüşü göstermiş ve S2 stratejisinde ise 0,8415 IoU ile en yüksek performansa ulaşmıştır. Bu sonuçlar, Ablation-CAM tarafından vurgulanan bölgelerin modelin tahmini üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Grad-CAM, S3-XAI-GT ve S3-XAI-PM stratejilerinde sırasıyla 0,8888 ve 0,8538 IoU değerleriyle en yüksek performansı elde etmiş ve vurguladığı piksellerin zemin gerçeği veya model tahmin maskesiyle birlikte kullanıldığında segmentasyon başarısının korunmasına daha fazla katkı sağladığını ortaya koymuştur. Görsel incelemelerde Grad-CAM ve Score-CAM aktivasyonlarının ağırlıklı olarak ayçiçeği tablaları üzerinde yoğunlaştığı, Ablation-CAM'in ise çevredeki bitki dokusunu da kapsayan daha geniş aktivasyonlar ürettiği belirlenmiştir. Yöntem performanslarının değerlendirme stratejilerine göre değişmesi, farklı CAM yaklaşımlarının model kararının farklı bileşenlerini açıkladığını ortaya koymuştur. Çalışma, CAM tabanlı AYZ yöntemlerinin farklı nicel değerlendirme stratejileri kapsamında incelenmesinin İHA görüntülerine dayalı tarımsal segmentasyon modellerinin açıklanabilirliğini ve güvenilirliğini değerlendirmede kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Ancak araştırma tek bir çalışma alanı, tek bir model ve bitki gelişim dönemi için yürütülmüştür. Gelecek çalışmalarda farklı üretim alanlarının, fenolojik dönemlerin ve segmentasyon mimarilerinin değerlendirmeye alınması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Agüera Vega, F., Carvajal Ramírez, F., Pérez Saiz, M., ve Orgaz Rosúa, F., 2015. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosystems Engineering,* 132: 19-27. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.01.008

Bai, B., Zhang, J., Song, Z., Zhou, P., ve Zhao, A., 2025. Enhancing sunflower head segmentation and counting using improved UNet. *Applied Engineering in Agriculture,* 41(2): 125-136. https://doi.org/10.13031/aea.16163

Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., ve Herrera, F., 2020. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion,* 58: 82-115. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012

Bouguettaya, A., Zarzour, H., Kechida, A., ve Taberkit, A. M., 2022. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review. *Neural Computing and Applications,* 34(12): 9511-9536. https://doi.org/10.1007/s00521-022-07104-9

Desai, S., ve Ramaswamy, H. G., 2020. Ablation-CAM: Visual explanations for deep convolutional network via gradient-free localization. *2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Snowmass, Colorado, ABD, syf: 972-980. https://doi.org/10.1109/WACV45572.2020.9093360

Dong, Y., Zhang, Y., Du, X., Wang, H., Li, Q., Shen, Y., Gong, S., Yan, S., Hu, H., Xiao, J., Xu, J., Zhang, Z., Hu, J., ve Zhao, Y., 2025. Field-scale single-plant sunflower head detection and geometric parameters measurement integrating multi-modal UAV data, deep learning and point cloud analysis. *Industrial Crops and Products,* 237: 122225. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122225

Hammoud, R., Gizzini, A. K., ve Ghandour, A. J., 2026. A quantitative evaluation framework for explainable AI in semantic segmentation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* Tehran, İran, X-4/W8-2025, syf: 323-330. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-323-2026

Iamchuen, N., Hongpradit, P., Puttinaovarat, S., ve Anucharn, T., 2026. Automated sunflower head detection and yield estimation from high-resolution UAV imagery using YOLOv11 for precision agriculture. *Sustainability,* 18(2): 1026. https://doi.org/10.3390/su18021026

Jing, R., Niu, Q., Tian, Y., Zhang, H., Zhao, Q., Li, Z., Zhou, X., ve Li, D., 2024. Sunflower-YOLO: Detection of sunflower capitula in UAV remote sensing images. *European Journal of Agronomy,* 160: 127332. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127332

Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,* 9(1): 62-66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076

Ronneberger, O., Fischer, P., ve Brox, T., 2015. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Navab, N., Hornegger, J., Wells, W. M., Frangi A. F. (Eds.), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015*, Springer International Publishing, Cham. syf: 234-241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., ve Batra, D., 2017. Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venedik, İtalya, syf: 618-626. https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74

Taskin, G., Aptoula, E., ve Ertürk, A., 2024. Explainable AI for Earth observation: Current methods, open challenges, and opportunities. Prasad, S., Chanussot, J., Li, J. (Eds.), *Advances in Machine Learning and Image Analysis for GeoAI*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, syf: 115-152. https://doi.org/10.1016/B978-0-44-319077-3.00012-2

Wang, H., Wang, Z., Du, M., Yang, F., Zhang, Z., Ding, S., Mardziel, P., ve Hu, X., 2020. Score-CAM: Score-weighted visual explanations for convolutional neural networks. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Seattle, Washington, ABD, syf: 111-119. https://doi.org/10.1109/CVPRW50498.2020.00020

Yildirim, E., Colkesen, I., ve Sefercik, U. G., 2026a. Field-scale sunflower head detection and spatial distribution patterns analysis using multi-temporal UAV imagery and deep learning. *2026 11th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, İstanbul, Türkiye. https://doi.org/10.1109/RAST69551.2026.11672439

Yildirim, E., Colkesen, I., ve Sefercik, U. G., 2026b. Evaluating transformer-and CNN-based semantic segmentation models for sunflower inflorescence identification using a UAV RGB orthomosaic. *Precision Agriculture*, 27: 3. https://doi.org/10.1007/s11119-026-10362-5

YOL ORTA EKSENLERİNİN YARI OTOMATİK TESPİTİ

Ömer CANÖZÜ [1], Hayrettin ACAR [2,3]

[1]Öğr. Gör., Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama, 58140, Sivas, Türkiye, omercanozu@cumhuriyet.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, h_acar@ktu.edu.tr
[3]Trabzon Teknokent, AcarTech Software and Engineering Limited Company, 61080, Trabzon, Türkiye

ÖZET

Gelişen akıllı ulaşım ve otonom araç teknolojileri, yüksek doğruluğa sahip yol ağı ve orta eksen verilerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu çalışmada, OpenStreetMap (OSM) yol verileri ile iki boyutlu (2B) nokta bulutu verilerinin entegrasyonuna dayalı, yüksek konumsal doğruluğa sahip ve yarı otomatik bir yol orta ekseni çıkarım metodolojisi önerilmiştir. Yöntemin ilk aşamasında, OSM yol segmentleri altlık veri olarak kullanılmış ve olası konumsal hataların etkisini azaltmak amacıyla yol eksenleri etrafında tampon bölgeler oluşturulmuştur. Bu bölgeler içerisinde kalan nokta bulutu verileri otomatik olarak seçilmiştir. Ardından, veri setindeki yol ve etrafındaki düzlemsel yüzeylerin matematiksel tespiti amacıyla RANSAC algoritması uygulanmıştır. Elde edilen düzlemler üzerinde, yol kenarı ve refüjlerdeki yeşil dokuyu ayırt etmek amacıyla Görünür Bölge Bitki Örtüsü İndeksi (VDVI) hesaplanarak bitki örtüsüne ait gürültü noktaları veri setinden yüksek bir doğrulukla elimine edilmiştir. Yol yüzeyini temsil eden noktalar, kullanıcı denetimli bir yaklaşımla doğrulanarak yarı otomatik süreç tamamlanmıştır. Ardından, elde edilen yol düzlem noktalarından yoğunluk tabanlı olarak yol merkez hattı hesaplanmış ve yüksek konumsal doğruluğa sahip yol orta eksenleri üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin OSM verilerindeki konumsal hataları azaltarak yüksek doğruluklu yol orta eksenlerinin elde edilmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntem, 2,5 m tampon tabanlı doğruluk analizi sonucunda TP, FP ve FN değerlerine dayalı olarak hesaplanan Precision (%84,47), Recall (%85,25), F1-Skoru (%84,86) ve IoU (%85,25) metriklerinde %84'ün üzerinde yüksek performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yol Orta Ekseni, 3B Nokta Bulutu, OpenStreetMap, RANSAC

ABSTRACT

SEMİ AUTOMATİC DETECTİON OF ROAD CENTERLİNES

Advancements in intelligent transportation systems and autonomous vehicle technologies have significantly increased the demand for high-accuracy road network and centerline data. In this study, a semi-automatic road centerline extraction methodology with high positional accuracy is presented, leveraging the integration of OpenStreetMap (OSM) road vectors and two-dimensional (2D) point cloud data. In the initial phase of the proposed framework, OSM road segments served as baseline data, around which buffer zones were established to mitigate potential positional discrepancies. Point cloud data within these buffered regions were automatically extracted. Subsequently, the Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm was implemented to mathematically detect planar surfaces representing the road and its immediate surroundings. On the extracted planes, the Visible Atmospherically Resistant Index (VDVI) was computed to discriminate green vegetation along road margins and medians, thereby effectively eliminating vegetation-induced noise with high precision. The candidate points representing the road surface were validated through a user-guided approach to finalize the semi-automatic workflow. Density-based spatial analysis was subsequently applied to the refined road plane points to compute the central trajectory, yielding 3D road centerlines with superior positional fidelity. The empirical results demonstrate that the proposed method successfully corrects positional errors inherent in OSM data to produce highly accurate road centerlines. Quantitative evaluation via a 2.5 m buffer-based accuracy assessment—derived from True Positive (TP), False Positive (FP), and False Negative (FN) parameters—revealed a robust performance exceeding 84% across all evaluation metrics, achieving a Precision of 84.47%, a Recall of 85.25%, an F1-Score of 84.86%, and an Intersection over Union (IoU) of 85.25%.

Keywords: Road Centerline, 3D Point Cloud, OpenStreetMap, RANSAC

1. GİRİŞ

Akıllı ulaşım sistemleri ve otonom araç teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, yüksek doğruluklu ve güncel yol ağı ile yol orta ekseni verilerine duyulan gereksinimi giderek artırmaktadır. Bu tür veriler, akıllı şehir uygulamaları, lojistik ve ulaşım planlaması, afet yönetimi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı analizlerde önemli bir mekânsal veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle yol geometrisinin doğru bir şekilde temsil edilmesi ve mevcut yol verilerinin güncel tutulması, gerçekleştirilecek mekânsal analizlerin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Özellikle yol güzergâhlarının belirlenmesi, ulaşım ağlarının modellenmesi ve farklı uygulamalara yönelik mekânsal analizlerin gerçekleştirilmesinde yüksek geometrik doğruluğa sahip yol verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla

birlikte, geleneksel arazi ölçme yöntemlerinin zaman, maliyet ve iş gücü açısından önemli gereksinimler ortaya çıkarması, uzaktan algılama verilerinden yararlanılarak yol bilgilerinin otomatik veya yarı otomatik olarak elde edilmesine yönelik araştırmaların önem kazanmasına neden olmuştur. Bu kapsamda, geniş çalışma alanlarında yol geometrisinin kısa sürede ve etkin bir biçimde belirlenebilmesi amacıyla farklı uzaktan algılama veri kaynaklarından yararlanılmaktadır. Özellikle LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutları, yüksek konumsal doğruluklarının yanı sıra yüzeyin üç boyutlu geometrisini ayrıntılı biçimde temsil edebilmeleri nedeniyle yol yüzeyi ve yol orta ekseni çıkarımında önemli bir veri kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu verilerden elde edilen üç boyutlu geometrik bilgiler, yol yüzeyinin çevresindeki diğer nesnelerden ayrıştırılmasına ve yol orta ekseninin daha hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, 3B nokta bulutu verilerinden yol yüzeyi, yol sınırı ve yol orta ekseni çıkarımına yönelik çok sayıda yöntemin geliştirildiği görülmektedir. Geometrik segmentasyon, süper voksel, voksel filtreleme ve bölge büyütme gibi klasik yöntemlerin yanı sıra Random Forest ve PointNet++ gibi makine ve derin öğrenme tabanlı yöntemler de yol noktalarının sınıflandırılması ve yol geometrisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ferraz vd., 2016; Li vd., 2016; Mi vd., 2021; Rato vd., 2021; Ma vd., 2022; Martínez vd., 2020). Bu yöntemlerde, nokta bulutlarının sağladığı üç boyutlu konum, yükseklik, yoğunluk ve geometrik özelliklerden yararlanılarak yol yüzeyinin çevredeki nesnelerden ayrılması ve daha sonra yol sınırları veya orta eksenlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Li vd. (2016), yoğunluk ve geometri tabanlı indislerden yararlanarak LiDAR verilerinden yol yüzeylerini %88.4 doğrulukla sınıflandırmış ve yol eksenlerinin belirlenmesinde PCA tabanlı bir yaklaşım kullanmıştır. Mi vd. (2021), MLS nokta bulutlarında süper-voksel tabanlı bir yöntem kullanarak yol sınırlarının belirlenmesinde %95.0 kesinlik ve %91.0 duyarlılık elde ederken, Rato vd. (2021) 3B LiDAR verilerini yoğunluk esaslı doluluk ızgaralarına dönüştürerek kenar tespiti ve voksel filtreleme tekniklerinden yararlanmıştır. Martínez vd. (2020) ise iki kademeli bölge büyütme ve sıçrama tespiti yaklaşımlarını kullanarak yoğunluk, eğrilik ve alan filtrelerinden oluşan dört aşamalı bir işlem zinciri sonucunda %93 tamamlayıcılık oranına ulaşmıştır. Makine ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerde de yüksek başarılar rapor edilmiştir. Ferraz vd. (2016), geniş ormanlık alanlardaki topoğrafik LiDAR verilerine Random Forest algoritmasını uygulayarak %80'in üzerinde başarı elde etmiş; Ma vd. (2022) ise LiDAR ve optik verileri birlikte değerlendirerek PointNet++ tabanlı bir model geliştirmiş ve yol eksenlerini %86.3 doğrulukla elde etmiştir. Biçici ve Zeybek (2021) Random Forest ile sınıflandırılan yol noktalarından Voronoi diyagramları aracılığıyla yol eksenlerini türeterek %99.9 başarım oranına ulaşırken, Zeybek ve Biçici (2023) MLS nokta verilerinden yol kaplaması ve yol envanter elemanlarını ayırarak 0.989, 0.991 ve 0.946 düzeylerinde F1-skorları elde etmiştir. Bu sonuçlar, 3B nokta bulutlarının yol yüzeyi ve yol geometrisinin belirlenmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, mevcut yöntemlerin başarısının çalışma alanının özelliklerine, nokta yoğunluğuna, yol geometrisine ve kullanılan algoritmanın parametrelerine bağlı olarak değişebildiği görülmektedir. Özellikle düşük nokta yoğunluğu, bitki örtüsü ve bina kaynaklı örtülme, araçların yol yüzeyini kapatması, yol ile kaldırım arasındaki kot farkının azalması ve karmaşık kavşak geometrileri yol çıkarım performansını sınırlandıran başlıca faktörlerdir. Wang vd. (2024), düşük nokta yoğunluğunda yol yüzeylerinin belirlenmesinde performans kaybı yaşandığını ve yöntemin yalnızca tek bir kentsel bölgede test edilmesinin önemli bir sınırlılık oluşturduğunu belirtmiştir. Ma vd. (2022) seyrek nokta bulutlarında bazı yol kesimlerinin gözden kaçabildiğini ve yöntemin eğitim verisinin kalitesine yüksek düzeyde bağımlı olduğunu ifade etmiştir. Hui vd. (2016), bitki örtüsü ve araç örtülmelerinin yol orta ekseni çıkarımında hatalara neden olduğunu bildirirken, Suleymanoglu vd. (2024) yol ile kaldırım arasındaki düşey kot farkının azalması durumunda kaldırım tespitinin zorlaştığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde Biçici ve Zeybek (2022), uçuş irtifasının artmasıyla veri setine daha fazla yol dışı unsurun dâhil olmasının yöntemin genellenebilirliğini olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Yöntemlerin parametre bağımlılığı da önemli bir sınırlılık olarak öne çıkmaktadır. Ferraz vd. (2016), yol genişliklerinin manuel olarak girilmesi gerektiğini belirtirken, süper-voksel, voksel ve bölge büyütme tabanlı yaklaşımlarda hücre boyutu, yoğunluk eşiği, komşuluk ilişkisi ve geometrik filtrelerin sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir (Mi vd., 2021; Rato vd., 2021; Martínez vd., 2020). Yol orta eksenlerinin çıkarılmasında kullanılan RANSAC, PCA, Hough Dönüşümü, Voronoi Diyagramları ve DBSCAN gibi farklı yöntemler de belirli çalışma koşullarında başarılı sonuçlar vermektedir (Hui vd., 2016; Biçici ve Zeybek, 2021; Zeybek ve Biçici, 2023; Suleymanoglu vd., 2024; Wang vd., 2024). Ancak Biçici ve Zeybek (2021) ile Zeybek ve Biçici (2023) tarafından da belirtildiği üzere, çoklu kavşaklar, keskin virajlar ve düzensiz yol geometrileri gibi karmaşık yapıların bulunduğu alanlarda yöntemlerin genellenebilirliği ve geometrik sürekliliği olumsuz etkilenebilmektedir.

Literatürdeki bu çalışmalar, 3B nokta bulutu verilerinden yol yüzeyi ve yol orta ekseni çıkarımında önemli ilerlemeler sağlandığını göstermesine rağmen, mevcut yaklaşımların önemli bir bölümünün yol ağının tamamen otomatik olarak yeniden oluşturulmasına veya öncelikle yol noktalarının sınıflandırılmasına odaklandığı görülmektedir (Li vd., 2016; Ferraz vd., 2016; Ma vd., 2022; Martínez vd., 2020). Buna karşılık, mevcut bir yol ağı verisinin başlangıç geometrisi olarak kullanılması ve bu geometrinin yüksek yoğunluklu 3B nokta bulutu verileri yardımıyla gerçek arazi koşullarına göre iyileştirilmesine yönelik çalışmaların daha sınırlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu noktada OpenStreetMap (OSM) verileri önemli bir başlangıç kaynağı sunmaktadır. OSM, geniş coğrafi kapsamı, kolay erişilebilirliği ve kullanıcı katkılarıyla sürekli güncellenebilmesi sayesinde yol ağlarının hızlı biçimde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, gönüllü coğrafi bilgi (VGI) niteliğindeki OSM verilerinin konumsal ve geometrik

doğruluğu veri üretim sürecine ve kullanıcı katkılarına bağlı olarak değişebilmekte ve bu durum yüksek hassasiyet gerektiren mühendislik uygulamalarında tek başına kullanımını sınırlandırabilmektedir. Özellikle yol orta ekseninin birkaç metre düzeyindeki konumsal değişimlerinin önemli olduğu uygulamalarda, OSM geometrisinin gerçek araziyi temsil eden daha hassas verilerle desteklenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda LiDAR ve fotogrametrik 3B nokta bulutları, yol yüzeyinin ayrıntılı geometrisini ve yükseklik bilgisini sağlayarak OSM verilerinin geometrik açıdan iyileştirilmesine olanak sunmaktadır. Li vd. (2016), Mi vd. (2021), Rato vd. (2021) ve Suleymanoglu vd. (2024) tarafından elde edilen sonuçlar, 3B nokta bulutlarının yol yüzeyi ve yol sınırlarının ayrıntılı biçimde belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla OSM verisinin yol ağının mevcut bağlantılarını ve yaklaşık geometrisini sağlaması, 3B nokta bulutunun ise gerçek yüzey koşullarına ilişkin yüksek ayrıntılı geometrik bilgi sunması, iki veri kaynağının birbirini tamamlayıcı nitelikte kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu entegrasyon sayesinde yalnızca nokta bulutundan yol ağını sıfırdan çıkarmaya dayalı yöntemlerde ortaya çıkabilecek eksik yol segmentleri ve bağlantı kopmaları azaltılırken, yalnızca OSM verisine dayalı yaklaşımlarda görülebilecek konumsal sapmaların da giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu yönüyle çalışmanın temel özgünlüğü, OSM yol geometrisinin nihai veri olarak kabul edilmesi yerine, 3B nokta bulutu içerisindeki yol yüzeyi ve geometrik bilgiler kullanılarak gerçek arazi koşullarına göre iyileştirilmesi ve yol orta eksenlerinin yeniden oluşturulmasıdır.

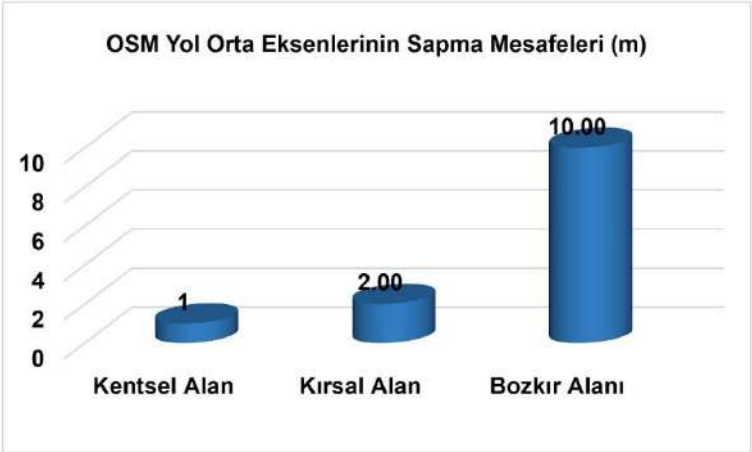
Bu çalışmada, literatürde vurgulanan kısıtlamalar doğrultusunda tamamen otomatik yaklaşımlar yerine yarı otomatik bir metodoloji benimsenmiştir. Bu tercihin temel gerekçesi; yol ağlarının değişken genişlik, geometrik form ve çevresel koşullar sergilemesi nedeniyle mevcut otomatik algoritmaların bu tür karmaşık yapılarda performans kaybı yaşamasıdır (Wang vd., 2024; Ma vd., 2022; Biçici ve Zeybek, 2022). Özellikle karmaşık kavşak konfigürasyonları, keskin dönüşler, düzensiz yol geometrileri, düşük nokta yoğunluğu ile bitki örtüsü ve araç kaynaklı gölgelenme (oklüzyon) etkileri, yol orta eksenlerinin tamamen otomatik ve güvenilir biçimde kestirilmesini zorlaştırmaktadır (Hui vd., 2016; Ma vd., 2022; Wang vd., 2024). Buna ek olarak, mevcut literatürdeki birçok yöntemin sabit yol genişlikleri ve algoritmik eşik parametrelerine bağımlı olduğu görülmektedir (Ferraz vd., 2016; Mi vd., 2021; Rato vd., 2021).

Sunulan yarı otomatik yaklaşım, otomatik algoritmaların sunduğu yüksek işlem hızı ve tekrarlanabilirlik avantajlarını uzman kullanıcı denetimiyle entegre ederek daha esnek ve dirençli (robust) bir çözüm sunmaktadır. Önerilen iş akışında, kullanıcı tarafından yalnızca temel başlangıç parametrelerinin tanımlanması ve ilgili yol segmentinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Sonrasında geometrik işlemler algoritmik olarak yürütülmektedir. Böylelikle tam manuel sayısallaştırmanın getirdiği zaman ve iş gücü maliyetleri minimize edilirken, tamamen otomatik yöntemlerde sıklıkla karşılaşılan hatalı segment seçimi, geometrik süreklilik kaybı ve değişken yol tipolojilerine uyumsuzluk gibi problemler de ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmanın temel özgün değeri, yol orta eksenlerinin belirlenmesinde mevcut yol vektör verilerinin başlangıç geometrisi olarak kullanılmasıdır. Bu veriler, 3B nokta bulutu ile bütünleştirilerek yol yüzeyine ilişkin geometrik bilgiler elde edilmiştir. Böylece yol orta eksenlerinin yarı otomatik olarak yeniden oluşturulmasını sağlayan bütünleşik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem mevcut yol ağlarının güncel arazi koşullarına hassas bir şekilde uyarlanmasını, yol orta eksenlerinin geometrik doğruluğunun artırılmasını ve manuel veri üretim ihtiyacının azaltılmasını amaçlamaktadır. Önerilen metodoloji herhangi bir eğitim veri setine veya ön öğrenme sürecine gereksinim duymaksızın, radyometrik kısıtlamalardan etkilenmeden, 3B nokta bulutu ve OSM verilerinden yüksek doğrulukta ve geometrik sürekliliğe sahip bütünleşik vektör yol eksenleri yarı otomatik bir şekilde üretebilmektedir.

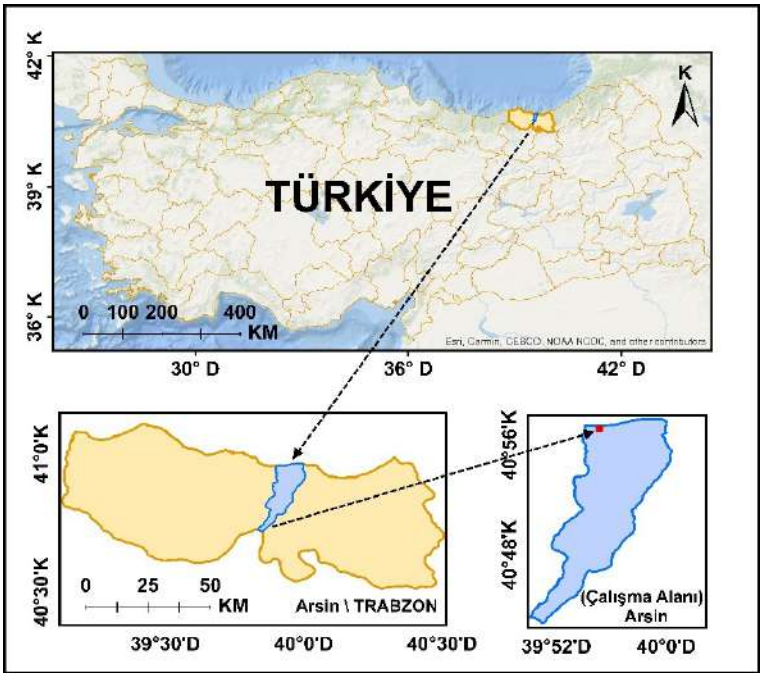
2. ÇALIŞMA VERİ SETİ VE METODOLOJİ

Bu çalışmada, yol orta eksenlerinin yarı otomatik olarak çıkarılması amacıyla OpenStreetMap (OSM) yol vektör verileri kullanılmıştır. OSM, kullanıcı katkılarıyla sürekli güncellenen açık erişimli bir veri kaynağıdır. OSM verilerinin konumsal doğruluğu, çalışma alanının özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kent içi, kırsal ve seyrek nüfuslu bozkır alanlarında gözlenen konumsal sapma değerleri sırasıyla 0.5–1 m, 1–2 m ve 5–10 m olarak Şekil 1'de verilmiştir. Haklay (2010), OSM ana yol ağlarında GNSS referanslarına göre yaklaşık 6 m, en olumsuz durumlarda ise 20 m'ye kadar konum sapması bildirmiştir. Bu doğrultuda, OSM yol geometrilerindeki olası konumsal sapmaları kapsamak amacıyla referans yol eksenlerinin her iki tarafına 20'şer metrelik tampon bölge uygulanarak toplam 40 metre genişliğinde bir buffer oluşturulmuştur.



Şekil 1. Arazi kullanım türlerine göre OSM yol ağlarındaki konumsal sapmalar

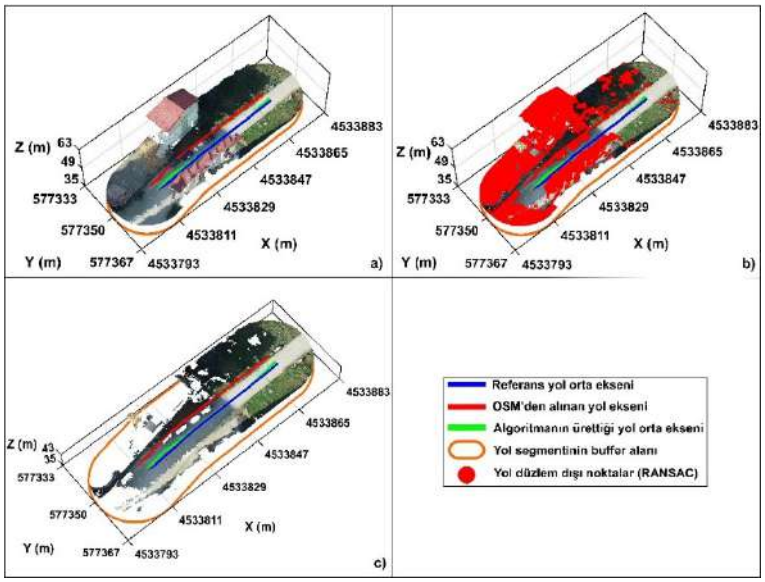
Çalışma alanı, Trabzon ili Arsin ilçesinde yaklaşık 9.28 hektarlık bir bölgeyi kapsamaktadır. Çalışma alanının seçiminde, OSM verilerinin kırsal alan kaynaklı belirgin hatalar barındırması, yol genişliklerinin değişkenliği ve yoğun bitki örtüsü ile binaların yol yüzeyini kapatması etkili olmuştur. Ayrıca dik eğimler ve çevredeki arazi koşullarının sunduğu topoğrafik çeşitlilik, önerilen yöntemin başarımını farklı zorluk derecelerinde test etmek amacıyla göz önüne alınmıştır. Böylece geliştirilen yaklaşımın karmaşık saha şartlarındaki doğruluğu ve dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Alana ait İHA fotogrametrik verilerinden üretilen 3B nokta bulutu, ortalama 126 nokta/m² yoğunluğa sahiptir. Çalışma alanında eğimli topoğrafya, dağınık yerleşim dokusu, farklı genişlik ve geometrilere sahip yollar ile yoğun bitki örtüsü bir arada bulunmaktadır. Bu özellikler, yol orta eksenlerinin belirlenmesinde karşılaşılabilecek farklı çevresel ve geometrik koşulların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma alanının Türkiye içerisindeki coğrafi konumu Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışma Alanı

Önerilen yöntem, açık kaynaklı OpenStreetMap (OSM) verilerindeki konumsal hataları en aza indirmeyi ve 3B nokta bulutunun yüksek geometrik hassasiyetinden yararlanarak yol orta eksenlerini yarı otomatik bir yaklaşımla üretmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma alanı belirlendikten sonra, OSM yol çizgileri geometrik sürekliliklerini korumak ve homojen segmentler elde etmek amacıyla 20°'lik açısal eşik temel alınarak segmentlere ayrılmıştır. Ardışık segmentler arasındaki açısal farkın 20°'yi aştığı düğüm noktaları gerçek kırılma kabul edilerek yol geometrisi ayrıştırılmıştır. Kullanılan 20°'lik eşik değeri; 20°'ye kadar olan sapmaların yönsel bir değişim oluşturmayıp hat sürekliliğini koruduğunu belirten Jiang ve Claramunt (2004) ile 15°–25° aralığındaki açısal filtrelemenin genel formu bozmadan işlem yükünü optimize ettiğini gösteren Li (2006) çalışmalarındaki genelleştirme ilkeleriyle uyumludur. Bu segmentasyon sayesinde, yol düzlem aramasını sınırlandırmak ve RANSAC ile tampon analizlerini doğru hatlar üzerinde yürütmek üzere segmentler etrafında dinamik tampon bölgeler (buffer) oluşturulmuştur. Şekil 3'te ilgili yol segmenti etrafında üretilen turuncu renkli buffer alanı gösterilmektedir. Oluşturulan bu buffer alanları aracılığıyla yol yüzeyi ve çevresini içeren 3B nokta kümesi otomatik olarak seçilerek mekânsal bazda sınırlandırılmıştır. Yapılan bu ön ayıklama sayesinde veri seti optimize edilerek işlem yükü hafifletilmiştir. Buna karşın ilgili alanlar; binalar, bitki örtüsü, kaldırımlar ve araçlar gibi zemin dışı unsurlardan kaynaklı yüksek oranda gürültü içermektedir. Bu karmaşık yapıları elemek amacıyla iki aşamalı bir filtreleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu doğrultuda RANSAC algoritması, nokta bulutlarında yol yüzeyinin tespiti ve gürültü noktalarının ayıklanmasında etkili bir araç olarak kullanılmıştır (Zuo vd., 2023). Yol yüzeyinin düzlemsel karakteri esas alınarak buffer içerisindeki noktalara RANSAC düzlem uydurma algoritması uygulanmıştır. Analiz aşamasında 1 m mesafe eşiği, 1000 yineleme ve %99 güven sınırı parametreleri tanımlanarak baskın yol tabanları matematiksel olarak modellenmiştir. Bu işlem sonucunda binalar, araçlar ve bitki örtüsü gibi düzlem dışı aykırı veriler elenerek Şekil 3'te kırmızı renkle vurgulanmıştır. Böylelikle sonraki işlem adımları için yalnızca net yol yüzeyi ve yol yüzeyiyle paralellik gösteren düzlemsel yapılar korunarak temizlenmiş nokta kümesi elde edilmiştir.



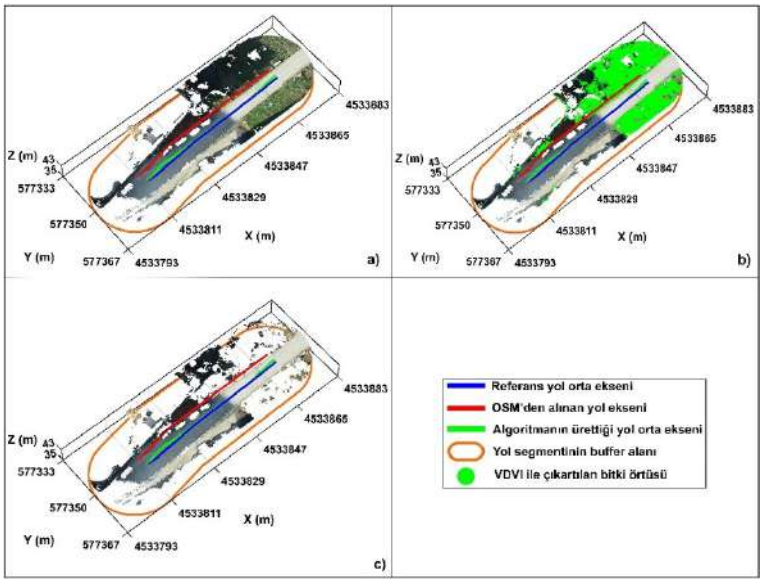
Şekil 3. Tampon bölgelerde RANSAC tabanlı düzlem çıkarımı ile yol tabanının tespiti ve yol dışı noktaların (kırmızı) filtrelenmesi

Ardından, yol kenarları ile refüjlerdeki yeşil vejetasyonu tespit etmek ve bu alanların gürültü etkisini azaltmak amacıyla Görünür Bölge Bitki Örtüsü İndeksi (VDVI) tercih edilmiştir. Spektral RGB bilgisine sahip 3B nokta bulutu verilerine Eşitlik 1 uygulanarak her bir noktanın VDVI değeri elde edilmiş ve bitki örtüsü noktaları başarıyla seçilmiştir.

$$\mathrm{VDVI} = \frac{2 \cdot G - R - B}{2 \cdot G + R + B} \tag{1}$$

RGB tabanlı vejetasyon ayrıştırmada sabit bir eşik bulunmamakla birlikte, alt eşik literatürde genellikle 0,05-0,13 aralığında önerilmektedir (Yan vd., 2021). Bu çalışmada gölgeli ve zayıf bitki örtüsünü kaçırmamak adına alt eşik 0,05; parlak yapay yüzeylerin spektral gürültüsünü önlemek amacıyla üst eşik 0,90 olarak uygulanmış ve bu aralıktaki noktalar bitki örtüsü temsil ettiği için elenmiştir.

Şekil 4'te (a) görselinde, RANSAC işlemi sonrasında elde edilen yol düzlemine ait ve bu düzleme paralel konumda bulunan noktalar gösterilmektedir. (b) görselinde, VDVI analizi ile bitki örtüsüne ait olduğu belirlenen noktalar yeşil renkte gösterilmektedir. (c) görselinde ise yeşil renkle gösterilen bitki örtüsüne ait noktaların çıkarılmasının ardından geriye kalan noktalar gösterilmektedir. Bu noktalar, yol segmenti içerisinde yer alan ve yol düzlemi üzerinde veya bu düzleme yakın konumda bulunan nihai noktaları temsil etmektedir.



Şekil 4. VDVI ile bitki örtüsüne ait noktaların tespiti

Bitki örtüsü noktalarının veri setinden başarıyla uzaklaştırılmasının ardından, otoparklar, yol banketleri ve kaldırımlar gibi yol yüzeyiyle aynı yükseklik seviyesinde bulunan ancak ana yol gövdesine ait olmayan karmaşık ve düzlemsel yapıların ayrıştırılması aşamasına geçilmiştir. Bu doğrultuda, saf yol yüzeyi noktalarını izole etmek ve doğru yol orta eksenlerini tespit etmek amacıyla yoğunluk tabanlı ve yarı otomatik bir analiz yaklaşımı uygulanmıştır.

İşlem sürecinde ilk olarak, yol segmentlerinin yerel yönelimleri boyunca dik birim normal vektörler yönünde eşit aralıklı paralel hatlar (öteleme eğrileri) türetilmiş ve bu hatların birleştirilmesiyle yolu kapsayan paralel grid ağları oluşturulmuştur. Sürecin karar aşamasında ise segmente özgü dinamik bir nokta yoğunluğu analizi benimsenmiştir. Her yol segmenti için en yüksek ve en düzenli nokta dağılımını gösteren grid alanı referans kabul edilerek, segmente özel ideal bir nokta yoğunluğu eşik değeri otomatik olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen istatistiki değerlendirmeler kapsamında, bu referans eşik değerinin belirlenen yüzdesini (%70) aşan gridler ana yol yüzeyi olarak sınıflandırılmıştır. Eşik değerin altında kalan düşük yoğunluklu ve gürültülü alanlar elenerek nihai yol noktaları izole edilmiştir.

Derin öğrenme modellerinin aksine herhangi bir ön eğitim verisine gereksinim duymayan bu metodolojide, algoritmanın tam otomatik çalıştığı aşamaların yanı sıra esnek bir iş akışı kurgulanmıştır. Karmaşık kavşak yapıları, belirgin şerit ayrımları veya yoğun gürültülü alanlar gibi tam otomatik algoritmaların yetersiz kaldığı lokal bölgelerde, operatör müdahalesine (manuel ayrıştırmaya ve doğrulamaya) imkân tanıyan yarı otomatik bir yapı benimsenmiştir.

Son aşamada, yoğunluk tabanlı analizler ve manuel doğrulamalar neticesinde elde edilen yol noktalarının kütle merkezleri, geometrik özellikleri ve morfolojik karakteristiği analiz edilmiştir. Doğrulanmış grid alanlarının geometrik merkezlerinden geçen ve ilgili yol segmentine paralel olan yüksek hassasiyetli yeni iki boyutlu vektör yol orta eksenleri başarıyla üretilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

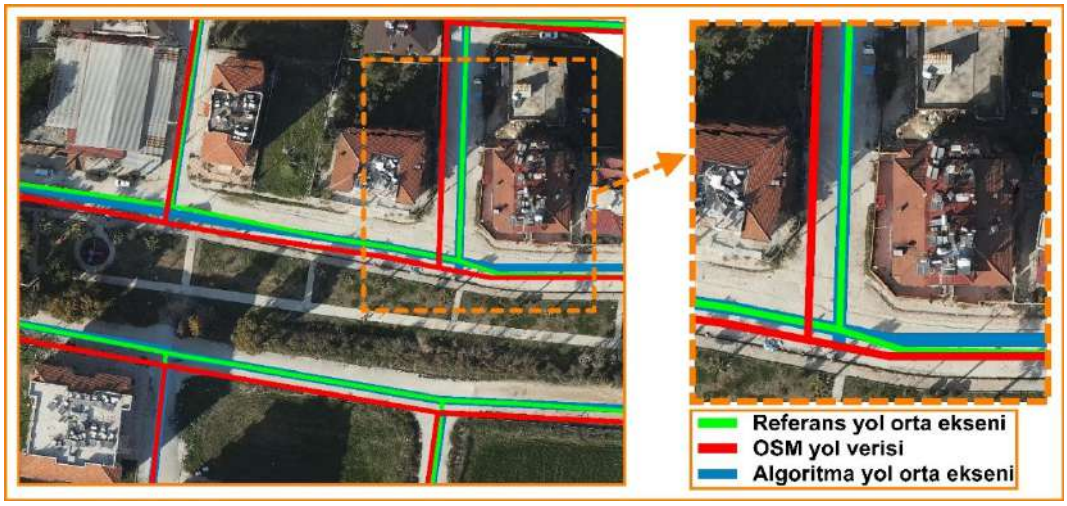
Bu çalışmada, İHA kaynaklı 3B fotogrametrik nokta bulutları ile OpenStreetMap (OSM) verilerini entegre eden, yoğunluk tabanlı ve yarı otomatik bir 2B yol orta ekseni çıkarma metodu geliştirilmiştir. RANSAC algoritması ile düzlem ayrıştırma, VDVI indeksi ile vejetasyon temizleme ve dinamik gridler üzerinden nokta yoğunluğu analizi adımlarını içeren bu bütünleşik yapı; kentsel ve kırsal topoğrafyadaki dar yollar, yoğun bitki örtüsü, araç parklanmaları ve yola paralel uzanan eş düzlemli zemin yapıları gibi karmaşık koşullar altında kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Literatürdeki derin öğrenme ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar yüksek hacimli eğitim verisine ihtiyaç duymakta ve farklı arazi şartlarında genellenebilirlik sorunları yaşamaktadır. Önerilen yöntem ise herhangi bir ön eğitim verisine gereksinim duymadan, segmente özgü dinamik nokta yoğunluğu analizi ile yol yüzeyini başarıyla izole etmekte ve kentsel/kırsal alanlarda genellenebilir bir iş akışı sunmaktadır. Yapılan 2,5 m tampon (buffer) tabanlı doğruluk değerlendirmelerinde tüm metriklerde %80'in üzerinde konumsal hassasiyete ulaşılmıştır. Ayrıca, geleneksel 2B yaklaşımların aksine Z yükseklik bileşenini koruyan ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamına doğrudan aktarılabilen (.shp, .geojson, .kml) 2B vektör veriler üretilmiştir.

Tam otomatik algoritmaların karmaşık kavşak yapıları, belirgin şerit ayrımları veya yoğun gürültülü alanlarda yetersiz kalabildiği göz önüne alınarak, esnek bir iş akışı sunan yarı otomatik bir yapı benimsenmiştir. Algoritma tarafından ana gövdesi otomatik belirlenen yol segmentlerinde, ihtiyaç duyulan lokal bölgelerde operatör müdahalesine (manuel

ayrıştırma ve doğrulama) imkân tanınması, konumsal hataların ve gürültülerin önüne geçilmesini sağlayarak heterojen arazi koşullarında yüksek başarım sergilemesini mümkün kılmıştır.

Geliştirilen metodolojinin sahadaki başarımı, Trabzon ili Arsin ilçesindeki çalışma alanına ait ortofoto altlığı üzerinde görselleştirilerek Şekil 5'te sunulmuştur. İlgili görselde; mevcut durumda konumsal kaymalar içeren OSM yol eksenleri kırmızı renkle, doğruluk analizinde esas alınan referans yol orta eksenleri yeşil renkle ve geliştirilen algoritma tarafından yarı otomatik olarak üretilen yüksek konumsal doğruluğa sahip 2B yol orta eksenleri ise mavi renkle gösterilmektedir.

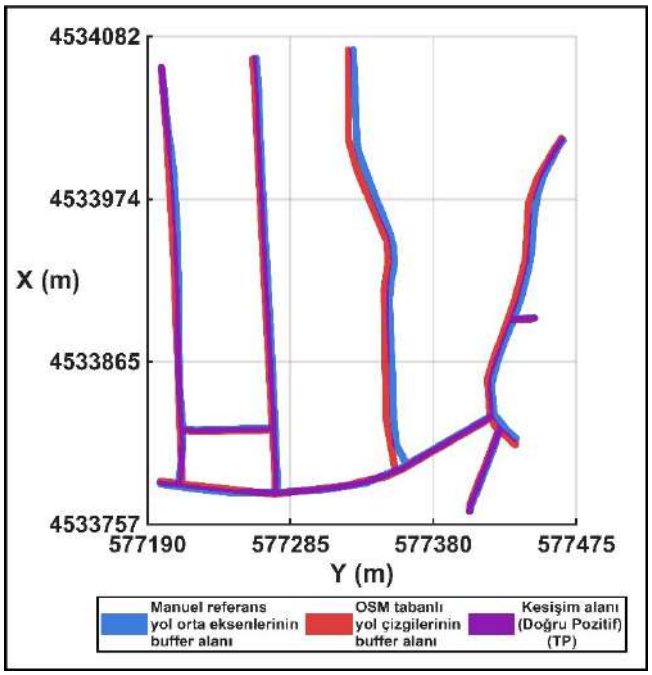


Şekil 5. Referans verinin (yeşil), ham OSM yol ekseninin (kırmızı) ve üretilen 2B yol orta ekseninin (mavi) ortofoto altlığındaki konumsal karşılaştırması

Önerilen yarı otomatik yöntemin konumsal ve geometrik başarımını nicel olarak ortaya koymak amacıyla, test alanlarından elde edilen nihai yol orta eksenleri ve ham OSM verileri, araziden veya hassas altlıklardan elde edilen referans yol hatları ile karşılaştırılmıştır. Doğruluk analizi sürecinde, hat tabanlı çakışım kalitesini değerlendirmek üzere referans eksenler etrafında 2,5 m genişliğinde bir buffer alanı oluşturulmuştur. Bu tampon alan içerisinde kalan doğru tespit edilmiş hat segmentleri Doğru Pozitif (TP), algoritma tarafından yol olmadığı halde üretilen gürültü veya hatalı hat segmentleri Yanlış Pozitif (FP) ve referans hatta mevcut olmasına rağmen tespit edilemeyen eksik yol segmentleri ise Yanlış Negatif (FN) olarak sınıflandırılmıştır

Hesaplanan TP, FP ve FN değerleri üzerinden metodolojinin başarım düzeyini ölçmek amacıyla Kesinlik, Duyarlılık, F1-Skoru ve Kesişim/Birleşim Oranı (IoU) metrikleri türetilmiştir. Referans veriler ile ham OSM hatları ve algoritmamızca üretilen eksenler arasında yapılan karşılaştırmalı analizler; önerilen yaklaşımın OSM verilerinde sıklıkla karşılaşılan konumsal kaymaları, lokal açısal kırılmaları ve topolojik eksiklikleri belirgin şekilde iyileştirdiğini kanıtlamıştır.

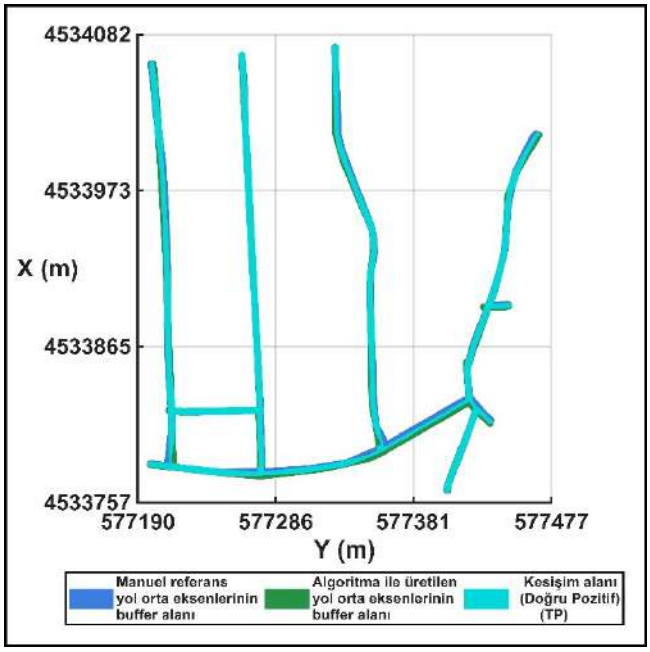
Konumsal doğruluğun nicel değerlendirilmesi amacıyla 2,50 m tampon (buffer) genişliği esas alınarak iki aşamalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ham OpenStreetMap (OSM) yol verilerinin referans veriler karşısındaki performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, manuel olarak oluşturulan referans yol eksenleri mavi, OSM yol eksenleri kırmızı ve iki veri kümesinin kesişim alanları mor renk ile gösterilmiştir. Bu renk kodlaması sayesinde, Bu renk kodlaması ile OSM yol eksenlerinin referans yol eksenlerine göre konumsal uyumu, sapmaları ve örtüşme alanları görsel olarak ortaya konulmuştur. Örtüşmenin yüksek ve düşük olduğu bölgeler ile konumsal farklılıklar, Şekil 6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Arsin (Trabzon) çalışma alanında referans ve OSM yol eksenlerinin konumsal örtüşmesi

Referans veri ile ham OSM verisinin karşılaştırılması sonucunda; Doğru Pozitif (TP) alan 3987,24 m^2, Yanlış Pozitif (FP) alan 3201,77 m^2 ve Yanlış Negatif (FN) alan 3168,57 m^2 olarak hesaplanmıştır. Bu temel alan verileri üzerinden türetilen Duyarlılık %55,72, Kesinlik %55,46, F1-Skoru %55,59 ve Kesişim/Birleşim Oranı (IoU) %55,72 olarak elde edilmiştir. Ham OSM verilerine ait bu düşük başarım oranları (%55 seviyesi), açık kaynaklı altlıklarda sıklıkla karşılaşılan belirgin konumsal kaymaları ve açısal ötelemeleri nicel olarak doğrulamaktadır.

Bu kapsamda, manuel olarak oluşturulan referans yol eksenleri mavi, algoritma tarafından üretilen yol orta eksenleri yeşil ve iki veri kümesinin kesişim alanları turkuaz renk ile gösterilmiştir. Bu renk kodlaması ile üretilen yol orta eksenleri ile referans yol eksenleri arasındaki konumsal uyum, sapmaları ve örtüşme alanları görsel olarak ortaya konulmuştur. Örtüşmenin yüksek ve düşük olduğu bölgeler ile konumsal farklılıklar, Şekil 7'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Arsin (Trabzon) çalışma alanında referans ve üretilen yol orta eksenlerinin konumsal örtüşmesi

Referans veriler ile geliştirilen algoritma tarafından üretilen yol orta eksenleri arasında 2,50 m buffer genişliği esas alınarak gerçekleştirilen alan bazlı doğruluk analizi sonuçları, metodolojinin konumsal hassasiyetini nicel olarak ortaya koymaktadır. Analiz kapsamında, referans tampon alanı içerisinde doğru tespit edilen alansal kesişimler Doğru Pozitif (TP) olarak 6100,30 m^2, algoritmanın hatalı ürettiği alanlar Yanlış Pozitif (FP) olarak 1121,70 m^2 ve tespit edilemeyen eksik alanlar ise Yanlış Negatif (FN) olarak 1055,51 m^2 olarak hesaplanmıştır. Bu temel veriler üzerinden türetilen performans metriklerinde; algoritmanın referans yolları yakalama başarısını gösteren Duyarlılık %85,25, üretilen verinin doğruluğunu temsil eden Keskinlik %84,47 ve bu iki metriğin harmonik ortalaması olan F1-Skoru %84,86 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, tahmin edilen ve referans alanların toplam çakışım kalitesini belirten Kesişim/Birleşim Oranı (IoU) %85,25 seviyesinde gerçekleşmiştir. Elde edilen tüm metriklerin %84'ün üzerinde bir başarım göstermesi, önerilen yarı otomatik yaklaşımın yüksek konumsal doğrulukla yol orta eksenlerini üretebildiğini doğrulamaktadır.

Karşılaştırmalı analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen yarı otomatik metodolojinin ham OSM verilerine kıyasla tüm doğruluk metriklerinde yaklaşık %30'luk net bir konumsal iyileşme sağladığı görülmüştür. Bu iyileşme, OSM verilerinde bulunan konumsal ötelemelerin ve geometrik uyumsuzlukların önemli ölçüde azaltıldığını ve %80'in üzerinde yüksek bir doğruluk performansı elde edildiğini göstermektedir. Önerilen metodoloji, yalnızca mevcut OSM geometrilerindeki konumsal hataları düzeltmekle kalmayıp, yüksek hassasiyetli vektörel yol orta eksenleri üretmektedir. Geleneksel 2B yol haritalama yaklaşımlarından farklı olarak, elde edilen yol orta eksenleri doğrudan vektörel veri formatlarında (.shp, .geojson, .kml) kullanılabilecek niteliktedir. Bu yönüyle önerilen metodoloji, mevcut yol verilerinin konumsal doğruluğunu iyileştirmenin yanı sıra, farklı CBS uygulamalarında kullanılabilecek doğrudan vektörel yol orta ekseni verisi sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, OpenStreetMap (OSM) yol verileri ile 2B nokta bulutu verilerinin birlikte değerlendirilmesine dayalı yarı otomatik bir metodoloji geliştirilmiştir. Arsin (Trabzon) çalışma alanında gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler sonucunda, önerilen yöntemin ham OSM verilerine kıyasla yaklaşık %30'luk net bir konumsal iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Önerilen yöntem ile %84,37 F1-Score ve %84,54 IoU değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, yöntemin OSM verilerindeki konumsal uyumsuzlukların azaltılmasında ve yüksek hassasiyetli vektörel yol orta eksenlerinin üretilmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elde edilen yol orta eksenlerinin yaygın CBS veri formatlarında kullanılabilir olması, yöntemin farklı mekânsal analiz ve uygulamalara entegre edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, yöntemin farklı yol geometrileri ve daha karmaşık kentsel ulaşım yapıları üzerindeki performansının geliştirilmesi planlanmaktadır. Özellikle karmaşık kavşak geometrilerinin ve çok şeritli yol yapılarının

esnek modellenmesine odaklanılarak, mevcut yarı otomatik çerçevenin tam otomatik bir sisteme dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte, farklı çalışma alanlarında yöntemin genellenebilirliğinin test edilmesi ve işlem süresinin azaltılmasına yönelik optimizasyonların gerçekleştirilmesi de gelecekteki çalışmalar kapsamında değerlendirilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmada ihtiyaç duyulan veri setlerinin temini ve sağlanmasındaki kıymetli katkılarından ötürü AcarTech Yazılım ve Mühendislik Limited Şirketi'ne içtenlikle teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Biçici, S., & Zeybek, M., 2021. An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud. Automation in Construction, 122, 103475. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103475

Biçici, S., & Zeybek, M., 2022. Improvements on road centerline extraction by combining Voronoi diagram and intensity feature from 3d uav-based point cloud. In The Proceedings of the International Conference on Smart City Applications (pp. 935-944). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94191-8 76

Ferraz, A., Mallet, C., & Chehata, N., (2016). Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 112, 23–36. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.002

Haklay, M., (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. Environment and planning B: Planning and design, 37(4), 682-703. https://doi.org/10.1068/b35097

Hui, Z., Hu, Y., Jin, S., & Yevenyo, Y. Z., 2016. Road centerline extraction from airborne LiDAR point cloud based on hierarchical fusion and optimization. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 118, 22-36. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.003

Jiang, B., & Claramunt, C., (2004). Topological analysis of urban street networks. Environment and Planning B: Planning and design, 31(1), 151-162. https://doi.org/10.1068/b306

Li, Y., Hu, X., Guan, H., & Liu, P., 2016. An efficient method for automatic road extraction based on multiple features from LiDAR Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41, 289-293. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-289-2016

Li, Z., (2006). Algorithmic foundation of multi-scale spatial representation. CRC press. https://doi.org/10.1201/9781420008432

Ma, H., Ma, H., Zhang, L., Liu, K., & Luo, W., 2022. Extracting urban road footprints from airborne LiDAR point clouds with PointNet++ and two-step post-processing. Remote Sensing, 14(3), 789. https://doi.org/10.3390/rs14030789

Martínez Sánchez, J., Fernández Rivera, F., Cabaleiro Domínguez, J. C., López Vilariño, D., & Fernández Pena, T., (2020). Automatic extraction of road points from airborne LiDAR based on bidirectional skewness balancing. Remote Sensing, 12(12), 2025. https://doi.org/10.3390/rs12122025

Mi, X., Yang, B., Dong, Z., Chen, C., & Gu, J., (2022). Automated 3D Road Boundary Extraction and Vectorization Using MLS Point Clouds. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(6), 5287–5297. https://doi.org/10.1109/tits.2021.3052882

Rato, D., & Santos, V., 2021. LIDAR based detection of road boundaries using the density of accumulated point clouds and their gradients. Robotics and Autonomous Systems, 138, 103714. https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103714

Suleymanoglu, B., Soycan, M., & Toth, C., 2024. 3d road boundary extraction based on machine learning strategy using lidar and image-derived mms point clouds. Sensors, 24(2), 503. https://doi.org/10.3390/s24020503

Wang, X., Ibrahim, M., Mansoor, A., Tareque, H., & Mian, A., 2024. Automated Road Extraction and Centerline Fitting in LiDAR Point Clouds. In 2024 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA) (pp. 600-607). IEEE. https://doi.org/10.1109/dicta63115.2024.00092

Yan, Y., Ma, S., Yin, S., Hu, S., Long, Y., Xie, C., & Jiang, H., (2021). Detection and numerical simulation of potential hazard in oil pipeline areas based on UAV surveys. Frontiers in Earth Science, 9, 665478. https://doi.org/10.3389/feart.2021.665478

Zeybek, M., & Biçici, S., 2023. Road surface and inventory extraction from mobile LiDAR point cloud using iterative piecewise linear model. Measurement Science and Technology, 34(5), 055204. https://doi.org/10.1088/1361-6501/acb78d

Zuo, Y., Ren, Y., & Du, Z. H., (2023). Rapid removal algorithm of road surface point cloud based on LP-RANSAC algorithm. Laser & Optoelectronics Progress, 60(14), 1428009. https://doi.org/10.3788/lop220707

TOKAT DİJİTAL İKİZ PROJESİ: 360° PANORAMA, İHA-YERSEL FOTOGRAMETRİ VE 3B MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK KÜLTÜREL MİRASIN BELGELENMESİ

Cengiz ERDOĞAN[1], Talha ERDOĞAN[2], Gürcan BÜYÜKSALİH[3], Cem GAZİOĞLU[4]

[1]Dr. Yüksek Geomatik Müh. Akropol Proje Mimarlık Müh. San. Tic. Ltd. Şti, 34443, Beyoğlu, İstanbul, cengiz@akropol.com.tr
[2] Mimar (İTÜ CBS Tek. Yüksek Lisans Öğr.) Akropol Proje Mim. Müh. San. Tic. Ltd. Şti, 34443, Beyoğlu, İstanbul, talha.akropol@gmail.com
[3]Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, 34116, Fatih, İstanbul, gurcanb@istanbul.edu.tr
[4]Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, 34116, Fatih, İstanbul, cemga@istanbul.edu.tr

ÖZET

Kültürel mirasın belgelenmesi, korunması ve geniş kullanıcı gruplarına erişilebilir biçimde sunulmasında uzaktan algılama, fotogrametri, jeodezik ölçme, üç boyutlu modelleme ve web teknolojilerinin bütünleşik kullanımı önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Tokat'ın tarihî, kültürel ve doğal varlıklarının dijital ortamda tanıtılmasına yönelik geliştirilen 360 Tokat uygulaması ile şehrin sembol yapısı olan ve rivayete göre Eflak Voyvodası III. Vlad'ın (Kazıklı Voyvoda) esir tutulduğu Tokat Kalesi özelinde yürütülen üç boyutlu belgeleme çalışması bir arada sunulmuştur. Proje kapsamında Tokat genelindeki dinî yapılar, türbeler, müzeler, mesire alanları ve kentsel dokuya ait çok sayıda nokta için gündüz ve gece 360° panorama görüntüleri üretilmiştir. Tokat Kalesi'nin ölçekli üç boyutlu modeli; yersel fotogrametri, İHA fotogrametrisi, RTK GNSS ve totalstation ölçmeleri birlikte kullanılarak oluşturulmuştur. Yersel görüntüler kalibre edilmiş 12 mm lensli bir Nikon D90 SLR kamera ile, hava görüntüleri ise bir DJI Mavic Air İHA ile elde edilmiştir. İHA uçuş planları Pix4D Capture yazılımında hazırlanmış, fotogrametrik değerlendirme Agisoft Metashape yazılımı ile yürütülmüştür. Hava ve yersel veri setleri aynı ITRF koordinat sisteminde ayrı ayrı modellenip tek bir modelde birleştirilmiş, dokulu model OBJ formatında dışa aktarılarak Sketchfab platformu üzerinden çevrim içi erişime açılmıştır. Sanal tur ortamında panorama gezintisi, gece görünümü, canlı sunum, harita tabanlı konum-bakış yönü bilgisi, İHA videosu, fotoğraf albümü, sanat tarihi raporu, ölçekli üç boyutlu model ve VR işlevleri bütünleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, jeodezik ölçme teknikleri ile fotogrametrik yöntemlerin birlikte kullanımının, kültürel mirasın hem etkili tanıtımı hem de ölçülebilir, yeniden kullanılabilir bir dijital veri olarak belgelenmesi için sürdürülebilir bir model sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: 3B modelleme, 360° panorama, fotogrametri, kültürel miras belgeleme, sanal gerçeklik.

ABSTRACT

TOKAT DIGITAL TWIN PROJECT: CULTURAL HERITAGE DOCUMENTATION USING 360° PANORAMA, UAV-TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY AND 3D MODELING TECHNIQUES

The integrated use of remote sensing, photogrammetry, geodetic surveying, three-dimensional modeling and web technologies is of growing importance for the documentation, preservation and accessible presentation of cultural heritage. This study presents the 360 Tokat application, developed to promote the historical, cultural and natural assets of Tokat in a digital environment, together with the three-dimensional documentation of Tokat Castle, the city's landmark structure that is, according to tradition, where the Wallachian Voivode Vlad III (Vlad the Impaler) was held captive. Daytime and night-time 360° panoramic images were produced for numerous religious buildings, tombs, museums, recreational areas and urban locations across Tokat. A scaled three-dimensional model of Tokat Castle was generated by integrating terrestrial photogrammetry, UAV photogrammetry, RTK GNSS surveying and total station measurements. Terrestrial images were acquired using a Nikon D90 SLR camera with a calibrated 12 mm lens, while aerial images were obtained using a DJI Mavic Air UAV. Flight plans were prepared in Pix4D Capture, and photogrammetric processing was carried out in Agisoft Metashape. Aerial and terrestrial datasets were modeled separately in the ITRF coordinate system, merged into a single model, exported in OBJ format and published online via the Sketchfab platform. The virtual-tour environment integrates panoramic navigation, night-time views, live presentation, map-based position and viewing direction, drone footage, a photo album, an art-history report, the scaled 3D model and virtual-reality functions. The results indicate that the combined use of geodetic surveying and photogrammetric methods provides a sustainable model for both the effective promotion and the measurable, reusable digital documentation of cultural heritage.

Keywords: 3D modeling, 360° panorama, cultural heritage documentation, photogrammetry, virtual reality.

1. GİRİŞ

Dijital teknolojilerdeki gelişmeler, kültürel mirasın belgelenmesi, korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması için yeni olanaklar oluşturmuştur. Üç boyutlu modelleme, fotogrametri, uydudan küresel konumlama sistemleri (GNSS), lazer tarama, yüksek çözünürlüklü sayısal görüntüleme, sanal gerçeklik ve web tabanlı uygulamalar; tarihî yapıların bilimsel olarak belgelenmesinde ve etkili biçimde tanıtılmasında kullanılabilmektedir. Fotogrametri ve üç boyutlu tarama teknolojileri, kültürel mirasa ait gerçekçi ve ölçülebilir modellerin koruma, izleme, restorasyon, sanal gerçeklik ve web tabanlı sunum amaçlarıyla değerlendirilmesini sağlamaktadır (Remondino, 2011). Benzer biçimde, İHA ve yersel fotogrametrinin birlikte kullanılması, kale ve saray gibi büyük ölçekli ve karmaşık geometrili yapıların doğruluğu yüksek üç boyutlu modellerle belgelenmesine imkân tanımakta (Bolognesi vd., 2014) ve bu modellerin fotogrametri, üç boyutlu baskı ve web tabanlı sunumla bütünleştirilmesi, kültürel mirasın hem bilimsel hem de kamusal erişime açık biçimde belgelenmesini mümkün kılmaktadır (Themistocleous vd., 2015).

Kültürel mirasın sanal gerçeklik ve web tabanlı platformlar aracılığıyla sunulması, mekânı fiziksel olarak ziyaret edemeyen geniş kullanıcı kitlelerine erişim sağlamakta ve karmaşık üç boyutlu modellerin etkileşimli biçimde deneyimlenmesine olanak tanımaktadır (Fernández-Palacios vd., 2017). Son yıllarda Osmanlı dönemi kale ve surlarının lazer tarama ve fotogrametri ile belgelenip sürükleyici sanal gerçeklik uygulamalarına dönüştürüldüğü çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Tschirschwitz vd., 2019); benzer biçimde, üç boyutlu model ve 360° panoramaların bütünleştirildiği doğrulanmış sanal müze platformlarının kullanıcı memnuniyeti üzerindeki olumlu etkisi de güncel araştırmalarla ortaya konmuştur (Saithong ve Yoddee, 2026). Yazarların Aydos Kalesi'nde yürüttüğü önceki bir çalışmada da yersel lazer tarama, dijital fotogrametri ve GPS ölçmelerinin bütünleşik kullanımının, kültürel mirasın hem restorasyon öncesi mevcut durumunun hem de kazı sonrası değişiminin güvenilir biçimde belgelenmesini sağladığı ortaya konmuştur (Erdoğan ve Maktav, 2012).

Tokat İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü sayfasında yayımlanmak üzere geliştirilen 360 Tokat uygulamasında Tokat'ın tarihinin, kültürünün ve doğal çevresinin geniş ölçekte dijital ortamda tanıtılması amaçlanmıştır. Uygulamada interaktif 360° Tokat gezintileri, kent hakkında bilgiler ve kültür rotaları bir araya getirilmiştir. Proje, yalnızca panorama gösterimi ile sınırlı kalmamakta; modern belgeleme yöntemleri ile oluşturulmuş ölçekli üç boyutlu modelleri de sanal tur ortamına dâhil etmektedir.

Tokat Kalesi için üretilen yüksek çözünürlüklü gündüz ve gece panoramalarının yanı sıra yersel ve hava fotogrametrisi kullanılarak ölçekli üç boyutlu model oluşturulmuştur. Böylece proje, görsel turizm uygulamasının ötesinde, kalenin mevcut durumunu gelecekte yapılabilecek restorasyon ve rölöve çalışmalarında referans olarak kullanılabilecek sayısal veri ile belgelemeyi hedeflemiştir. Bu bildiride, öncelikle çalışma alanının tarihî bağlamı özetlenmekte; ardından projede izlenen jeodezik ölçme ve fotogrametrik belgeleme yöntemleri, veri işleme akışı ve geliştirilen web tabanlı sanal tur sistemi ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı: Tokat İli ve Tokat Kalesi

Çalışma alanı, Türkiye'nin Orta Karadeniz Bölgesi'nde, Yeşilırmak havzasında yer alan Tokat ilidir. İl; kuzeyde Samsun, kuzeydoğuda Ordu, doğuda Sivas, güneyde Sivas ve Yozgat, batıda ise Amasya illeriyle komşudur ve yaklaşık 10.071 km² yüzölçümüne sahiptir (Tokat Valiliği, 2026). Tokat ilinin Türkiye üzerindeki konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tokat ilinin Türkiye üzerindeki konumu.

Tokat, antik çağlardan itibaren Hititler, Frigler, Kimmerler, Persler ve Makedonyalıların hâkimiyetinde kalmış; MÖ 301-MS 66 yılları arasında Pontus Krallığı döneminde "Comana Pontica" olarak anılmıştır. MS 66'dan 395'e kadar Roma, ardından Bizans hâkimiyetine giren kent, 1071 Malazgirt Zaferi'nin ardından 11. yüzyılda Dânişmend Gazi tarafından fethedilerek Türk-İslam kültürünün bölgede yerleşmesini sağlamıştır. Danişmendlilerden sonra sırasıyla Anadolu Selçuklu Devleti, Eretna Beyliği, Kadı Burhâneddin idaresi ve nihayet Osmanlı Devleti hâkimiyetine giren Tokat, İpek Yolu üzerindeki konumu sayesinde Osmanlı döneminde önemli bir ticaret ve sanayi merkezi olarak gelişmiştir (Tokat Valiliği, 2026; Boşdurmaz, 2021).

İl merkezine hâkim, sarp bir tepe üzerinde konumlanan Tokat Kalesi, kentin en önemli simgesi ve şehrin kalekent tipolojisinin belirleyicisidir; günümüz yerleşimi kalenin doğu ve güney yamaçlarında gelişmiştir. Kalenin kesin yapım tarihi bilinmemekle birlikte, tepede yer alan Pontus dönemine ait kaya mezarı ve basamaklı su tüneli, yapının kökeninin Pontus Krallığı dönemine kadar uzanabileceğini göstermektedir; kaleye ait en eski izler ise 5-6. yüzyıla tarihlenmektedir. Uzun süre Doğu Roma (Bizans) hâkimiyetinde kalan kale, 1074 yılında Dânişmend Gazi tarafından ele geçirilmiş, bu kuşatmayla birlikte kalede Bizans hâkimiyeti sona ererek günümüze uzanan Türk hâkimiyeti

başlamıştır. Kale; sırasıyla Dânişmendli, Anadolu Selçuklu, Eretna, Kadı Burhâneddin ve Osmanlı idaresinde onarım görmüş ve öncelikle savunma amacıyla kullanılmıştır (Çıtak, 2023).

Osmanlı döneminde korunaklı yapısı nedeniyle "Çardak-ı Bedevi" olarak da anılan kalenin zindanında, tarih boyunca isyancılar, suçlular ve çeşitli hanedan mensupları ile savaş esirleri tutsak edilmiştir (Çıtak, 2023). Bu isimler arasında, Bram Stoker'ın Drakula romanına ilham kaynağı olduğu kabul edilen Eflak Voyvodası III. Vlad'ın (Kazıklı Voyvoda) da bulunduğuna dair kaynaklarda çeşitli değerlendirmeler yer almaktadır; nitekim konuyu inceleyen akademik bir çalışmada, kale zindanında tutsak edilen önemli isimlerden birinin "Voyvode the Impaler" olduğu yönünde görüşler bulunduğu belirtilmektedir (Çıtak, 2023). Fatih Sultan Mehmet ile Edirne'de birlikte yetiştiği bilinen III. Vlad'ın, tahta çıkışının ardından yaşanan gelişmeler sonucunda Tokat'a gönderildiği ve rivayete göre bir süre kale zindanlarında tutulduğu aktarılmaktadır. Tokat Kalesi'nde 2026 yılında sürdürülen restorasyon ve kazı çalışmaları kapsamında ortaya çıkarılan zindanlardan birinin, bu rivayetle ilişkilendirilmesi, konuyu güncel biçimde gündeme taşımıştır.

Ulusal basında da "**Kont Drakula'nın esir tutulduğu gizemi kale"** olarak haber yapılmıştır. Uygulama içerisinden ulusal basında çıkan haberin internet linkine erişilebilmektedir. Şekil 2'de haber görseli verilmiştir.



Şekil 2. Tokat Kalesi ile ilgili ulusal basında çıkan haber görseli

Projede üretilen sanal tur uygulamasının fotoğraf albümü bölümünde, kale içindeki gizli geçit ve tünellere ait görüntülerle de kullanıcıya aktarılmaktadır. Kalenin genel görüntüsü de fotoğraf albümünde yer almaktadır. (Şekil 3).

Tokat Kalesi'nin Tokat il sınırları içindeki ve şehir merkeziyle ilişkili konumu Şekil 4'de gösterilmiştir. Kalenin bu merkezi, erişimi güç ve sarp konumu, hem tarih boyunca savunma işlevini pekiştirmiş hem de günümüzde belgeleme çalışmalarında yersel ve hava tabanlı yöntemlerin bir arada kullanılmasını gerekli kılmıştır.



Şekil 3. 360 Tokat sanal tur uygulamasının fotoğraf albümünde yer alan, Tokat Kalesi'ne ait görüntü.

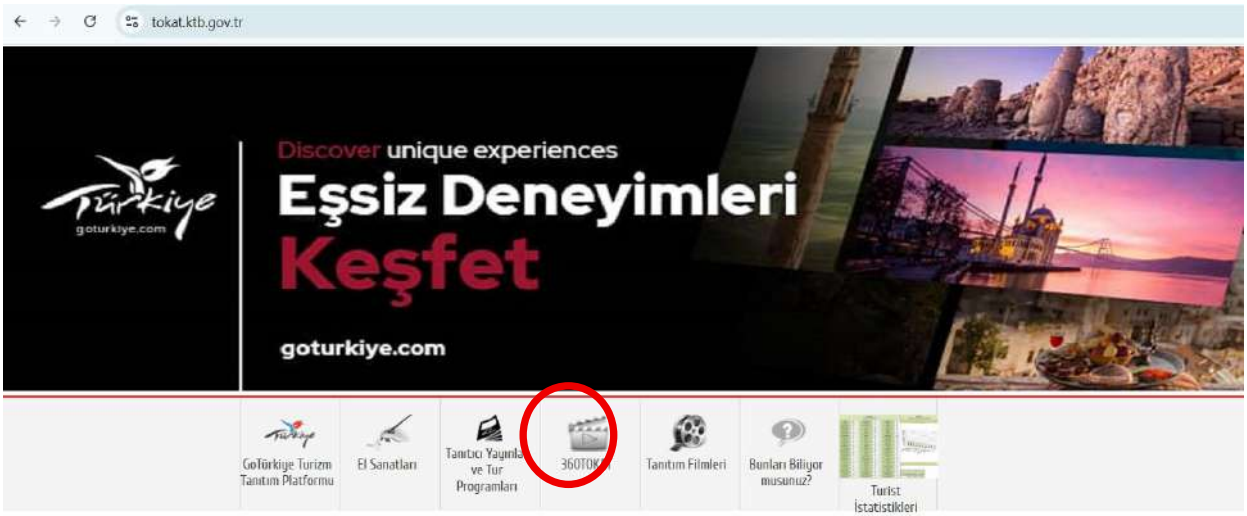


Şekil 4. Tokat Kalesi'nin Tokat il merkezi içindeki konumu

2.2. Proje Kapsamı

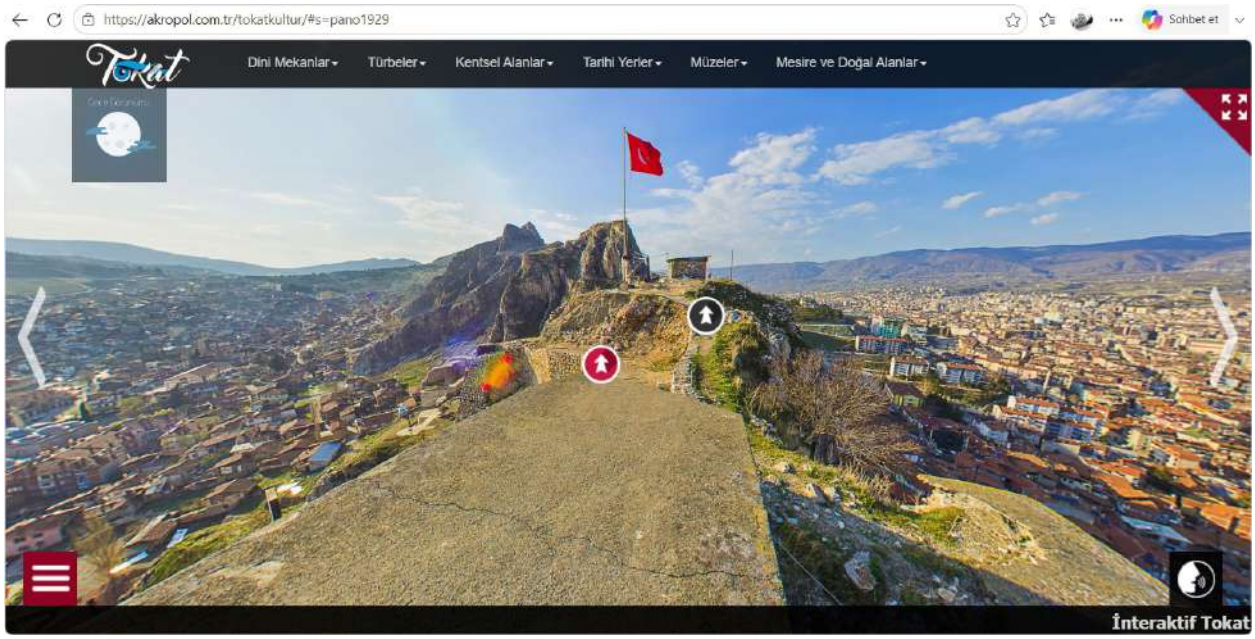
Çalışma kapsamında Tokat'ın dinî mekânları, türbeleri, müzeleri, mesire ve doğal alanları, kentsel alanları ve diğer tarihî mekânlarının 360° panorama çekimleri gerçekleştirilmiştir. Panoramik görüntüler, profesyonel yüksek çözünürlüklü SLR kameralar ile elde edilmiştir. Her panorama noktasında gündüz görüntülerine ek olarak gece çekimleri de gerçekleştirilmiş; böylece her konum için gece panoramalarının da kullanıma sunulması sağlanmıştır.

Tüm bu verilere Tokat İl Kültür Müdürlüğü' sayfasından 360 Tokat uygulaması ile erişilebilmektedir. Bu uygulamada Tokat'ın tarihini, kültürünü ve doğasını dijital ortamda geniş çaplı tanıtmak amaçlanmıştır. Projede interaktif Tokat (360° gezinti), kent hakkında bilgiler ve kültür rotaları yer almaktadır. 360 Tokat İl Kültür Müdürlüğü sayfasına https://tokat.ktb.gov.tr/ adresinden girilmektedir. (Şekil 5).



Şekil 5. 360 Tokat İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Ana Sayfası (https://tokat.ktb.gov.tr/)

360 Tokat Uygulama giriş ekranına ise http://www.akropol.com.tr/teknomer/tokatkale/index.html adresinden erişilmektedir. (Şekil 6).



Şekil 6. 360 Tokat sayfasının ana ekranı: (akropol.com.tr/tokatkultur).

Tokat Kalesi'nde kale sur duvarları, mimari öğeler, yüksek burçlar, zemin yüzeyleri ve eğimli alanların eksiksiz belgelenmesi amaçlanmıştır. Yer erişiminin sınırlı olduğu yüksek sur duvarları, burçlar, zemin ve yamaçlar İHA ile; duvar yüzeyleri ve ayrıntılı mimari öğeler ise yakın resim yersel fotogrametrisi ile belgelenmiştir.

2.3. Jeodezik Kontrol ve Ölçme Altyapısı

Fotogrametrik modelin ölçeklendirilmesi ve koordinatlandırılması için zeminde ve sur duvarlarında kontrol noktaları tesis edilmiştir. Rüzgârdan etkilenmeyecek biçimde tahta plakalar üzerine hazırlanan, A3 boyutunda zemin işaretli hedefler RTK GPS ile ölçülmüştür (Şekil 7). Sur duvarlarındaki hedeflere ilişkin ITRF koordinatlarının belirlenmesi için hedef yakınlarında en az iki poligon noktası oluşturulmuş, bu noktalar Topcon GRS1 RTK GPS ile ölçülmüş (Şekil 8) ve Topcon 7005i Imaging Total Station kullanılarak hedeflerin koordinatları belirlenmiştir. Duvar yüzeylerinde ise, Agisoft Metashape yazılımı içerisinde üretilip PDF olarak bastırılan kodlu dairesel işaretleyiciler (marker) kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 7. Fotogrametrik uçuş kontrol noktaları için zeminde tesis edilen, numaralı ve A3 boyutlu hedefler.



Şekil 8. Sur duvarı yakınındaki poligon noktalarının Topcon GRS1 RTK GPS ile ölçümü.



Şekil 9. Agisoft Metashape yazılımı içerisinde üretilip sur duvarlarına yapıştırılan kodlu dairesel işaretleyiciler (marker).

Topcon 7005i Imaging Total Station'ın ölçülen noktaya ilişkin fotoğraf kaydı oluşturabilmesi, arazi krokisi tutulmadan ölçü noktalarının ayırt edilmesini kolaylaştırmıştır. Çok sayıda düşey kontrol noktasının ölçülmesiyle oluşturulan üç boyutlu modelin hata düzeyinin azaltılması ve yüksek çözünürlüklü veri üretilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan başlıca jeodezik ölçme donanımlarına ilişkin teknik kriterler Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Fotogrametrik belgeleme iş akışında kullanılan jeodezik ölçme donanımlarına ilişkin teknik kriterler.

Bileşen	Teknik kriter / kullanım
GNSS alıcısı	Çift frekanslı (L1/L2) çalışma; en az 220 kanal; GPS/GLONASS L1/L2; GALILEO sinyallerini kullanabilecek altyapı.
Düzeltme verisi	CORS-TR ve İSKİ yer istasyonlarından yayımlanan düzeltmeler ile ölçme.
Hava fotogrametrisi	Uçuş öncesi, hava fotoğraflarında görünecek biçimde tesis edilmiş en az dört zemin kontrol noktası; santimetre hassasiyetinde GPS ölçmesi.
Totalstation	Reflektörsüz 250 m, reflektörlü 3000 m ölçme menzili; Windows CE işletim sistemi; LCD/TFT ekran ve ölçülen noktanın fotoğrafını kaydedebilen video özelliği.
Düşey kontrol noktalarının Lazer ile ölçümü	Cephelerdeki belirgin noktaların lazerli totalstation ile ölçülerek düşey kontrol noktası olarak kullanılması;

2.4. Yersel ve İHA Fotogrametrisi

Yersel fotogrametrik görüntü alımında Nikon D90 SLR kamera kullanılmıştır. Kameranın çözünürlüğü 12 megapikseldir ve 12 mm odak uzaklıklı, kalibrasyonu yapılmış lens kullanılmıştır. Kale sur duvarlarının ve kale içi ayrıntılarının belgelenmesinde özellikle yakın resim fotogrametrisi uygulanmıştır.

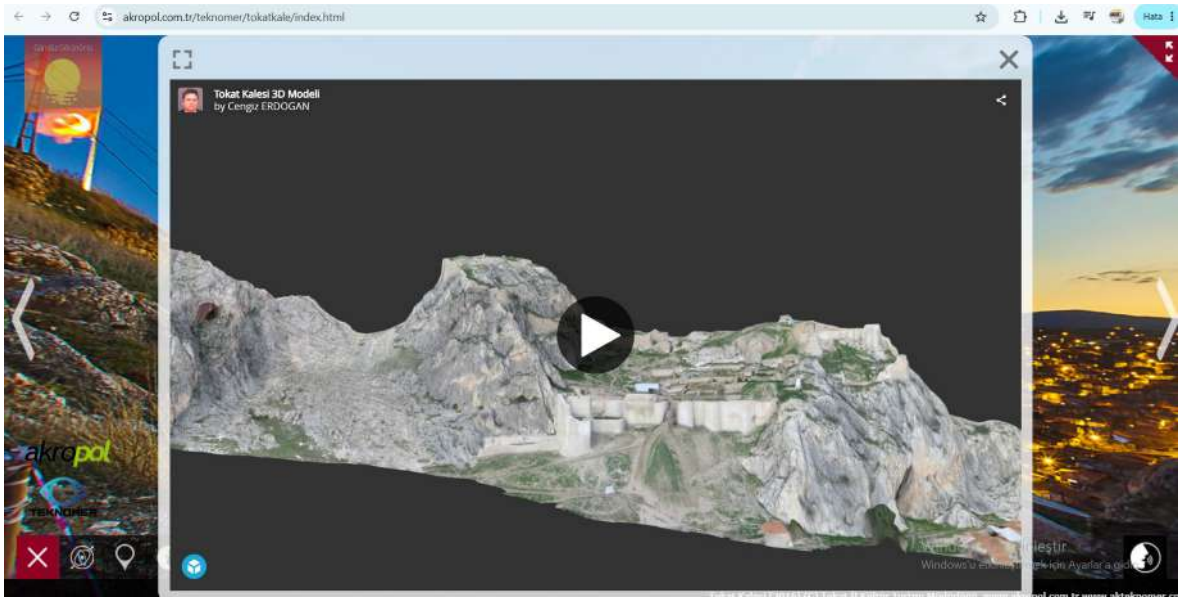
Yerden erişilemeyen yüksek sur duvarlarının, burçların, zemin yüzeylerinin ve yamaçların belgelenmesi için DJI Mavic Air İHA kullanılmıştır. İHA üzerinde bulunan 12 megapiksel çözünürlüklü kamera ile hem otonom hem de manuel bindirmeli görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Otonom uçuşlar için ücretsiz Pix4D Capture yazılımında görüntü bindirme oranları tanımlanmış, uçuş yüksekliği girilmiş ve uçuş planı hazırlanmıştır.

Yapının üstten görünüşünü ve yan cephelerini kapsayacak biçimde yersel ve havadan bindirmeli fotoğraf alımı öngörülmüştür. Görüntü alımından önce zeminde en az dört, düşeyde en az dört koordinatı bilinen kontrol noktasının tesis edilmesi; bu noktaların GPS ve totaltation ile ölçülmesi; noktaların kapsadıkları tüm görüntülerde işaretlenmesi esas alınmıştır.

2.5. Fotogrametrik Değerlendirme ve Üç Boyutlu Model Üretimi

Fotogrametrik değerlendirmede Agisoft Metashape yazılımı kullanılmıştır. Hava ve yersel fotogrametri görüntüleri ayrı veri setleri olarak değerlendirilmiş; her iki model ITRF koordinat sisteminde oluşturulduğu için veri setleri sorunsuz biçimde birleştirilebilmiştir.

İş akışında sırasıyla görüntülerin hizalanması, ön kalibrasyon değerlerinin elde edilmesi, kontrol noktalarına göre ölçeklendirme, modelin yeniden optimize edilmesi ve yüksek yoğunluklu nokta bulutunun üretilmesi uygulanmıştır. Yoğun nokta bulutundan üç boyutlu ağ modeli oluşturulmuş; fazla nokta ve mesh verileri temizlenmiştir. Yüksek çözünürlüklü görüntülerin mesh model üzerine giydirilmesiyle gerçekçi dokulu kale modeli elde edilmiştir. Model temizlenmiş, optimize edilmiş ve OBJ formatında dışa aktarılmıştır. Oluşturulan model çevrim içi görüntüleme için Sketchfab platformuna yüklenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Tokat Kalesi fotogrametrik üç boyutlu modelinin web tabanlı Sketchfab görüntüleyicisinde sunumu.

Genel iş akışı kapsamında modellerin OBJ, PLY, 3DS ve PDF formatlarında dışa aktarılması; kullanıcıların Akrobat Reader yazılımı aracılığıyla üç boyutlu model üzerinden ölçü alabilmesi; ayrıca yapıların ölçekli üstten ve cepheden ortofoto/rölöve planlarının hazırlanması öngörülmüştür. Bu planlarda ölçek ve koordinat ağının gösterimi eklenmiştir. Söz konusu ölçülebilir çıktı, benzer bir yaklaşımla Aydos Kalesi'nde de restorasyon çalışmalarına temel oluşturacak biçimde değerlendirilmiştir (Erdoğan ve Maktav, 2012).

2.6. Web Tabanlı Sanal Tur ve Kullanıcı Arayüzü

Tokat Kalesi için yüksek çözünürlüklü gündüz ve gece panoramaları kullanılarak çok işlevli bir sanal tur hazırlanmıştır. Sanal turda ekranın sağ ve solunda bulunan yön okları ile panoramik geçişler sağlanabilmektedir. (Şekil 11). Sol üstteki gece görünümü seçeneği ile aynı alanın gece panoramasına erişilebilmektedir. Sağ altta bulunan canlı sunum simgesine tıklandığında, yöresel Tokat kıyafetli sanal bir sunucu ekranda belirmekte ve Tokat Kalesi hakkında sesli bilgilendirme yapmaktadır (Şekil 12).



Şekil 11. Tokat Kalesi sanal turunda gündüz panoraması ve yönlendirme arayüzü.



Şekil 12. Sanal turdaki gece panoraması ile etkileşimli sanal sunucu (avatar) modülü.

Sanal tur uygulaması; masaüstü bilgisayar, tablet ve mobil telefon ekranlarına uyum sağlayacak duyarlı (responsive) tasarım yaklaşımı ile hazırlanmıştır. Mobil cihazlarda yer alan pusula işlevi, cihazın yönüne ve hareketine göre panoramanın bakış yönünü değiştirebilmektedir. Sistem ayrıca; Google Haritalar üzerinde panorama konumu ve bakış yönü bilgisini, kale hakkında tarihî bilgi ekranını, İHA ile çekilmiş video görüntüsünü, fotogrametrik yöntemle oluşturulmuş üç boyutlu kale modelini (model üzerinde büyütme, küçültme, döndürme ve gezinti işlevleriyle), Google Cardboard uyumlu VR gözlüklerle panoramik tur erişimini (Şekil 13), Tokat Kalesi'nin üç boyutlu animasyon videosunu, kale hakkındaki haber içeriğini, fotoğraf albümünü ve sanat tarihi raporunun PDF sürümünü tek bir arayüzde bütünleştirmektedir.



Şekil 13. Google Cardboard uyumlu VR modunda Tokat Kalesi Stereo görünümü

3. PROJEDE ÖNE ÇIKAN ÖĞELER

Proje sonucunda Tokat'ın kültürel mirası; 360° panorama görüntüleri, gece panoramaları, ölçekli üç boyutlu model, canlı sunum, harita tabanlı konum bilgisi, İHA videoları, fotoğraf albümü, sanat tarihi raporu ve VR işlevleri ile bütünleşik bir dijital ortamda sunulmuştur. Bu yapı, geleneksel sanal turlarda yaygın biçimde görülen, yalnızca panorama tabanlı kullanım yaklaşımından ayrılmaktadır.

Tokat Kalesi için oluşturulan üç boyutlu model, turizm ve tanıtım işlevinin yanında ölçülebilir bir belgeleme ürünü niteliği taşımaktadır. Yersel fotogrametri ile yakın sur duvarları ve cephelerin mimari ayrıntıların; İHA fotogrametrisi ile yüksek ve ulaşılması zor bölümlerin belgelenmesi sağlanmıştır. Her iki veri setinin aynı ITRF koordinat sisteminde üretilmesi, tekil bir görüntüleme tekniği ile yeterince elde edilemeyen detayların bütünleştirilmesine olanak vermiştir. Bu bulgu, kale ve saray gibi karmaşık geometrili yapılarda İHA ve yersel fotogrametrinin birlikte kullanılmasının doğruluğu artırdığını gösteren benzer çalışmalarla da örtüşmektedir (Bolognesi vd., 2014).

Kontrol noktalarının zeminde ve düşey yüzeylerde kullanılmasıyla modelin ölçeklendirilmesi hedeflenmiştir. Hedeflerin ve poligon noktalarının RTK GNSS, ve totalstation ölçmeleriyle koordinatlandırılması, modelin gerçek dünya koordinat sistemine bağlanmasını sağlamaktadır.

Sanal turun duyarlı tasarımı; masaüstü, tablet ve mobil telefon kullanıcılarının aynı içeriğe erişebilmesini sağlamaktadır. Pusula tabanlı mobil kullanım, harita tabanlı konum-bakış yönü bilgisi ve VR desteği; kullanıcı etkileşimini klasik fotoğraf ya da panorama gösterimlerinin ötesine taşımaktadır. Bu yönüyle proje, 3B model ve 360° panoramaların bütünleştirildiği doğrulanmış sanal müze/tur platformlarının kullanıcı deneyimi üzerindeki olumlu etkisini ortaya koyan güncel bulgularla da tutarlılık göstermektedir (Saithong ve Yoddee, 2026).

Kalenin Kazıklı Voyvoda ile ilişkilendirilen zindanı ve gizli geçitleri gibi anlatısal/efsanevi katmanlarının sanal tur içeriğine (fotoğraf albümü ve haber bağlantısı aracılığıyla) dâhil edilmesi, projeyi yalnızca teknik bir belgeleme çalışmasından çıkarıp, kültürel mirasın hikâyeleştirilerek aktarıldığı bir dijital anlatı (storytelling) platformuna dönüştürmektedir; bu yaklaşım, açık kaynaklı 3B web platformlarının kültürel mirası hem belgeleme hem de hikâyeleştirme işlevini bir arada taşıyabileceğini gösteren güncel çalışmalarla da örtüşmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

360 Tokat Projesi'nde 360° panorama görüntüleme, yersel ve İHA fotogrametrisi, GNSS/RTK ölçmeleri, total station ölçmeleri, üç boyutlu modelleme, web teknolojileri ve sanal gerçeklik işlevleri bütünleşik olarak kullanılmıştır. Tokat Kalesi özelinde üretilen ölçekli üç boyutlu model; mevcut durumun dijital kaydı, mimari inceleme, rölöve altlığı oluşturma ve gelecekteki restorasyon çalışmalarına referans veri sağlama potansiyeline sahiptir.

Projenin temel katkısı, kültürel mirasın yalnızca görsel olarak sunulmasına değil; aynı zamanda ölçülebilir, üç boyutlu ve yeniden kullanılabilir sayısal veri olarak belgelenmesine olanak vermesidir. Sanal tur içine üç boyutlu model, gece panoraması, video, haber, fotoğraf albümü, sanat tarihi raporu ve VR işlevlerinin yerleştirilmesi; kullanıcı deneyimi ile bilimsel belgeleme gereksinimlerini aynı ortamda birleştirmiştir. Kalenin Kazıklı Voyvoda rivayetiyle güçlenen kültürel çekiciliği, bu tür dijital belgeleme çalışmalarının yalnızca akademik değil, aynı zamanda kültürel turizme

katkı sağlama potansiyelini de ortaya koymaktadır; nitekim kalede 2026 yılında sürdürülen restorasyon ve kazı çalışmalarında ortaya çıkarılan zindanların bu anlatıyla ilişkilendirilmesi, konunun güncel önemini teyit etmektedir.

Gelecekte yüksek çözünürlüklü panorama sistemlerinin LiDAR sensörleri ile bütünleştirilmesi önerilmektedir. Böylece mevcut 360 Tokat uygulamasının yeni nesil üç boyutlu sanal tur modeline dönüştürülmesi; daha yüksek geometrik ayrıntının belgelenmesi, panorama üzerinde ölçme olanaklarının geliştirilmesi ve kullanıcıların kültürel miras alanlarını daha gerçekçi dijital ortamlarda deneyimlemesi mümkün olabilecektir (Erdoğan, 2007). Ayrıca, benzer yöntemlerin Tokat iline bağlı Niksar, Zile ve Turhal kaleleri başta olmak üzere ilin diğer tarihî varlıklarına da uygulanarak bütüncül bir dijital miras envanterinin oluşturulması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Bolognesi, M., Furini, A., Russo, V., Pellegrinelli, A. ve Russo, P., 2014. Accuracy of Cultural Heritage 3D Models by RPAS and Terrestrial Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5: 113-119. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-113-2014.

Boşdurmaz, N., 2021. *İpek Yolunda Bir Şehir Tokat*. Tokat Belediyesi Kültür Yayınları, İstanbul.

Çıtak, M., 2023. Tarihi Geçmişi ve Savunma Yapısıyla Tokat Kalesi. *Ortaçağ Araştırmaları Dergisi*, 6(2): 484-503. https://doi.org/10.48120/oad.1276747.

Erdoğan, C., 2007. Lazer tarama yöntemi ile bir mühendislik projesi uygulaması: Atatürk rölyefinin konumlandırılması. *3. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, Konya, Türkiye, Ekim 2007.

Erdoğan, C. ve Maktav, D., 2012. Using Remote Sensing, Laser Scanning and GPS for Documentation of the Historical Byzantine Aydos Castle. Perakis, K., Moysiadis, A. (Ed.), *Advances in Geosciences*, EARSeL, syf: 165-174.

Fernández-Palacios, B.J., Morabito, D. ve Remondino, F., 2017. Access to Complex Reality-Based 3D Models Using Virtual Reality Solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 23: 40-48.

Remondino, F., 2011. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, 3(6): 1104-1138. https://doi.org/10.3390/rs3061104.

Saithong, P. ve Yoddee, J., 2026. Immersive Digitalization of Cultural Heritage: A Validated Virtual Reality Museum Platform Using Integrated 3D and 360-Degree Technologies. *Frontiers in Virtual Reality*, 7: 1767312. https://doi.org/10.3389/frvir.2026.1767312.

Themistocleous, K., Ioannides, M., Agapiou, A. ve Hadjimitsis, D.G., 2015. The Methodology of Documenting Cultural Heritage Sites Using Photogrammetry, UAV and 3D Printing Techniques: The Case Study of Asinou Church in Cyprus. *Proc. SPIE 9535, 3rd International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*, 953510. https://doi.org/10.1117/12.2195626.

T.C. Tokat Valiliği, 2026. Tokat. https://www.tokat.gov.tr/tokat [Erişim tarihi: 13.09.2026].

Tschirschwitz, F., Büyüksalih, G., Kersten, T.P., Kan, T., Enc, G. ve Baskaraca, P., 2019. Virtualising an Ottoman Fortress: Laser Scanning and 3D Modelling for the Development of an Interactive, Immersive Virtual Reality Application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9: 723-729. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-723-2019.

BİNA ÇATI YÜZEYLERİNDEKİ YABANCI NESNELERİN OTOMATİK TESPİTİ

Emine UZUNALİOĞLU[1], Hayrettin ACAR[2, 3]

[1]Harita Yüksek Mühendisi., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 61080, Ortahisar, Trabzon, uzunaliogluemine@gmail.com
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, h_acar@ktu.edu.tr
[3]Trabzon Teknokent, AcarTech Yazılım ve Mühendislik Limited Şirketi, 61080, Trabzon, Türkiye

ÖZET

Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte insansız hava araçları (İHA), sundukları yüksek mekansal çözünürlük, hızlı veri toplama kapasitesi ve düşük maliyeti sayesinde birçok farklı disiplin için önemli bir veri kaynağı haline gelmiştir. Sürekli artan nüfus ve buna bağlı olarak hızlanan kentleşme süreçleri, oluşabilecek çevresel sorunların ve kentsel problemlerin daha etkin bir şekilde izlenmesini gerekli kılmaktadır. Kentsel alanlarda yapıların çatı yüzeylerinde zamanla biriken veya çeşitli nedenlerle oluşan yabancı nesneler, yapı güvenliğini olumsuz etkileyebilmekte, bakım ve onarım maliyetlerini artırabilmekte, çevresel açıdan çeşitli riskler oluşturabilmekte ve sürdürülebilir yaşam için tehdit unsuru haline gelebilmektedir. Bu nedenle çatı yüzeylerinde bulunan yabancı nesnelerin hızlı, güvenilir ve otomatik yöntemlerle tespit edilmesi, yapı sağlığının izlenmesi ve olası potansiyel risklerin önceden belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bina çatı yüzeylerinde bulunan yabancı nesnelerin belirlenmesine yönelik görüntü işleme tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada, aynı bölgeye ait farklı zamanlarda İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler MATLAB ortamında işlenmiş ve çatı yüzeylerinde meydana gelen değişimler belirlenerek yabancı nesneler tespit edilmiş ve mekansal konumları ortaya çıkarılmıştır. Geliştirilen yöntemin performansı doğruluk analizi ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlara göre doğruluk oranı %88,66, tamlık oranı %100 ve F1 skoru %93,33 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: değişim analizi, nesne tespiti, ortofoto

ABSTRACT

AUTOMATIC DETECTION OF FOREIGN OBJECTS ON BUILDING ROOF SURFACES

With the rapid advancement of technology, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become an important source of data for various disciplines due to their high spatial resolution, fast data acquisition capability, and cost-effectiveness. Continuous population growth and the resulting acceleration of urbanization processes necessitate more effective monitoring of environmental issues and urban-related problems. Foreign objects that accumulate or occur on building rooftops over time may adversely affect structural safety, increase maintenance and repair costs, create various environmental risks, and pose a threat to sustainable living. Therefore, the rapid, reliable, and automated detection of foreign objects on rooftop surfaces is of great importance for monitoring building conditions and identifying potential risks in advance. In this study, an image processing-based approach was developed to detect foreign objects located on building rooftops. High-resolution UAV images of the same area acquired at different times were processed in the MATLAB environment, and changes occurring on rooftop surfaces were identified to detect foreign objects and determine their spatial locations. The performance of the proposed method was evaluated through accuracy assessment. According to the obtained results, the method achieved an accuracy of 88.66%, a completeness rate of 100%, and an F1-score of 93.33%.

Keywords: change detection, object detection, orthophoto

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve hızlı kentleşme ile birlikte yapılaşma ve konut sayısında sürekli bir artış yaşanmaktadır. Bu süreç, kentsel alanlarda kültürel, ekonomik, sosyal ve çevresel değişimlerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve yapıların düzenli olarak izlenmesini önemli hale getirmektedir. Özellikle geniş ve ulaşılması zor çatı yüzeylerinin denetlenmesi, yapı güvenliği, bakım ve çevresel yönetim gibi birçok açıdan önem taşımaktadır.

Günümüzde insansız hava araçları (İHA), yüksek çözünürlüklü ve güncel veri elde etme imkanı sayesinde birçok bilimsel ve teknik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA'lar, saha çalışmalarını azaltmaları, veri toplama süreçlerini hızlandırmaları, uygun maliyetli olmaları ve yüksek çözünürlüklü görüntü üretmeleri nedeniyle özellikle fotogrametri ve uzaktan algılama çalışmalarında önemli bir veri kaynağı haline gelmiştir. İHA'lar aracılığıyla elde

edilen yüksek çözünürlüklü ve coğrafi referanslı ortofoto görüntüler, farklı zamanlarda meydana gelen değişimlerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

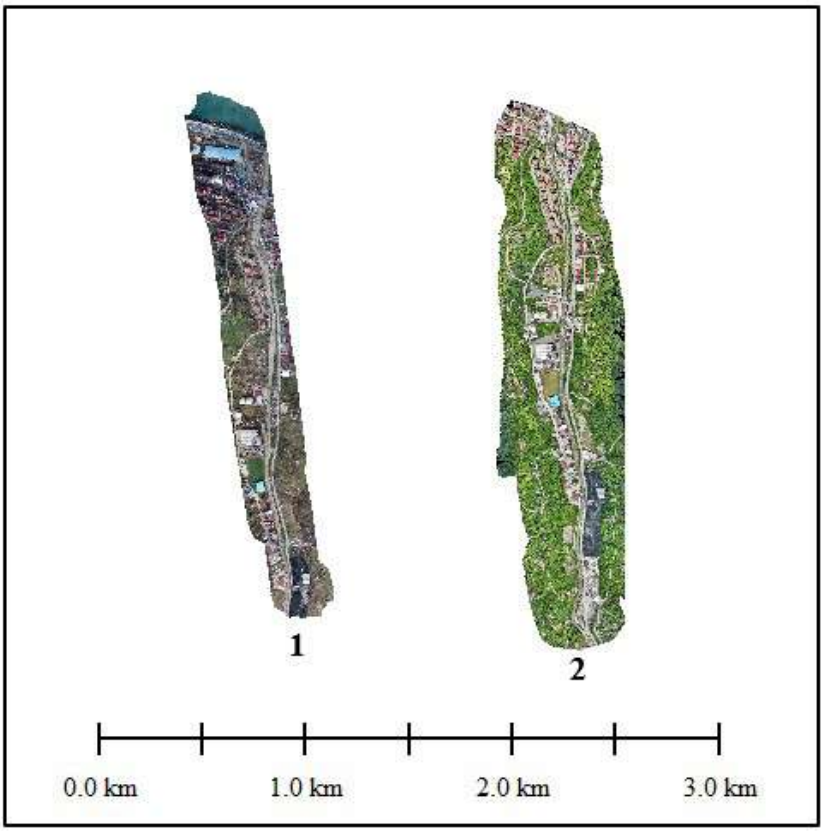
Bina çatıları üzerinde zamanla ahşap parçaları, plastikler, yapraklar, hayvansal kaynaklı materyaller ve çeşitli atıklar gibi yabancı nesneler oluşabilmektedir. Bu nesneler, çevresel ve estetik sorunların yanı sıra çatı bakımı, yapısal güvenlik ve özellikle rüzgar veya fırtına gibi doğal olaylar sırasında çeşitli riskler oluşturabilmektedir. Çatı yüzeylerinin manuel olarak incelenmesi ise ulaşım zorlukları, güvenlik riskleri, zaman ve iş gücü gereksinimi nedeniyle zahmetli ve maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, çatı yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin ve yabancı nesnelerin hızlı, güvenilir ve otomatik bir şekilde belirlenmesine yönelik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda İHA ve görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüler üzerinden yapıların ve özellikle çatı yüzeylerinin ayrıntılı olarak incelenmesi mümkün hale gelmiştir. Farklı zamanlarda elde edilen görüntülerin karşılaştırılmasıyla meydana gelen değişimler belirlenebilmekte ve bu değişimlerden yararlanılarak çatı üzerinde sonradan ortaya çıkan yabancı nesneler tespit edilebilmektedir. Bu yaklaşım, manuel inceleme süreçlerinin azaltılmasının yanı sıra çatı bakımı ve denetimi, çevresel izleme, şehir planlama ve afet yönetimi gibi farklı uygulama alanlarına da katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Bu çalışmanın amacı, farklı zamanlarda elde edilen yüksek çözünürlüklü ve coğrafi referanslı ortofoto görüntüler kullanılarak bina çatı yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin ve yabancı nesnelerin otomatik olarak belirlenmesidir. Zamansal değişimin tespiti, önceki dönemlere ait verilerin güncel veriler ile kıyaslanması ile gerçekleşmektedir. Geleceğe dayalı sürdürülebilir çevre düzeni ve yönetimi, çatı denetimi, bakımı ve onarımı, atık madde izlenimi gibi sorunların çözümüne ışık tutacak bilgilere ulaşmayı hedeflemektedir. İHA teknolojileri ile elde edilen görüntüler hızlı, ekonomik ve güncel bilgiler sunmakta; bu sayede haritalama, şehir planlama, çevresel düzenleme, afet yönetimi ve arazi kullanımı gibi birçok farklı uygulama alanında etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Kullanılan veriler gerçek coğrafi referanslı olduğu için bu veriler coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamına kolayca entegre edilebilmektedir.

1.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanında aynı bölgeyi kapsayacak biçimde Trabzon ili Yomra ilçesinde farklı tarihlerde iki ayrı İHA uçuşu gerçekleştirilmiştir. Uçuşlar sonucunda elde edilen görüntüler (Şekil1), fotogrametrik değerlendirme ve görüntü işleme süreçlerinden geçirilerek yüksek mekansal çözünürlüğe sahip ortofoto görüntüler üretilmiştir. Araştırmada, aynı coğrafi alana ilişkin farklı zamanlarda üretilen bu iki ortofoto veri setinden yararlanılarak, çatı yüzeylerinde zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi ve önceki görüntüde bulunmayan, sonradan oluşmuş yabancı nesnelerin otomatik olarak tespitine dayalı bir yöntem kullanılmıştır. Bu doğrultuda, farklı tarihlere ait ortofoto görüntüler karşılaştırılarak çatı yüzeylerindeki değişimlerin ortaya çıkarılması ve değişim gösteren alanlar nesne tespiti açısından değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Trabzon Yomra İHA uçuşundan elde edilen ortofoto görüntüler

Her iki ortofoto veri setinin oluşturulmasına yönelik İHA uçuşları, yaklaşık 180 m ortalama uçuş yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. Görüntülerin fotogrametrik süreçte sürekliliğin sağlanması amacıyla enine bindirme oranı %70, boyuna bindirme oranı ise %80 olarak planlanmıştır. Yer örnekleme aralığı 5 cm'den küçüktür. Görüntü veri setlerine ilişkin bazı bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

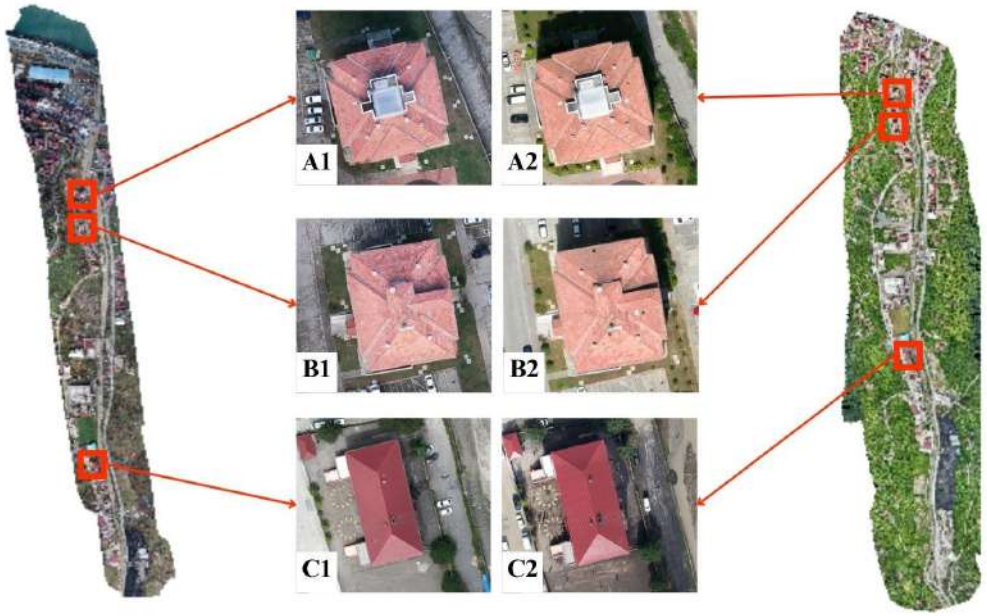
Çizelge 1. Kullanılan ortofoto görüntülerinin bazı özellikleri

	1.Görüntü	**2.Görüntü**
Görüntü Boyutu	560 mb	1.23 gb
Piksel Boyutu	0.056	0.04922
Bant Sayısı	4	4
Satır Sayısı	13527	12764
Sütun Sayısı	46157	54073
Üretim Yılı	2022	2023
Kullanılan Cihaz	Phantom 4 RTK	Mavic 3E
Uçuş Yüksekliği	180 m	180 m
Enine Bindirme	%70	%70
Boyuna Bindirme	%80	%80

2. YÖNTEM

Çalışmada, bina çatı yüzeyleri üzerinde bulunan yabancı veya atık materyallerin otomatik olarak tespit edilmesi amacıyla farklı tarihlerde elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntülerinden yararlanılmıştır. Önerilen yöntem, aynı çalışma alanına ait farklı zamanlarda üretilen ortofoto görüntülerinin karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntem genel olarak; ortofoto verilerinin hazırlanması, ön işleme, piksel tabanlı değişim analizi, histogram dengeleme, morfolojik işlemler, nesnelerin belirlenmesi ve doğruluk analizinden oluşmaktadır. İHA ile gerçekleştirilen görüntü alım çalışmalarından elde edilen hava fotoğrafları, fotogrametrik değerlendirme süreçlerinden geçirilerek yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntülerine dönüştürülmüştür. Böylece çalışma alanına ait, geometrik düzeltmeleri gerçekleştirilmiş ve konumsal özellikleri korunmuş iki farklı tarihe ait ortofoto veri seti elde edilmiştir. Çalışmada, aynı alanı kapsayacak şekilde farklı tarihlerde gerçekleştirilen İHA

uçuşları sonucunda elde edilen görüntülerden üç farklı bina seçilip kullanılmıştır. Seçilen binalar A, B ve C olarak isimlendirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. İki farklı ortofoto görüntüden elde edilen aynı binaya ait veriler

Farklı zamanlarda gerçekleştirilen İHA uçuşları sonucunda elde edilen görüntüler, aynı çalışma alanını kapsadıkları halde görüntüleme koşullarındaki değişiklikler nedeniyle birtakım farklılıklar içerebilmektedir. Özellikle güneşin konumu, ışık şiddeti, atmosferik koşullar, gölge alanlarının dağılımı, sensör özellikleri gibi farklılıklar, aynı yüzeylere ait piksel değerlerinin farklı tarihlerde değişmesine neden olabilmektedir. Bu durum, görüntüler arasında gerçekleştirilecek doğrudan piksel tabanlı karşılaştırmalarda gerçek değişimlerden bağımsız olarak fark değerlerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle değişim analizi gerçekleştirilmeden önce, iki ortofoto görüntüsünün karşılaştırılabilir hale getirilmesi amacıyla çeşitli ön işleme adımları uygulanmıştır.

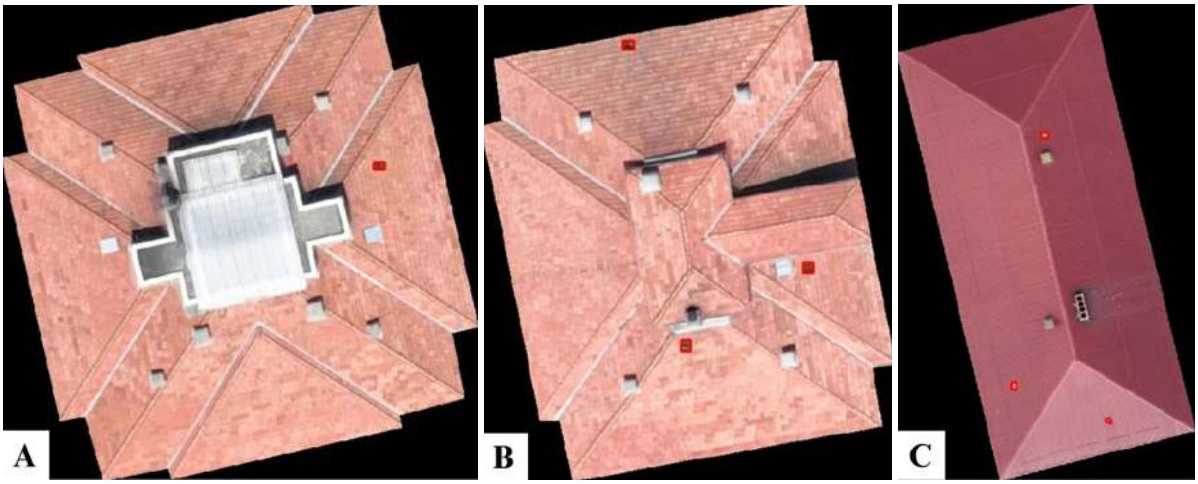
Ön işleme aşamasında, değişim analizinin yalnızca bina çatı yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla çalışma alanlarının sınırlandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çalışma alanında belirlenen A, B ve C binalarına ait çatı yüzeyleri ortofoto görüntüler üzerinde ayrı ayrı değerlendirilerek analiz bölgeleri tanımlanmıştır. Çatı yüzeylerinin sınırlarının belirlenmesinde, bina çatısının görüntü üzerindeki konumu ve geometrik sınırları esas alınmış ve analiz dışında bırakılması gereken çevre unsurlarının mümkün olduğunca çalışma alanına dahil edilmemesine dikkat edilmiştir. Belirlenen analiz bölgeleri, farklı tarihlere ait ortofoto görüntülerde aynı bina ve aynı çatı yüzeylerini karşılayacak şekilde uygulanmıştır. Böylece iki farklı tarihe ait görüntüler arasında gerçekleştirilecek piksel tabanlı karşılaştırmanın aynı mekansal alan üzerinden yürütülmesi sağlanmıştır. Çalışma alanının çatı yüzeyleri ile sınırlandırılması sayesinde, bina çevresinde yer alan zemin, yol, bitki örtüsü, diğer yapılar ve benzeri unsurların oluşturabileceği değişimlerin analiz sonuçlarına dahil edilmesi önlenmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, çatı yüzeylerinin analiz alanı olarak belirlenmesi, işlem yükünün azaltılmasına ve yalnızca değişim tespiti açısından anlamlı olan piksellerin değerlendirilmesine de katkı sağlamıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen sınırlandırılmış görüntü bölgeleri, görüntüler arasındaki radyometrik farklılıkların azaltılması ve devamında gerçekleştirilecek değişim analizine hazırlanması amaçlanmıştır.

Çalışma alanı sınırlandırıldıktan sonra, görüntü boyutları ve piksel yapıları değerlendirilerek, karşılıklı piksel karşılaştırmasının gerçekleştirilebilmesi için görüntüler arasında boyutsal uyum sağlanmıştır. Böylece aynı konuma karşılık gelen piksel değerlerinin doğrudan karşılaştırılabilmesine olanak oluşturulmuştur. Görüntülerin farklı tarihlerde ve farklı aydınlatma koşullarında elde edilmiş olması nedeniyle ortaya çıkan radyometrik farklılıkların azaltılması amacıyla parlaklık ve renk değerleri üzerinde düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda görüntüler arasındaki ton ve parlaklık dağılımlarının birbirine yaklaştırılması amacıyla histogram dengeleme işlemi uygulanmıştır. Histogram dengeleme ile farklı görüntüleme koşullarından kaynaklanan farklılıkların azaltılması ve gerçek nesne değişimlerinin daha belirgin hale getirilmesi amaçlanmıştır. Uygulanan ön işleme adımlarının sonucunda daha uyumlu hale getirilen ortofoto görüntüleri değişim analizi için hazır duruma getirilmiştir. Böylece farklı

tarihlerde elde edilen görüntüler arasındaki piksel değerlerinden kaynaklanan değişimlerin, mümkün olduğunca gerçek yüzey değişimlerini temsil etmesi hedeflenmiştir.

3. BULGULAR

Farklı tarihlerde elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüler üzerinden bina çatı yüzeylerinde bulunan yabancı nesnelerin otomatik olarak tespit edilmesine yönelik geliştirilen yöntem uygulanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle çatı sınırlarının belirlenmesiyle analiz alanı sınırlandırılmış, ardından farklı tarihlerde elde edilen görüntüler arasındaki ışık, kontrast ve parlaklık farklılıklarının etkisi azaltılmıştır. Ön işleme sonrasında gerçekleştirilen RGB tabanlı fark analizi ile iki farklı tarihe ait görüntüler arasındaki değişimler belirlenmiş, morfolojik işlemler yardımıyla küçük ve anlamsız değişimler elimine edilerek daha tutarlı değişim bölgeleri elde edilmiştir. Bu işlemler sonucunda çatı yüzeyleri üzerinde bulunan yabancı nesnelerin belirgin şekilde ortaya çıkarılabildiği tespit edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Bina çatıları üzerinde tespit edilen yabancı nesneler

Elde edilen değişim bölgeleri incelendiğinde, çatı yüzeyinin homojen bir renk ve dokuya sahip olduğu alanlarda yabancı nesnelerin çevresindeki piksellerden daha kolay ayrıştırıldığı ve değişim bölgelerinin daha doğru belirlendiği görülmüştür. Bu durum, yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntülerin küçük ölçekli nesnelerin ve yüzey değişimlerinin belirlenmesinde sağladığı avantajı ortaya koymaktadır. Yapılan analizlerde farklı tarihlere ait görüntüler arasındaki değişimlerin yalnızca yabancı nesnelerin varlığından değil, aynı zamanda görüntüleme koşullarındaki farklılıklardan da kaynaklanabildiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen uygulanan görüntü ön işleme ve fark analizi işlemleri sonucunda, gerçek fiziksel değişimlerin çevresel etkilerden kaynaklanan piksel farklılıklarından büyük ölçüde ayrıştırılabildiği görülmüştür. Özellikle renk ve parlaklık farklılıklarının belirgin olduğu yabancı nesnelerin tespitinde daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Analiz sonucunda oluşturulan değişim maskelerinin incelenmesiyle, yabancı nesnelerin konumsal olarak çatı yüzeyleri üzerinde belirgin bölgeler şeklinde ortaya çıktığı görülmüştür. Morfolojik işlemler sonrasında elde edilen maskelerde küçük ve dağınık piksellerin azaltılmasıyla değişim bölgelerinin daha bütüncül bir görünüm kazandığı belirlenmiştir. Böylece yalnızca piksel düzeyindeki farklılıkların değil, belirli bir alansal bütünlüğe sahip değişimlerin de ortaya çıkarılması mümkün olmuştur. Farklı çatı yüzeylerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, yöntemin özellikle yüzey dokusunun düzenli ve renk dağılımının homojen olduğu çatılarda daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yabancı nesne ile çatı yüzeyi arasındaki renk ve ton farklılığının arttığı durumlarda değişim bölgelerinin daha belirgin hale geldiği, buna bağlı olarak nesnelerin tespit edilebilirliğinin de arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, önerilen yöntemin yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüler üzerinden bina çatı yüzeylerindeki yabancı nesnelerin otomatik olarak belirlenmesinde kullanılabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Çalışmada, bina çatı yüzeylerinde zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi ve yüzey üzerinde bulunan yabancı nesnelerin otomatik olarak tespit edilmesi amacıyla yüksek çözünürlüklü İHA ortofoto görüntülerine dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Farklı tarihlerde elde edilen ortofoto görüntülerin karşılaştırılmasına dayanan yaklaşımda, görüntülerin analiz için hazırlanması, RGB bantları üzerinden değişimlerin belirlenmesi ve elde edilen değişim bölgelerinin iyileştirilmesi aşamalarından yararlanılmıştır. Uygulamalar sonucunda, geliştirilen yaklaşımın çatı yüzeylerindeki yabancı nesnelerin belirlenmesinde kullanılabilir ve başarılı sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir. Üç farklı çalışma alanı üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda %88,66 doğruluk, %100 tamlık ve %93,33 F1 skoru elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çatı yüzeyi ile yabancı nesne arasında belirgin renk, parlaklık veya ton farklılığının bulunduğu durumlarda tespit performansının arttığını ortaya koymuştur. Bu durum, yüksek çözünürlüklü İHA ortofotolarının yüzey değişimlerinin belirlenmesindeki etkinliğini desteklemektedir.

Bununla birlikte, farklı tarihlerde elde edilen görüntülerin karşılaştırılmasında görüntüleme koşullarının sonuçlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle güneşlenme, gölgelenme, yansıma ve atmosferik koşullardaki farklılıkların azaltılması amacıyla görüntülerin mümkün olduğunca benzer koşullarda elde edilmesi ve uygun görüntü ön işleme tekniklerinin kullanılması önerilmektedir. Böylece gerçek değişimlerin çevresel koşullardan kaynaklanan farklılıklardan daha etkin biçimde ayrıştırılması mümkün olacaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada geliştirilen yaklaşımın yüksek çözünürlüklü İHA ortofoto görüntüler kullanılarak bina çatı yüzeylerindeki yabancı nesnelerin otomatik tespitinde etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen doğruluk değerleri, yaklaşımın uygulanabilirliğini desteklerken, yöntemin farklı çalışma alanları ve veri setleri üzerinde geliştirilebilecek bir yapıya sahip olduğunu da göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, çatı yüzeylerinin zamansal olarak izlenmesi, değişimlerin belirlenmesi ve yabancı nesnelerin otomatik olarak tespit edilmesine yönelik gerçekleştirilecek araştırmalara temel oluşturabilecek niteliktedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda multispektral görüntülerin ve yükseklik bilgilerinin mevcut yönteme entegre edilmesiyle nesnelerin yalnızca renk ve parlaklık özellikleri üzerinden değil, spektral ve geometrik özellikleri bakımından da değerlendirilmesi mümkün olabilir. Bunun yanı sıra, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımların kullanılması özellikle küçük boyutlu ve düşük kontrastlı nesnelerin tespit edilmesine katkı sağlayabilir.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmada kullanılan verilerin temin edilmesine sağladığı katkıdan dolayı AcarTech Yazılım ve Mühendislik Limited Şirketine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

Cheng, G., Huang, Y., Li, X., Lyu, S., Xu, Z., Zhao, H., Zhao, Q., & Xiang, S., 2024**.** Change Detection Methods for Remote Sensing in the Last Decade: A Comprehensive Review. Remote Sensing, 16(13), 2355.

Cui, W., Wang, C., Li, X., & Liu, X., 2021. Foreign Body Detection in The Electrified Area of Urban Rail Trains Using Improved Yolov3 Algorithm. Journal of Physics: Conference Series.

Dikbayır, H. S., & Bülbül, H. İ., 2020. Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanarak Gerçek Zamanlı Araç Tespiti. TÜBAV Bilim Dergisi, 13(3), 1-14.

Hafner, S., Fang, H., Azizpour, H., & Ban, Y., 2024. Continuous Urban Change Detection from Satellite Image Time Series with Temporal Feature Refinement and Multi-Task Integration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2406.

Kaur, R., & Singh, S., 2023. A comprehensive review of object detection with deep learning. Digital Signal Processing, 132, Article 103812.

Kovanič, Ľ., Topitzer, B., Peťovský, P., Blišťan, P., Gergeľová, M. B., & Blišťanová, M., 2023. Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV. Applied Sciences, 13(11), 6732.

Luo, W., Xing, J., Milan, A., Zhang, X., Liu, W., & Kim, T. K., 2021. Multiple Object Tracking: A Literature Rewiew. Artificia Intelligence, 293, 103448.

Murat, S., 2021. İnsansız hava aracı görüntülerinden derin öğrenme yöntemleriyle nesne tanıma, Maltepe, İstanbul.

Stilla, U., & Xu, Y., 2021. Change Detection of Urban Objects Using 3D Point Clouds: A Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (197), 228-255.

Wang, W., Chen, J., Huang, Z., Yuan, H., Li, P., Jiang, X., Wang, X., Zhong, C., & Lin, Q., 2023. Improved YOLOv7-Based Algorithm for Detecting Foreign Objects on the Roof of a Subway Vehicle. Sensors, 23(23), 9440.

Zhang, Z., Vosselman, G., Gerke, M., Persello, C., Tuia, D., & Yang, M. Y., 2019. Detecting Building Changes between Airborne Laser Scanning and Photogrammetric Data. *Remote Sensing*, *11*(20), 2417.

HAVA LIDAR SEMANTİK SEGMENTASYONUNDA NOKTA TABANLI DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hacer Kübra SEVİNÇ[1], İsmail Rakıp KARAŞ[2]

[1]Öğr. Gör. Dr., Karabük Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, 78050, Merkez, Karabük, kubrasevinc@karabuk.edu.tr
[2]Prof. Dr., Karabük Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 78050, Merkez, Karabük, ismail.karas@karabuk.edu.tr

ÖZET

Hava LiDAR nokta bulutlarının düzensiz örnekleme yapısı, değişken nokta yoğunluğu ve sınıf dengesizliği, semantik segmentasyonu zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, Oregon LiDAR Programı verileri üzerinde PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer mimarileri aynı veri bölünmesi, giriş öznitelikleri ve değerlendirme ölçütleri altında karşılaştırılmıştır. Ham nokta bulutu 100 × 100 m boyutunda 580 karoya ayrılmış; 480 karo eğitim-geliştirme sürecine, 100 karo ise teste ayrılmıştır. Eğitim karolarının %20'si doğrulama için kullanılmıştır. Eğitim ve test ayrımı nokta düzeyinde değil, karo düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Her nokta X, Y, Z, RGB ve yoğunluk olmak üzere yedi öznitelikle temsil edilmiş, eğitim girdileri 4096 noktaya sabitlenmiştir. PointNet %37,86 mIoU ve %46,87 genel doğruluk, PointNet++ MSG %49,90 mIoU ve %57,42 genel doğruluk, Point Transformer ise %50,10 mIoU ve %61,39 genel doğruluk üretmiştir. Point Transformer bina ve vejetasyon sınıflarında sırasıyla %48,28 ve %40,60 IoU ile daha yüksek gözlenen değerler verirken, PointNet++ MSG sınıflandırılmamış ve zemin sınıflarında daha yüksek IoU elde etmiştir. Point Transformer ile PointNet++ MSG arasındaki mIoU farkı yalnızca 0,20 yüzde puanıdır ve sonuçlar tek eğitim koşusuna dayandığından istatistiksel üstünlük olarak yorumlanmamıştır. PointNet'in vejetasyondaki düşük başarısı, yerel geometrik ilişkileri sınırlı modellemesi, 100 × 100 m karolardan sabit sayıda nokta örneklenmesi ve sınıf sınırlarındaki karışıklık bağlamında tartışılmıştır. Bulgular, model seçiminin yalnızca tek bir genel ölçüte değil, sınıf bazlı başarım ve hedef uygulamaya göre yapılması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: derin öğrenme, LiDAR, nokta bulutu, semantik segmentasyon

ABSTRACT

COMPARISON OF POINT-BASED DEEP LEARNING ARCHITECTURES FOR AIRBORNE LIDAR SEMANTIC SEGMENTATION

The irregular sampling, varying point density, and class imbalance of airborne LiDAR point clouds make semantic segmentation challenging. This study compares PointNet, PointNet++ MSG, and Point Transformer on Oregon LiDAR Program data under the same data split, input features, and evaluation metrics. The raw point cloud was divided into 580 tiles of 100 × 100 m; 480 tiles were allocated to training and validation, while 100 tiles were used for testing. Twenty percent of the 480 tiles were used for validation. The training–test split was performed at the tile level rather than at the individual-point level. Each point was represented by seven features consisting of X, Y, Z, RGB, and intensity, and training inputs were fixed at 4096 points. PointNet achieved 37.86% mIoU and 46.87% overall accuracy; PointNet++ MSG achieved 49.90% mIoU and 57.42% overall accuracy; and Point Transformer achieved 50.10% mIoU and 61.39% overall accuracy. Point Transformer yielded higher observed IoU values for building and vegetation, whereas PointNet++ MSG performed better for unclassified and ground points. The 0.20 percentage-point mIoU difference between Point Transformer and PointNet++ MSG is not interpreted as statistical superiority because the results are based on a single training run for each model. PointNet's low vegetation IoU is discussed in relation to its limited modelling of local geometry, fixed-size sampling from 100 × 100 m tiles, and class-boundary confusion. The findings indicate that architecture selection should consider class-wise performance and the intended application rather than a single aggregate metric.

Keywords: deep learning, LiDAR, point cloud, semantic segmentation

1. GİRİŞ

Hava LiDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri, geniş alanlara ait üç boyutlu geometrik bilginin yüksek konumsal doğrulukla elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Üretilen yoğun nokta bulutları; arazi örtüsünün belirlenmesi, bina ve vejetasyon çıkarımı, sayısal yüzey modellerinin oluşturulması, kentsel modelleme ve üç boyutlu mekânsal analiz gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bununla birlikte LiDAR nokta bulutları, görüntülerde olduğu gibi düzenli bir ızgara yapısına sahip değildir. Noktaların düzensiz ve sırasız dağılımı, nokta yoğunluğunun çalışma alanı boyunca değişebilmesi ve farklı arazi örtüsü sınıflarının benzer geometrik özellikler gösterebilmesi, nokta düzeyinde semantik segmentasyonu güçleştirmektedir (Zhang vd., 2019).

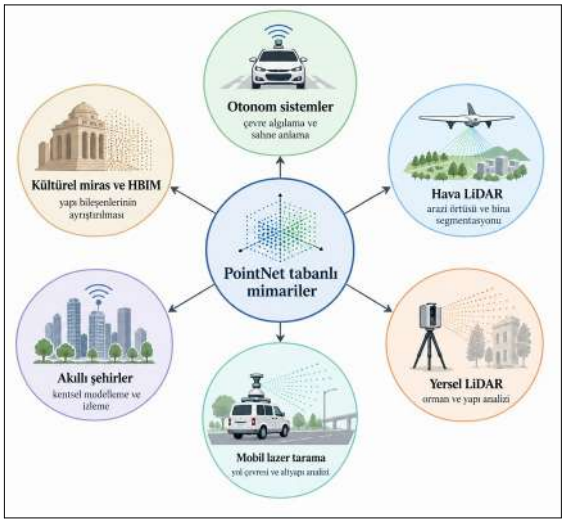
Klasik makine öğrenmesi yöntemlerinde sınıflandırma başarısı büyük ölçüde önceden belirlenen özniteliklere bağlıyken, derin öğrenme yöntemleri nokta bulutlarından ayırt edici özelliklerin doğrudan öğrenilmesine olanak

sağlamaktadır (Liu vd.,2019). Bu yaklaşımın öncü örneklerinden biri olan PointNet, düzensiz nokta kümelerini herhangi bir voksel veya görüntü dönüşümüne ihtiyaç duymadan doğrudan işleyebilmektedir. Model, her nokta üzerinde paylaşımlı çok katmanlı algılayıcılar kullanmakta ve nokta sırasından bağımsız küresel bir temsil oluşturmak için simetrik bir havuzlama işlemi uygulamaktadır (Qi vd., 2017a). Bununla birlikte PointNet'in noktalar arasındaki yerel geometrik ilişkileri doğrudan modellememesi, özellikle karmaşık sınıf sınırlarının bulunduğu sahnelerde önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır.

PointNet++, bu sınırlılığı gidermek amacıyla nokta bulutunu hiyerarşik yerel bölgeler üzerinden işlemektedir. Set Abstraction katmanları aracılığıyla nokta bulutu aşamalı olarak örneklenmekte, komşu noktalar gruplandırılmakta ve farklı mekânsal ölçeklerde yerel geometrik öznitelikler öğrenilmektedir. Multi-Scale Grouping (MSG) yaklaşımında aynı merkez nokta çevresinde farklı yarıçaplardaki komşulukların birlikte değerlendirilmesi, özellikle nokta yoğunluğunun değişken olduğu LiDAR verilerinde farklı büyüklüklerdeki yapıların temsil edilmesine olanak sağlamaktadır (Qi vd., 2017b).

Daha güncel nokta tabanlı yaklaşımlar ise geometrik komşuluk bilgisinin yanında noktalar arasındaki bağlamsal ilişkileri de öğrenmeye yönelmiştir. Point Transformer, öz-dikkat mekanizmasını üç boyutlu nokta bulutlarına uyarlayarak noktalar ve komşulukları arasındaki ilişkileri içerik ve konuma bağlı biçimde ağırlıklandırmaktadır (Zhao vd., 2021). Böylece yalnızca nokta düzeyindeki özniteliklerin değil, bir noktanın çevresindeki diğer noktalarla kurduğu ilişkinin de temsil edilmesi amaçlanmaktadır.

Nokta tabanlı derin öğrenme mimarileri, farklı platformlardan elde edilen üç boyutlu nokta bulutlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir (Şekil 1). Mobil lazer tarama verilerinde PointNet ile yol yüzeyi, hendek, bariyer, çit ve yol çevresi elemanlarının segmentasyonu gerçekleştirilmiş; bu tür uygulamalar otonom sistemlerde çevre algısı açısından da önem taşımaktadır (Balado vd., 2019). Büyük ölçekli hava lazer tarama verilerinde PointNet'in dış ortam semantik segmentasyonundaki davranışı ve hiperparametrelere duyarlılığı incelenmiş (Nurunnabi vd., 2021), yersel lazer tarama verilerinde ise PointNet tabanlı modeller orman düşey yapısının zemin, çalı, gövde ve yaprak bileşenlerine ayrılması için uygulanmıştır (Ma vd., 2023). Bu örnekler, nokta tabanlı derin öğrenme yaklaşımlarının hava, mobil ve yersel LiDAR ile robotik ve otonom sistemler gibi farklı uygulama bağlamlarında değerlendirilebildiğini göstermektedir.



Şekil 1. Nokta tabanlı derin öğrenme mimarilerinin kullanım alanları

Bu çalışmada PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer mimarileri aynı hava LiDAR veri seti üzerinde karşılaştırılmıştır. Bu üç mimarinin seçilmesinin temel nedeni, nokta bulutu işlemede birbirini izleyen farklı temsil yaklaşımlarını yansıtmalarıdır: PointNet küresel nokta özelliklerine, PointNet++ MSG hiyerarşik ve çok ölçekli yerel geometrik özelliklere, Point Transformer ise dikkat mekanizması aracılığıyla nokta ilişkilerinin bağlamsal olarak modellenmesine dayanmaktadır. Karşılaştırmada yalnızca genel doğruluk ve ortalama IoU değerleri değil, sınıf bazlı IoU sonuçları da değerlendirilerek mimarilerin Sınıflandırılmamış, Vejetasyon, Zemin ve Bina sınıflarındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. NOKTA TABANLI DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİ

Bu çalışmada karşılaştırılan PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer modelleri, düzensiz üç boyutlu nokta bulutlarını doğrudan işleyebilen nokta tabanlı derin öğrenme mimarileridir. Bununla birlikte üç model, nokta bulutundaki geometrik ve bağlamsal bilginin temsil edilme biçimi açısından önemli farklılıklar göstermektedir. PointNet temel olarak nokta düzeyi öznitelikler ile küresel bir temsil oluştururken, PointNet++ yerel geometrik komşulukları hiyerarşik olarak modellemekte, Point Transformer ise noktalar arasındaki ilişkileri dikkat mekanizmasıyla ağırlıklandırmaktadır.

2.1. PointNet

PointNet, düzensiz ve sırasız nokta bulutlarının doğrudan derin öğrenme modellerine girdi olarak kullanılabilmesini sağlayan öncü mimarilerden biridir (Qi vd., 2017a). Model, her noktayı bağımsız olarak paylaşımlı çok katmanlı algılayıcılar (shared MLP) aracılığıyla işler. Nokta düzeyinde elde edilen öznitelikler, maksimum havuzlama gibi simetrik bir fonksiyon kullanılarak tek bir küresel özellik gösteriminde birleştirilir. Simetrik fonksiyon kullanımı sayesinde model, nokta bulutundaki noktaların giriş sırasından bağımsız çalışabilmektedir.

PointNet'in önemli avantajı, nokta bulutunun voksel veya iki boyutlu görüntü gibi başka bir veri yapısına dönüştürülmesini gerektirmemesidir. Böylece özgün üç boyutlu nokta gösterimi korunmaktadır. Buna karşılık model, komşu noktalar arasındaki mesafe, yön ve yerel geometrik düzeni doğrudan modellememektedir. Bu nedenle çatı kenarları, zemin-vejetasyon geçişleri veya farklı yükseklikteki bitkisel yapılar gibi yerel geometrinin belirleyici olduğu bölgelerde ayırt edici bilgi sınırlı kalabilmektedir.

2.2. PointNet++ MSG

PointNet++, PointNet'in yerel geometrik ilişkileri sınırlı biçimde modellemesi sorununu hiyerarşik bir özellik öğrenme yapısı ile ele almaktadır (Qi vd., 2017b). Modelin temel bileşeni olan Set Abstraction katmanlarında önce nokta bulutunu temsil edecek merkez noktalar seçilmekte, ardından bu merkezlerin çevresindeki komşu noktalar gruplandırılmakta ve her yerel bölgeden PointNet tabanlı özellikler çıkarılmaktadır. Bu işlemin ardışık katmanlarda tekrarlanması sayesinde model küçük ölçekli geometrik yapılardan daha geniş sahne özelliklerine doğru hiyerarşik bir temsil oluşturmaktadır.

Bu çalışmada PointNet++ mimarisinin Multi-Scale Grouping (MSG) varyantı kullanılmıştır. MSG, her merkez nokta için tek bir komşuluk ölçeği yerine birden fazla yarıçapta komşuluk tanımlamakta ve bu bölgelerden elde edilen özellikleri birleştirmektedir. Böylece aynı noktanın yakın çevresindeki ince geometrik yapılar ile daha geniş çevresel bağlam birlikte temsil edilebilmektedir. Bu özellik, nokta yoğunluğunun mekânsal olarak değiştiği hava LiDAR verilerinde özellikle önemlidir. MSG yaklaşımı, farklı yoğunluk seviyelerinde geometrik bilginin tek bir komşuluk ölçeğine bağımlı kalmasını azaltmayı amaçlamaktadır.

2.3. Point Transformer

Point Transformer, Transformer mimarilerinde kullanılan öz-dikkat mekanizmasını üç boyutlu nokta bulutlarına uyarlayan nokta tabanlı bir derin öğrenme yaklaşımıdır (Zhao vd., 2021). PointNet ve PointNet++ mimarilerinde özellik çıkarımı ağırlıklı olarak nokta düzeyi dönüşümler ve geometrik komşuluklar üzerinden gerçekleştirilirken, Point Transformer nokta özellikleri arasındaki ilişkilerin önemini dikkat ağırlıkları aracılığıyla öğrenmektedir. Böylece bir noktanın temsili yalnızca kendi özniteliklerine değil, çevresindeki diğer noktalarla olan ilişkilerine bağlı olarak güncellenebilmektedir.

Öz-dikkat mekanizması, farklı noktaların segmentasyon kararı üzerindeki katkılarının uyarlamalı olarak belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin bir noktanın bina yüzeyine, çatı kenarına, zemine veya vejetasyona ait olduğunun belirlenmesinde yalnızca noktanın koordinat ve radyometrik özellikleri değil, yakın çevresindeki noktalarla oluşturduğu geometrik ve bağlamsal yapı da kullanılabilmektedir.

Point Transformer bu nedenle özellikle karmaşık sınıf sınırlarının bulunduğu nokta bulutlarında güçlü bir temsil kapasitesi sunmaktadır. Bununla birlikte dikkat işlemleri, daha basit PointNet tabanlı yapılara göre daha yüksek hesaplama ve bellek maliyetine neden olabilmektedir.

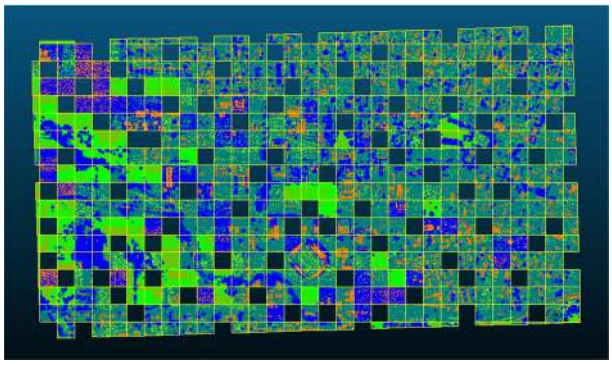
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı ve Veri Seti

Veri, Oregon Department of Geology and Mineral Industries LiDAR Programı kapsamında üretilmiş ve OpenTopography platformundan temin edilmiştir (OpenTopography, 2011). Çalışma alanı, ABD'nin Oregon eyaletinde Oregon State University ve çevresindeki kentsel ve bitkisel örtülerin birlikte bulunduğu bölgeyi kapsamaktadır (Şekil 2). Çalışma alanının coğrafi konumu ve 100 × 100 m'lik LiDAR karo örtüsü Şekil 2'de; yerel topoğrafik/düşey yapıyı görünür kılmak amacıyla bağıl yükseklikle renklendirilmiş örnek bir test karosu ise Şekil 3'te gösterilmiştir.



a) Çalışma alanının konumu



b) 100 × 100 m LiDAR karoları

Şekil 2. Çalışma alanı ve LiDAR karo düzeni.

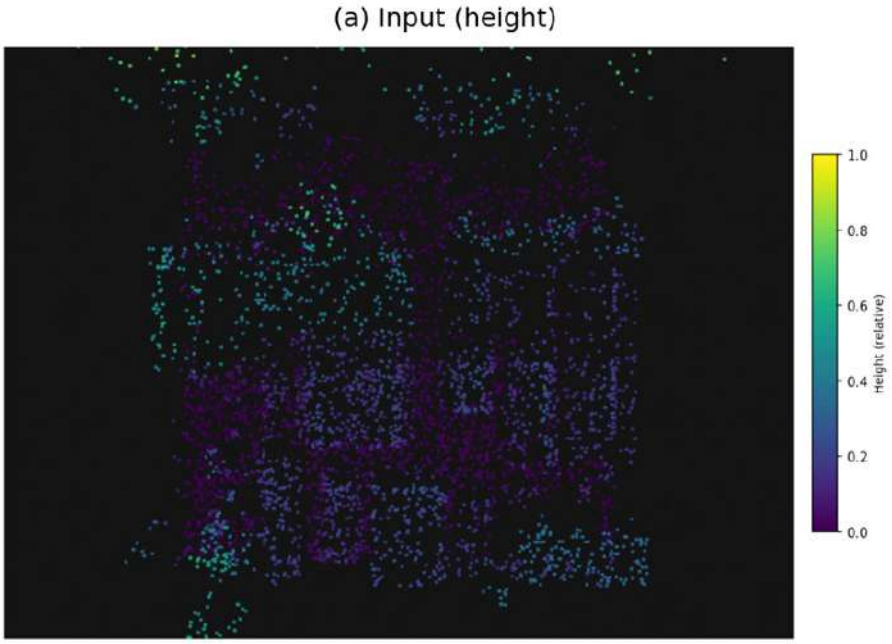
Ham LiDAR nokta bulutu, büyük ölçekli verinin yönetilebilir örneklere dönüştürülmesi amacıyla CloudCompare v2.14.alpha ile 100 × 100 m boyutlarında karolara ayrılmıştır. Toplam 580 karonun 480'i eğitim ve doğrulama, 100'ü ise test amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada, standartlaştırılmış benchmark veri setlerinden farklı olarak, gerçek saha koşullarındaki sınıf dengesizliği, değişken nokta yoğunluğu ve veri heterojenliğini koruyan bir hava LiDAR veri seti üzerinde model performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Veride Sınıflandırılmamış, Vejetasyon, Zemin ve Bina olmak üzere dört sınıf bulunmaktadır. Her nokta için X, Y, Z koordinatları, kırmızı, yeşil ve mavi bant değerleri ile LiDAR yoğunluğu kullanılmıştır. Sınıf dağılımı Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Veri setindeki sınıf dağılımı.

Sınıf	**Nokta sayısı**	**Oran (%)**
Sınıflandırılmamış	3.465.115	7,21
Vejetasyon	27.513.533	57,21
Zemin	13.414.662	27,89
Bina	3.697.440	7,69
Toplam	48.090.750	100,00

Çizelge 1, vejetasyon sınıfının tüm noktaların yarısından fazlasını oluşturduğunu, bina ve sınıflandırılmamış sınıflarının ise yaklaşık %7 düzeyinde kaldığını göstermektedir. Bu nedenle genel doğruluk tek başına yeterli değildir; sınıf bazlı IoU ve makro ortalama mIoU birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma alanındaki yerel topoğrafik ve düşey değişime örnek olarak, bağıl yükseklik değerleriyle renklendirilmiş bir test karosu Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Yerel topoğrafik/düşey yapıyı gösteren, bağıl yükseklikle renklendirilmiş örnek LiDAR test karosu.

3.2. Ön İşleme ve Sabit Nokta Örnekleme

Nokta tabanlı ağların sabit boyutlu tensör gereksinimi nedeniyle her eğitim örneği 4096 noktaya dönüştürülmüştür. Bir karoda 4096'dan fazla nokta varsa rastgele alt örnekleme yapılmış, daha az nokta varsa mevcut noktalardan tekrarlı örnekleme ile dolgu uygulanmıştır. Böylece hiçbir karo yalnızca nokta sayısı nedeniyle dışarıda bırakılmamıştır. Model girdisi her nokta için yedi boyutlu (x, y, z, r, g, b, yoğunluk) özellik vektöründen oluşmuştur. Ortak ön işleme hattında XYZ koordinatları merkezlenerek birim küreye ölçeklenmiş, RGB değerleri 255'e ve yoğunluk değerleri kendi maksimum değerine bölünerek normalize edilmiştir.

Tam çözünürlüklü nokta bulutlarına yönelik çıkarım aşamasında, hesaplama yükünü azaltmak amacıyla karolar 2048 noktaya alt örneklenmiş; bu noktalarda elde edilen tahminler en yakın komşu enterpolasyonu ile özgün çözünürlükteki nokta bulutuna aktarılmıştır.

3.3. Eğitim Protokolü

Deneyler PyTorch tabanlı bir eğitim altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer modellerinin eğitiminde Adam optimizasyon algoritması, 0,001 başlangıç öğrenme oranı, Cross-Entropy kayıp fonksiyonu ve StepLR öğrenme oranı zamanlayıcısı kullanılmıştır. Mini-yığın boyutu 16 olarak belirlenmiş ve her eğitim örneğinde 4096 nokta kullanılmıştır. Azami eğitim süresi 50 epoch olarak belirlenmiş; doğrulama mIoU değerinde 15 ardışık epoch boyunca iyileşme olmaması durumunda erken durdurma uygulanmıştır. Doğrulama başarımı en yüksek olan kontrol noktası değerlendirme için saklanmıştır. Eğitim-doğrulama bölünmesinde rastgelelik tohumu 42 olarak sabitlenmiştir. Eğitim veri artırma işlemleri yalnızca eğitim kümesinde etkinleştirilmiş, doğrulama ve test kümelerinde uygulanmamıştır. Sonuçlar her model için tek bir eğitim çalıştırmasına dayandığından, farklı rastgele başlangıçlara ait ortalama ve standart sapma değerleri raporlanmamıştır.

Çizelge 2. Eğitim ve çıkarım yapılandırması.

Bileşen	Değer / uygulama
Optimizasyon	Adam
Başlangıç öğrenme oranı	0,001
Kayıp fonksiyonu	Cross-Entropy
Mini-yığın boyutu (BATCH_SIZE)	16
Azami epoch	50
Erken durdurma	Doğrulama mIoU; sabır (patience) = 15 epoch
Eğitim noktası / karo	4096
Çıkarım noktası / karo	2048 + en yakın komşu enterpolasyonu
Girdi öznitelikleri	X, Y, Z, R, G, B, yoğunluk (7 öznitelik)
Eğitim veri artırma	Eğitimde etkin; doğrulama/testte kapalı
Rastgelelik tohumu	42
Donanım	NVIDIA RTX 5070 Ti, 16 GB VRAM
Tekrar / seed raporu	Her model için tek çalıştırma; varyans raporlanmadı

3.4. Değerlendirme Ölçütleri

Her sınıf için kesişim-birleşim oranı IoU = TP / (TP + FP + FN) biçiminde hesaplanmıştır. Burada TP doğru pozitif, FP yanlış pozitif ve FN yanlış negatif nokta sayısını göstermektedir. Dört sınıfın IoU değerlerinin aritmetik ortalaması mIoU olarak raporlanmıştır. Genel doğruluk (OA) ise doğru sınıflandırılan tüm noktaların toplam nokta sayısına oranıdır. Sınıf dengesizliği nedeniyle temel karşılaştırma ölçütü mIoU olmakla birlikte, OA ve sınıf bazlı IoU değerleri birlikte yorumlanmıştır.

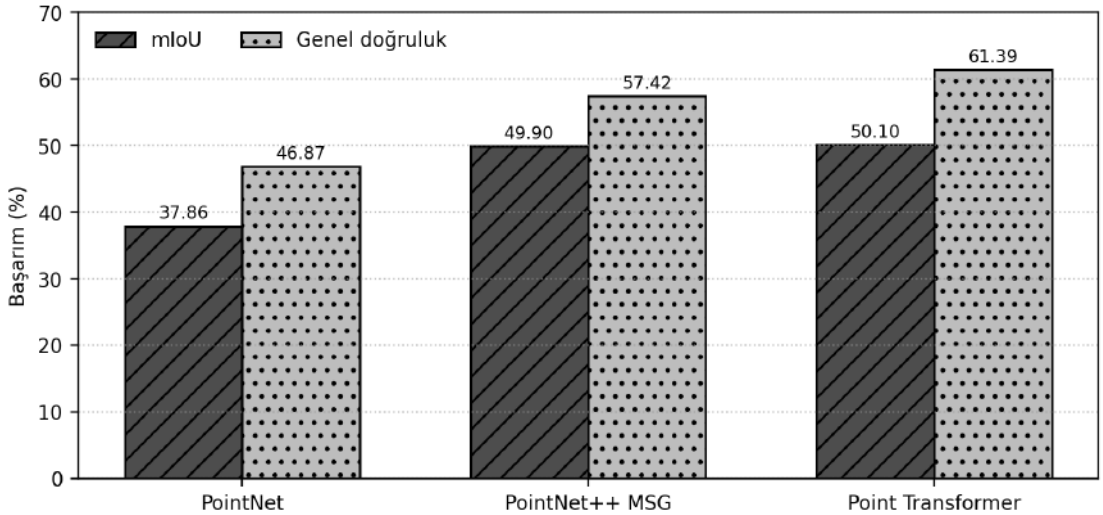
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Genel Başarım

Üç mimarinin ortak test kümesindeki sonuçları Çizelge 3'te, mIoU ve genel doğruluk karşılaştırması ise Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Modellerin genel ve sınıf bazlı test sonuçları.

Model	mIoU	OA	Sınıflandırılm.	Vejetasyon	Zemin	Bina
PointNet	37,86	46,87	70,68	9,26	45,12	26,38
PointNet++ MSG	49,90	57,42	81,74	25,08	47,32	45,44
Point Transformer	50,10	61,39	67,03	40,60	44,47	48,28

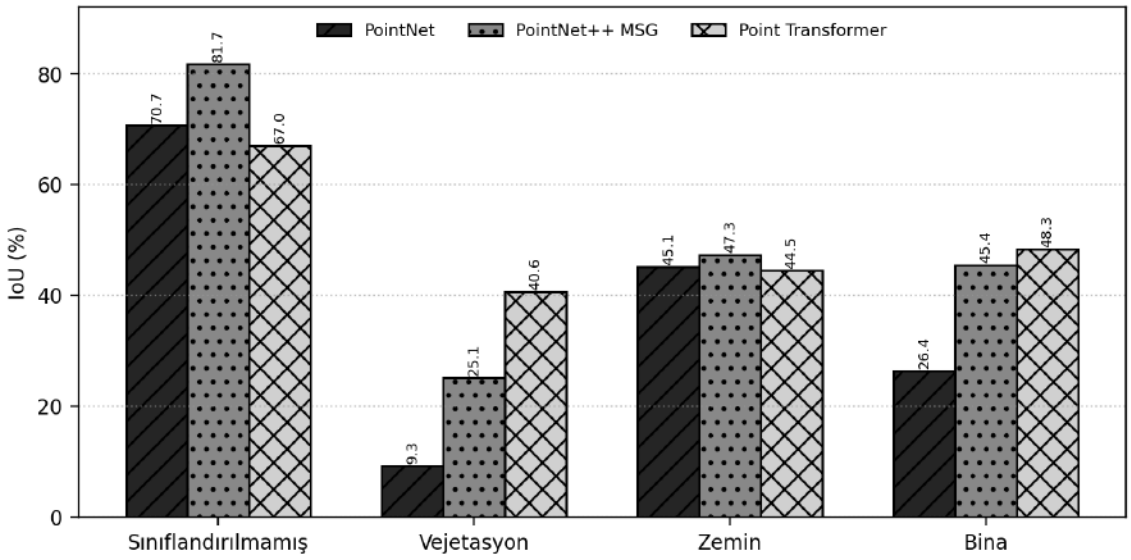


Şekil 4. Modellerin mIoU ve genel doğruluk değerleri.

PointNet %37,86 mIoU ile en düşük gözlenen sonucu vermiştir. PointNet++ MSG, PointNet'e göre mIoU'da 12,04 ve genel doğrulukta 10,55 yüzde puanlık daha yüksek değer üretmiştir. Bu betimsel örüntü, yerel ve çok ölçekli geometrik bilginin hava LiDAR sahnelerinde yararlı olabileceği görüşüyle uyumludur. Point Transformer %50,10 mIoU ve %61,39 OA üretmiştir. Bununla birlikte Point Transformer ile PointNet++ MSG arasındaki mIoU farkı yalnızca 0,20 yüzde puanıdır. Çoklu bağımsız eğitim, standart sapma veya eşleştirilmiş istatistiksel sınama bulunmadığından bu küçük fark mimariler arasında güvenilir bir üstünlük kanıtı olarak değerlendirilmemiş; yalnızca gözlenen tek koşulu sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.2. Sınıf Bazlı Başarım

Sınıf bazlı IoU değerleri Şekil 5'te karşılaştırılmıştır. En iyi model tek bir mimaride sabit kalmamaktadır: PointNet++ MSG sınıflandırılmamış (%81,74) ve zemin (%47,32) sınıflarında; Point Transformer ise vejetasyon (%40,60) ve bina (%48,28) sınıflarında daha yüksek IoU üretmiştir.



Şekil 5. Modellerin sınıf bazlı IoU değerleri.

Bina çıkarımının öncelikli olduğu bir uygulamada Point Transformer'ın daha yüksek bina IoU'su önemli olabilir. Buna karşılık zemin yüzeyinin ayrılması veya sınıflandırılmamış noktaların korunması gereken bir iş akışında PointNet++ MSG daha uygun bir profil sunmaktadır. Bu farklılık, model seçiminin yalnızca mIoU sıralamasına indirgenmemesi gerektiğini göstermektedir.

4.3. PointNet'in Vejetasyon Sınıfındaki Düşük Başarımı

PointNet'in vejetasyon sınıfındaki %9,26 IoU değeri, sınıfın veri setindeki %57,21'lik baskınlığı göz önüne alındığında özellikle dikkat çekicidir. Bu değer, yalnızca sınıf azlığı ile açıklanamaz. İlk olası etken, PointNet'in yerel komşulukları açık biçimde temsil etmemesidir. Vejetasyonun düzensiz düşey yapısı ile zemin-bitki geçişlerinin ayırt edilmesi, tek tek nokta özelliklerinden çok yerel geometrik bağlama bağlıdır. PointNet++ MSG ve Point Transformer'ın aynı sınıfta sırasıyla %25,08 ve %40,60 IoU üretmesi bu yorumu destekleyen betimsel bir örüntüdür.

İkinci etken, 100 × 100 m büyüklüğündeki heterojen karolardan yalnızca 4096 nokta seçilmesidir. Sabit boyutlu rastgele örnekleme, özellikle sınıf sınırlarında ve küçük yerel yapılarda temsil kaybına yol açabilir. Üçüncü olarak, gerçek dünya verisindeki etiket gürültüsü, değişken nokta yoğunluğu ve çıkarımda 2048 noktadan en yakın komşu ile tam çözünürlüğe aktarım karmaşık sınıf sınırlarındaki hatayı artırabilecek unsurlardır. Bununla birlikte bu açıklamalar bu çalışmada nedensel olarak sınanmamıştır. PointNet'e ait çoklu seed dağılımı ve ayrıntılı sınıf karışıklık analizi bulunmadığından %9,26 değeri, PointNet'in genel kapasitesine ilişkin bir benchmark sonucu olarak değil, bu veri ve uygulama hattında elde edilen tek koşulu bir sonuç olarak değerlendirilmelidir. Literatürde ISPRS 3D/Vaihingen tabanlı çalışmalar ve DALES gibi hava LiDAR benchmarkları farklı sınıf tanımları, nokta yoğunlukları, veri hazırlama ve bölme protokolleri kullanmaktadır; bu nedenle bu veri kümelerindeki sayısal sonuçlarla doğrudan performans eşitlemesi yapmak uygun değildir (Nong vd., 2023; Varney vd., 2020).

5. SINIRLILIKLAR

Bu çalışma, PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer mimarilerinin standartlaştırılmış benchmark veri setlerinin ötesinde, gerçek saha koşullarındaki sınıf dengesizliği, değişken nokta yoğunluğu ve veri heterojenliğini koruyan hava LiDAR verisi üzerindeki davranışlarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Kullanılan veri seti; sınıf dengesizliği, değişken nokta yoğunluğu ve sahadaki doğal veri heterojenliğini koruması bakımından gerçek dünya uygulamalarına daha yakın bir yapı sunmaktadır. Bununla birlikte, sonuçların tek bir LiDAR veri kaynağından elde edilmiş olması, bulguların farklı coğrafi bölgeler, sensör özellikleri ve veri toplama koşulları için doğrudan genellenmesini sınırlandırmaktadır.

Büyük ölçekli nokta bulutunun hesaplamalı olarak işlenebilir hale getirilmesi amacıyla veri 100 × 100 m boyutlarında karolara ayrılmış ve eğitim sırasında her karodan sabit sayıda nokta örneklenmiştir. Bu yaklaşım hesaplama yükünü azaltmakla birlikte, özellikle düşük frekanslı sınıfların, küçük nesnelerin ve sınıf sınırlarındaki ayrıntıların bazı örneklerde yeterince temsil edilememesine neden olabilir. Benzer şekilde, çıkarım aşamasında daha

düşük sayıda nokta üzerinden tahmin yapılması ve sonuçların tam çözünürlüklü nokta bulutuna aktarılması da sınıf sınırlarındaki hataları etkileyebilecek bir unsurdur.

Ayrıca çalışmada her model için tek bir eğitim sonucu raporlanmıştır. Farklı rastgele başlangıçlarla tekrarlı deneyler gerçekleştirilmediğinden, özellikle PointNet++ MSG ve Point Transformer arasında gözlenen küçük performans farkları istatistiksel bir üstünlük olarak değerlendirilmemelidir. Bu nedenle sonuçlar, aynı veri ve eğitim koşulları altında elde edilen karşılaştırmalı performans göstergeleri olarak ele alınmıştır.

Gelecek çalışmalarda farklı gerçek dünya hava LiDAR veri setlerinin kullanılması, eğitimlerin birden fazla rastgele başlangıçla tekrarlanması ve sonuçların ortalama ve standart sapma gibi istatistiklerle birlikte raporlanması karşılaştırmanın güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca farklı örnekleme stratejileri ve daha geniş nokta tabanlı model grupları kullanılarak, veri yapısının model performansı üzerindeki etkisi daha ayrıntılı biçimde incelenebilir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada PointNet, PointNet++ MSG ve Point Transformer mimarileri Oregon hava LiDAR verisinin dört sınıflı semantik segmentasyonu için karşılaştırılmıştır. Gözlenen tek koşulu sonuçlarda PointNet++ MSG, PointNet'e göre genel ve sınıf bazlı ölçütlerin çoğunda daha yüksek değerler üretmiş; bu durum hiyerarşik ve çok ölçekli yerel özelliklerin yararlı olabileceğine işaret etmiştir. Point Transformer en yüksek gözlenen genel doğruluğu ve bina ile vejetasyon IoU değerlerini üretmiştir. Buna karşılık mIoU bakımından PointNet++ MSG ile farkı yalnızca 0,20 yüzde puanıdır ve tekrarlı deney bulunmadığından bu fark istatistiksel üstünlük olarak yorumlanmamıştır.

Sonuçlar, gerçek saha koşullarındaki heterojenlik ve sınıf dengesizliğini koruyan hava LiDAR verilerinde mimarilerin sınıf bazında farklı davranışlar gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda farklı gerçek dünya LiDAR veri setleri ve tekrarlı eğitimler kullanılarak karşılaştırmanın kapsamı genişletilebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, LiDAR verisini açık erişimle sağlayan Oregon Department of Geology and Mineral Industries ve OpenTopography platformuna teşekkür eder.

Bu çalışma, TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı kapsamında yürütülen 126Y269 numaralı “Hava LiDAR Nokta Bulutlarının Transformer Tabanlı Semantik Segmentasyonunun Açıklanabilir Yapay Zeka ile İncelenmesi” başlıklı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Balado, J., Martínez-Sánchez, J., Arias, P. ve Novo, A. (2019). Road Environment Semantic Segmentation with Deep Learning from MLS Point Cloud Data. Sensors, 19, 3466. https://doi.org/10.3390/s19163466

Liu, W., Sun, J., Li, W., Hu, T., & Wang, P. (2019). Deep Learning on Point Clouds and Its Application: A Survey. *Sensors*, *19*(19), 4188. https://doi.org/10.3390/s19194188

Ma, Z., Dong, Y., Zi, J., Xu, F. ve Chen, F. (2023). Forest-PointNet: A Deep Learning Model for Vertical Structure Segmentation in Complex Forest Scenes. Remote Sensing, 15, 4793. https://doi.org/10.3390/rs15194793

Nurunnabi, A., Teferle, F. N., Li, J., Lindenbergh, R. ve Parvaz, S. (2021). Investigation of PointNet for Semantic Segmentation of Large-Scale Outdoor Point Clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-4/W5-2021, 397-404. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-397-2021

Nong, X., Bai, W. ve Liu, G. (2023). Airborne LiDAR point cloud classification using PointNet++ network with full neighborhood features. PLOS ONE, 18, e0280346. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280346

OpenTopography (2011). Oregon Department of Geology and Mineral Industries Lidar Program Data. https://doi.org/10.5069/G9QC01D1

Qi, C. R., Su, H., Mo, K. ve Guibas, L. J. (2017a). PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 77-85. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.16

Qi, C. R., Yi, L., Su, H. ve Guibas, L. J. (2017b). PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. Advances in Neural Information Processing Systems, 30.

Varney, N. M., Asari, V. K. ve Graehling, Q. (2020). DALES: A large-scale aerial LiDAR data set for semantic segmentation. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 717-726. https://doi.org/10.1109/CVPRW50498.2020.00101

Zhang, J., Zhao, X., Chen, Z. ve Lu, Z. (2019). A review of deep learning-based semantic segmentation for point cloud. IEEE Access, 7, 179118-179133. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958671

Zhao, H., Jiang, L., Jia, J., Torr, P. H. S. ve Koltun, V. (2021). Point Transformer. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 16259-16268. https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.01595

BÜYÜK DİL MODELİ İLE ÇOK KAYNAKLI ÇEVRESEL METİNLERDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN GEOVISUAL ANALİZİ İLE TÜRKİYE'DE KAHVERENGİ KOKARCANIN (HALYOMORPHA HALYS) İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE İLİŞKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Pınar KAZAZ [1], Çetin CÖMERT [2],

1 Pınar KAZAZ,Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon,pinarkazaz88@gmail.com
2Prof. Dr.Çetin Cönert, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, ccomert@ ktu.edu.tr

ÖZET

İstilacı türlere ilişkin yer, zaman, zarar, müdahale ve çevresel koşul bilgileri bilimsel yayınlar, resmî belgeler, haberler ve çevrim içi içerikler gibi farklı kaynaklara dağılmış biçimde bulunabilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'de kahverengi kokarcaya (Halyomorpha halys) ilişkin çok kaynaklı metinlerden mekânsal-zamansal olayların çıkarılması, coğrafi kodlama ve mekânsal eşleştirme yoluyla konumlandırılması, geogörsel olarak incelenmesi ve iklimle ilişkili anlatıların ERA5 yeniden analiz verileriyle değerlendirilmesi amaçlanmıştır.Ulusal ve yerel haberler, bilimsel yayınlar, resmî kurum belgeleri ve YouTube içeriklerinden oluşan, 2015–2026 dönemini kapsayan 2.036 belge Python tabanlı araçlarla derlenmiştir. İlk aşamada GPT-4.1 mini ile bağımsız olaylar ve bunlara bağlı zaman, konum, ürün, zarar, müdahale, yayılım ve iklim bilgileri çıkarılmış; ikinci aşamada GPT-4.1 ile aday olaylar sınıflandırılmış ve analitik kullanılabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Tür, zaman ve coğrafya denetimleri sonucunda 3.769 olaydan oluşan analiz havuzu elde edilmiştir. Fındıkla ilişkili olaylar Space-Time Cube (STC), zaman animasyonları ve bağlantılı görünümlerle incelenmiş; metinlerden çıkarılan iklim ilişkilerinin meteorolojik değişken ve zaman ölçeği açısından değerlendirilmesinde ClimateGPT-7B'den yararlanılmış ve uygun ilişkiler ERA5 yeniden analiz verileriyle karşılaştırılmıştır. Bulgular, fındıkla ilişkili olayların 2017'de ağırlıklı olarak Artvin çevresinde raporlandığını, 2023 sonrasında Ordu, Samsun, Giresun ve Trabzon'da yoğunlaştığını ve 2025'te daha batıdaki illerde de bildirilmeye başladığını göstermiştir. Kronolojik olarak karşılaştırılabilir 12 ilde ilk belgelenmiş varlık ile ilk kamu müdahalesi arasındaki ortalama gecikme 1,83 yıl, medyan gecikme ise 2 yıl olarak hesaplanmıştır. ERA5 karşılaştırmaları, metinsel iklim anlatıları ile meteorolojik koşullar arasındaki tutarlılığın kullanılan yer, dönem, değişken ve mekânsal ölçek ölçütlerine duyarlı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, çok kaynaklı metinsel bilgilerin LLM, mekânsal-zamansal analiz ve meteorolojik yeniden analiz verileriyle bütünleştirilmesinin istilacı türlerin raporlanan yayılım örüntülerinin araştırılmasında kullanılabilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Büyük Dil Modelleri, Çok Kaynaklı Çevresel Bilgi Çıkarımı, İklim Değişikliği, Geovisual Analytics, Space-Time Cube.

ASSESSING THE RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATE CHANGE AND THE BROWN MARMORATED STINK BUG (HALYOMORPHA HALYS) IN TÜRKIYE THROUGH GEOVISUAL ANALYSIS OF DATA EXTRACTED FROM MULTI-SOURCE ENVIRONMENTAL TEXTS USING LARGE LANGUAGE MODELS

ABSTRACT

Information on the location, timing, damage, interventions, and environmental conditions associated with invasive species is often dispersed across multiple sources, including scientific publications, official documents, news reports, and online content. This study aimed to extract spatiotemporal events related to the brown marmorated stink bug (Halyomorpha halys) from multi-source texts in Türkiye, geolocate these events through geocoding and spatial matching, examine them using geovisual methods, and evaluate climate-related narratives against ERA5 reanalysis data. A corpus of 2,036 documents covering the 2015–2026 period, including national and local news reports, scientific publications, official institutional documents, and YouTube content, was compiled using Python-based tools. In the first stage, GPT-4.1 mini was used to extract independent events and associated information on time, location, crop, damage, intervention, spread, and climate. In the second stage, GPT-4.1 was used to classify candidate events and assess their analytical usability. Following species, temporal, and geographic validation, an analytical dataset comprising 3,769 events was obtained. Hazelnut-related events were examined using a Space-Time Cube (STC), temporal animations, and linked views. ClimateGPT-7B was used to assess the climate relationships extracted from the texts in terms of relevant meteorological variables and temporal scales, and suitable relationships were subsequently compared with ERA5 reanalysis data. The findings showed that hazelnut-related events were reported predominantly around Artvin in 2017, became concentrated in Ordu, Samsun, Giresun, and Trabzon after 2023, and began to be reported in provinces farther west in 2025. Across 12 provinces that allowed chronological comparison, the mean lag between the first documented presence and the first public intervention was 1.83 years, with a median lag of 2 years. Comparisons with ERA5 showed that the consistency between textual climate narratives and meteorological conditions was sensitive to the spatial location, time period, meteorological variable, and spatial scale used in the assessment. Overall, the results demonstrate that integrating multi-source textual information with LLM-based information extraction, spatiotemporal analysis, and meteorological reanalysis data provides a viable approach for investigating reported spread patterns of invasive species.

.

Keywords: Large Language Models, Multi-Source Environmental Information Extraction, Climate Change, Geovisual Analytics, Space-Time Cube.

1. GİRİŞ

İstilacı yabancı türler yalnızca ekosistemleri etkileyen biyolojik bir sorun değil aynı zamanda tarımsal üretimi, gıda güvenliğini ve ekonomileri de etkilemektedir. IPBES'in küresel değerlendirmesine göre biyolojik istilaların yıllık ekonomik maliyeti 2019 yılında 423 milyar ABD dolarını aşmıştır. Ayrıca istilacı yabancı türler, belgelenmiş bitki ve hayvan yok oluşlarının önemli nedenleri arasında gösterilmektedir (IPBES, 2023). Bu etkilerin artmasında uluslararası ticaret, ulaşım ve arazi kullanımındaki değişimlerin yanı sıra iklim koşullarındaki dönüşüm de rol oynamaktadır.

İklim değişikliği tüm istilacı türleri aynı yönde etkilememektedir. Örneğin sıcaklık artışı, kışların ılımanlaşması, yağış düzenindeki değişimler veya aşırı hava olayları bazı türlerin yeni bölgelere taşınmasını, bu bölgelerde yaşamını sürdürmesini ve yerleşik popülasyonlar oluşturmasını kolaylaştırabilir. İklim değişikliği ayrıca yayılım yollarını, istilacı türlerin ekosistem üzerindeki etkilerini ve kullanılan mücadele yöntemlerinin etkinliğini değiştirebilir (Hellmann vd., 2008). Türlerin iklim değişikliğine vereceği tepki; fizyolojik eşiklerine, yaşam döngülerine, konukçu varlığına ve yayılma yollarına bağlı olduğundan yalnızca sıcaklıktaki değişime bakılarak kesin bir yayılım sonucu çıkarılması güçtür (Walther vd., 2009).

Halyomorpha halys (kahverengi kokarca), geniş konukçu yelpazesi ve yeni alanlara hızla yayılabilmesi nedeniyle tarımsal üretim açısından önemli bir istilacı zararlıdır. Meyve, sebze, sert kabuklu meyve ve tarla bitkileri dâhil çok sayıda konukçu bitkide beslenmekte; ürünlerin verimini, kalitesini ve pazarlanabilirliğini azaltabilmektedir (Leskey ve Nielsen, 2018). Türkiye'de türle ilgili bildirimlerin önemli bir bölümü fındık üretiminin yoğun olduğu Karadeniz illerinden gelmektedir. Bununla birlikte kahverengi kokarcanın etkisi yalnızca fındıkla sınırlı değildir. Bu çalışmada bütün ürünlere ilişkin kayıtlar korunmuş; fındık, belge yoğunluğu ve bölgesel ekonomik önemi nedeniyle ayrıntılı konumsal-zamansal analizlerde odak ürün olarak ele alınmıştır. Kahverengi kokarcanın Türkiye'deki yayılımını uzun bir zaman aralığında ve standart alanlarla gösteren tek bir açık veri kaynağı bulunmamaktadır. Türün görüldüğü yerler, olay tarihleri, etkilenen ürünler ve yürütülen mücadele çalışmaları farklı kaynaklara dağılmış durumdadır. Bilimsel yayınlar daha çok türün biyolojisini ve gözlemsel bulguları açıklarken resmî kurum belgeleri izleme ve mücadele faaliyetleri hakkında bilgi vermektedir. Yerel ve ulusal haberlerde üreticilerin karşılaştığı zararlar ile belirli yerlerdeki gelişmeler öne çıkabilmektedir. Video içerikleri ise saha gözlemlerini, kurum açıklamalarını ve üretici deneyimlerini yazılı kaynaklarda bulunmayan ayrıntılarla aktarabilmektedir. Bu kaynakların her biri araştırma problemine farklı bir açıdan yaklaşmaktadır; ancak hiçbiri tek başına türün yayılımını, etkilerini ve müdahale sürecini bütünüyle temsil etmemektedir.

Çevresel konulara ilişkin çevrim içi içeriklerin farklı kaynaklardan toplanması ve ortak bir analitik ortamda değerlendirilmesi daha önce de ele alınmıştır. Media Watch on Climate Change sistemi, çevrim içi haber ve diğer web içeriklerinden elde edilen çevresel bilgileri haritalar, zaman görünümleri ve bağlantılı grafikler aracılığıyla araştırılabilir hâle getirmiştir (Scharl vd., 2013). Bu tür çalışmalar, web üzerindeki metinsel içeriğin çevresel araştırmalar için tamamlayıcı bir bilgi kaynağı olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık metinlerde geçen yer, zaman ve olay bilgilerinin doğrudan haritalanabilir kayıtlar olmadığı unutulmamalıdır. Aynı belgenin birden fazla olayı anlatabilmesi, yayın tarihi ile olay tarihinin farklı olması ve bir yer adının farklı idari düzeylerde kullanılabilmesi, metinsel kaynakların yapılandırılmasını gerekli kılmaktadır.

Bu gereksinim, büyük dil modellerine dayanan iki aşamalı bir bilgi çıkarımı iş akışıyla ele alınmıştır. Akademik yayınlar, resmî kurum belgeleri, ulusal ve yerel haberler ile YouTube video transkriptlerinden oluşan 2.036 belge ortak bir belge derleminde bir araya getirilmiştir. İlk aşamada GPT-4.1 mini modeliyle metinlerdeki aday olaylar belirlenmiş; olay yılı, olay yeri, ürün, olay türü, yayılım durumu, müdahale, müdahaleyi gerçekleştiren aktör, iklim anlatısı ve bu çıkarımları destekleyen kanıt cümleleri yapılandırılmıştır. İkinci aşamada GPT-4.1 modeli, aday kayıtları sınıflandırmak ve ilk çıkarımlardaki belirsizlikleri azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Daha sonra tür, zaman, coğrafya, olay niteliği ve kanıt ilişkisi bakımından ek denetimler uygulanmıştır. Model çıktıları doğrudan doğru kabul edilmemiş; kaynak metin ve kanıt cümlesiyle birlikte değerlendirilebilen aday kayıtlar olarak ele alınmıştır.

Bu süreç, çalışmanın GeoAI boyutunu oluşturmaktadır. GeoAI, yapay zekâ yöntemlerinin coğrafi bilgi ve mekânsal veri bilimiyle bütünleştirilerek mekânsal olarak açık modellerde, coğrafi bilgi keşfinde ve çeşitli coğrafi analiz görevlerinde kullanılmasını kapsayan bir araştırma alanıdır (Janowicz vd., 2020). Bu çalışmada büyük dil modeli, farklı kaynaklardaki metinlerde bildirilen olayları ve bunlara ilişkin bilgileri ortak alanlar altında yapılandırmak amacıyla kullanılmıştır. Çıkarılan yer adlarının idari birimlerle eşleştirilmesi, koordinatlandırılması ve olayların zaman bilgileriyle ilişkilendirilmesi, metinsel çıktıları konumsal-zamansal analizlerde kullanılabilir hâle getirmiştir. İş akışı; tür adı, eş anlamlılar, coğrafi kapsam ve analiz ayarlarının değiştirilebildiği form tabanlı bir arayüze dönüştürülmüştür. Böylece süreç, benzer kaynak yapısına sahip başka istilacı türlere de uyarlanabilir bir yapı kazanmıştır.

Metinlerden elde edilen kayıtların yalnızca harita üzerinden incelenmesi, farklı bilgi boyutları arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesini sınırlayabilir. Olayın yeri ve zamanı ile ilişkili ürün, müdahale durumu ve kaynak belge gibi bileşenlerin birlikte ele alınması, olay bağlamının daha bütüncül incelenmesini sağlar. Coğrafi görsel analitik

yaklaşımı, insanın analitik yetenekleri ile bilgisayarların veri işleme gücünü etkileşimli görsel arayüzlerde bir araya getirerek analitik akıl yürütmeyi ve karar vermeyi desteklemektedir (García-Chapeton vd., 2021).

Çalışmada olayların yıllar içerisindeki mekânsal dağılım ve değişimlerinin birlikte incelenebilmesi amacıyla Space–Time Cube (STC) yaklaşımından da yararlanılmıştır. STC'de yatay düzlem coğrafi alanı, dikey eksen ise zamanı temsil etmekte; böylece farklı konum ve zamanlara ait kayıtların aynı geometrik yapı içerisinde incelenmesine olanak sağlanmaktadır. STC'nin harita ve diğer görsel gösterimlerle birlikte kullanılması, mekânsal ve zamansal örüntülerin farklı görünümler üzerinden araştırılmasını desteklemektedir (Kveladze vd., 2015). Bu çalışmada STC, kahverengi kokarcanın biyolojik popülasyon yoğunluğunu doğrudan ölçen bir yapı olarak değil, kaynaklarda bildirilen olayların mekânsal ve zamansal dağılımını gösteren tamamlayıcı bir görsel analiz bileşeni olarak kullanılmıştır.

İklim değişikliğiyle ilişki ise ayrı bir kanıt katmanı olarak ele alınmıştır. Belgelerde sıcaklık artışı, ılıman kış koşulları, yağış, nem, don ve kuraklıkla ilişkilendirilen ifadeler GPT-4.1 mini ile çıkarılmıştır. Bu anlatılar, iklim alanına özgü literatürle eğitilen ClimateGPT-7B kullanılarak bilimsel bağlam bakımından ayrıca değerlendirilmiştir (Thulke vd., 2024). Ancak ClimateGPT'nin ürettiği açıklamalar gözlemsel iklim verisi olarak kabul edilmemiştir. Metinlerden çıkarılan iklim anlatıları, ERA5 meteorolojik yeniden analiz veri setinden elde edilen sıcaklık, yağış ve bağıl nem değişkenleriyle karşılaştırılmıştır. Yeniden analiz, istasyon, uydu, radar ve üst atmosfer gözlemlerinin sayısal hava tahmin modeliyle veri özümseme yöntemi kullanılarak birleştirilmesidir. ERA5 bu yöntemle geçmiş atmosfer koşullarını düzenli mekânsal ve zamansal aralıklarda tahmin eden küresel bir veri setidir (Hersbach vd., 2020). Bu karşılaştırmanın amacı, metinlerdeki iklim ifadelerini kesin biçimde doğrulamak değil; söz konusu anlatıların ilgili yer ve dönem için ERA5 tarafından temsil edilen meteorolojik koşullarla ne ölçüde uyumlu olduğunu incelemektir.

Bu çerçevede çalışmanın amacı, Türkiye'de kahverengi kokarcaya ilişkin farklı kaynaklarda bildirilen olayları yapılandırmak; bu olayların konumsal-zamansal dağılımını, yayılım bağlantılarını ve kamu müdahalelerini geovisual analytics ortamında araştırmak ve metinlerde H. halys ile ilişkilendirilen iklim anlatılarının ilgili yer ve dönemlerdeki meteorolojik koşullarla ne ölçüde örtüştüğünü ERA5 yeniden analiz verileri üzerinden değerlendirmektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma; çok kaynaklı belgelerin toplanması, metinlerden olay bilgilerinin çıkarılması, olayların mekânsal-zamansal olarak incelenmesi ve iklimle ilişkili anlatıların gözlemsel iklim verileriyle değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Bu bölümde veri toplama ve iki aşamalı büyük dil modeli iş akışı açıklanmakta; ardından Space-Time Cube, iklim ve bağlantılı görünümler yaklaşımları sunulmaktadır.

2.1. Veri Kaynakları ve Çalışma Kapsamı

Kahverengi kokarcaya ilişkin yer, zaman, zarar ve mücadele bilgileri tek bir veri kaynağında düzenli biçimde bulunmadığından ulusal ve yerel haberler, bilimsel yayınlar, resmî kurum belgeleri ve YouTube içerikleri birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, farklı çevrim içi çevresel kaynakların ortak bir analitik yapıya aktarılmasına dayanan önceki görsel analitik çalışmalarla uyumludur (Scharl vd., 2013).

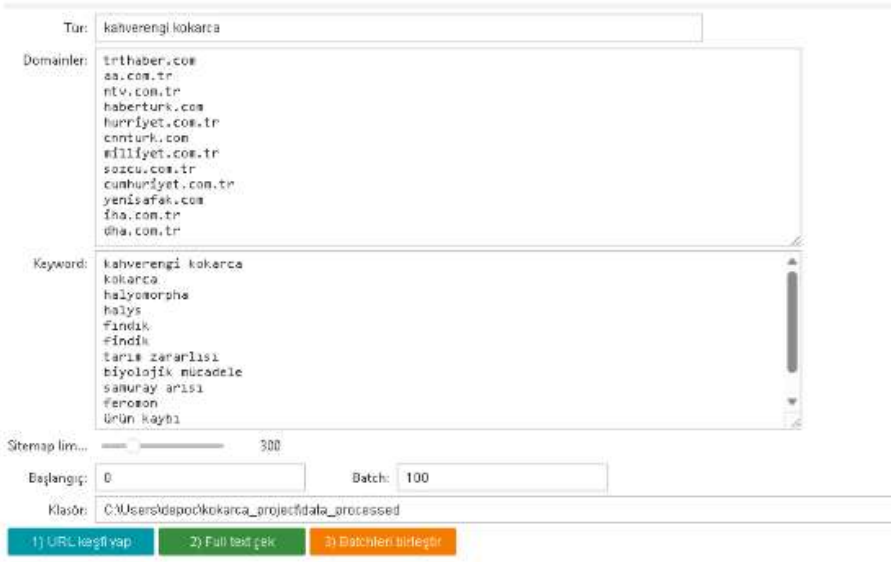
Veri toplama ve ön işleme sonunda 601 ulusal haber, 583 yerel haber, 302 YouTube içeriği, 294 bilimsel yayın ve 256 resmî kurum belgesi olmak üzere toplam 2.036 belge elde edilmiştir. Her belgeye kaynak türünü gösteren bir sınıf ve benzersiz bir global_id atanmış; başlık, yayın tarihi, yayıncı, özgün bağlantı ve metin içeriği ortak bir yapıda saklanmıştır.

Belgeler 2015-2026 döneminde yayımlanan içerikleri kapsamaktadır. Temel konumsal-zamansal olay incelemesinde 2017-2025 dönemi esas alınmıştır. Veri toplama sırasında ürün sınırlaması uygulanmamıştır. Bununla birlikte fındık, derlemde zarar ve mücadele bildirimleriyle en sık ilişkilendirilen ürün olmuş ve Karadeniz illerindeki belge yoğunluğu bu ürün için daha ayrıntılı bir değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Bu nedenle fındık kayıtları STC ve iklim analizlerinde odak alt küme olarak kullanılmış, diğer ürünler ana veri yapısında korunmuştur.

2.1.1. Form Tabanlı Otomatik Veri Toplama

Kaynakların erişim ve içerik yapıları farklı olduğundan veri toplama süreci, kaynak türlerine göre geliştirilen form tabanlı araçlarla yürütülmüştür. Python 3 ve Jupyter Notebook ortamında hazırlanan arayüzlerde kullanıcı; hedef türü, anahtar kelimeleri, taranacak kaynakları, tarih veya kayıt aralığını ve çıktı konumunu tanımlayabilmektedir. Web kaynaklarının keşfinde Serper API gibi arama servislerinden, haber ve web sayfalarındaki içeriklerin çıkarılmasında ise Newspaper3k ve BeautifulSoup kütüphanelerinden yararlanılmıştır. URL keşfi, tam metin elde etme, yinelenen kayıtların kontrolü, ara çıktıların kaydedilmesi ve farklı işlem dosyalarının birleştirilmesi otomatikleştirilmiştir. Bu yapı; yerel ve ulusal haberler, akademik yayınlar, resmî kurum kaynakları ve YouTube için kaynakların erişim özelliklerine göre uyarlanarak, sonraki bilgi çıkarımı ve konumsal-zamansal analizlerde kullanılabilecek ortak bir belge derleminin oluşturulmasını sağlamıştır.

.



Şekil 1. Ulusal haber verilerinin toplanmasında kullanılan form tabanlı arayüz örneği.

2.1.2. İki Aşamalı Büyük Dil Modeli Analizi

Tek bir belgede farklı yer ve zamanlara ait birden fazla olay bulunabildiği için analiz birimi belge yerine olay olarak belirlenmiştir. İlk aşamada GPT-4.1 mini (gpt-4.1-mini-2025-04-14) ile bağımsız olaylar ve bunlara bağlı zaman, konum, ürün, zarar, müdahale, aktör, yayılım ve iklim bilgileri çıkarılmıştır. İkinci aşamada GPT-4.1 (gpt-4.1-2025-04-14) aday kayıtları olay türü, gerçekleşme durumu ve analitik kullanılabilirlik bakımından değerlendirmiştir. Modellerin uzun bağlam ve yapılandırılmış talimat izleme yetenekleri bu tür belge işleme görevlerini desteklemektedir (OpenAI, 2025). Kaynakta bulunmayan bilgilerin üretilmemesi ve her olay için doğrudan kanıt cümlesinin korunması temel kural olarak uygulanmıştır.

İkinci model yeni olay üretmemiş; ilk aşamada belirlenen adayları birleştirme, ayırma, sınıflandırma veya kapsam dışı bırakma kararlarıyla denetlemiştir. İki analiz aşaması arasındaki bağlantı, global_id ve event_order alanlarıyla korunmuştur. global_id kaynak belgeyi birleşik derlem içinde benzersiz olarak tanımlarken event_order aynı belgeden çıkarılan olayların sırasını göstermektedir. Bu alanlar birlikte kullanılarak her aday olay, ikinci aşamadaki sınıflandırma ve doğrulama sonucuyla eşleştirilmiştir. Her iki aşamada yapılandırılan bilgi grupları ve uygulanan işlemler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İki aşamalı GPT analizinde yapılandırılan bilgiler

Bilgi grubu	**GPT-1 çıkarımı**	**GPT-2 değerlendirmesi**
Olay	Bağımsız olay, özet ve ham nitelik	Olay türü ve gerçekleşme durumu
Zaman	Tarih, yıl, dönem ve göreli ifade	Standart tarih, hassasiyet ve kullanılabilirlik
Konum	İl, ilçe, yerleşim ve özgün yer ifadesi	İdari düzey, konum rolü ve mekânsal uygunluk
Ürün ve zarar	Etkilenen ürün ve zarar ifadeleri	Gerçekleşmiş zarar ile olasılığın ayrılması
Müdahale ve aktör	Mücadele yöntemi, işlem ve kurum	Uygulama, plan ve önerinin ayrılması
Yayılım	Başlangıç, hedef ve yeni görülen yer	Yayılım kanıtı ve yönünün değerlendirilmesi
İklim ve çevre	Sıcaklık, ılıman kış, yağış, nem, don ve kuraklık	İlişkinin yönü ve kanıt düzeyi
Kanıt ve güven	Doğrudan kaynak cümlesi ve güven	Kararın denetlenmesi ve kaynak belgeye dönüş

Birinci GPT analizi 2.036 belgenin tamamında yürütülmüş ve 4.757 aday olay belirlenmiştir. Adayların tamamı ikinci modelde sınıflandırılmış, 3.786 olay çalışma kapsamında ilgili bulunmuştur. Tür, zaman ve coğrafya denetimlerinin ardından 3.769 olaydan oluşan doğrulanmış analiz havuzu elde edilmiştir. Sayılardaki azalma teknik kayıt kaybını değil, kapsam dışındaki veya analiz koşullarını karşılamayan olayların ayrılmasını göstermektedir. İki aşamalı analiz boyunca belge ve olay sayılarında gerçekleşen değişim Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. İki aşamalı GPT analizinde kayıt sayıları

İşlem düzeyi	Sayı	Açıklama
Analize giren belgeler	2.036	Beş kaynak türünden oluşturulan belge derlemi
GPT-1 aday olayları	4.757	Metinlerden çıkarılan bütün aday olaylar
GPT-2'de sınıflandırılan	4.757	Kimlikleri korunarak değerlendirilen adaylar
İlgili olay alt kümesi	3.786	Çalışma kapsamında ilgili bulunan olaylar
Doğrulanmış olay havuzu	3.769	Tür, zaman ve coğrafya denetimi sonrası kayıtlar

2.1.3. Türden Bağımsız GPT Otomasyonu ve Doğrulama

GPT iş akışı, kod hücrelerini doğrudan değiştirme gereksinimini azaltmak amacıyla form tabanlı bir arayüze dönüştürülmüştür. Bilimsel ad, yaygın adlar, eş anlamlılar, hedef coğrafya, analiz dili ve kullanılacak modeller form üzerinden belirlenebilmektedir. GPT-1, GPT-2, tür doğrulama ve Event/Fact denetimi için kullanılan istemler kullanıcı tarafından düzenlenebilmekte veya ek talimatlarla genişletilebilmektedir. Şekil 2'de gösterilen arayüz; dosya ve API kontrolü, pilot uygulama, iki aşamalı GPT analizi, tür–zaman–konum doğrulaması, olay–olgusal kayıt tutarlılık denetimi ve nihai veri tabanının oluşturulması adımlarını tek bir iş akışında birleştirmektedir. Ara sonuçların kaydedilmesi, işlemin kesinti sonrasında kaldığı yerden sürdürülmesine de olanak vermektedir.



Şekil 2. İki aşamalı GPT analiz otomasyonunun form tabanlı arayüzü: (a) proje, hedef tür ve model ayarları; (b) GPT-1, GPT-2, tür doğrulama ve Event/Fact denetimi için kullanıcı tarafından düzenlenebilen istemler; (c) pilot uygulamadan nihai veri tabanının oluşturulmasına uzanan üretim hattı.

Formda hedef tür bilgilerinin değiştirilebilmesi, iş akışının başka istilacı türlere uyarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte tür adları, eş anlamlılar, alana özgü terimler, istemler ve sınıflandırma kuralları her yeni uygulamadan önce araştırmacı tarafından gözden geçirilmelidir. Form tabanlı otomasyon, veri işleme adımlarının aynı düzen içinde tekrarlanmasını kolaylaştırmakta; ancak uzman değerlendirmesi ve bilimsel doğrulama gereksinimini ortadan kaldırmamaktadır.

2.2. Space-Time Cube ile Mekânsal-Zamansal Analiz

Çalışmanın kavramsal çerçevesinde açıklanan Space-Time Cube (STC) yaklaşımı, çok kaynaklı metinlerden çıkarılan kahverengi kokarca (KK) olaylarının mekânsal ve zamansal değişimini birlikte incelemek amacıyla uygulanmıştır. STC yapısında fındıkla ilişkili ve kalite kontrolünden geçen olay kayıtları kullanılmış; her olayın yıl bilgisi ile il veya ilçe düzeyindeki konum bilgisinin analize uygunluğu denetlenmiştir. Aynı coğrafi birim ve yıldaki olaylar aynı mekân-zaman hücresinde toplulaştırılarak 2017– 2026 dönemindeki olay dağılımının izlenebileceği üç boyutlu bir yapı oluşturulmuştur.

Her mekân-zaman hücresinin değeri, ilgili coğrafi birim ve yılda STC'ye dâhil edilen olay kayıtlarının sayısı olarak hesaplanmıştır. Bu değer, türün biyolojik popülasyon büyüklüğünü veya sahadaki birey yoğunluğunu değil, kaynaklarda belgelenen olay sayısını temsil etmektedir. Kayıt bulunmayan hücreler ise türün yokluğu olarak değil, ilgili yer ve yıl için STC'ye dâhil edilebilir bir olay kaydının bulunmaması olarak tanımlanmıştır.

Toplam olay sayısının farklı nitelikteki bilgileri tek bir değerde birleştirmesini önlemek ve her mekân-zaman hücresinin bileşimini incelemek amacıyla il düzeyindeki STC tematik katmanlara ayrılmıştır. Desteklenmiş varlık katmanı, kaynak metinde türün belirli bir yer ve zamanda bulunduğunu destekleyen olayları kapsamaktadır. Bunun daha sınırlı bir alt kümesi olan doğrudan varlık gözlemi katmanı, türün görüldüğünün, bulunduğunun, yakalandığının veya tespit edildiğinin açıkça bildirildiği olayları temsil etmektedir. Zarar katmanında fındıkla ilişkili zarar bildirimleri; yayılım katmanında türün yeni alanlara ulaşması veya coğrafi dağılımının genişlemesiyle ilişkilendirilen olaylar; müdahale katmanında mücadele ve yönetim faaliyetleri; iklim/çevre katmanında ise olaylarla

ilişkilendirilen iklimsel ve çevresel ifadeler ele alınmıştır. Böylece her hücrede belgelenen olayların bilgi türleri de incelenebilmiştir. Katmanlar ve analitik işlevleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

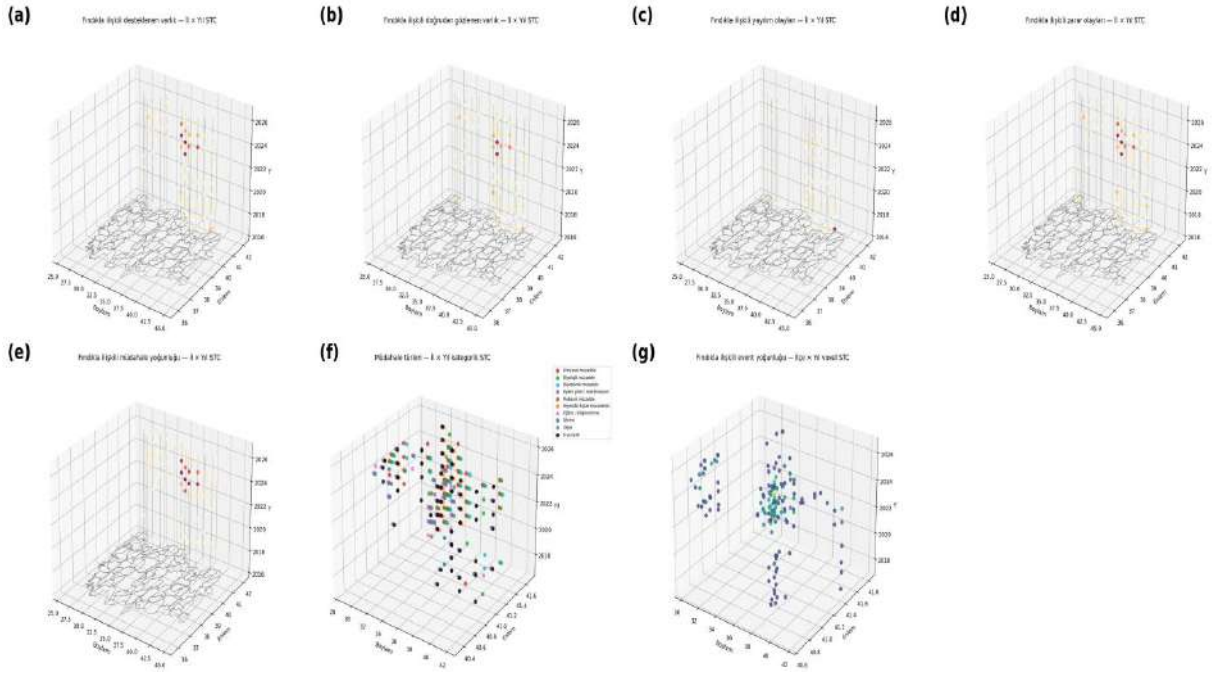
Tablo 3. STC katmanları ve analitik işlevleri

Katman	**Analitik işlev**
Desteklenen varlık	Kanıtla desteklenen kayıtların il-yıl dağılımı
Doğrudan gözlenen varlık	Doğrudan gözlem kanıtı taşıyan kayıtların il-yıl dağılımı
Yayılım	Yeni alana genişleme olarak sınıflanan olaylar
Zarar	Fındık zararıyla ilişkilendirilen olaylar
Müdahale yoğunluğu ve türü	Mücadele olaylarının yoğunluğu ve yöntem çeşitliliği
İlçe olay STC	İl örüntüsünün ADM2 ilçe sınırlarında ayrıntılandırılması

Tablo 3'te tanımlanan olay katmanlarının mekânsal ve zamansal dağılımlarını birlikte incelemek amacıyla il × yıl düzeyinde ayrı STC görünümleri oluşturulmuştur. Şekil 3'te desteklenmiş varlık (a), doğrudan varlık gözlemi (b), yayılım (c), zarar (d) ve müdahale yoğunluğu (e) gösterilmiş; müdahale kayıtları ayrıca mücadele türlerine göre kategorik olarak görselleştirilmiştir (f). İl düzeyindeki gösterimlere ek olarak, olayların daha ayrıntılı mekânsal çözünürlükte incelenebilmesi amacıyla ilçe × yıl düzeyinde voxel tabanlı STC oluşturulmuştur (g).

İlçe düzeyindeki STC'nin oluşturulmasında olay kayıtlarında yer alan ilçe adları Türkiye ADM2 sınır verisiyle eşleştirilmiştir. Yazım ve Türkçe karakter farklılıkları denetlenmiş, aynı ilçeyi ifade eden farklı gösterimler ADM2 kodları kullanılarak tek bir idari birim altında birleştirilmiştir. Bu işlemin ardından ilçe düzeyindeki STC 68 farklı ADM2 ilçesi ve 2017–2026 yılları temel alınarak oluşturulmuştur.

Şekil 3. Fındıkla ilişkili olayların STC görünümleri: (a) desteklenen varlık, (b) doğrudan gözlenen varlık, (c) yayılım, (d) zarar, (e) müdahale yoğunluğu, (f) müdahale türleri ve (g) ilçe düzeyinde olay yoğunluğu.



2.3. İstilacı Türlerin Yayılımında İklim Boyutu

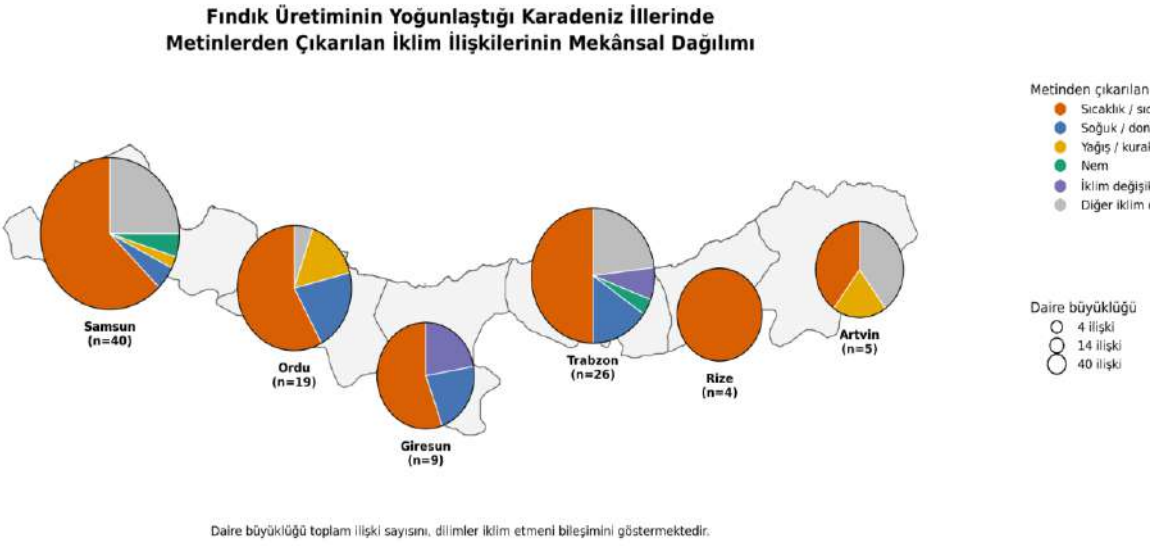
İklim koşulları istilacı türlerin yerleşmesini, gelişmesini ve yayılmasını etkileyebilmekte; bu etkilerin yönü ve büyüklüğü türün biyolojisine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişebilmektedir (Hellmann vd., 2008). H. halys için de iklim değişikliğinin potansiyel dağılım ve bolluk üzerindeki olası etkileri daha önce değerlendirilmiş ve özellikle sıcaklık koşullarındaki değişimlerin türün gelecekteki dağılımı açısından önem taşıyabileceği gösterilmiştir (Kistner, 2017). Bununla birlikte iklimsel uygunluk, gerçekleşmiş yayılımla aynı anlama gelmemekte; insan aracılı taşınma, konukçu varlığı ve diğer çevresel etmenler de gözlenen dağılımı etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada iklim değişikliğinin H. halys üzerindeki uzun dönemli etkisi doğrudan modellenmemiştir. Bunun yerine, kaynak metinlerde H. halys ile ilişkilendirilen iklim anlatılarının ilgili yer ve dönemlerdeki meteorolojik koşullarla uyumu ERA5 yeniden analiz verileri kullanılarak incelenmiştir. Bu nedenle ERA5 karşılaştırmaları iklim

değişikliğine ilişkin nedensel kanıt olarak değil, metinsel iklim anlatılarının meteorolojik bağlamını değerlendiren tamamlayıcı bir analiz olarak ele alınmıştır.

2.3.1. İklim Kanıtlarının Ayrıştırılması

Çalışmada iklim bilgisi iki farklı kanıt düzeyinde ele alınmıştır. İlk düzey, haberler, resmî açıklamalar ve bilimsel yayınlarda H. halys ile ilişkilendirilen sıcaklık, ılıman kış, soğuk, don, yağış, nem ve kuraklık gibi metinsel iklim anlatılarından oluşmaktadır. İkinci düzeyde, bu anlatıların ilgili yer ve dönemdeki meteorolojik koşullarla ne ölçüde örtüştüğünü değerlendirmek amacıyla ERA5 yeniden analiz verileri kullanılmıştır (Hersbach vd., 2020). Metinlerden çıkarılan iklim ilişkileri ile ERA5 tarafından temsil edilen meteorolojik koşullar farklı kanıt türleri olarak ayrı tutulmuş ve karşılaştırma nedensellik göstergesi olarak yorumlanmamıştır. Fındık üretiminin yoğunlaştığı Artvin, Rize, Trabzon, Giresun, Ordu ve Samsun illerinde metinlerden çıkarılan iklim ilişkilerinin mekânsal dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Fındık üretiminin yoğunlaştığı Karadeniz illerinde metinlerden çıkarılan iklim ilişkilerinin mekânsal dağılımı. Daire büyüklüğü toplam ilişki sayısını, dilimler iklim etmeni bileşimini göstermektedir.

Haritadaki dairelerin büyüklüğü ilde belirlenen toplam iklim ilişkisi sayısını, daire dilimleri ise sıcaklık/sıcak koşullar, soğuk/don, yağış/kuraklık, nem, iklim değişikliği ve diğer iklim etmenlerinin dağılımını göstermektedir. Bu gösterim iklim etkisinin şiddetini değil, kaynak metinlerde bildirilen iklim ilişkilerinin mekânsal yoğunluğunu ve bileşimini temsil etmektedir.

2.3.2. Büyük Dil Modeli ve İklim Değerlendirmesi

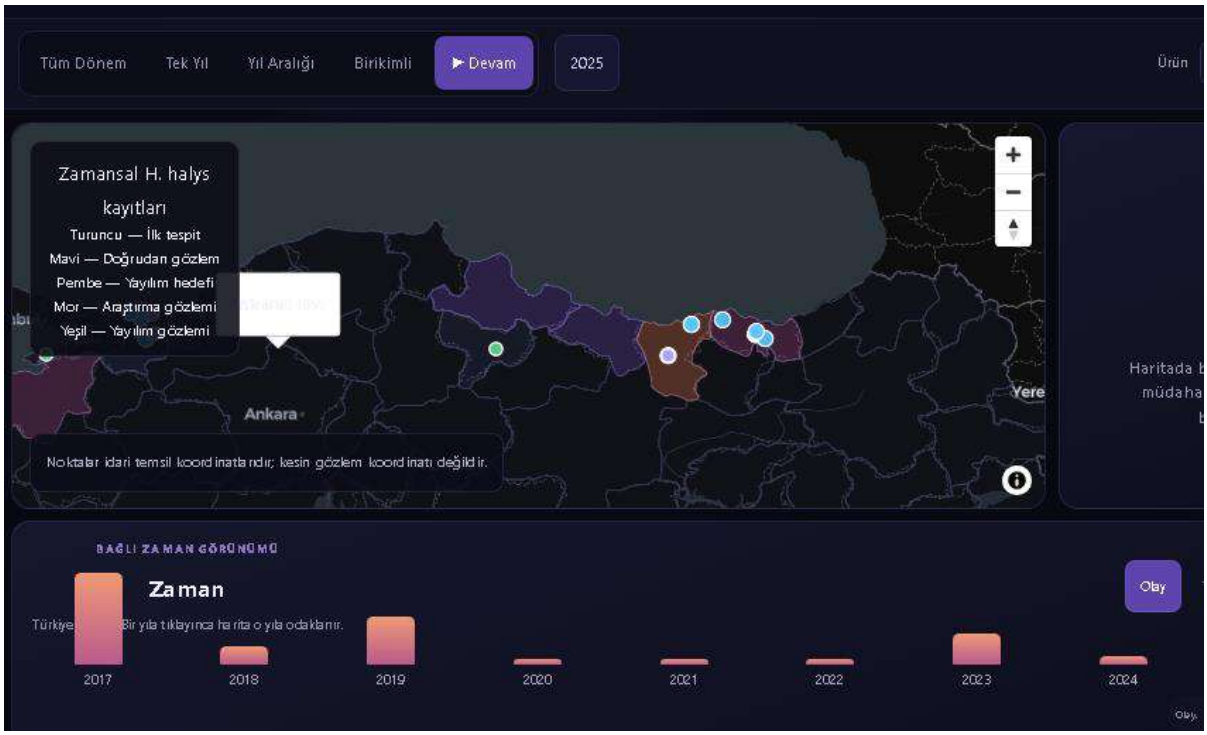
İki aşamalı GPT iş akışında metinlerdeki iklim ifadeleri olayla birlikte çıkarılmış; iklim faktörü, bildirilen etki, yer, zaman, mevsim ve kanıt cümlesi yapılandırılmıştır. ClimateGPT-7B ise bu ilişkilerin doğruluğunu belirlemek için değil, metinde geçen iklim ifadesinin hangi meteorolojik değişken ve zaman ölçeğiyle değerlendirilmesi gerektiğini belirlemek amacıyla RunPod bulut GPU ortamında çalıştırılmıştır (Thulke vd., 2024). Örneğin "ılıman kış–kışlama sonrası çıkış" ilişkisi için yıllık sıcaklık yerine ilgili kış döneminin sıcaklığının değerlendirilmesi gerektiği dikkate alınmıştır. Benzer şekilde don gibi kısa süreli olayların mevsimsel ortalamalarla doğrudan değerlendirilemeyeceği, yerel nem ifadelerinde bölgesel verilerin sınırlı kalabileceği ve tek bir yıldaki meteorolojik sapmanın iklim değişikliğinin kanıtı olarak yorumlanamayacağı gözetilmiştir. ClimateGPT çıktıları meteorolojik gözlem veya biyolojik doğrulama olarak kullanılmamıştır. Bu değerlendirme sonrasında yer, zaman ve değişken açısından uygun ilişkiler ERA5 sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileriyle karşılaştırılmıştır.

2.4. Bağlantılı Görünümler Yaklaşımının Oluşturulması

Çok kaynaklı metinlerden çıkarılan olayların mekânsal, zamansal ve tematik boyutlarını birlikte incelemek amacıyla bağlantılı görünümlere dayalı bir coğrafi görsel analitik arayüz geliştirilmiştir. Harita, zaman grafiği, Space-Time Cube (STC), iklim, müdahale ve belge görünümleri ortak filtre durumu üzerinden koordine edilmiştir. İl, yıl, yıl aralığı ve ürün seçimleri ilgili görünümlere yansıtılarak genel örüntülerden olaylara ve kaynak kanıtlarına geçiş desteklenmiştir.

Şekil 5'te harita ve zaman görünümünün bağlantılı kullanımı gösterilmektedir. Haritada KK kayıtları olay rollerine göre ayrıştırılırken zaman görünümü, kayıtların yıllara göre dağılımını sunmaktadır. Tek yıl, yıl aralığı, birikimli gösterim ve animasyon seçenekleri zamansal değişimin etkileşimli olarak incelenmesini sağlamıştır. Arayüz React/TypeScript, MapLibre ve Deck.gl; grafikler ECharts ile geliştirilmiş, ortak durum Zustand ve veri erişimi

FastAPI ile yönetilmiştir. Bağlantılı görünümler örüntülerin birlikte keşfedilmesini desteklemekte, ancak tek başına nedensel ilişki göstermemektedir.



Şekil 5. Kahverengi Kokarca kayıtlarının bağlantılı harita ve zaman görünümünde etkileşimli gösterimi.

2.5. Müdahale Analizi

Kamu müdahalelerinin zamanlamasını değerlendirmek amacıyla, il düzeyinde ilk belgelenmiş varlık yılı ile ilk kamu müdahalesi yılı eşleştirilmiş ve kronolojik olarak karşılaştırılabilir kayıtlar için iki tarih arasındaki yıl farkı hesaplanmıştır. Müdahale kaydının veri kümesindeki ilk uygun varlık kaydından daha erken olduğu iller gecikme hesabına dâhil edilmeyerek ayrı bir kronoloji sınıfında değerlendirilmiştir.

3. SONUÇLAR

Fındıkla ilişkili *KK* olaylarının STC sonuçları, çalışma döneminde hem olayların coğrafi dağılımının hem de kayıt yoğunluğunun değiştiğini göstermiştir (Şekil 3). İl düzeyinde 2017'de kayıtlar ağırlıklı olarak Artvin ve çevresinde belirginleşirken, 2023'ten itibaren Ordu, Samsun, Giresun ve Trabzon'da yoğunlaşan bir örüntü ortaya çıkmıştır. Toplam olay sayısı 2023'te 159'a, 2024'te 290'a ulaşmış; 2024 yılında Ordu ve Samsun'da 68'er, Giresun'da 62 ve Trabzon'da 54 olay kaydedilmiştir. 2025'te bu yoğunlaşma devam ederken Sakarya, Düzce ve Kocaeli'deki kayıtlar olayların daha batıdaki alanlarda da bildirildiğini göstermiştir. Tematik STC'ler bu genel dağılımın farklı olay türlerinden oluştuğunu ortaya koymuştur. Desteklenmiş varlık kayıtları doğrudan gözlem kayıtlarından daha geniş bir mekânsal-zamansal dağılım gösterirken, yayılım olayları toplam olay dağılımına göre daha seyrek bir yapı sergilemiştir. Zarar bildirimleri özellikle Orta ve Doğu Karadeniz'deki yoğun olay alanlarında belirginleşmiş; müdahale STC'si ise mücadele faaliyetlerinin zaman içerisindeki dağılımını ortaya koymuştur. Müdahalelerin ayrıca türlerine göre gösterilmesi, biyolojik ve kimyasal mücadele, biyosidal uygulamalar, izleme ve eğitim/bilgilendirme gibi farklı uygulamaların yer ve zaman bakımından birlikte incelenmesini sağlamıştır.

İlçe düzeyindeki voxel STC, il düzeyinde görülen örüntünün il sınırları içerisinde eşit dağılmadığını daha ayrıntılı olarak göstermiştir. Analize dâhil edilen 68 ilçede 2017–2026 dönemi için oluşan 680 olası ilçe-yıl hücresinin 143'ünde en az bir olay belirlenmiş ve bu hücrelerde toplam 383 olay kaydı yer almıştır. En yüksek ilçe-yıl değeri 2024'te Samsun-Çarşamba'da 26 olay olarak belirlenmiş; bunu 2023'te Ordu-Fatsa (16), 2023'te Samsun-Çarşamba (13) ve 2024'te Samsun-Terme (13) izlemiştir. Ordu'da Altınordu, Fatsa, Perşembe, Ünye ve Çatalpınar; Samsun'da Çarşamba, Terme, Salıpazarı ve Tekkeköy ile Giresun'da Keşap ve Görele gibi ilçelerde farklı yıllarda tekrarlanan kayıtlar, il düzeyindeki yoğunlaşmanın belirli ilçelerde daha belirgin olduğunu göstermiştir. İl ve ilçe STC sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, erken dönemde Doğu Karadeniz'de belirginleşen kayıtların 2023–2025 döneminde Orta ve Doğu Karadeniz'de yoğunlaştığı ve aynı zamanda daha batıdaki alanlarda da görülmeye başladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte STC'deki olay sayıları biyolojik popülasyon veya birey yoğunluğunu değil, incelenen kaynaklarda yer ve zamanla ilişkilendirilebilen olayların kayıt yoğunluğunu temsil etmektedir; ayrıca 2026 yılı tamamlanmamış olduğundan bu yıla ait değerler önceki tamamlanmış yıllarla doğrudan karşılaştırılmamıştır.

Metinlerdeki iklim ilişkileri çoğunlukla sıcaklık, sıcak koşullar ve kışlama davranışı üzerinden kurulmuştur. İfadeler özellikle 2024 ve 2025 yıllarında yoğunlaşmış; en fazla ilişki Samsun, Trabzon ve Ordu için belirlenmiştir. ERA5 yeniden analiz verilerine göre 2024 kışında incelenen Karadeniz illerindeki sıcaklık anomalileri yaklaşık +1,93 ile +2,53 °C arasında değişirken, 2025'te değerler çoğunlukla negatife dönmüştür. Bu bulgular, metinlerde bildirilen sıcaklık anlatılarının ilgili yıl ve mevsimin meteorolojik koşullarıyla birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır.

Metinsel anlatılar ile ERA5 verileri arasındaki ilişki iki düzeyde incelenmiştir. İlk yönsel değerlendirmede, metinde bildirilen iklim koşulunun yönü ile ERA5'te gözlenen meteorolojik değişimin yönü karşılaştırılmış ve en yüksek meteorolojik tutarlılık oranları Rize (%32,3) ve Giresun'da (%29,9) belirlenmiştir. Nihai değerlendirmede ise yer, dönem, meteorolojik değişken ve mekânsal ölçek açısından daha seçici karşılaştırılabilirlik ölçütleri uygulanmıştır. ERA5'e bağlanan 71 ilişkinin 48'inde belirgin meteorolojik sapma görülmemiş, 12 ilişki doğrudan sınanabilir bulunmamış ve 8 ilişki mekânsal ölçek nedeniyle sınırlı kalmıştır. Açık yönsel destek bir ilişkide, karşıt sinyal ise iki ilişkide belirlenmiştir. Bu farklılık, metinsel iklim anlatıları ile meteorolojik veriler arasındaki tutarlılığın kullanılan karşılaştırma ölçütlerine duyarlı olduğunu göstermiştir.

ClimateGPT değerlendirmesi bu farklılığın yorumlanmasında bilimsel bir çerçeve sağlamıştır. Metinlerdeki ılıman kış, don, nem ve yağış gibi ifadelerin aynı meteorolojik değişken ve zaman ölçeğiyle değerlendirilemeyeceği görülmüştür. Örneğin ılıman kış anlatıları ilgili kış döneminin sıcaklık koşullarıyla değerlendirilirken, kısa süreli don olaylarının mevsimlik ortalama sıcaklıkla doğrudan temsil edilmesinin sınırlı olduğu dikkate alınmıştır. Bu nedenle metinsel iklim anlatıları doğru veya yanlış olarak sınıflandırılmamış; ERA5 ile hangi koşullarda karşılaştırılabilecekleri belirlenmiştir. ERA5 sonuçları da iklim değişikliğinin KK üzerindeki etkisinin doğrudan kanıtı olarak değil, metinlerde bildirilen iklim koşullarının meteorolojik bağlamını değerlendiren tamamlayıcı kanıt olarak yorumlanmıştır.

Geliştirilen bağlantılı görünümler, KK olaylarının mekânsal ve zamansal değişiminin birlikte incelenmesini sağlamıştır. Zaman animasyonlu harita yıllık ve birikimli dağılımı gösterirken, STC analizinde 2017–2026 döneminde 13 ilde toplam 542 olay görselleştirilmiştir. Harita ve zaman üzerinden yapılan seçimlerin diğer görünümlere aktarılmasıyla olaylar iklim, müdahale ve kaynak belgelerle ilişkili olarak incelenebilmiştir.

İlk belgelenmiş varlık olayı ile ilk kamu müdahalesi arasındaki zamansal fark il düzeyinde ayrıca değerlendirilmiştir. Hem varlık hem de müdahale yılı belirlenebilen 16 ilin 12'sinde kronolojik olarak karşılaştırılabilir kayıt elde edilmiştir. Bu illerde ilk belgelenmiş varlık ile ilk kamu müdahalesi arasındaki ortalama gecikme 1,83 yıl, medyan gecikme ise 2 yıl olarak hesaplanmıştır. Üç ilde ilk müdahale, ilk belgelenmiş varlık kaydıyla aynı yıl gerçekleşirken, karşılaştırılabilir illerin %75'inde ilk müdahalenin iki yıl içinde kaydedildiği belirlenmiştir. En uzun gecikme Sakarya'da 6 yıl olarak hesaplanmıştır. Yalova, Amasya, Giresun ve Ordu'da ise müdahale kayıtları veri kümesindeki ilk uygun varlık kaydından daha erken tarihlendiğinden, bu iller gecikme hesabına dâhil edilmemiş ve ayrı bir kronoloji sınıfında değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

García-Chapeton, G. A., Toxopeus, A. G., Olivero, J., Ostermann, F. O., & de By, R. A. (2021). Combining favorability modeling with collaborative geo-visual analysis to improve agricultural pest management. *Transactions in GIS, 25*(2), 985–1008.

Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G. ve Dukes, J. S. (2008). Five potential consequences of climate change for invasive species. Conservation Biology, 22(3), 534-543.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. vd. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049.

IPBES. (2023). *Summary for policymakers of the thematic assessment report on invasive alien species and their control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (H. E. Roy, A. Pauchard, P. Stoett, & T. Renard Truong, Eds.). IPBES Secretariat.

Janowicz, K., Gao, S., McKenzie, G., Hu, Y., & Bhaduri, B. (2020). GeoAI: Spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. *International Journal of Geographical Information Science, 34*(4), 625–636.

Kistner, E. J. (2017). Climate change impacts on the potential distribution and abundance of the brown marmorated stink bug (Hemiptera: Pentatomidae) with special reference to North America and Europe. Environmental Entomology, 46(6), 1212-1224. https://doi.org/10.1093/ee/nvx157

Kveladze, I., Kraak, M.-J. ve van Elzakker, C. P. J. M. (2015). The Space-Time Cube as part of a GeoVisual analytics environment to support the understanding of movement data. International Journal of Geographical Information Science, 29(11), 2001-2016.

Leskey, T. C., & Nielsen, A. L. (2018). Impact of the invasive brown marmorated stink bug in North America and Europe: History, biology, ecology, and management. *Annual Review of Entomology, 63*, 599–618.

OpenAI. (2025). Introducing GPT-4.1 in the API. https://openai.com/index/gpt-4-1/

Scharl, A., Hubmann-Haidvogel, A., Weichselbraun, A., Lang, H.-P. ve Sabou, M. (2013). Media Watch on Climate Change: Visual analytics for aggregating and managing environmental knowledge from online sources. 46th Hawaii International Conference on System Sciences, 955-964.

Thulke, D., Gao, Y., Pelser, P., Brune, R., Jalota, R., Fok, F. vd. (2024). ClimateGPT: Towards AI synthesizing interdisciplinary research on climate change.

Walther, G.-R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pyšek, P., Kühn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukát, Z., Bugmann, H., Czúcz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarošík, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M.,

Nentwig, W., … Settele, J. (2009). Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution, 24*(12), 686–693. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.008

AÇIK KAYNAKLI 3B WEBCBS MİMARİSİ İLE AKILLI KAMPÜS DİJİTAL İKİZİNİN MODELLENMESİ: İTÜ-AYAZAĞA ÖRNEĞİ

Serdar SAKALLI[1], Tahsin YOMRALIOĞLU[2]

1Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, sakalli20@itu.edu.tr
2Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, tahsin@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, üniversite kampüslerinin karmaşık üstyapı, altyapı ve idari bileşenlerini ortak bir mekânsal paydada buluşturmak amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü özelinde açık kaynaklı, servis odaklı ve bileşen tabanlı ikinci kuşak bir 3B WebCBS platform mimarisi geliştirilmiş ve kurumsal alan adı üzerinden erişime sunulmuştur. Canlı sensör entegrasyonuna dayalı otomatize ve çift yönlü bir veri akışını henüz barındırmayan sistem, tamamlanmış bir dijital ikiz iddiası taşımamakta; akıllı kampüs yönetimi için gerekli mekânsal ve anlamsal temeli kuran olgun bir dijital model niteliği taşımaktadır. Platformun veri altyapısında; önceki çalışmada üretilen mekânsal veritabanı ile pilot bina entegrasyon çıktıları hazır altlık olarak alınmış, genişleyen kampüs envanteriyle birlikte mekânsal veriler tematik katmanlar altında yeniden yapılandırılmıştır. Yeni mimaride, önceki modelin istemci ağırlıklı yapısı; rol tabanlı erişim denetimi ve istemci-sunucu arasında dengelenmiş analitik iş bölümü sağlayan servis odaklı bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu doğrultuda, veritabanı destekli veri sunumu ve uygulama servisleri kurgulanmış; mekânsal sorgu ve analitik iş yükü sunucu katmanına, etkileşimli görselleştirme süreçleri ise istemci katmanına aktarılmıştır. Bulut ortamındaki performans değerlendirmelerinde; ağ aktarım yükünün azaltıldığı, sorgu yanıt sürelerinin etkileşimli kullanım eşiklerini karşıladığı ve bellek kararlılığının korunduğu gözlenmiştir. Çalışma, dış ticari yazılımlara bağımlılığı en aza indirerek üniversiteler ve kamu kurumları için ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir açık kaynak referans mimari sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: 3B WebCBS, akıllı kampüs yönetimi, CesiumJS, dijital model, YBM-CBS entegrasyonu

ABSTRACT

MODELING OF SMART CAMPUS DIGITAL TWIN WITH OPEN-SOURCE 3D WEBGIS ARCHITECTURE: CASE STUDY OF ITU-AYAZAGA

In this study, an open source, service oriented, and component based second generation 3D WebGIS platform architecture was developed specifically for the Istanbul Technical University (ITU) Ayazağa Campus to unify the complex superstructure, infrastructure, and administrative components of university campuses under a common spatial baseline and was deployed for access via an institutional domain. Lacking an automated and bi-directional data flow based on live sensor integration, the system does not claim to be a fully realized digital twin; rather, it constitutes a mature digital model that establishes the necessary spatial and semantic foundation for smart campus management. In the data infrastructure of the platform, the spatial database and pilot building integration outputs from the previous study were utilized as baseline datasets, and the spatial data were restructured under thematic layers in parallel with the expanding campus inventory. In the new architecture, the client-heavy structure of the previous model was transformed into a service-oriented framework providing role-based access control (RBAC) and a balanced division of analytical workload between the client and server. To this end, spatial database services and application services were established, offloading the spatial query and analytical workload to the server layer while delegating interactive visualization processes to the client layer. Performance evaluations conducted in a cloud environment revealed that network transfer payload was reduced, query response times met interactive usability thresholds, and memory stability was preserved. By minimizing reliance on external proprietary software, the study presents a scalable and sustainable open-source reference architecture for universities and public institutions.

Keywords: 3D WebGIS, BIM-GIS integration, CesiumJS, digital model, smart campus management

1. GİRİŞ

Akıllı kampüs yaklaşımı; kent yönetimini daha stratejik, veriye dayalı ve sürdürülebilir bir zemine oturtmayı amaçlayan akıllı şehir anlayışının, planlama ve işletme sorumluluğunun tek bir çatı altında toplandığı üniversite kampüslerine uyarlanmış küçük ölçekli bir prototipidir. Yapı stoku, teknik altyapı şebekeleri, ulaşım ve otopark alanları ile açık ve yeşil alanlar gibi kentsel yönetimin başlıca konularını sınırları belirli ve görece küçük bir alanda bir arada barındıran bu kampüslerde; artan kullanım yoğunluğu, çeşitlenen hizmet talepleri ve sınırlı kurumsal kaynaklar, bileşenlerin birbirinden bağımsız planlanıp işletilmesini, dolayısıyla kampüs ölçeğinde stratejik karar almayı güçleştirmektedir (Valks vd., 2021). Bu koşullarda; fiziksel, dijital ve operasyonel bileşenlerin tek bir bütünleşik çerçevede ele alındığı, mekânsal veriler üzerinden yürütüldüğü ve karar süreçleri ile kullanıcı etkileşiminin desteklendiği veri odaklı bir yönetişim modeli, kampüsün planlama ve işletme kararlarını ortak bir bilgi zemininde buluşturmayı amaçlamaktadır (Min-Allah ve Alrashed, 2020; Sneesl vd., 2022). Sorumluluğun tek çatı altında

toplanması, veri bütünlüğünü kendiliğinden sağlamamaktadır. Bu veriler farklı disiplinlerin yöntemleriyle ve idari birimlerin kendi gereksinimleri doğrultusunda ayrı sistemlerde üretilmekte, aynı varlık her sistemde farklı biçimde tanımlandığından ortak bir yorum çerçevesi oluşmamakta, bu durum paydaşlar arasında bilgi asimetrisine yol açmaktadır (Meschini vd., 2022).

Bu payda üzerinde kurulan temsil, kampüsün görselleştirilmesinin ötesine geçip üzerinde işlem yapılabilen bir karar ortamına dönüştüğünde dijital ikiz niteliği kazanmaktadır. Söz konusu temsil, kampüsün fiziksel bileşenlerini konum ve geometrileriyle birlikte işlevsel ve yönetsel öznitelikleri üzerinden tanımlarken fiziksel gerçeklikle bağını, varlığa ilişkin verilerle zaman içinde güncellendiği ölçüde koruyabilmektedir (Jeddoub vd., 2023). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), ortak mekânsal paydayı kurarak kampüs bileşenlerine ait bilgileri standart veri katmanları hâlinde düzenlemekte ve katmanlar arasındaki ilişkileri çözümlenebilir kılmaktadır (Yomralıoğlu, 2000). Yapıya ilişkin bilginin tasarımdan işletmeye kadar tek bir paylaşılan model üzerinden yönetilmesini öngören Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) çıktılarının bina katmanıyla eşleştirilmesi, temsili yapı elemanı, kat ve iç mekân ölçeğinde derinleştirmektedir (Moretti vd., 2021; Meschini vd., 2022). Saha düzeyinde konumlandırılan algılama ve ölçüm birimlerinin ortak bir çerçevede birbirine bağlanmasına dayanan nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının aynı düzene dâhil edilmesi ise kampüsün güncel durumunu yansıtan veriyi bu temsile taşımaktadır (Valks vd., 2021).

Ancak bu güncelliğin sağlanması tek adımda tamamlanan bir geçiş değil, fiziksel varlık ile dijital karşılığı arasındaki veri akışının yönüne ve otomasyon derecesine göre farklılaşan kademeli bir olgunlaşma sürecidir (Kritzinger vd., 2018). Bu ölçüte göre temsiller; güncellemenin elle yapıldığı dijital model, fizikselden dijitale otomatik akışın kurulduğu dijital gölge ve akışın çift yönlü işlediği dijital ikiz olarak adlandırılmaktadır. Kampüs ölçeğinde otomatik veri akışının kesintisiz sağlanması, algılama ve iletişim altyapısının yalnızca kurulmasını değil işletilmesini de gerektirdiğinden, çoğu kampüste belirleyici olan teknolojinin erişilebilirliği değil kurumun bu sürekli yükü üstlenebilmesidir (Sneesl vd., 2022). Bu olgunluk sınıflandırması ile söz konusu işletme yükü birlikte değerlendirildiğinde, çalışmada geliştirilen sistem, otomatik ve çift yönlü veri akışını henüz içermediğinden tamamlanmış bir dijital ikiz iddiası taşımamaktadır. Ölçüme dayalı gözlem verisinin sonraki aşamalarda sisteme bağlanabilmesi için gerekli mekânsal ve anlamsal temelin kurulmasına odaklanan mevcut aşama, dolayısıyla dijital ikizin modellenmesi olarak ele alınmaktadır. Bu hazırlığın veri akışı boyutu ise standart uyumlu ve veri kökenini gözeten bir gözlem katmanı üzerinden ayrı bir çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

Kampüs ölçeğinde geliştirilen uygulamalar, birbirinden kullandıkları teknolojilerle değil, dijital temsile kazandırdıkları işlevlerle ayrışmaktadır. Gao vd. (2025) Lanzhou Jiaotong Üniversitesi kampüsünün tamamını kapsayan, gerçek görünüme dayalı üç boyutlu bir kampüs modeli üreterek bu modeli tarayıcı üzerinden çok kullanıcının erişimine açmış; Meschini vd. (2022) ise yapı bileşeni ölçeğinden kent içine dağılmış kampüs ölçeğine uzanan tek bir bilgi çerçevesi kurarak YBM ve CBS verisini varlık ile tesis yönetimi süreçlerine dayanak oluşturacak biçimde bütünleştirmiştir. Bu temsile zaman boyutunun eklenmesinde, Roda-Sanchez vd. (2024) ve Manokeaw vd. (2025) sensör ağlarından gelen veriyi açık veri kaynakları ve çözümleme modelleriyle birleştirerek enerji tüketimi ve mekân kullanımı gibi göstergeleri izlenebilir kılmış; Valks vd. (2021) ise dört örnek olay üzerinden kampüs yönetimindeki karar süreçlerini çözümleyerek IoT uygulamalarından gelen gerçek zamanlı verinin stratejik kararlara bağlanabilmesi için karşılanması gereken koşulları ortaya koymuştur. Bu uygulamalar, mekânsal temsilin anlamsal bilgi ve zamana bağlı gözlemle tek bir sistemde birleştirilebildiğini ve bu sistemlerin web tabanlı arayüzler üzerinden farklı kullanıcı gruplarına açılabildiğini göstermektedir. Bu sistemlerin sürdürülebilir biçimde işletilebilmesi, sundukları işlevlerin ötesinde ölçeklenebilirlik, erişim denetimi, bakım yükü ve maliyet gereksinimlerinin birlikte karşılanmasını gerektirmektedir (Sneesl vd., 2022).

Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) tarafından yürütülen "Akıllı Kampüs Tasarımı ve Uygulaması: İTÜ Modeli" (MDA-2024-45565) kodlu BAP–DAP Projesi kapsamında, mekânsal verilerin üretimi, çok katmanlı bir düzende yönetimi ve sorgulanması ile mekânsal analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla açık kaynaklı güncel teknolojiler temel alınarak oluşturulan ve CesiumJS aracılığıyla 3B WebCBS ortamında sunumu için geliştirilen önceki modelin veri altyapısı (Sakallı vd., 2025), genişleyen veri kapsamı ve işletilebilirlik gereksinimleri doğrultusunda bileşen tabanlı ve servis odaklı ikinci kuşak bir mimariyle yeniden yapılandırılmış, çok sayıda kullanıcıya hizmet verebilecek bir WebCBS platformuna dönüştürülmüş ve kurumsal alan adı üzerinden yayımlanmıştır. Yeni mimaride görselleştirme ve hesaplama yükünün istemci ile sunucu arasındaki dengesi, büyüyen veri hacmine karşın akıcı bir kullanıcı deneyimi sağlayacak biçimde yeniden kurulmuş, bağımsız prototip sayfaları üzerinde çalışan mekânsal analiz araçları tek bir panel altında birleştirilerek yenilenmiş, rol tabanlı erişim denetimi ise katman yönetimi, sorgu ve analiz düzeyinde devreye alınmıştır; bütün bu değişiklikler, dış ticari servislere olan bağımlılığı en aza indirecek biçimde açık kaynaklı teknolojiler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İşlev ve kullanıcı çeşitliliğiyle İTÜ Ayazağa Kampüsü, Türkiye'deki büyük ölçekli üniversite kampüsleri için temsili bir vaka oluşturmakta; açık kaynaklı teknolojiler üzerine kurulan sistem benzer ölçekteki kurumlar için referans mimari sunmayı hedeflemektedir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE MEKÂNSAL VERİ MİMARİSİ

Uygulamanın konumlandığı çalışma alanı, İstanbul'un Sarıyer ilçesinde yer alan ve yaklaşık 120 hektarlık bir alana yayılan İTÜ Ayazağa Kampüsü'dür. Kampüste; eğitim, araştırma, barınma, ofis, sosyal yaşam, spor ve yönetim işlevlerine ayrılmış yapı stoku, ulaşım ve otopark alanları, açık ve yeşil alanlar ile çok katmanlı teknik altyapı

şebekeleri yer almakta; bu bileşenler öğrenci, personel ve ziyaretçilerden oluşan kullanıcı gruplarınca birlikte kullanılmaktadır. Kampüsün iki ve üç boyutlu modellenmesinde kullanılan mekânsal altlık, önceki çalışma kapsamında İHA fotogrametrisiyle üretilen ortomozaik ile sayısal yükseklik modelinden (SYM) oluşmaktadır (Sakallı vd., 2025). Farklı dönemlerde inşa edilen yapı stokuna ve kademeli olarak genişleyen altyapı şebekelerine ait kayıtlar sorumlu idari birimlerce ayrı ayrı ve farklı biçimlerde tutulduğundan, bu kayıtların ortak bir yapıda toplanması kampüsün tek bir mekânsal temsil altında ele alınabilmesinin ön koşuludur.

2.1. Katman Envanteri ve Veritabanı Kurgusu

Önceki çalışmada farklı kaynaklardan elde edilen verilerin TUREF/TM30 (EPSG:5254) koordinat referans sisteminde 18 tematik katman altında düzenlendiği veritabanı (Sakallı vd., 2025), bu çalışmada genişleyen veri kapsamının oluşturduğu bakım yükünü azaltmak ve birlikte sorgulanabilirliği güçlendirmek amacıyla, her varlığın tek kayıtla temsil edildiği ve nitelik farklarının özniteliklerle taşındığı 14 katmanlı bir yapıya dönüştürülmüştür. Birleştirmenin ölçütü, her varlığın tek bir veritabanı kaydı ile temsil edilmesidir. Bu doğrultuda aynı türden kayıtlar tek katmanda toplanmış, aralarındaki nitelik farkları ayrı katmanlarla değil öznitelik değerleriyle taşınmıştır.

Katman sayısındaki bu azalmaya karşın, kampüs genelinde yürütülen veri toplama süreçleri envantere dört yeni katman kazandırarak veri kapsamını genişletmiş ve envanter 18 tematik katmana ulaşmıştır. Atık Yönetimi Birimi tarafından sağlanan 48 tehlikesiz atık toplama noktası; konum ve bölge bilgileriyle birlikte karma atık, geri dönüşüm ve cam konteynerlerinin sayıları üzerinden "Atık Toplama Noktası" katmanında tanımlanmıştır. İTÜ Sağlık, Kültür ve Spor Daire Başkanlığınca belirlenen 43 hayvan besleme noktası; kedi ve köpek besleme noktaları ile Veteriner Birimi takibindeki hayvanlara ayrılmış noktalar biçiminde sınıflandırılarak "Hayvan Besleme Noktası" katmanında sisteme eklenmiştir. Bunun yanı sıra kampüste faaliyet gösteren 26 kurumsal birimin kat, açık adres ve iletişim öznitelikleriyle "Merkez ve Müdürlükler" katmanında tanımlanması, kurumsal bilgi dağınıklığını önleyerek ilgili birimlerin mekânsal ve idari detaylarına tekil bir arayüzden erişim imkânı sunmaktadır. Ring durakları, otopark bariyerleri, yaya girişleri, bisiklet parkları ve şarj istasyonlarını kapsayan 86 kayıt ise yön, hat ve kapasite öznitelikleriyle "Ulaşım Noktası" katmanında sınıflandırılarak kampüs içi erişilebilirlik ve mobilite unsurlarının eşzamanlı değerlendirilebilmesi sağlanmıştır.

2.2. YBM-CBS Entegrasyonu ve Semantik Zenginleştirme

Ön çalışmada kampüsteki bir lojman binası üzerinde yürütülen, yapıya ait IFC 2x3 modelinin FME Workbench ile coğrafi olarak referanslandırılmasına ve TUCBS-Tapu ve Kadastro veri temasıyla uyumlu öznitelik alanlarının modele eklenmesine dayanan YBM–CBS pilot uygulaması, iç mekân ölçeğindeki bilgiyi taşıyan zenginleştirilmiş bir yapı modeli üretmiştir (Sakallı vd., 2025). Modelin öznitelik düzeyinde filtrelenebilmesi yapı elemanlarının geometri tanımlarının bulunmasına bağlı olduğundan, modelde tanımlı olduğu hâlde geometri taşımayan kavramsal varlıklara ait semantik bilgi, yapı elemanı kimlik bağları üzerinden kurulan ilişkilerle geometrik elemanlara aktarılmış ve kavramsal varlıklar dolaylı yoldan sorgulanabilir hâle gelmiştir. Yapı elemanından iç mekân ve kat bilgisine, oradan bağımsız bölüm ve mülkiyet hakkına uzanan üç düzeyde filtrelenebilir hâle gelen model, hukuki kayıtlar ile fiziksel yapı elemanları arasındaki ilişkiyi aynı ortamda izlenebilir kılarak 3B arazi yönetiminin dayandığı temsili yapı ölçeğinde kurmuştur (van Oosterom vd., 2020; Güler vd., 2022). Veri düzeyinde elde edilen ve gösterimi birinci kuşak arayüzde gerçekleştirilen kazanım, kampüs geneli yapı stokunun iç mekân bileşenlerini de kapsayacak biçimde modellenmesiyle birlikte, envanterle aynı ortamda işletilebilir hâle gelecek ve varlık yönetimine dayanak olacaktır.

3. AÇIK KAYNAKLI İKİNCİ KUŞAK WEBCBS MİMARİSİ

3.1. Bileşen Tabanlı Mimariye Geçiş

Veri kapsamındaki genişleme ve farklılaşan kullanım gereksinimleri nedeniyle, önceki modelin istemci ağırlıklı ve doğrudan veri erişimine dayanan yapısı, uygulama sorumluluklarının istemci, servis ve veritabanı arasında ayrıştırıldığı ikinci kuşak bir mimariye dönüştürülmüştür. Bu mimari evrim, içerik dağıtım ağı üzerinden yüklenen kütüphanelere dayalı yalın JavaScript prototipinden React ve TypeScript temelli bileşen yapısı ile ölçeklenebilir veri servislerini bir arada işleten güncel ikinci kuşak mimariye geçişle gerçekleşmiştir (**Çizelge 1**).

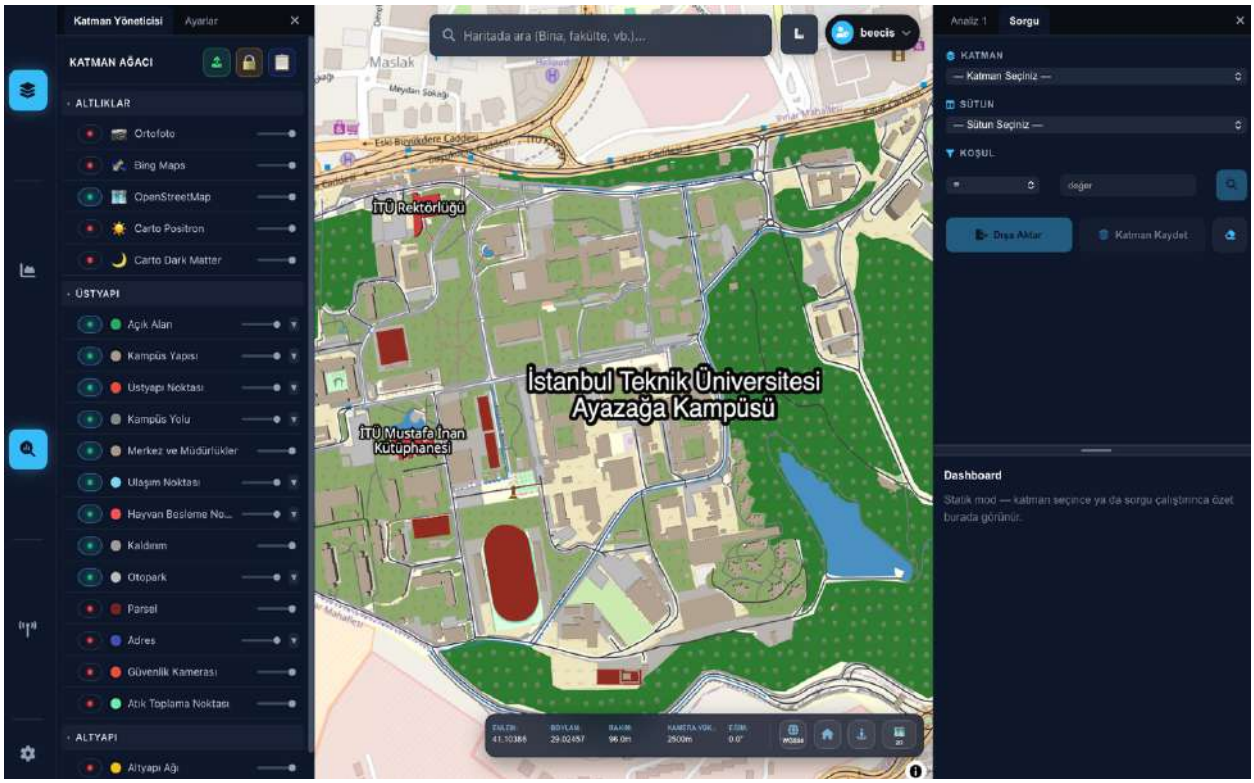
Bu yapı içinde React ve TypeScript tabanlı istemci katmanı, uygulama durumunu yöneterek MapLibre tabanlı 2B/2.5B ve CesiumJS tabanlı 3B görselleştirme seçeneklerini barındırmakta; Express tabanlı REST API kimlik doğrulama, yapılandırma, sorgu ve analiz hizmetlerini, pg_tileserv ise PostgreSQL/PostGIS veritabanındaki geometrilerin WebCBS arayüzüne özgü vektör karolar hâlinde sunulmasını üstlenmektedir. Birinci kuşak sürümünde yerel geliştirme ortamında çalışan sistem, bu çalışmada sunucu ve altyapı yönetimini bütünleşik olarak sağlayan bir hizmet olarak platform (PaaS) çözümü olan Railway'e taşınmış; uygulama servisleri ile PostgreSQL/PostGIS veritabanı canlı kullanım için bu ortamda yapılandırılarak sistem kurumsal alan adı aracılığıyla erişime açılmıştır. Railway'in GitHub deposuyla birlikte çalışacak biçimde yapılandırılması, kod güncellemelerinin elle müdahale gerektirmeden canlı sisteme aktarılmasını sağlarken dal bazlı dağıtım desteği, geliştirme sürümlerinin üretim ortamından bağımsız biçimde sınanmasına olanak tanımaktadır.

Çizelge 1. Birinci ve ikinci kuşak WebCBS mimarilerinin karşılaştırılması

Ölçüt	Birinci kuşak sistem (Sakallı vd., 2025)	İkinci kuşak sistem
Mimari ve bağımlılıklar	CDN üzerinden yüklenen JavaScript–CesiumJS bağımlılıkları; istemci ağırlıklı prototip	npm ile yönetilen React–TypeScript bileşenleri; Express–pg_tileserv–PostgreSQL/PostGIS iş bölümü
Veri aktarımı	Katman geometrileri ve özniteliklerinin REST API üzerinden katman bazında toplu olarak istemciye aktarılması	Katman geometrilerinin vektör karolarla, yapılandırma ve sorgu verilerinin ise REST API üzerinden istemciye aktarılması
Görselleştirme ve katman yönetimi	CesiumJS tabanlı 3B görünüm; kod içine gömülü katman ve semboloji tanımları	MapLibre tabanlı 2B/2.5B ana görünüm ve geliştirme aşamasındaki CesiumJS 3B görünümü; veritabanından yönetilen katman ve semboloji tanımları
Mekânsal analiz	İstemcide Turf.js tabanlı tampon bölge ve CesiumJS sahnesinde yürütülen görünürlük analizleri	Sunucuda PostGIS tabanlı tampon bölge ve örtüşme analizleri; MapLibre arayüzünde istemci tarafında yürütülen görünürlük analizleri
Erişim denetimi	Tek düzeyli kullanıcı erişimi	Genel, öğrenci ve yetkili rolleriyle denetlenen erişim
Dağıtım	Web ortamındaki araştırma prototipi	Sürüm denetimli canlı dağıtım ve kurumsal alan adı aracılığıyla erişim

3.2. Arayüz Güncellemeleri ve Çok Ölçekli Görselleştirme

İkinci kuşak sistemin birincil kullanım arayüzü, farklı donanım kapasiteleri ve bağlantı koşullarında kampüs verisine erişimi kolaylaştırmak, istemci tarafındaki işlem yükünü sınırlamak ve harita üzerindeki etkileşimin akıcılığını korumak amacıyla açık kaynaklı web haritalama kütüphanesi MapLibre GL temel alınarak geliştirilmiştir. Harita alanını kalıcı olarak daraltmadan araçlara ihtiyaç anında erişim sağlamak üzere benimsenen kenar çubuğu ve açılır panel düzeninde, katman yönetimi ve ayar panelleri ekranın solunda, sorgu ve analiz paneli sağında konumlandırılmış; kampüs genelinde arama ve veri filtreleme olanağı sunan çubuk üst merkezde, koordinat ve kamera bilgileri ile başlangıç görünümüne dönüş, Mapillary tabanlı sokak görünümü ve görüntüleme modu araçları ise alt şeritte bir araya getirilmiştir (**Şekil 1**).



Şekil 1. İTÜ Ayazağa Kampüsü WebCBS Platformu Arayüz Yerleşimi

Arayüzde sunulan mekânsal içeriğin ayrıntı düzeyi de aktarılacak veri hacmini azaltmaya yönelik genelleştirme yaklaşımı doğrultusunda görüntüleme ölçeğine göre değişmekte (Wallner vd., 2022); geometrik karmaşıklığı yüksek bina ve yol ağı katmanlarında uzak görünümde basitleştirilmiş özet geometriler, yakın görünümde ise ayrıntılı geometriler devreye alınarak performans ile görsel ayrıntı arasında denge kurulmaktadır. İkinci kuşak arayüzdeki CesiumJS tabanlı 3B görselleştirme bileşeni henüz güncelleme aşamasında olup sonraki aşamalarda ayrıntılı arazi ve altyapı verilerinin sunulması, birinci kuşak arayüzde gösterilen YBM–CBS pilot modelinin kampüs genelindeki yapı stokunu ve iç mekân bileşenlerini kapsayacak biçimde genişletilmesi ve bu içeriğin envanterle aynı ortamda işletilmesi planlanmaktadır. Mapillary tabanlı sokak görünümü aracı, kampüs genelindeki görüntü konumlarının harita üzerinden seçilmesine **(Şekil 2-a)**, görüntüler arasında dinamik geçiş yapılmasına ve seçilen görüntünün konum ile bakış yönünün uygulama arayüzünde eşzamanlı olarak görüntülenebilmesine olanak sağlamaktadır (**Şekil 2-b**).



Şekil 2. WebCBS arayüzündeki panoramik sokak görüntüsü işlevi. **a)** Sokak görüntülerinin kampüsteki mekânsal dağılımı; **b)** Arayüzün bakış yönünde eşzamanlı hareketi

3.3. Katman Yönetimi ve Görselleştirme Tercihleri

Arayüzde sunulan katmanların görünürlüğü ve panel sıralaması birinci kuşak sistemde kaynak kodu içinde tanımlanırken, ikinci kuşak sistemde bu tanımlar artan katman sayısı ve çok ölçekli gösterim gereksinimleri doğrultusunda veritabanından yönetilir hâle getirilmiştir. Katman ağacı, katman ve öznitelik düzeyindeki yapılandırma kayıtlarının servisler aracılığıyla istemciye aktarılmasıyla altlık, üstyapı ve altyapı grupları altında dinamik olarak oluşturulmakta; belirli bir öznitelik değeri için semboloji tanımı bulunmadığında ise katman düzeyindeki varsayılan gösterim tercihleri devreye alınmaktadır. Yapılandırma tanımlarının uygulama kodundan ayrıştırılması, yeni katmanların ve gösterim tercihlerinin istemci koduna müdahale edilmeksizin tanımlanıp güncellenmesini sağlayarak sistemin bakımını ve değişen kullanım gereksinimlerine uyarlanmasını kolaylaştırmaktadır.

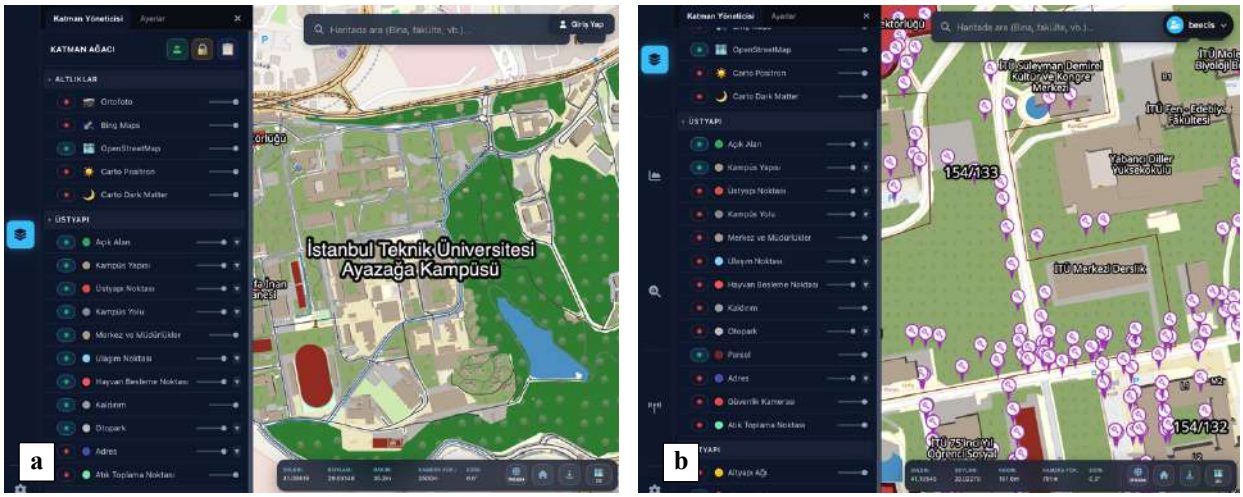
WebCBS ortamında görüntüleme ölçeğinin etkileşimli olarak değişmesi, bilgi yoğunluğunu sınırlandırmak ve okunabilirliği korumak üzere sembol ve etiketlerin yakınlaştırma düzeylerine göre düzenlenmesini gerektirmektedir (Justová ve Cajthaml, 2023); bu çalışmada konum işaretçileri ve etiketlerin görünürlük eşikleri her katman için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Kullanıcı, katman yöneticisi üzerinden katmanların görünürlüğünü ve sırasını denetleyebilmekte; seçilen katmana ait kayıtları aynı arayüzden açılan öznitelik tablosunda inceleyebilmektedir (**Şekil 3**).

3.4. Rol Tabanlı Erişim Denetimi

Katman envanterinin farklı erişim duyarlılıklarına sahip verileri içermesi nedeniyle, önceki modelin kullanıcı profilleri arasında ayrım gözetmeyen tek düzeyli erişim yapısı, genel, öğrenci ve yetkili kullanıcı rollerine dayanan bir yetkilendirme düzenine dönüştürülmüştür. Bu düzen kapsamında kullanıcıya atanan rol servis katmanında doğrulanmakta; erişime açılan katman ve öznitelikler ile kullanılabilecek sorgu ve mekânsal analiz işlevleri ilgili yetki düzeyine göre belirlenmektedir. Yetki denetiminin istemci arayüzündeki görünürlük tercihleriyle sınırlı tutulmayıp servis yanıtları oluşturulmadan önce uygulanması, kullanıcı rolünün izin vermediği veri ve özniteliklerin istemciye aktarılmasını engellemektedir. Bu kapsamda teknik altyapı şebekeleri, güvenlik kamera ağı ve kadastral sınırlar ile bunlara ait hassas öznitelikler yalnız yetkili kullanıcı rolüne açılırken, genel ve öğrenci rollerinin erişimi ortak kullanıma uygun veri kapsamıyla sınırlandırılmaktadır (**Şekil 4**).



Şekil 3. İkinci kuşak WebCBS arayüzünde katman yöneticisi paneli ve katman öznitelik tablosunun gösterimi



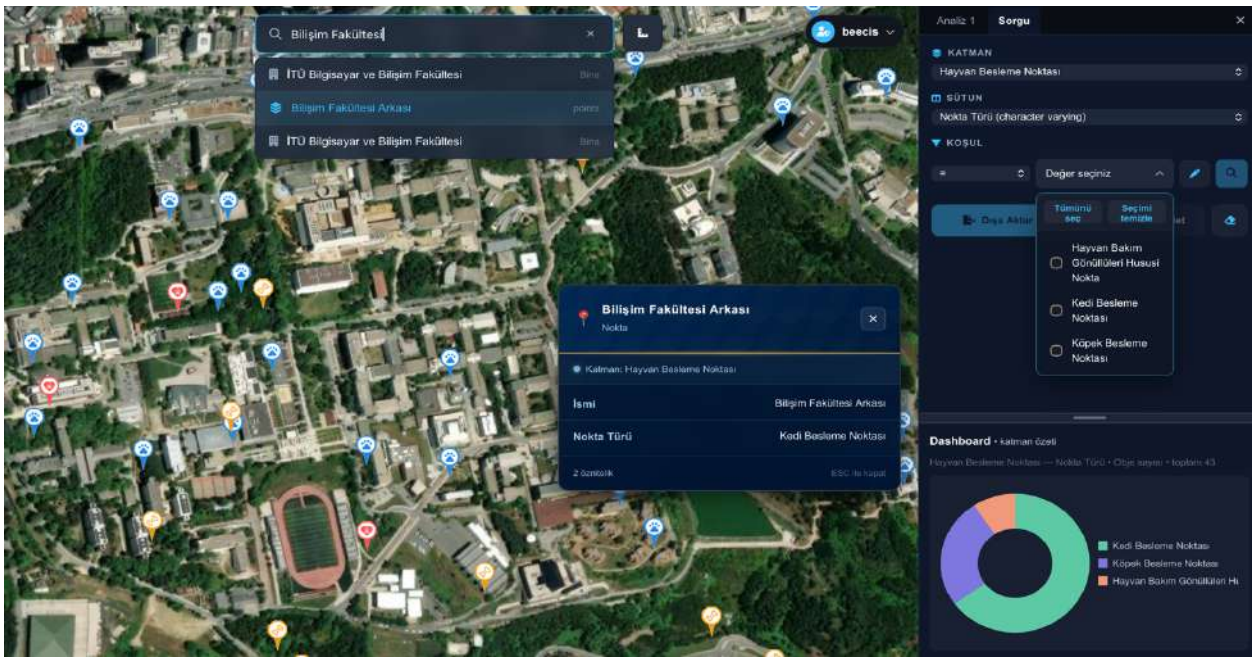
Şekil 4. WebCBS arayüzünde rol tabanlı erişim denetimine göre farklılaşan veri ve işlev kapsamı. **a)** Genel kullanıcıya sunulan standart erişim; **b)** Yetkili kullanıcıya sunulan genişletilmiş kapsam

3.5. Mekânsal Veride Arama, Filtreleme ve Sorgulama

Önceki sistemde öznitelik tabanlı sorgulama, katman kayıtlarının belirli koşullara göre filtrelenmesine ve sonuçların harita üzerinde vurgulanmasına odaklanırken (Sakallı vd., 2025), ikinci kuşak sistemde bu temel işleyiş korunmuş; sorgulama süreci, sonuçların görsel biçimde özetlenmesini, oturum içinde ayrı bir sonuç katmanı olarak yönetilmesini ve yetki kapsamında dışa aktarılmasını kapsayacak biçimde genişletilmiştir. Arama çubuğu, kullanıcının erişim yetkisi bulunan katmanlardaki tanımlayıcı öznitelik değerleri üzerinden kampüs bileşenlerinin bulunmasını; seçim sonrasında harita görünümünün ilgili konuma odaklanmasını, seçilen kaydın vurgulanmasını ve özniteliklerinin bilgi penceresinde görüntülenmesini sağlamaktadır (**Şekil 5**). Seçilen öznitelik alanının veri tipine uygun operatörleri kullanıcıya sunan sorgu arayüzü, sayısal ve tarih alanlarında karşılaştırma ve aralık sorgularının kurulmasına, metin alanlarında büyük-küçük harf duyarsız eşleşme yapılmasına ve kategorik alanlarda birden fazla değerin aynı sorgu koşulu içinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Harita üzerinde vurgulanan sorgu sonuçları, sonuç kümesinin içeriğine göre dinamik biçimde oluşturulan gösterge panosunda toplam kayıt sayısı, kategorik dağılımlar, sayısal özniteliklere ait histogramlar ile toplam ve ortalama değerler üzerinden görsel olarak özetlenmektedir (**Şekil 5**).

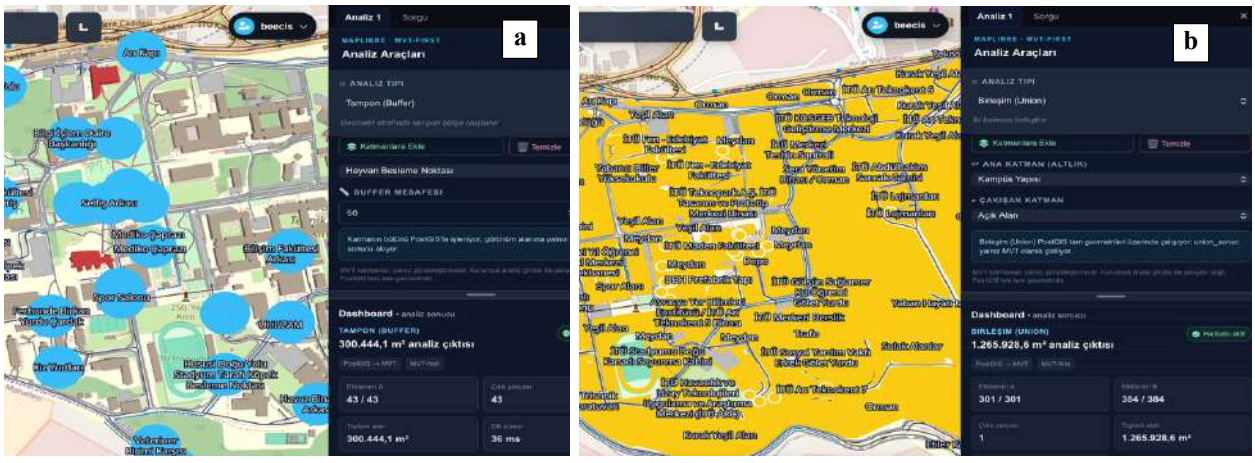
3.6. Mekânsal Analiz Fonksiyonları ve Karar Süreçlerine Katkıları

Önceki sistemde uygulamanın ana arayüzünden bağımsız prototip sayfalarında sunulan analiz araçları; ikinci kuşak sistemde kullanıcıların mekânsal analizleri WebCBS ortamından ayrılmadan, yönlendirmeli bir arayüz üzerinden işlem parametrelerini adım adım tanımlayarak gerçekleştirebildiği tek bir bütünleşik panel altında toplanmıştır. Web tabanlı mekânsal analizlerde hesaplama yükünün istemci ve sunucu arasında dağıtılması, işlem süresi ile aktarılacak veri hacminin birlikte gözetilmesini gerektirmektedir (Kulawiak vd., 2019). Bu doğrultuda ikinci kuşak sistemdeki her analiz işlevi, işlenen verinin kapsamı ve yürütülen işlemin niteliği esas alınarak istemci veya sunucu katmanında yürütülecek biçimde yapılandırılmıştır.



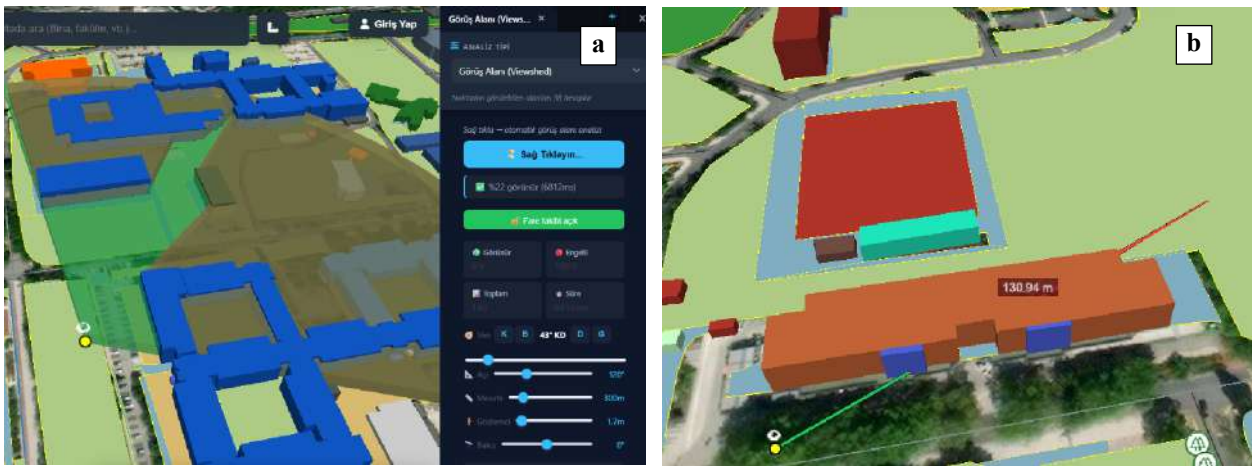
Şekil 5. İkinci kuşak arayüzde yer alan arama çubuğu, gelişmiş öznitelik sorgulama ve etkileşimli gösterge panosu

Söz konusu mimari ayrım kapsamında, önceki sistemde Turf.js aracılığıyla istemci tarafında yürütülen tampon bölge analizi, büyük ve karmaşık geometrilerin veritabanı düzeyinde daha güvenilir biçimde işlenmesi amacıyla PostGIS'in ST_Buffer işlevini kullanan sunucu katmanına taşınmıştır. Kesişim, kırpma, fark, birleştirme ve çözme işlemlerini kapsayan örtüşme analizleri, seçilen katmanların PostGIS'te tutulan geometriler üzerinde sunucu tarafında yürütülmekte; üretilen sonuçlar arayüze görselleştirme amacıyla vektör karolar hâlinde aktarılmaktadır. Sunucu katmanına taşınan tampon bölge aracı, tek bir kampüs bileşeninin, katmandaki tüm kayıtların veya model üzerine çizilen bir geometrinin analiz girdisi olarak seçilmesi ve alan geometrilerinde dışa ya da içe doğru tampon üretilmesi yoluyla altyapı hatları çevresindeki emniyet mesafeleri ile acil toplanma noktalarının erişim alanları gibi farklı planlama senaryolarının değerlendirilmesini desteklemektedir (**Şekil 6-a**). Örtüşme analizleri, kaldırım geometrileriyle kesişen üstyapı noktalarının belirlenmesi, kampüs sınırı içinde kalan altyapı ağlarının ayrıştırılması ve parsellerde yapılaşma dışında kalan alanların hesaplanması gibi mekânsal değerlendirmelerin aynı arayüzde yürütülmesini ve sonuçlarının yeni katmanlar hâlinde incelenmesini sağlamaktadır (**Şekil 6-b**).



Şekil 6. Sunucu katmanında yürütülen vektör tabanlı mekânsal analiz fonksiyonları ve uygulama senaryoları**.**
a) Sunucu tabanlı tampon bölge analizi; **b)** Sunucu tabanlı örtüşme analizi

Birinci kuşak arayüzde analiz sonucunu sahneye yayılan tekil ışınlar üzerinden gösteren görüş alanı aracı, bu çalışmada görünür bölgeler ile yapılar ve diğer fiziksel unsurlar nedeniyle görüş dışında kalan bölgeleri üç boyutlu hacimler hâlinde ayrıştıracak ve yön ile görüş açısı parametrelerinin değişimine ek bir hesaplama gerektirmeden yanıt verecek biçimde yeniden tasarlanmıştır (**Şekil 7-a**). Görüş hattı aracına eklenen gözlemci yüksekliği ayarı ve görüş doğrultusunu imleç hareketine bağlı olarak dinamik biçimde güncelleyen ışın izleme işlevi, iki konum arasındaki görüş durumunun farklı gözlem yüksekliklerinde sahne üzerinde incelenmesine olanak tanımaktadır (**Şekil 7-b**). Bu iki görünürlük aracı, güvenlik kameraları ile diğer gözlem noktalarının kapsama alanlarının karşılaştırılması, olası kör noktaların belirlenmesi ve yeni yapılaşmanın çevredeki görüş koşullarına etkisinin incelenmesi yoluyla kampüs güvenliği ve yapılaşmaya ilişkin karar süreçlerine mekânsal girdi sunmaktadır.



Şekil 7. Üç boyutlu görünürlük analizi fonksiyonları. **a)** Gelişmiş işlevleriyle görüş alanı analizi; **b)** Dinamik görüş hattı analizi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen ikinci kuşak 3B WebCBS altyapısı, PaaS (Railway) ortamında kurumsal alan adı altında canlı ortama alınmış; 18 tematik mekânsal katmanın, rol tabanlı erişim yetkilerinin ve etkileşimli analiz araçlarının tek bir bütünleşik platformda çok kullanıcılı erişime sunulması sağlanmıştır. Söz konusu servis odaklı yapının sunduğu teknik başarım kazanımlarını ve ölçeklenebilirliğini ortaya koymak amacıyla, sunucu ve istemci katmanlarında literatürdeki test protokollerine uygun performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Web tarayıcı tabanlı mekânsal bilgi sistemlerinde, kullanıcı etkileşiminin akıcılığını ve platform verimliliğini belirleyen temel parametreler arasında ilk açılış/yükleme süresi ile ağ üzerinden aktarılan veri hacmi öne çıkmaktadır (Netek vd., 2023). Söz konusu ilkeler doğrultusunda istemci ve sunucu katmanlarında yürütülen deneysel ölçümlerde, altyapının ilk yükleme ağ aktarım yükü ile veri sıkıştırma verimliliğine ilişkin elde edilen performans göstergeleri **Çizelge 2**'de sunulmuştur. Elde edilen bu performans artışı, ağ üzerindeki veri aktarım gecikmesini düşürerek kısıtlı bant genişliğine sahip bağlantılarda ilk yükleme süresinin kısalmasına katkı sunmaktadır.

Çizelge 2. İkinci kuşak WebCBS platformunun deneysel performans göstergeleri ve literatür eşik değerleriyle karşılaştırılması

Performans Göstergesi	İkinci Kuşak WebCBS Ölçüm Değeri	Literatür / Sektör İdeal Eşik Değeri	İşlevsel Önem ve Yöntemsel Değerlendirme
İlk Yükleme Ağ Transferi	1,2 MB (İyileştirme öncesi ham yük: 4,3 MB)	< 2,0 MB (Ağ aktarım yükü üst sınırı)	Netek vd. (2023) < 2,0 MB üst sınırı karşılanmış; kısıtlı ağlarda akıcı erişilebilirlik ve hızlı açılış sağlanmıştır.
Ağ Sıkıştırma Verimliliği	%87,6 Veri Tasarrufu (636,5 KB → 78,3 KB)	> %75,0 (Veri sıkıştırma başarı oranı)	Netek vd. (2023) > %75,0 sıkıştırma hedefi aşılmış (%87,6); ağ iletimindeki bant genişliği darboğazı önlenmiştir.
Sorgu ve Veri Dışa Aktarma Yanıtı	1,27 saniye (632 KB aktarım)	< 2,0 saniye (Anlık/kesintisiz kabul sınırı)	Kulawiak vd. (2019) < 2,0 sn psikolojik etkileşim eşiği yakalanmış; karar destek sorgularında kullanım akıcılığı korunmuştur.
Servis Trafiği ve Ölçeklenebilirlik	~86.500 karo isteği/ay (en yüksek: 23.100 istek/gün)	Kesintisiz Yanıt (Sıfır paket kaybı)	Netek vd. (2023) ölçeklenebilirlik kriterleri karşılanmış; vektör karo akışıyla yoğun trafikte sunucu kararlılığı yakalanmıştır.
İstemci Bellek Kararlılığı	Sabit RAM Tüketimi (Veri ölçeğinden bağımsız)	Düz Çizgi Seyri (Bellek sızıntısız)	Auer ve Zipf (2018) bellek kararlılığı ilkesiyle uyumlu bulunmuş; karo tabanlı akışla istemci RAM kullanımı sabit tutulmuştur.

Servis mimarisi açısından canlı erişim ortamında veritabanı ve vektör karo katmanları üzerinden yürütülen yoğun istek trafiği, sunucu tarafında performans kaybı yaşanmaksızın karşılanarak Netek vd. (2023) ölçeklenebilirlik ilkeleriyle uyum göstermiştir (**Çizelge 2**). İstemci katmanındaki öznitelik sorgulama yanıt hızları ise Kulawiak vd. (2019) tarafından tanımlanan ideal etkileşim süresi kriterini karşılamaktadır (**Çizelge 2**). Elde edilen bu tepki süresi, karar vericilerin karmaşık mekânsal sorgulama adımlarında analiz akışını kesintiye uğratmadan veri odaklı değerlendirmeleri akıcı biçimde sürdürebilmesine katkı sunmaktadır. Diğer taraftan, uygulanan dinamik veri akış mimarisi sayesinde istemci tarafındaki bellek (RAM) kullanımı mekânsal kapsamdan bağımsız olarak sabit kalmakta ve Auer ve Zipf (2018) bellek kararlılığı ilkesiyle örtüşmektedir (**Çizelge 2**).

Veri mimarisi düzeyinde elde edilen bulgular da platformun işletilebilirliğini belirlemektedir. Her varlığın tek bir veritabanı kaydıyla temsil edildiği ve nitelik farklarının öznitelik değerleriyle taşındığı birleştirme ölçütü, envanterin bakım yükünü azaltırken katmanlar arası birlikte sorgulanabilirliği güçlendirmiş; bu yönüyle bilginin standart veri katmanları hâlinde düzenlenmesine ilişkin yaklaşımla (Yomralıoğlu, 2000) örtüşmekte ve aynı varlığın farklı sistemlerde farklı tanımlanmasından doğan bilgi asimetrisinin (Meschini vd., 2022) ortak bir mekânsal payda üzerinde giderilebildiğini göstermektedir. Envantere eklenen işletme ve hizmet odaklı katmanlar ise akıllı kampüs kapsamının teknik altyapıyla sınırlı olmadığına ilişkin değerlendirmelerle de tutarlıdır.

YBM-CBS entegrasyonuna ilişkin bulgu, iç mekân ölçeğindeki bilginin envanterle aynı ortamda sorgulanabilmesinin geometri tanımına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Geometri taşımayan kavramsal varlıkların yapı elemanı kimlik bağları üzerinden geometrik elemanlara ilişkilendirilmesi, yapı elemanından kat ve iç mekâna, oradan bağımsız bölüm ve mülkiyet hakkına uzanan üç düzeyli bir filtrelemeyi olanaklı kılmıştır. Bu sonuç, YBM çıktılarının CBS ile bütünleştirilmesine (Moretti vd., 2021) ve IFC tabanlı modellerin 3B mülkiyet tesciline dayanak oluşturmasına (van Oosterom vd., 2020; Güler vd., 2022) ilişkin bulgularla aynı yöndedir. Ancak modelin pilot bina ölçeğinde kalması, bu filtrelemenin kampüs geneline ölçeklenememesine ve CesiumJS tabanlı 3B görünümün tam işlevsellikle devreye alınamamasına yol açmaktadır.

Analitik iş yükünün istemciden sunucuya kaydırılması tartışmanın ikinci eksenidir. Tampon bölge, kesişim, kırpma ve fark işlemlerinin PostGIS işlevlerine taşınması istemciyi yalnızca görselleştirme ve etkileşimle yükümlü bırakmış; ölçülen sabit bellek davranışı bu iş bölümünün sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bulgular, sunucu ve istemci tarafı işleme yaklaşımlarının karşılaştırıldığı çalışmalarla (Kulawiak vd., 2019) ve vektör karo tabanlı sunumun ölçeklenebilirliği artırdığına ilişkin sonuçlarla (Wallner vd., 2022) aynı yöndedir. Semboloji tanımlarının veritabanından yönetilmesi ve görünürlük eşiklerinin ölçeğe bağlı tanımlanması ise çok ölçekli gösterimde bilgi yoğunluğunun denetlenmesine ilişkin kartografik yaklaşımlarla (Justová ve Cajthaml, 2023) tutarlıdır.

Bütün olarak platform, fiziksel varlık ile dijital temsil arasında tek yönlü ve elle güncellenen bir veri akışına dayanmakta; dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz ayrımını veri akışının yönü ve otomasyon düzeyi üzerinden kuran sınıflandırmaya göre (Kritzinger vd., 2018) dijital model aşamasında konumlanmaktadır. Kampüs ve kent ölçeğindeki uygulamaların büyük bölümünün bu olgunluğa ulaşmadığı yönündeki değerlendirme (Jeddoub vd., 2023) bu bulguyla örtüşmekte; elde edilen sonuçlar 3B kampüs modelleri ve IoT tabanlı akıllı kampüs kurgularını ele alan çalışmalara (Gao vd., 2025; Roda-Sanchez vd., 2024; Manokeaw vd., 2025) tamamlayıcı bir ara aşama tanımlamaktadır. Bulguların tek bir kampüse dayanması genellenebilirliği sınırlamakta; ölçümlerin ağ aktarımı, yanıt süresi ve bellek kullanımıyla sınırlı kalması kullanıcı deneyimine ilişkin çıkarım yapılmasına izin vermemektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; İTÜ Ayazağa Kampüsü özelinde, üniversite kampüslerinin karmaşık üstyapı, altyapı ve idari bileşenlerini tek bir mekânsal paydada buluşturmak amacıyla açık kaynaklı, servis odaklı ve bileşen tabanlı ikinci kuşak bir 3B WebCBS platform mimarisi geliştirilmiş ve kurumsal alan adı üzerinden erişime sunulmuştur. Platform, canlı sensör entegrasyonuna dayalı otomatize ve çift yönlü bir veri akışını henüz barındırmadığından tamamlanmış bir "dijital ikiz" aşamasına ulaşmamış olup, akıllı kampüs yönetimi için ihtiyaç duyulan mekânsal ve anlamsal temeli kuran olgun bir "dijital model" niteliği taşımaktadır. PaaS altyapısında açık kaynaklı yazılımlarla kurgulanan servis mimarisi, veritabanından dinamik katman yönetimi, rol tabanlı erişim denetimi ve istemci-sunucu arasındaki analitik iş bölümü sayesinde kısıtlı ağ koşullarında da etkileşim eşiklerini karşılayan yanıt süreleri ve kararlı bellek kullanımı sergilemiştir. Çalışmanın literatüre ve kurumsal yönetime sağladığı temel katkı, dış ticari yazılımlara olan bağımlılığı en aza indiren Türkiye'deki üniversiteler ve kamu kurumları için ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir açık kaynak referans mimari ortaya koyması ve mekânsal verileri idari karar süreçlerini destekleyen analitik bir ortama dönüştürmesidir.

Mevcut platformun temel sınırlılığı, canlı sensör ağlarıyla otomatize veri entegrasyonunun henüz kurgulanmamış olması ve yapı elemanları ile iç mekân detaylarını barındıran 3B temsillerin kampüs geneli yerine pilot bina ölçeğinde kalması nedeniyle, yenilenen 3B görselleştirme modülünün henüz tam işlevsellikle devreye alınamamasıdır. Bu bağlamda, mekânsal veri altyapısının zenginleştirilmiş 3B yapı modelleriyle bütünleştirilmesi, kampüs genelinde dijital bir varlık yönetim sistemine geçiş için gereken veri temelini oluşturarak idari karar süreçlerinin veri odaklı biçimde desteklenmesine zemin hazırlamaktadır. Sensör altyapısındaki bu sınırlılığı aşmak amacıyla, standart veri şemalarına dayanan ve fiziksel algılayıcı kurulumuna doğrudan ihtiyaç duymadan türetilmiş zamansal gözlem katmanlarını oluşturan paralel bir çalışma yürütülmektedir. Söz konusu entegrasyonların tamamlanmasıyla birlikte, mevcut dijital modelin kendi kendini yönetebilen bütünleşik bir dijital ikiz seviyesine ulaştırılması ve Türkiye'deki üniversiteler ile kamu kurumları için kurgulanan referans mimarinin tam kapasiteyle hayata geçirilmesi hedeflenmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen "Akıllı Kampüs Tasarımı ve Uygulaması: İTÜ Modeli" (MDA-2024-45565) kodlu BAP–DAP Projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı katkılardan dolayı İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Auer, M. ve Zipf, A., 2018. 3D WebGIS: From Visualization to Analysis. An Efficient Browser-Based 3D Line-of-Sight Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7): 279.

Gao, R., Yan, G., Wang, Y., Yan, T., Niu, R. ve Tang, C., 2025. Construction of a Real-Scene 3D Digital Campus Using a Multi-Source Data Fusion: A Case Study of Lanzhou Jiaotong University. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1): 19.

Güler, D., van Oosterom, P. ve Yomralıoğlu, T., 2022. How to exploit BIM/IFC for 3D registration of ownership rights in multi-storey buildings: An evidence from Turkey. *Geocarto International*, 37(27): 18418-18447.

Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R. ve Billen, R., 2023. Digital twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122: 103440.

Justová, P. ve Cajthaml, J., 2023. Cartographic Design and Processing of Originally Printed Historical Maps for Their Presentation on the Web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(6): 230.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. ve Sihn, W., 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11): 1016-1022.

Kulawiak, M., Dawidowicz, A. ve Pacholczyk, M. E., 2019. Analysis of server-side and client-side Web-GIS data processing methods on the example of JTS and JSTS using open data from OSM and geoportal. *Computers & Geosciences*, 129: 26-37.

Manokeaw, S., Khuwuthyakorn, P., Chan, Y.-C., Tengtrairat, N., Jintapitak, M., Thinnukool, O., Buachart, C., Sinthamrongruk, T., Kridakorn Na Ayutthaya, T., Suriyanon, N., Kanangkaew, S. ve Rinchumphu, D., 2025. A Dynamic Digital Twin Framework for Sustainable Facility Management in a Smart Campus: A Case Study of Chiang Mai University. *Technologies*, 13(10): 439.

Meschini, S., Pellegrini, L., Locatelli, M., Accardo, D., Tagliabue, L. C., Di Giuda, G. M. ve Avena, M., 2022. Toward Cognitive Digital Twins Using a BIM-GIS Asset Management System for a Diffused University. *Frontiers in Built Environment*, 8: 959475.

Min-Allah, N. ve Alrashed, S., 2020. Smart Campus—A Sketch. *Sustainable Cities and Society*, 59: 102231.

Moretti, N., Ellul, C., Re Cecconi, F., Papapesios, N. ve Dejaco, M. C., 2021. GeoBIM for built environment condition assessment supporting asset management decision making. *Automation in Construction*, 130: 103859.

Netek, R., Pohankova, T., Bittner, O. ve Urban, D., 2023. Geospatial Analysis in Web Browsers—Comparison Study on WebGIS Process-Based Applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(9): 374.

Roda-Sanchez, L., Cirillo, F., Solmaz, G., Jacobs, T., Garrido-Hidalgo, C., Olivares, T. ve Kovacs, E., 2024. Building a Smart Campus Digital Twin: System, Analytics, and Lessons Learned from a Real-World Project. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3): 4614-4627.

Sakallı, S., Yüksel, N., Beytekin, D. S., Yomralıoğlu, B. ve Ruscuk, T., 2025. Dijital ikiz temelli akıllı kampüs modelinin geliştirilmesi ve CesiumJS ile sunumu: İTÜ-Ayazağa kampüs örneği. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 1-3 Ekim 2025, Ankara, syf: 142-150.

Sneesl, R., Jusoh, Y. Y., Jabar, M. A. ve Abdullah, S., 2022. Revising Technology Adoption Factors for IoT-Based Smart Campuses: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(8): 4840.

Valks, B., Arkesteijn, M. H., Koutamanis, A. ve den Heijer, A. C., 2021. Towards a smart campus: supporting campus decisions with Internet of Things applications. *Building Research & Information*, 49(1): 1-20.

van Oosterom, P., Bennett, R., Koeva, M. ve Lemmen, C., 2020. 3D Land Administration for 3D Land Uses. *Land Use Policy*, 98: 104665.

Wallner, A. G., Piechl, T., Paulus, G. ve Anders, K.-H., 2022. Open Source Vector Tile Creation for Spatial Data Infrastructure Applications. *AGILE: GIScience Series*, 3: 67.

Yomralıoğlu, T., 2000. *Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar*. 7. basım, İber Ofset, İstanbul. 480 sayfa.

MEZARLIK ALANLARININ ETKİN KULLANIMINA YÖNELİK WEB TABANLI BİR ARAYÜZ

Fatih TERZİ[1], Alper Tunga AKIN[2], Bura Adem ATASOY[3]

[1]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Ortahisar, Trabzon, fatihterzi@ktu.edu.tr
[2]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ortahisar, Trabzon, alpertunga@ktu.edu.tr
[3]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ortahisar, Trabzon, bugratasoy@ktu.edu.tr

ÖZET

Mezarlıklar, defin işlevinin yanı sıra kültürel, dinî ve açık-yeşil alan nitelikleri taşıyan kentsel arazi kullanım biçimlerindendir. Nüfus artışı ve kentleşme mezarlık alanlarına duyulan gereksinimi artırırken, kent toprağının daralması ve maliyetinin yükselmesi defin maliyetlerini artırmakta; mezarlık için ihtiyaç duyulan toprağın kısıtlı olması ise mevcut mezarlıkların kullanımının düzenlenmesini gerektirmektedir (Çakır Sümer, 2020). İstanbul örneğinde mevcut mezarlıkların kapasitesi ve dolma hızı incelenmiş, mevcut kapasitenin yaklaşık iki yıl içinde dolabileceği belirtilmiş ve yeni mezarlık alanlarının belirlenmesine yönelik CBS tabanlı uygunluk haritaları üretilmiştir (Kazel, 2023). Chongqing kenti için yürütülen bir başka çalışmada ise 2022–2030 döneminde kayıtlı nüfusa ilişkin ölüm sayıları tahmin edilmiş ve bu tahminlerin mezarlık arzının planlanması ve inşası için veri ve karar referansı sağlaması amaçlanmıştır (Wu vd., 2024). Bu değerlendirmeler, mezarlık alanlarının belirlenmesi ve mevcut alanların kullanımının düzenlenmesinin özellikle yoğun yapılaşmış kentlerde güncelliğini koruyan bir planlama konusu olduğuna işaret etmektedir.

Mezarlık planlamasına ilişkin literatürde konu farklı bileşenler üzerinden ele alınmıştır. Karadağ vd. (2018), mezarlık için uygun alanların belirlenmesinde bakı, eğim, büyük toprak grupları, arazi yetenek sınıfları, sulu derelere uzaklık, kapalılık, mevcut arazi kullanımı ile yerleşim ve ulaşım sistemlerine uzaklık ölçütlerini CBS ortamında birlikte değerlendirmiştir. Özhancı ve Aklıbaşında (2017), literatüre dayanarak mezarlıkların planlanmasında otopark, hizmet binaları, meydan, birden fazla giriş, ziyaretçi yolları, çim alanlar ile oturma ve dinlenme köşeleri gibi kullanımların dikkate alınması gerektiğini aktarmıştır. Iswoyo vd. (2025) ise mezarlık kapasitesi ile yeşil alan işlevini birlikte ele almış; bitkilendirme düzenini mezar sıraları, yaya yolları ve araç yollarıyla ilişkilendiren öneriler geliştirmiştir.

Mezarlıkların iç düzenine odaklanan çalışmalarda dolaşım ve erişimle ilgili benzer sorunlar belirlenmiştir. Karaoğlu (2007), Karacaahmet Mezarlığı'nda ada içlerinde bir sirkülasyon sisteminin bulunmadığını ve mezarların bazı bölümlerde aralarında yürümeyi engelleyecek kadar birbirine yaklaştığını belirtmiştir. Akten ve Özkartal (2016), Soğukkuyu Mezarlığı'nda adaların tamamına yakınında iç yollar bulunmadığını ve sirkülasyonun ada çevresindeki araç yollarından sağlandığını; mezarların ise düzensiz biçimde yerleştirilerek bazı noktalarda aralarında boşluk kalmayacak ölçüde sıkıştırıldığını belirtmiştir. Kumru ve Özçalık (2021) da Şeyh Adil Mezarlığı'nda mezarlara ulaşan ara yolların sınırlı olduğunu, bazı mezarlara dar boşluklardan veya diğer mezarların üzerinden geçilerek ulaşıldığını ve mezar birimlerinin düzensiz biçimde sıkıştırıldığını ifade etmiştir. Farklı kentlerde elde edilen bu bulgular, mezar aralıkları ile ada içi yol düzeninin erişim ve dolaşım bakımından önemli tasarım bileşenleri olduğunu göstermektedir.

Mezarlıkların mekânsal düzeni, defin biçimi ve dinî uygulamalarla da ilişkilidir. Uslu (2009), İslami mezarlıkların projelendirilmesinde ada, parsel ve sirkülasyon sisteminin oluşturulmasında kıble yönünün dikkate alındığını belirtmiş, ortalama mezar ölçüsünü 2,00 × 0,80 m olarak vermiştir. Yetişkin mezar alanı için Karaoğlu (2007) 2,10 × 0,80 m, Güçlü vd. (1996) ise 2,50 × 1,20 m ölçülerini aktarmıştır. Kaynaklarda mezar yapısı ve mezar alanı için farklı tanım ve bağlamlarda farklı boyutların verilmesi, iç düzen çalışmalarında ise mezar aralıkları ve yol düzeninin erişim ve sirkülasyon açısından öneminin vurgulanması nedeniyle, mezar uzunluğu ve genişliği, mezarlar arasındaki mesafe ve yol genişliği arayüzde kullanıcı tarafından değiştirilebilen parametreler olarak tanımlanmıştır.

Fiziksel ve mekânsal planlamaya yönelik çalışmaların yanı sıra, mezarlık yönetiminde dijital teknolojilerin kullanımı da ele alınmaktadır. Agostini vd. (2024), yeşil alan, çevresel kaynak kullanımı, izleme sistemleri ve dijital hizmetleri içeren kavramsal bir akıllı ve sürdürülebilir mezarlık modeli önermiştir. Bora vd. (2025) ise mevcut mezarların haritalanması, mezar bilgilerinin aranması, boş ve dolu mezar parsellerinin görüntülenmesi ve rezervasyon işlemlerinin yürütülmesi amacıyla CBS tabanlı bir akıllı mezarlık sistemi geliştirmiştir. Bu çalışmalardan, dijital teknolojilerin mezarlıklara ilişkin mekânsal ve idari verilerin yönetilmesi, görselleştirilmesi ve hizmet süreçlerinin düzenlenmesinde kullanılabildiği anlaşılmaktadır. Bu yaklaşım, mezarlık alanlarına ilişkin planlama kararlarının da sayısal ve görsel araçlarla desteklenebileceğine işaret etmektedir.

Literatür, mezarlık alanlarının yer seçimi, kapasitesi, iç düzeni, peyzaj bileşenleri ve dijital yönetimi bakımından değerlendirilmesine ilişkin bir çerçeve sunmaktadır. Bununla birlikte, incelenen kaynaklarda planlamaya konu bir mezarlık alanının kıble yönelimli mezar ve temel yol düzeni bakımından sınanmasına imkân veren, kullanıcı tarafından değiştirilebilen geometrik parametrelere dayalı bir arayüz örneği belirlenememiştir. Bu çalışmanın amacı, mezarlık alanlarının belirlenen ihtiyaçlar ve geometrik kabuller doğrultusunda önceden incelenmesine yardımcı olacak bir karar destek platformu geliştirmektir. Mevcut sürüm, alan sınırı içerisinde kıble yönelimli mezar birimlerinin ve temel yol düzeninin otomatik olarak oluşturulmasına odaklanmaktadır. Böylece farklı mezar ölçüleri, aralıklar ve yol genişlikleri altında oluşan yerleşimlerin planlama aşamasında görülmesi ve karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Geliştirilen arayüz, karar verme sürecine geometrik bir ön değerlendirme sunan başlangıç bileşeni olarak ele alınmıştır. Platformun sonraki aşamalarda hizmet alanları, topoğrafik kısıtlar ve genel peyzaj bileşenleriyle genişletilmesi öngörülmektedir.

Çalışmada, JavaScript programlama dili kullanılarak sınırları belirlenen bir mezarlık alanı içerisinde kıble yönelimli mezar birimlerini ve temel yol düzenini otomatik olarak oluşturan web tabanlı bir arayüz geliştirilmiştir. Arayüzün işlevleri, literatürde mezarlıkların iç düzenine ilişkin belirtilen mezar ölçüleri, mezarlar arasındaki mesafeler, kıble yönelimi ve dolaşım gereksinimleri dikkate alınarak tanımlanmıştır.

İşlem sürecinde öncelikle planlamaya konu alanın geometrisi arayüze aktarılmaktadır. Mezar uzunluğu ve genişliği, mezarlar arasındaki mesafeler ile yol genişliği kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Bu değerler, farklı planlama kabullerinin incelenebilmesi amacıyla değiştirilebilir parametreler olarak düzenlenmiştir. Kullanıcının mezarları otomatik oluşturma komutunu vermesiyle birlikte arayüz, mezar birimlerini kıble yönüne uygun olarak oluşturmakta, alan sınırı içinde çoğaltmakta ve tanımlanan değerlere göre temel yol düzenini üretmektedir. Alan sınırı dışında kalan mezar birimleri yerleşime dâhil edilmemekte, elde edilen mezar ve yol düzeni arayüz üzerinde görselleştirilmektedir.

Çalışmanın bu aşamasında alanın tamamının defin açısından kullanılabilir olduğu ve topoğrafik, jeolojik veya mevcut kullanım kaynaklı bir kısıt içermediği kabul edilmiştir. Geliştirilen ilk sürüm, alan geometrisi ile mezar yerleşimi arasındaki ilişkinin incelenmesine odaklanmakta; hizmet alanları, topoğrafik kısıtlar ve ayrıntılı peyzaj bileşenleri mevcut kapsamın dışında tutulmaktadır. Bu nedenle arayüz, mevcut aşamada tanımlanan parametrelere göre yerleşim oluşturan geometrik bir ön değerlendirme aracı olarak ele alınmıştır.

Arayüzün işleyişini göstermek amacıyla herhangi bir gerçek mezarlığı temsil etmeyen örnek bir alan geometrisi kullanılmıştır. Mezar uzunluğu ve genişliği, mezarlar arasındaki mesafeler ve yol genişlikleri kullanıcı tarafından tanımlandıktan sonra otomatik oluşturma işlemi başlatılmıştır. Arayüz, mezar birimlerini hesaplanan kıble doğrultusunda yerleştirmiş ve tanımlanan değerlere göre temel yol düzenini oluşturmuştur. Alan sınırının dışında kalan birimler yerleşime dâhil edilmemiştir. Elde edilen düzen Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: a) Arayüzün parametre giriş alanları, b) Otomatik oluşturulan mezar ve yol düzeni örneği

Üretilen çıktı, alan geometrisinin mezar sıralarının oluşumu üzerindeki etkisinin, sınır boyunca mezar yerleşimine dâhil edilemeyen bölümlerin, yollar için ayrılan alanların ve oluşturulan mezar sayısının birlikte incelenmesine imkân vermektedir. Parametre değerlerinin değiştirilmesiyle aynı alan için farklı yerleşim düzenleri oluşturulabilmekte ve bu düzenler görsel olarak karşılaştırılabilmektedir. Sunulan örnek, arayüzün çalışma biçimini göstermek amacıyla kullanılmış olup bir saha doğrulaması, kullanılabilirlik testi veya performans değerlendirmesi niteliği taşımamaktadır.

Bu çalışmada, sınırları belirlenen bir mezarlık alanı içerisinde kıble yönelimli mezar birimlerini ve temel yol düzenini otomatik olarak oluşturan web tabanlı bir arayüzün ilk sürümü geliştirilmiştir. Kullanıcı tarafından tanımlanabilen mezar ölçüleri, mesafeler ve yol genişlikleri sayesinde farklı yerleşim kabullerinin aynı alan üzerinde incelenmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu yönüyle arayüz, mezarlık alanlarının planlama aşamasında geometrik açıdan ön değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek bir başlangıç bileşeni sunmaktadır.

Bununla birlikte, mezarlık planlamasında mezar birimleri, yollar, topoğrafya, jeolojik ve hidrolojik koşullar, girişler, otoparklar, hizmet birimleri, dinlenme alanları, bitkilendirme ve diğer peyzaj bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Platformun sonraki sürümlerinde bu bileşenlerin sisteme eklenmesi, farklı alan geometrileri üzerinde sınanması ve kullanıcı değerlendirmeleriyle geliştirilmesi planlanmaktadır. Böylece mevcut geometrik yerleşim aracının, mezarlık alanlarının farklı planlama ihtiyaçları bakımından incelenmesini destekleyen daha kapsamlı bir platforma dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Sözcükler: karar destek platformu, kıble yönelimi, mezarlık planlaması, web tabanlı arayüz

ABSTRACT

A WEB-BASED INTERFACE FOR THE EFFECTIVE USE OF CEMETERY AREAS

This study presents the first version of a web-based decision support platform developed to support the preliminary assessment of cemetery areas during the planning stage. The interface was developed using JavaScript and automatically generates qibla-oriented grave units and a basic road layout within a defined area boundary. Grave length and width, spacing between graves, and road widths can be modified by the user, allowing different layout assumptions to be visualised and compared for the same area. Grave units extending beyond the area boundary are excluded from the layout, and the resulting arrangement is displayed through the interface. An example area geometry was used to demonstrate the operation and output of the platform. The generated layout allows the effects of area geometry on grave rows, boundary-related unused spaces, road allocation, and the number of generated graves to be examined together. At this stage, the entire area is assumed to be suitable for burial, while topographic, geological, hydrological, and existing land-use constraints are excluded. The platform is therefore considered an initial geometric assessment component. Future versions are expected to incorporate service areas, topographic constraints, and broader landscape components to support a more comprehensive planning process.

Keywords: cemetery planning, decision support platform, qibla orientation, web-based interface.

Kaynaklar

Agostini, A. L. C., Manfroi, C., Pereira, R., Da Costa, E. M., & Dos Santos, N. (2024, June). Cemetery: more human, intelligent, and sustainable. In 2024 International Conference on Intelligent Environments (IE) (pp. 132-138). IEEE.

Akten, M., & Özkartal, N. (2016). İzmir İli Soğukkuyu Mezarlığının planlama kriterleri ve peyzaj tasarımı açısından irdelenmesi. Journal of Architectural Sciences and Applications, 1(2), 9-20.

Bora, M. A., Permatasari, R. D., Hernando, L., Abdullah, H. M. W., Siagian, T. E., Kurniawan, V. F., ... & Fauzan, H. (2025). Optimization of public cemetery management through a cognitive ergonomics approach based on a Smart Cemetery System (SCS). Journal Européen des Systèmes Automatisés, 58(11), 2337-2349.

Çakır Sümer, G. (2020). Kentlerde Mezarlık Alan Yetersizliği ve Çözüme Yönelik Uygulamalar: Dünyadan ve Türkiye'den Örnekler. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 22(3), 749-764.

Güçlü, K., Yılmaz, S., & Yılmaz, H. (1996). Kentsel yeşil doku içinde mezarlıkların yeri, önemi ve Erzurum örneği. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 1-12.

Iswoyo, H., Farid, M., Nurfaida, N., Dariati, T., Faried, M., Bukti Djufrie, A., ... & Haya, R. (2025). Spaces for the living and the dead: Optimising cemeteries as sustainable urban green spaces. Journal of Water and Land Development, No. 66, 162-175. doi: 10.24425/jwld.2025.155312

Karadağ, A. A., Gültekin, P., & Kayapınar, E. (2018). Mezarlık Yer Seçim Kriterlerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma: Akçakoca (Düzce). Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 14(2), 17-32.

Karaoğlu, D. (2007). Kent mezarlıklarının yeşil doku içindeki önemi ve ziyaretçi memnuniyetinin belirlenmesi: Karacaahmet Mezarlığı örneği [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı.

Kazel, E. (2023). İstanbul'da Nekrocoğrafya (Mezarlıklar): Mekânsal Planlama Yönünden Bir Değerlendirme. Ege Coğrafya Dergisi, 32(2), 273-287.

Kumru, S. N., & Özçalık, M. (2021). The evaluation of city cemeteries as active green areas, the case of Kahramanmaras. Journal of Architecture, Engineering & Fine Arts, 3(1), 1-18.

Özhancı, E., & Aklıbaşında, M. (2017). Kentsel peyzaj içinde mezarlıklar ve peyzaj mimarlığı açısından incelenmesi; Nevşehir örneği. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 48(2), 113-124.

Uslu, A. (2009, 13–15 Mayıs). Çevreye dost mezarlık (ekolojik mezarlık) planlama yaklaşımları ve dünya kentlerinden örnekler. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

Wu, H., Jin, Y., Xue, Y., Zeng, B., & Wang, H. (2024). Exploring Death Population Prediction and Cemetery Planning in Chongqing amid an Aging Population: A Grey Forecast Model Based on Interval Grey Number. Journal of Grey System, 36(3), 51-63.

WEB TABANLI 3B COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNDE DİNAMİK VE GPU DESTEKLİ GÖRÜLEBİLİRLİK ANALİZİ

Ziya USTA[1]

[1]Dr.Öğr.Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 08010, Merkez, Artvin, ziyausta@artvin.edu.tr

ÖZET

Görülebilirlik (viewshed) analizi, kentsel planlama, telekomünikasyon ağ tasarımı, askeri operasyonlar ve turizm gibi birçok alanda karar destek mekanizmalarının temel bir bileşenidir. Geleneksel Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarında bu analizler genellikle durağan, iki boyutlu (2B) veya 2.5B sayısal yükseklik modelleri üzerinden, Merkezi İşlem Birimi (CPU) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak, Akıllı Şehir konseptinin yaygınlaşması ve 3B Şehir Modellerinin (CityGML, 3D Tiles vb.) detay seviyesinin (LOD) artmasıyla birlikte, yüksek çözünürlüklü veriler üzerinde gerçek zamanlı ve dinamik analiz ihtiyacı doğmuştur. Ancak, yüksek çözünürlüklü 3B veriler (ör. fotogrametrik mesh modeller, nokta bulutları veya CityGML verileri) üzerinden elde edilen karmaşık analiz sonuçlarının masaüstü yazılımlara bağımlı kalmadan, web ortamında hızlı ve etkileşimli bir şekilde sunulması teknik bir zorluktur. Bu çalışma, web tarayıcıları üzerinden eklenti gerektirmeksizin çalışabilen, Grafik İşlem Birimi (GPU) tabanlı dinamik bir 3B görülebilirlik analizi yaklaşımı sunmaktadır. Geliştirilen mimaride, hesaplama yükü sunucudan alınarak istemci tarafındaki GPU'ya (WebGL/WebGPU API'leri aracılığıyla) aktarılmış, böylece hareketli gözlem noktaları ve değişen çevre koşullarında saniyede 60 kare (FPS) akıcılığında gerçek zamanlı analiz imkanı sağlanmıştır. Performans testleri, önerilen GPU tabanlı gölge haritalama (shadow mapping) ve ışın izleme (ray-casting) melez yönteminin, geleneksel CPU tabanlı yöntemlere kıyasla büyük veri setlerinde analiz sürelerini %85 oranında azalttığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: 3B CBS, görülebilirlik analizi, GPU hesaplama, WebGPU, akıllı şehirler

ABSTRACT

DYNAMIC GPU-ACCELERATED VISIBILITY ANALYSIS IN WEB-BASED 3D GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Viewshed analysis is a fundamental component of decision support mechanisms in various fields such as urban planning, telecommunication network design, military operations, and tourism. In traditional Geographic Information Systems (GIS) software, these analyses are generally performed on static, two-dimensional (2D) or 2.5D digital elevation models using the Central Processing Unit (CPU). However, with the proliferation of the Smart City concept and the increasing level of detail (LOD) in 3D City Models, the need for real-time and dynamic analysis on high-resolution data has emerged. However, the rapid and interactive visualization of complex analysis results derived from high-resolution 3D datasets (e.g., photogrammetric mesh models, point clouds, or CityGML datasets) in web environments, without relying on desktop software, remains a significant technical challenge. This study presents a dynamic 3D viewshed analysis approach based on the Graphics Processing Unit (GPU) that can run on web browsers without requiring any plugins. In the developed architecture, the computational load is transferred from the server to the client-side GPU (via WebGL/WebGPU APIs), thus providing real-time analysis capabilities at 60 frames per second (FPS) for moving observation points and changing environmental conditions. Performance tests indicate that the proposed hybrid GPU-based shadow mapping and ray-casting method reduces analysis times by 85% on large datasets compared to traditional CPU-based methods.

Keywords: 3D GIS, viewshed analysis, GPU computing, WebGPU, smart cities

1. GİRİŞ

Görülebilirlik (viewshed) analizi, belirli bir gözlem noktasından bakıldığında topografya veya yapay engeller (binalar, bitki örtüsü vb.) dikkate alınarak çevredeki hangi bölgelerin görülebildiğini veya görünmez olduğunu belirleyen temel bir mekansal analiz türüdür [1]. Bu analiz yöntemi; turizm rotalarının çekiciliğinin değerlendirilmesinden [2] kentsel planlamaya, telekomünikasyon ağ tasarımından çevre yönetimine kadar pek çok gerçek dünya uygulamasında karar destek mekanizmalarının temel bir bileşenidir. Mekansal algı ve görünürlük değerlendirmeleri, günümüzde tarihsel ve arkeolojik alanların analizinde dahi önemli mekansal içgörüler sunabilmektedir [3]. Geleneksel yaklaşımlar çoğunlukla Görüş Hattı (Line of Sight - LoS) algoritmalarına ve ızgara tabanlı Sayısal Yükseklik Modellerine (DEM) dayanmakta olup, bu analizler genellikle durağan 2B formda çalışan bağımsız işleme modülleridir [4]. Ancak, analiz edilecek coğrafi verinin boyutu ve hassasiyeti arttıkça, Merkezi İşlem Birimi (CPU) tabanlı klasik hesaplama yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu yüksek işlem süresi pratik uygulamalar için ciddi bir darboğaz haline gelmektedir [5].

Günümüzde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) giderek üç boyutlu (3B) yapıya bürünmesi ve Akıllı Şehir konseptinin gelişimiyle birlikte, yüksek detay seviyesine (LOD) sahip 3B şehir modellerinin kullanımı yaygınlaşmıştır [6]. Geometrik açıdan karmaşık olan bu 3B yapı ve nesneler, görsel engeller olarak simülasyon süreçlerine dahil edildiğinde çok daha hassas ve "gerçek 3B" (true 3D) görülebilirlik analizlerine olanak tanımaktadır [7]. Bununla birlikte, artan mekansal karmaşıklık ve devasa büyüklükteki coğrafi veri setleri, özellikle çoklu gözlem noktalarından yapılan eşzamanlı dinamik analizlerde muazzam bir hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadır [8].

Söz konusu hesaplama yükünün üstesinden gelmek amacıyla araştırmacılar, sahip oldukları paralel işlem (parallel computing) mimarisi sayesinde uygun maliyetle yüksek işlem gücü sunabilen Grafik İşlem Birimlerine (GPU) yönelmişlerdir [5, 7]. GPU üzerinde koşulan paralel algoritmalar sayesinde görülebilirlik hesaplaması; geleneksel LoS yöntemlerinin aksine doğrudan 3B görselleştirme ve işleme (rendering) hattıyla entegre edilebilmekte, bu sayede sistem performansı ciddi biçimde artmaktadır [8]. Güncel CBS platformlarının web ortamına taşınması mekansal verilere erişilebilirliği kolaylaştırmış olsa da, hesaplama maliyeti yüksek olan 3B görülebilirlik algoritmaları modern web mimarilerinde dahi genellikle halen sunucu tarafında (server-side) çalıştırılmaktadır. Bu geleneksel yaklaşım, eşzamanlı çoklu kullanıcı etkileşimlerinde sunucu kilitlenmelerine ve analiz sonuçlarının arayüze gecikmeli olarak yansımasına neden olmaktadır. UZAL-CBS 2026 sempozyumunun "Akıllı Şehirler" ve "Yenilikçi WebCBS Uygulamaları" vizyonu doğrultusunda bu çalışmanın temel amacı; ağır işlem yükünü sunucudan alarak doğrudan web tarayıcısı üzerinden son kullanıcının donanımına (WebGL API'leri aracılığıyla GPU'ya) dağıtan, eklenti gerektirmeyen, yüksek hızlı ve dinamik bir 3B görülebilirlik analiz aracı mimarisi ortaya koymaktır.

2. YÖNTEM VE MATERYAL

Bu çalışmada, 3B verilerin (Bina, Arazi, Ağaç modelleri) web ortamında görselleştirilmesi ve yönetilmesi için açık kaynaklı 3B web harita kütüphaneleri temel alınmıştır. Veri formatı olarak, heterojen ve büyük boyutlu 3B mekansal verilerin akışını optimize eden 3D Tiles OGC standardı kullanılmıştır.

2.1 GPU Tabanlı Analiz Mimarisi

Analiz için CPU tabanlı doğrusal hesaplama algoritmaları yerine, Ekran Kartının (GPU) paralel işlem gücünden faydalanan Gölge Haritalama (Shadow Mapping) tekniği adapte edilmiştir. Bu teknik, ışık kaynaklarının çevreye etkisini hesaplamak için grafik programlamada sıklıkla kullanılır. Çalışmada gözlem noktası (observer) sanal bir ışık kaynağı olarak sisteme tanımlanmıştır.

- Derinlik Tamponu (Depth Buffer) Oluşturma: Gözlem noktasının bakış açısından sahnenin bir derinlik haritası GPU üzerinde (Frame Buffer Object - FBO) oluşturulur.
- Parça Gölgelendirici (Fragment Shader) İşlemleri: Kameranın genel bakış açısından sahne render edilirken, her bir pikselin koordinatı gözlemcinin uzayına dönüştürülür. Pikselin kameraya olan uzaklığı, derinlik haritasındaki değer ile karşılaştırılır. Eğer pikselin uzaklık değeri derinlik haritasındaki değerden büyükse (arkada kalıyorsa) piksel "görünmez" (kırmızı), eşit veya küçükse "görünür" (yeşil) olarak boyanır.

2.2. Dinamik Değerlendirme

Sistemin dinamik yapısı, gözlem noktasının koordinatlarının (X, Y, Z, Yönelim, Bakış Açısı) kullanıcı tarafından veya bir hareketli nesne (örneğin bir İHA rotası) üzerinden anlık olarak değiştirilebilmesine dayanır. WebGPU API'si aracılığıyla bu parametreler anında GPU gölgelendiricilerine (shader) iletilerek sahne yeniden çizilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen mimari, Trabzon ili Ortahisar ilçesine ait yüksek çözünürlüklü (LOD2) 3B şehir modeli üzerinde test edilmiştir

- Performans: Sunucu tabanlı klasik bir LoS algoritmasının 10.000 bina içeren bir alanda tek bir analiz sonucunu üretmesi ortalama 4.2 saniye sürerken; WebGPU destekli GPU mimarisinde aynı alan için hesaplama süresi 16 milisaniyenin (ms) altına inmiştir.
- Akıcılık: Hareketli bir gözlemci senaryosunda, tarayıcı üzerinde 60 FPS (Frame Per Second) değeri korunmuş, kullanıcı deneyiminde herhangi bir donma yaşanmamıştır.
- Ölçeklenebilirlik: İstemci tarafında çalışan (client-side) bu mimari sayesinde, sisteme bağlanan kullanıcı sayısı artsa dahi sunucu tarafında ek bir işlem yükü (CPU load) oluşmadığı gözlemlenmiştir.

3. SONUÇ

Akıllı şehirler, afet yönetimi ve kentsel dönüşüm süreçlerinde üç boyutlu mekansal analizlerin hızı ve doğruluğu kritik önem taşır. Bu çalışma kapsamında web teknolojileri ve ekran kartı donanımının gücü birleştirilerek, yüksek çözünürlüklü 3B coğrafi veriler üzerinde eşzamanlı, interaktif ve dinamik bir görülebilirlik analiz aracı sunulmuştur. Gelecek çalışmalarda, analizlerin sadece görünürlük ile sınırlı kalmayıp, silüet analizi ve diğer kent analitiği tekniklerini içerecek şekilde genişletilmesine odaklanılacaktır

KAYNAKÇA

1. Zhao, J., Xu, A., Zhang, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Cao, M., & Huang, M. (2024). Overview and Prospects of Visibility Analysis Approaches. *The 31st International Conference on Geoinformatics*, 110(1), 28.

2. Mor, M., Fisher-Gewirtzman, D., Yosifof, R., & Dalyot, S. (2021). 3D Visibility Analysis for Evaluating the Attractiveness of Tourism Routes Computed from Social Media Photos. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 275.

3. Landeschi, G. (2018). Rethinking GIS, three-dimensionality and space perception in archaeology. *World Archaeology*, 51(1), 17-32.

4. Pan, Z., Tang, J., Tjahjadi, T., Wu, Z., & Xiao, X. (2020). A Novel Rapid Method for Viewshed Computation on DEM through Max-Pooling and Min-Expected Height. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 633.

5. Fang, C., Yang, C., Chen, Z., Yao, X., & Guo, H. (2011). Parallel algorithm for viewshed analysis on a modern GPU. *International Journal of Digital Earth*, 4(6), 471-486.

6. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Oosterom, P. (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842-2889.

7. Feng, W., Gang, W., Deji, P., Yuan, L., Liuzhong, Y., & Hongbo, W. (2015). A parallel algorithm for viewshed analysis in three-dimensional Digital Earth. *Computers & Geosciences*, 75, 57-65.

8. Xiao, T., Deng, J., Wen, C., & Gu, Q. (2024). Parallel algorithm for multi-viewpoint viewshed analysis on the GPU grounded in target cluster segmentation. *International Journal of Digital Earth*, 17(1).

İSTANBUL'DA AKTİF YEŞİL ALAN YETERLİLİĞİNİN CBS VE MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Betül GÜNEŞ [1] , Ahmet Tarık TORUN [2]

[1] Öğrenci, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Emniyet, 06560, gunes-betul@ogr.hbv.edu.tr
[2]Dr,Öğr,Üyesi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, Emniyet, 06560, ahmet-torun@hbv.edu.tr

ÖZET

İstanbul yıllar içerisinde hızla artmakta olan demografik yapı göstermektedir. Bu gelişimini metropol olması ve iki kıtanın birleşim noktasında olması desteklemektedir. Araştırmada nüfus artışı ile birlikte artan kentleşme, aktif yeşil alanların dağılımı arasındaki ilişkiler coğrafi bilgi sistemleri ve makine öğrenmesi ile ele alınmıştır. Çalışmada Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verileri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) analizleri ve Overpass Turbo tabanlı mekânsal veriler kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden olan Random Forest algoritması ile nüfus yoğunluğu ve aktif yeşil alan yeterliliği arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi sonucunda şehirde aktif yeşil alan yetersizliğine sebep olan faktörlerin önem derecesi belirlenmiştir. Dünya Sağlık Örgütünün sınıflandırmasında yer alan değerlere göre ise kişi başına düşen aktif yeşil alan yeterliliği kriter olarak alınmıştır. Veriler ArcGIS Pro ortamında işlenerek haritalar oluşturulmuştur. Çalışma sonunda elde edilen bulgularda,ilçelerde nüfus artışının dengesiz dağıldığını ve bu durumun özellikle kent sakinlerinin aktif yeşil alanlara erişilebilirliği üzerinde etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Büyük çoğunlukta aktif yeşil alanların yetersiz olduğu ve gelecekte şehir planlamalarında bu durumun göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmüştür. Sonuç olarak, İstanbul'daki aktif yeşil alanlar hem doğal yaşam alanlarının korunması hemde kentleşme politikalarının geliştirilmesinde kentlerin sürdürülebilir olması için önem arz etmektedir.

Anahtar Sözcükler: aktif yeşil alanlar, coğrafi bilgi sistemleri, İstanbul, makine öğrenmesi, nüfus yoğunluğu

ASSESSMENT OF ACTIVE GREEN SPACE ADEQUACY IN ISTANBUL USING GIS AND MACHINE LEARNING TECHNIQUES

ABSTRACT

İstanbul shows a rapidly increasing demographic structure over the years. This development is supported by its status as a metropolitan city and its location at the intersection of two continents. In this study, the relationship between population growth, increasing urbanization, and the distribution of active green spaces was examined using Geographic Information Systems and machine learning techniques. In the study, data from the Turkish Statistical Institute (TÜİK), GIS analyses, and spatial data based on Overpass Turbo were used. Using the Random Forest algorithm, which is one of the machine learning methods, the relationships between population density and active green space adequacy were evaluated. As a result of machine learning, the importance level of the factors causing insufficient active green space in the city was determined. According to the values included in the World Health Organization classification, per capita active green space adequacy was taken as a criterion. The data were processed in ArcGIS Pro environment and maps were produced. The findings obtained at the end of the study show that population growth in districts is unevenly distributed and that this situation has effects especially on the accessibility of urban residents to active green spaces. It was concluded that the majority of active green spaces are insufficient and that this situation should be taken into account in future urban planning. As a result, active green spaces in Istanbul are important for both the preservation of natural habitats and the development of urbanization policies to ensure the sustainability of cities.

Keywords: active green spaces, geographic information systems, Istanbul, machine learning, population density

GİRİŞ

Dünya nüfusunun büyük çoğunluğu kentlerde yaşamakta ve bu oran gittikçe artmaktadır. Sanayi devrimi ile başlayan bu süreç yoğun nüfuslu yapılaşmış alanların çoğalmasına ve çeşitli kentsel sorunların oluşmasına neden olmuştur(İ.B.B,Strateji Raporları). Bu sorunların yaşanmasında büyük metropoller ise başı çekmektedirler.

İstanbul, Avrupa-Asya kıtasında yer alan ve kalabalık nüfustan oluşan metropol bir şehirdir. Sayıca fazla aktif yeşil alan barındırmasına rağmen şehirdeki sürdürülebilir yaşam alanları açısından kritik rol oynamaktadır. Günümüzde yaklaşık 5461 km² yüz ölçüme ve 15,7 milyonluk bir nüfusa sahiptir. İstanbul, 12 bölgeden alan bakımından en küçüğü

iken nüfus açısından en büyüğüdür(Yılmaz,M.,2025).2007 yılında 12.573.836 olan nüfus, 17 yılda 3.127.766 artmış ve 2026'da 15.841.576'ya çıkmıştır. Bu artış İstanbul da yeşil alanların korunmasını daha da önemli hale getirmiştir.

Aktif yeşil alanlar her yaştan kent insanının dinlenme, eğlenme, spor yapma, yürüme ve oyun oynama gibi aktiviteleri gerçekleştirebildikleri parklar, çocuk oyun alanları, spor alanları, rekreasyon alanları gibi alanların tamamıdır. Aktif yeşil alanların kullanıcılara hizmet edebilmesi ve kentsel ekosistem hizmetlerini yerine getirebilmesi, niceliksel ve niteliksel olarak bazı özelliklere sahip olmasıyla doğrudan ilişkilidir (Özgeriş,M.2023). Şehir sakinlerinin fiziksel refahı, özellikle devam eden iklim değişikliğinin daha sıcak koşullara ve daha aşırı hava olaylarına yol açacağı göz önüne alındığında, yeşil alanlardan hem doğrudan hem de dolaylı olarak fayda görebilir (Rocque vd. 2021). Gölge sağlayarak, ısı tutulumunu azaltarak ve buharlaşma yoluyla soğutmayı artırarak , kentsel yeşil alanlar ortam sıcaklıklarını düşürebilir ve bu nedenle, çevredeki alanlara göre sıcaklıkları 2,8°C'den fazla artırabilen kentsel ısı adası etkisine karşı mücadelede önemli bir araçtır (Oliveira vd., 2011 , Mohajerani vd., 2017 , Frumkin, 2002) (Bille ve ark.,2023). İstanbul özelinde yeşil alanlar aynı zamanda deprem toplanma alanı olarak da işlev görmektedir. Ancak İstanbul; kent içindeki birçok yeşil alanın imara açılıyor olması gibi nedenlerle yeşil alanlarını kaybetmekte ve kente yeni yeşil alanlar kazandırılıyor olsa bile, nüfus artışına bağlı olarak kişi başına düşen yeşil alan miktarı azalmaktadır. Kentsel ortamlarda açık yeşil alan değerlendirmesiyle ilgili en yaygın ölçü, kişi başına düşen yeşil alan miktarıdır. Ayrıca yeşil alanların bir kısmı insanların kullanımına kapalı olabilmektedir. Böylece yeşil alanlar kullanım durumuna göre; Aktif yeşil alanlar ve Pasif yeşil alanlar olarak ayrılmaktadır. Pasif yeşil alanlar ise yol kenarları, mezarlıklar, özel bahçeler, kamu kurumlarına ait bahçeler gibi doğrudan yararlanmaya açık olmayan alanlar olarak sınıflandırılmaktadır (Gül vd., 2020)(Akkemik ve ark.,2021).

Bu çalışmada, İstanbul'da yer alan aktif yeşil alanlar makine öğrenmesi teknikleri ve cbs kullanılarak nüfus yoğunluğu ile ilişkilendirmiştir. Araştırmada aktif yeşil alan grubuna girmekte olan parklar, millet bahçeleri, rekreasyon alanları, koruların dağılımı incelenmektedir. 39 ilçedeki aktif yeşil alan yeterliliği ve kent yaşamına katkıları ele alınmıştır. İstanbul'da hızlı bir şekilde artmış olan nüfus ve kentleşme, bu alanlara olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Ancak aktif yeşil alanlar ilçeler arasında dengeli dağılmamaktadır ve bu durum kişi başına düşen yeşil alan miktarındaki farklılıklar meydana getirmektedir. Kentte yaşayan insanların bu alanlara erişimini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmanın temel problemi, İstanbul'da nüfus yoğunluğu ile aktif yeşil alanların dağılımı ve yeterliliği arasında nasıl bir ilişkinin bulunduğunun ortaya konulmasıdır. Çalışmanın amacı, İstanbul'daki aktif yeşil alanların mevcut durumunu nüfus yoğunluğu verileri doğrultusunda makine öğrenmesi kullanılarak analiz etmek ve aktif yeşil alanların ilçelere göre dağılımını ve yeterlilik düzeyini değerlendirmektir. Çalışmanın sonucunda ise sürdürülebilir şehir planlamasına yönelik öneriler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

MATERYAL VE METHOD

Çalışmanın araştırma alanını İstanbul ili oluşturmaktadır. Çalışmada İstanbul'un ilçeleri değerlendirilmiştir ve Nüfus verileri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan güncel verilerden elde edilmiştir. İlçe yüzölçümü verileri resmi idari sınır verilerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Aktif yeşil alan verileri ise OpenStreetMap den Overpass Turbo platformu aracılığıyla sorgulanarak elde edilmiştir. Çalışmada aktif yeşil alan kapsamında parklar, millet bahçeleri, rekreasyon alanları, koruları dikkate alınmıştır. Elde edilen değerler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen 9 m²/kişi referans değeri esas alınarak sınıflandırılmıştır. Buna göre kişi başına aktif yeşil alan miktarı 9 m²'nin altında olan ilçeler "Yetersiz", 9 m² ve üzerinde olan ilçeler ise "Yeterli" olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada ilçelerin aktif yeşil alan yeterlilik durumlarının sınıflandırılmasında Random Forest algoritması kullanılmıştır. ML, bilgisayarların verilerden öğrenmesini sağlayan algoritmaların tasarlanması ve geliştirilmesine odaklanan bilimsel bir disiplindir. Karmaşık kalıpları tanımayı ve veri odaklı analiz yoluyla içgörüler elde etmeyi amaçlar. Büyük veri kümelerinin manuel olarak analiz edilmesi genellikle pratik olmadığından, ML tahmine dayalı modelleme için verimli bir alternatif sunar. Breiman tarafından geliştirilen RF algoritması, torbalama ve özellik seçimi tekniklerini birleştiren bir topluluk öğrenme yöntemidir. Ormandaki her karar ağacı, verilerin farklı bir önyüklemeli alt kümesi üzerinde eğitilir, bu da aşırı uyumu azaltır ve genelleme yeteneğini artırır. Bu rastgele örnekleme, model çeşitliliğini artırır ve varyansı düşürür. Her düğümde, ağaçlar arasındaki korelasyonu en aza indirerek ve gürültüye karşı sağlamlığı artırarak, bölme için rastgele bir özellik alt kümesi seçilir. Tahminler, çoğunluk oylaması (sınıflandırma) veya ortalama alma (regresyon) yoluyla toplanır, bu da bireysel ağaç hatalarını azaltır ve genel doğruluğu artırır. Böylece aktif yeşil alan yeterliliğini etkileyen değişkenlerin göreceli önemlerinin de ortaya konulması amaçlanmıştır. Modelde giriş değişkenler;İlçe nüfusu ,İlçe yüzölçümü (km²),Toplam aktif yeşil alan (m²) olarak belirlenmiştir. Modelin hedef değişkeni ise WHO kriterlerine göre oluşturulan "Yeterli" ve "Yetersiz" sınıfları oluşturmuştur. Veri seti eğitim (%80) ve test (%20) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Model eğitildikten sonra test verisi üzerinde doğruluk (Accuracy), Precision, Recall ve F1-Score performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Makine öğrenmesi tekniklerinden RF kullanılarak İstanbul ilçe özelinde aktif yeşil alan yeterlilikleri, kişi başına düşen aktif yeşil alan miktarı üzerinden değerlendirilmiştir ve WHO'nun önerdiği 9 m²/kişi standardına göre sınıflandırılmıştır. Bulgular incelediğinde ise ilçelerin büyük çoğunluğunun yetersiz sınıfına dahil olduğunu ve yalnızca sınırlı sayıda ilçenin yeterli yeşil alana sahip olduğunu göstermektedir. RF modeli ile yapılan sınıflandırma

genel olarak yüksek doğruluk göstermiştir. Ancak veri setindeki sınıf dengesizliği nedeniyle model performansının dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Sonuçlar incelendiğinde aktif yeşil alanların yalnızca toplam alanlarının değil, nüfus yoğunluğu ile beraber ele alınmasının daha anlamlı sonuçlar ortaya çıkaracağını göstermektedir. Özellikle yoğun nüfuslu ilçelerde kişi başına düşen aktif yeşil alanın düşük olması, planlamalarda nüfus odaklı yaklaşımın önemini artırdığını göstermektedir. Çalışma, CBS ve makine öğrenmesi yöntemlerinin kentsel yeşil alan analizlerinde etkili şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulguların şehir planlama süreçlerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Çalışmanın sınırlılıkları arasında OpenStreetMap verilerinin güncelliği ve eksikliği sorunları ile yalnızca WHO kriterinin kullanılması yer almaktadır. Gelecek çalışmalarda alanların azalmasına sebep olan ek faktörlerin dahil edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Akkemik, Ü., Tolunay, D., Erdönmez, C., Atmış, E., & Kurdoğlu, O. (2021). İstanbul'un yeşil alan sorunları çerçevesinde yeşil duvarların irdelenmesi ve öneriler. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 23(1), 337-345.

Bille, R. A., Jensen, K. E., & Buitenwerf, R. (2023). Global patterns in urban green space are strongly linked to human development and population density. Urban Forestry & Urban Greening, 86, 127980.

Frumkin, H. (2002). Urban sprawl and public health. Public Health Reports, 117(3), 201-217.

Gül, A., Dinç, G., Akın, T., & Koçak, A. İ. (2020). Kentsel açık ve yeşil alanların mevcut yasal durumu ve uygulamadaki sorunlar. İdealkent Kent Araştırmaları Dergisi, 11, 1281–1312.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (t.y.). İstanbul açık ve yeşil alan yaklaşımı: Strateji raporu. YAYSİS. https://yaysis.istanbul/storage/files/raporlar/5_STRATEJ%C4%B0%20RAPORU.pdf

Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. Journal of Environmental Management, 197, 522-538.

Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. Building and Environment, 46(11), 2186-2194.

OpenStreetMap Contributors. (2026). Overpass Turbo: Web-based data filtering tool for OpenStreetMap. https://www.overpass-turbo.eu/

Özgeriş, M. (2023). Aktif yeşil alanların niceliksel ve niteliksel analizi: Erzurum Adnan Menderes Mahallesi örneği. JENAS Journal of Environmental and Natural Studies, 5(1), 68-84.

Rocque, R. J., Beaudoin, C., Ndjaboue, R., Cameron, L., Poirier-Bergeron, L., Poulin-Rheault, R. A., … Witteman, H. O. (2021). Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. BMJ Open, 11(6), e046333.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2026). Resmi istatistikler ve veri tabanı. https://www.tuik.gov.tr

Yılmaz, M. (2025). İstanbul Düzey-1 Bölgesinde 2007–2024 Arasında Nüfus Gelişimi ve Bu Gelişimi Etkileyen Faktörler / Population Growth and Factors Affecting This Growth in Istanbul Level-1 Region Between 2007–2024. 5th International Paris

Social Science Congress, 20–22 December 2025, Paris, France. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Türkçe ve Sosyal Bilimler Eğitimi Bölümü.

BİR BİLGİ GRAFI TAMAMLAMA PROBLEMİ OLARAK 3B BİNA MODELLERİNİN GEOMETRİK İYİLEŞTİRMESİ

Alper Tunga AKIN[1], Çetin CÖMERT[1]

[1]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, {alpertunga;ccomert}@ktu.edu.tr

ÖZET

Üç boyutlu kent modelleri (3BKM); kentsel planlama, enerji değerlendirmesi, güneşlenme ve görünürlük analizleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, afet yönetimi ve sayısal ikiz uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Biljecki vd., 2015). Bu modellerin söz konusu analizlerde güvenilir biçimde kullanılabilmesi, yalnızca görsel olarak makul görünmelerine değil, aynı zamanda geometrik ve semantik açıdan tutarlı olmalarına bağlıdır. Bununla birlikte, gerçek dünya veri kümelerinde eksik yüzeyler, kendi kendiyle kesişen geometriler, hatalı yüzey yönelimleri, manifold olmayan kenarlar ve yanlış semantik sınıflandırmalar gibi farklı hata türleri sıklıkla görülmektedir (Biljecki vd., 2016). Bu nedenle, hatalı modellerin analiz süreçlerinden önce iyileştirilmesi, 3BKM alanının temel araştırma konularından biri hâline gelmiştir.

Geometrik tutarlılığın kontrolü, 3B modeli oluşturan geometrilerin ISO:19107 Coğrafi Bilgi – Uzamsal Şemasındaki (ISO, 2019) tanımlara uygunluğunun kontrolünü ifade eder ve bir 3B bina objesinin geometrik iyileştirmesi ise, tanıma aykırı geometrilerin bu şemadaki tanımlara uygun hale getirilmesidir. Mevcut geometrik iyileştirme yöntemleri genel olarak lokal ve global yöntemler olmak üzere iki grupta ele alınabilir. Lokal yöntemler, model üzerindeki hataları tespit ederek yalnızca sorunlu bölgelere müdahale ederler. Bu yaklaşımın başlıca avantajı, girdi geometrinin ve mevcut semantik tanımlamaların büyük ölçüde korunabilmesidir. Sınır halkalarının belirlenmesi, köşe birleştirme, yeniden üçgenleme ve delik kapatma gibi kural tabanlı işlemler bu gruba girmektedir (Bogdahn & Coors, 2010; Zhao vd., 2013; Alam vd., 2014; Rashidan vd., 2022; Gao vd., 2024).

Söz edilen işlemler, hata barındıran yüzeye komşu olan yüzeylerde yeni bir öz-kesişim, düzlemsizlik ya da topolojik tutarsızlık oluşturabilmektedir. Özellikle birbirine yakın koordinatlar üzerinde yürütülen kayan noktalı (floating point) aritmetik, ve tolerans değer, tabanlı kararlar, başka bir hatayı tetikleyebilmekte ve iyileştirme süreci zincirleme, hatta yinelemeli biçimde yeni hatalar üretebilmektedir (Attene vd., 2013). Birden fazla hata türünün aynı yapıda bulunduğu objelerde bu sorun daha da belirgin hâle gelmektedir (Biljecki vd., 2016). Dolayısıyla yerel yöntemler, sınırlı, objenin geri kalanından net biçimde ayrıştırılabilen, hatalarda etkili olmakla birlikte, hataların söz edildiği gibi iç içe geçebileceği modellerde geometrik geçerliliği garanti etmekte zorlanmaktadır.

Global yöntemler ise hatalı yüzeyleri ayrı ayrı düzeltmek yerine, giriş modelinden hareketle yeni ve geometrik olarak geçerli bir dış kabuk üretmektedir. Vokselleştirme, morfolojik işlemler, shrink-wrapping, alpha-wrapping ve kinetik bölümleme gibi yaklaşımlar bu sınıfta değerlendirilebilir (Nooruddin & Turk, 2003; Ju, 2004; Mulder vd., 2015; Steuer vd., 2015; Zhao vd., 2018; Portaneri vd., 2022; Yu vd., 2022). Bu yöntemler, giriş modelindeki hataların türünden ve konumundan görece bağımsız biçimde kapalı ve manifold bir kabuk oluşturabilmeleri bakımından önemli bir üstünlüğe sahiptir.

Ancak global iyileştirme, sınır temsilini yeniden üretilmiş bir yüzeyle değiştirdiği için bazı önemli kayıplara yol açabilmektedir. Vokselleştirme çözünürlüğü, morfolojik kapatma işlemleri veya belirli bir ofset mesafesiyle çalışan sarma (wrapping) yöntemleri, model hacminin özgün sınırlara göre değişiklik göstermesine neden olabilir. Benzer biçimde, yeniden oluşturulan yüzey giriş geometrisini, yüksek başarı ile olsa dahi, yaklaşık olarak temsil ettiğinden yatay veya düşey doğrultuda geometrik yer değiştirmeler, diğer bir ifadeyle deplasmanlar ortaya çıkabilir. Küçük mimari ayrıntılar düzleştirilebilir, eğimli yüzeyler basamaklı yapılara dönüşebilir ve birbirine yakın bileşenler tek bir hacim altında birleşebilir.

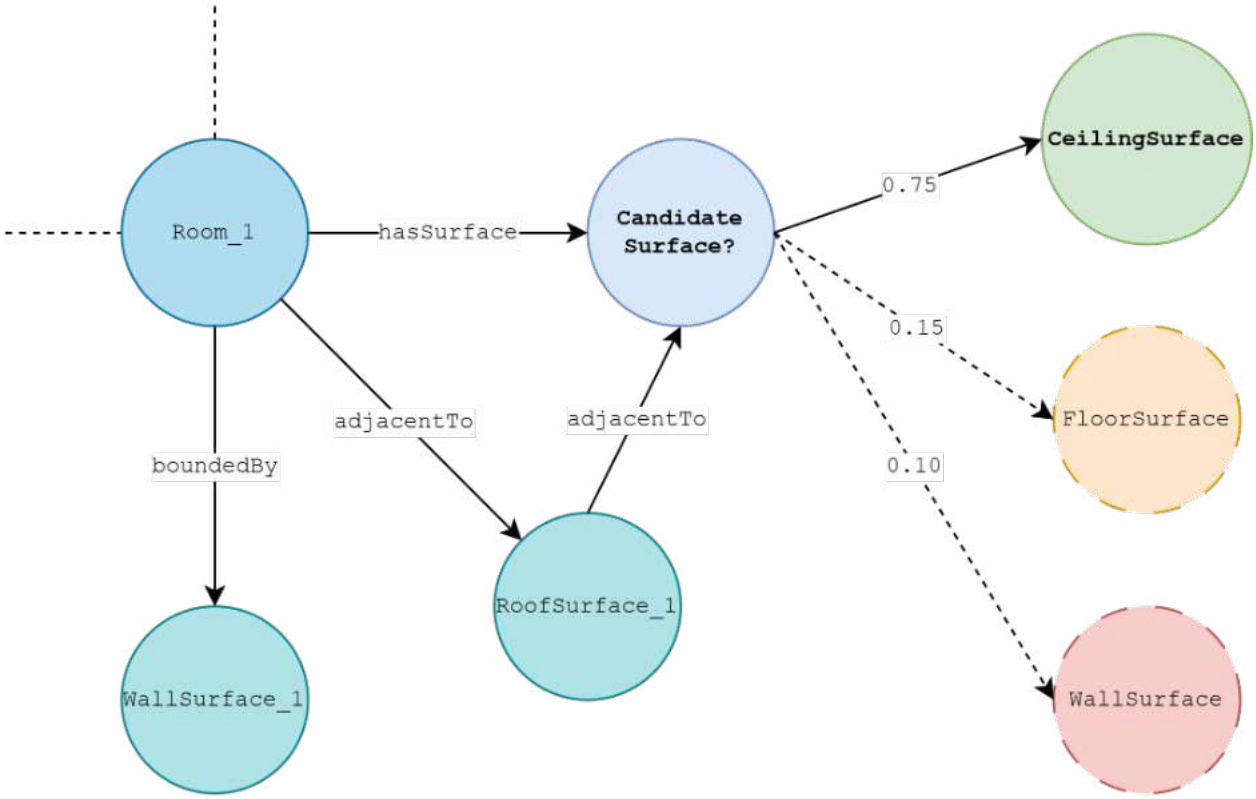
Global yöntemlerin bir diğer temel sınırlılığı semantik kayıptır. Yeniden kabuk oluşturma sırasında girdi yüzeyler ile üretilen yüzeyler arasında, üçgen sayısı değişeceğinden, bire bir eşleşme olmamakta ve çatı, duvar, zemin, açıklık veya iç mekân sınırı gibi tematik sınıflar doğrudan yeni geometriye aktarılamamaktadır.Semantik sınıfların yüzey normali, konum, eğim veya komşuluk gibi geometrik ölçütlerden yararlanılarak yeniden atanması mümkün olsa da bu işlem, özellikle ayrıntılı yapı modellerinde belirsizlik taşımaktadır. Örneğin, duvar yüzeyleri üzerinde yer alan kapı ve pencere gibi açıklık bileşenleri aynı ya da birbirine oldukça yakın normal yönlerine sahip olabilir ve doğrudan mekânsal komşuluk içinde bulunabilir. Bu nedenle yüzey normali ve konum gibi tekil geometrik göstergeler, farklı semantik sınıfların güvenilir biçimde ayrıştırılması için tek başına yeterli olmayabilir; bileşenler arasındaki yapısal ve bağlamsal ilişkilerin de değerlendirilmesi gerekir (Gröger et al., 2012; Selvaraju et al., 2021). Böylece geometrik geçerlilik elde edilebilirken özgün geometrinin konumu, hacmi ve semantik yapısı kısmen kaybedilebilmektedir.

Lokal ve global yöntemlerin bu tamamlayıcı fakat birbiriyle çelişen özellikleri, geometrik iyileştirmenin yalnızca yüzey üretme veya hata kapatma problemi olarak ele alınmasının yeterli olmadığını göstermektedir. İyileştirme sürecinin geometrik biçimin yanı sıra yapı bileşenleri arasındaki topolojiyi ve semantik ilişkileri de dikkate alması gerekmektedir. Bu çalışma, söz konusu gereksinimden hareketle, bilgi grafiği gömme (knowledge graph embedding) yöntemlerine dayanan ve farklı ayrıntı düzeylerine uyarlanabilecek genelleştirilebilir bir geometrik iyileştirme çerçevesi önermektedir.

Önerilen çerçevede 3B bina modeli, geometrik nesnelerin ve aralarındaki ilişkilerin birlikte temsil edildiği bir bilgi grafına dönüştürülmektedir. Yapılar, yapı bileşenleri, yüzeyler ve diğer uzamsal nesneler grafın düğümlerini (nodes); içerme, sınırlama, komşuluk, kesişme, bağlanma ve semantik sınıfa ait olma gibi ilişkiler ise grafın kenarlarını (edges) oluşturmaktadır. Koordinatlar, yüzey normalleri, alan, eğim, yönelim ve geometrik tolerans gibi nicel bilgiler düğüm veya ilişki öznitelikleri olarak temsil edilebilir. Böylece model yalnızca üçgenlerden oluşan bir ağ olarak değil, geometrik ve semantik bağlamı tanımlanmış ilişkisel bir yapı olarak ele alınır.

Bilgi grafiği gömme yöntemleri, düğümleri ve ilişkileri düşük boyutlu sürekli vektör uzaylarında temsil ederek graf içinde tekrar eden örüntülerin öğrenilmesini sağlar. Bu temsiller bağlantı tahmini, eksik bilgi tamamlama ve tutarsız ilişkilerin belirlenmesi gibi görevlerde kullanılabilmektedir (Cao vd., 2024). Önerilen senaryoda mevcut grafın belirli ilişkileri eğitim sırasında kontrollü biçimde maskelenerek model öz-denetimli olarak eğitilebilir. Eğitilen gömme modeli daha sonra eksik bir yüzeyin hangi bileşenleri sınırlaması gerektiğini, hangi yüzeylerle komşu olduğunu veya hangi semantik sınıfa ait olabileceğini olasılık puanlarıyla tahmin eder.

Bu yaklaşımda geometrik iyileştirme yalnızca yeni üçgenlerin üretilmesi olarak değil, eksik veya tutarsız ilişkilerin tamamlanması olarak yeniden formüle edilmektedir. Örneğin açık bir aday yüzey için model; yüzeyin hangi nesneye ait olduğu, komşu yüzeylerle nasıl ilişkilendiği ve hangi semantik sınıf altında tanımlanması gerektiği konusunda aday üçlüler (candidate triples) üretebilir (Şekil 1). Böylece iyileştirme kararı yalnızca en yakın köşelere veya yerel yüzey normallerine değil, veri kümesinde öğrenilmiş daha geniş yapısal örüntülere dayanabilir.



Şekil 1. Bir aday yüzeye semantik sınıf atanmasına yönelik temsili bilgi grafı tamamlama senaryosu. Buradaki çıkarım şu şekilde ifade edilebilir: "Aday yüzey aynı anda hem Room hem de RoofSurface ile komşuysa, büyük olasılıkla CeilingSurface sınıfındadır."

Bu çerçeve, lokal yöntemlerde görülebilen zincirleme düzenlemelerin sayısını azaltma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda tüm modelin yeniden ağlaştırılmasını gerektirmediğinden, global yöntemlerde ortaya çıkabilen hacimsel genişleme, deplasman ve semantik kayıp risklerini de sınırlandırabilir. Modelin geçerli bölümleri korunurken yalnızca eksik veya tutarsız olduğu belirlenen bileşenler üzerinde işlem yapılması, özgün yapısal görünümün daha yüksek oranda korunmasını sağlayabilir.

Önerilen yaklaşımın başarısı, eğitim verisinin çeşitliliği ve grafın temsil gücüyle doğrudan ilişkilidir. Belirli geometrik biçimlerin veya semantik sınıfların veri kümesinde yeterince temsil edilmemesi, tahminlerin baskın örüntülere yönelmesine neden olabilir. Benzer biçimde, farklı veri üretim süreçlerinden kaynaklanan heterojenlikler aynı ilişkinin farklı biçimlerde kodlanmasına yol açabilir. Bu nedenle ontoloji uyumu, sınıf dengesizliği, negatif örnekleme stratejisi ve eğitim-test ayrımının dikkatli biçimde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca gömme modellerinin ürettiği sonuçlar kesin kurallardan ziyade güven puanlarına dayandığından, hangi tahminlerin iyileştirilmiş modele kabul edileceğini belirleyecek deterministik mekanizmalara ihtiyaç vardır (Zamini vd., 2022).

Sonuç olarak, graf tamamlama, mevcut lokal ve global geometrik iyileştirme yöntemlerinin doğrudan yerine geçecek bir çözüm olma potansiyeli taşımaktadır. Bu yapı; özgün geometrinin ve semantiğin korunması, zincirleme sayısal hataların azaltılması ve bütünüyle yeniden oluşturulan kabukların neden olduğu hacimsel genişleme ile deplasmanın sınırlandırılması açısından umut verici bir araştırma yönü sunmaktadır. Gelecek çalışma hedefleri arasında, yöntemin farklı detay seviyelerinde ve farklı boyutlarda kent modelleriyle denenmesi ve sonuçların mevcut yöntemler ile kapsamlı kıyaslaması bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B kent modelleri, geometrik iyileştirme, bilgi grafı, bilgi grafı gömme, graf tamamlama

KAYNAKÇA

Alam, N., Wagner, D., Wewetzer, M., von Falkenhausen, J., Coors, V. & Pries, M. (2014). Towards automatic validation and healing of CityGML models for geometric and semantic consistency. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 77–91.

Attene, M., Campen, M. & Kobbelt, L. (2013). Polygon mesh repairing. ACM Computing Surveys, 45(2), 1–33.

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4), 2842-2889.

Biljecki, F., Ledoux, H., Du, X., Stoter, J., Soon, K. H. & Khoo, V. (2016). The most common geometric and semantic errors in CityGML datasets. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 13–22.

Bogdahn, J. & Coors, V. (2010). Towards an automated healing of 3D urban models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-4/W15, 13–17.

Cao, J., Fang, J., Meng, Z. & Liang, S. (2024). Knowledge graph embedding: A survey from the perspective of representation spaces. ACM Computing Surveys, 56(6), 1–42.

Gao, W., Peters, R., Ledoux, H. & Stoter, J. (2024). Filling holes in LoD2 building models. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 171–177.

Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0. Open Geospatial Consortium, OGC 12-019.

International Organization for Standardization. (2019). ISO 19107:2019 Geographic information—Spatial schema. ISO.

Ju, T. (2004). Robust repair of polygonal models. ACM Transactions on Graphics, 23(3), 888–895.

Mulder, D., Stoter, J., Ledoux, H. & Nourian, P. (2015). Automatic repair of 3D city building models using a voxel-based repair method.

Nooruddin, F. S. & Turk, G. (2003). Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 9(2), 191–205.

Portaneri, C., Rouxel-Labbé, M., Hemmer, M., Cohen-Steiner, D. & Alliez, P. (2022). Alpha wrapping with an offset. ACM Transactions on Graphics, 41(4), 1–22.

Rashidan, H., Abdul Rahman, A., Musliman, I. A. & Buyuksalih, G. (2022). Triangular mesh approach for automatic repair of missing surfaces of LoD2 building models. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-4/W3-2021, 281–286.

Selvaraju, P., Nabail, M., Loizou, M., Maslioukova, M., Averkiou, M., Andreou, A., Chaudhuri, S., & Kalogerakis, E. (2021). BuildingNet: Learning to label 3D buildings. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision.

Steuer, H., Machl, T., Sindram, M., Liebel, L. & Kolbe, T. H. (2015). Voluminator—Approximating the volume of 3D buildings to overcome topological errors. In F. Bação, M. Y. Santos ve M. Painho (Eds.), AGILE 2015: Geographic Information Science as an Enabler of Smarter Cities and Communities (ss. 343–362). Springer.

Yu, M., Lafarge, F., Oesau, S. & Hilaire, B. (2022). Repairing geometric errors in 3D urban models with kinetic data structures. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 192, 315–326.

Zamini, M., Reza, H. & Rabiei, M. (2022). A review of knowledge graph completion. Information, 13(8), 396.

Zhao, Z., Ledoux, H. & Stoter, J. (2013). Automatic repair of CityGML LoD2 buildings using shrink-wrapping. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-2/W1, 309–317.

Zhao, J., Ledoux, H., Stoter, J. & Feng, T. (2018). HSW: Heuristic shrink-wrapping for automatically repairing solid-based CityGML LOD2 building models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 289–304.

GEOMETRIC HEALING OF 3D BUILDING MODELS AS A KNOWLEDGE GRAPH COMPLETION PROBLEM

Alper Tunga AKIN[1], Çetin CÖMERT[1]

[1]Karadeniz Technical University, Department of Geomatics Engineering, 61080 Ortahisar, Trabzon, Türkiye, {alpertunga;ccomert}@ktu.edu.tr

ABSTRACT

Three-dimensional city models (3DCMs) are used in a broad range of applications, including urban planning, energy assessment, solar exposure and visibility analyses, computational fluid dynamics, disaster management, and digital twins (Biljecki et al., 2015). Their reliable use in such analyses depends not only on visual plausibility but also on geometric and semantic validity. Nevertheless, real-world datasets frequently contain multiple error types, including missing surfaces, self-intersecting geometries, incorrectly oriented surfaces, non-manifold edges, and incorrect semantic classifications (Biljecki et al., 2016). Consequently, healing defective models before analytical processing has become a central research topic in the field of 3DCMs.

Geometric validity checking refers to verifying whether the geometries constituting a 3D model conform to the definitions of ISO 19107:2019, Geographic information—Spatial schema (ISO, 2019); geometric healing of a 3D building object, in turn, involves bringing non-conforming geometries into compliance with these definitions. Existing geometric healing approaches can broadly be classified as local and global methods. Local methods detect defects in the model and intervene only in the affected regions. Their principal advantage is that the input geometry and its existing semantic definitions can largely be preserved. Rule-based operations such as boundary-loop detection, vertex merging, retriangulation, and hole filling fall into this category (Bogdahn & Coors, 2010; Zhao et al., 2013; Alam et al., 2014; Rashidan et al., 2022; Gao et al., 2024).

These operations can introduce new self-intersections, non-planarities, or topological inconsistencies in surfaces adjacent to the defective one. In particular, floating-point arithmetic involving closely spaced coordinates and tolerance-based decisions may trigger additional errors, causing the healing process to generate new defects in a cascading or even recursive manner (Attene et al., 2013). The issue becomes more pronounced in objects where multiple error types coexist within the same structure (Biljecki et al., 2016). Local methods are therefore effective for limited defects that can be clearly isolated from the rest of the object, but they struggle to guarantee geometric validity in models where defects are structurally intertwined.

Global methods, by contrast, generate a new, geometrically valid outer shell from the input model rather than repairing defective surfaces individually. Approaches such as voxelization, morphological operations, shrink-wrapping, alpha-wrapping, and kinetic partitioning belong to this class (Nooruddin & Turk, 2003; Ju, 2004; Mulder et al., 2015; Steuer et al., 2015; Zhao et al., 2018; Portaneri et al., 2022; Yu et al., 2022). Their main advantage is the ability to construct closed, manifold shells relatively independently of the type and location of defects in the input model.

However, because global healing replaces the original boundary representation with a reconstructed surface, it may entail substantial losses. Voxel resolution, morphological closing operations, and wrapping techniques based on a prescribed offset distance can cause the model volume to deviate from its original boundaries. Likewise, because the reconstructed surface approximates the input geometry—even when the approximation is highly accurate—geometric displacements may arise in the horizontal or vertical directions. Small architectural details may be smoothed out, inclined surfaces may become stair-stepped, and closely spaced components may merge into a single volume.

Another fundamental limitation of global methods is semantic loss. During shell reconstruction, changes in the number of triangles prevent a one-to-one correspondence between the input and generated surfaces; consequently, thematic classes such as roof, wall, ground, opening, or interior boundary cannot be transferred directly to the new geometry. Although semantic classes can be reassigned using geometric criteria such as surface normals, position, slope, or adjacency, the process remains ambiguous, particularly in detailed building models. For example, opening components such as doors and windows embedded in wall surfaces may have identical or very similar normal directions and may also be in direct spatial proximity. Individual geometric indicators such as surface normal and position may therefore be insufficient on their own to distinguish semantic classes reliably; the structural and contextual relationships among components must also be considered (Gröger et al., 2012; Selvaraju et al., 2021). Thus, while geometric validity may be achieved, the position, volume, and semantic structure of the original geometry may be partially lost.

These complementary yet conflicting characteristics of local and global methods indicate that geometric healing cannot be treated solely as a problem of surface generation or defect closure. In addition to geometric form, the healing process must account for the topology and semantic relationships among building components. Motivated by this need, this study proposes a generalizable geometric healing framework based on knowledge graph embedding methods that can be adapted to different levels of detail.

In the proposed framework, a 3D building model is transformed into a knowledge graph in which geometric objects and their relationships are represented jointly. Buildings, building components, surfaces, and other spatial objects form the nodes of the graph, while relationships such as containment, bounding, adjacency, intersection, connectivity, and semantic class membership form its edges. Quantitative information such as coordinates, surface normals, area, slope, orientation, and geometric tolerances can be represented as node or relation attributes. The model is thus treated not merely as a triangle mesh, but as a relational structure with an explicitly defined geometric and semantic context.

Knowledge graph embedding methods encode nodes and relations in low-dimensional continuous vector spaces, enabling recurring patterns within the graph to be learned. These representations can support tasks such as link prediction, completion of missing information, and identification of inconsistent relationships (Cao et al., 2024). In the proposed scenario, selected relationships in the existing graph can be deliberately masked during training, allowing the model to be trained in a self-supervised manner. The trained embedding model can then assign probability scores to predictions concerning which components a missing surface should bound, which surfaces it should be adjacent to, or which semantic class it should belong to.

In this approach, geometric healing is reformulated not merely as the generation of new triangles, but as the completion of missing or inconsistent relationships. For an open candidate surface, for example, the model can generate candidate triples describing the object to which the surface belongs, its relationships with neighbouring surfaces, and the semantic class under which it should be defined (Figure 1). The healing decision can therefore draw not only on the nearest vertices or local surface normals, but also on broader structural patterns learned from the dataset.

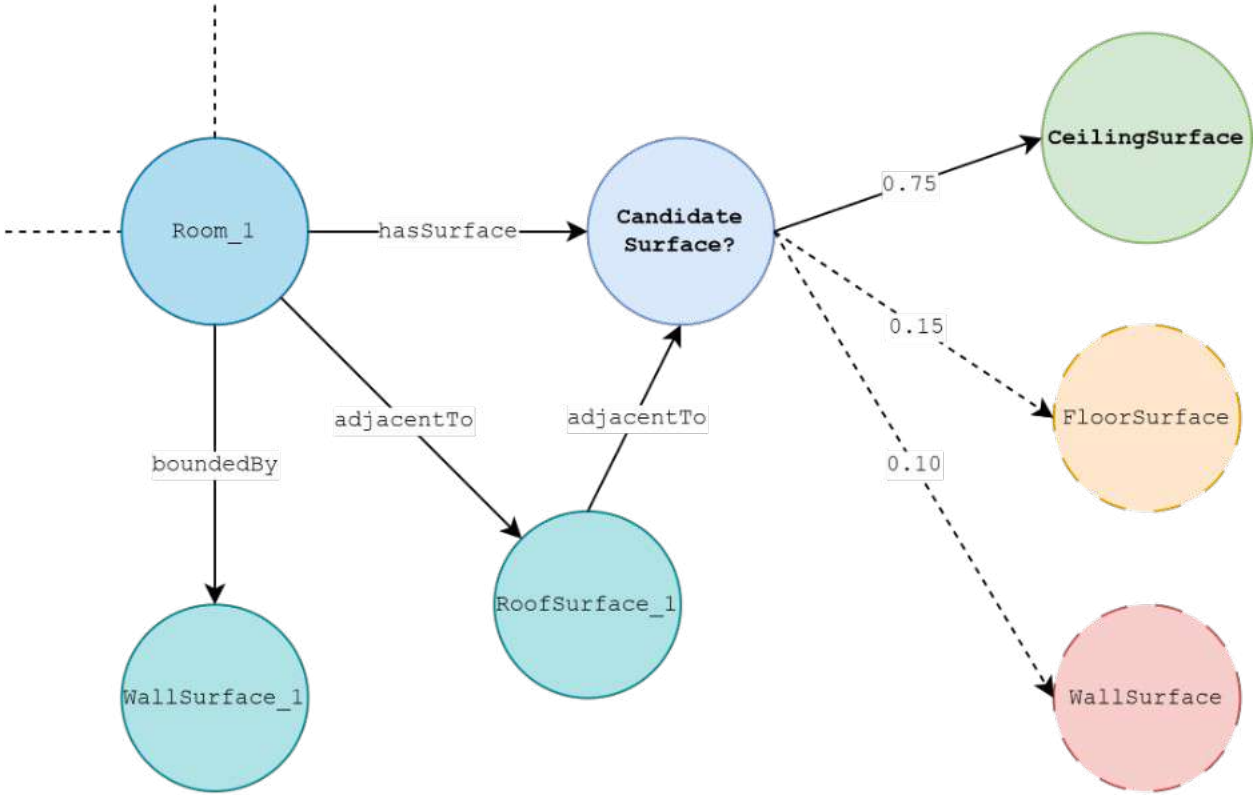


Figure 1. Illustrative knowledge graph completion scenario for assigning a semantic class to a candidate surface. The inference can be expressed as follows: "If the candidate surface is adjacent to both a Room and a RoofSurface, it is most likely a CeilingSurface."

This framework has the potential to reduce the number of cascading modifications observed in local methods. Because it does not require the entire model to be remeshed, it may also limit the risks of volumetric expansion, displacement, and semantic loss associated with global methods. Processing only components identified as missing or inconsistent while retaining valid portions of the model may preserve the original structural appearance more effectively.

The success of the proposed approach is directly related to the diversity of the training data and the representational capacity of the graph. If particular geometric forms or semantic classes are insufficiently represented in the dataset, predictions may become biased toward dominant patterns. Likewise, heterogeneity arising from different data-production processes may cause the same relationship to be encoded in different ways. Ontology alignment, class imbalance, negative sampling strategy, and the training-test split must therefore be designed carefully. Moreover, because embedding models produce confidence scores rather than deterministic rules, deterministic mechanisms are needed to determine which predictions can be incorporated into the healed model (Zamini et al., 2022).

In conclusion, graph completion has the potential to serve as a direct alternative to existing local and global geometric healing methods. This approach offers a promising research direction for preserving the original geometry and semantics, reducing cascading numerical errors, and limiting the volumetric expansion and displacement caused by fully reconstructed shells. Future work will include testing the method on city models at different levels of detail and scales, followed by a comprehensive comparison of its results with those produced by existing methods.

Keywords: 3D city models, geometric healing, knowledge graph, knowledge graph embedding, graph completion

REFERENCES

Alam, N., Wagner, D., Wewetzer, M., von Falkenhausen, J., Coors, V. & Pries, M. (2014). Towards automatic validation and healing of CityGML models for geometric and semantic consistency. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 77–91.

Attene, M., Campen, M. & Kobbelt, L. (2013). Polygon mesh repairing. ACM Computing Surveys, 45(2), 1–33.

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4), 2842-2889.

Biljecki, F., Ledoux, H., Du, X., Stoter, J., Soon, K. H. & Khoo, V. (2016). The most common geometric and semantic errors in CityGML datasets. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 13–22.

Bogdahn, J. & Coors, V. (2010). Towards an automated healing of 3D urban models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-4/W15, 13–17.

Cao, J., Fang, J., Meng, Z. & Liang, S. (2024). Knowledge graph embedding: A survey from the perspective of representation spaces. ACM Computing Surveys, 56(6), 1–42.

Gao, W., Peters, R., Ledoux, H. & Stoter, J. (2024). Filling holes in LoD2 building models. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 171–177.

Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0. Open Geospatial Consortium, OGC 12-019.

International Organization for Standardization. (2019). ISO 19107:2019 Geographic information—Spatial schema. ISO.

Ju, T. (2004). Robust repair of polygonal models. ACM Transactions on Graphics, 23(3), 888–895.

Mulder, D., Stoter, J., Ledoux, H. & Nourian, P. (2015). Automatic repair of 3D city building models using a voxel-based repair method.

Nooruddin, F. S. & Turk, G. (2003). Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 9(2), 191–205.

Portaneri, C., Rouxel-Labbé, M., Hemmer, M., Cohen-Steiner, D. & Alliez, P. (2022). Alpha wrapping with an offset. ACM Transactions on Graphics, 41(4), 1–22.

Rashidan, H., Abdul Rahman, A., Musliman, I. A. & Buyuksalih, G. (2022). Triangular mesh approach for automatic repair of missing surfaces of LoD2 building models. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-4/W3-2021, 281–286.

Selvaraju, P., Nabail, M., Loizou, M., Maslioukova, M., Averkiou, M., Andreou, A., Chaudhuri, S., & Kalogerakis, E. (2021). BuildingNet: Learning to label 3D buildings. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision.

Steuer, H., Machl, T., Sindram, M., Liebel, L. & Kolbe, T. H. (2015). Voluminator—Approximating the volume of 3D buildings to overcome topological errors. In F. Bação, M. Y. Santos ve M. Painho (Eds.), AGILE 2015: Geographic Information Science as an Enabler of Smarter Cities and Communities (ss. 343–362). Springer.

Yu, M., Lafarge, F., Oesau, S. & Hilaire, B. (2022). Repairing geometric errors in 3D urban models with kinetic data structures. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 192, 315–326.

Zamini, M., Reza, H. & Rabiei, M. (2022). A review of knowledge graph completion. Information, 13(8), 396.

Zhao, Z., Ledoux, H. & Stoter, J. (2013). Automatic repair of CityGML LoD2 buildings using shrink-wrapping. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-2/W1, 309–317.

Zhao, J., Ledoux, H., Stoter, J. & Feng, T. (2018). HSW: Heuristic shrink-wrapping for automatically repairing solid-based CityGML LOD2 building models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 289–304.

LA PALMA VOLKANİK PATLAMASI SONRASI ARAZİ ÖRTÜSÜ VE KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Sidal YILDIRIM[1], İlktan GAYRETOĞLU[1], Zehra ÇETİN[2]

[1]Lisans Öğr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, sidal.yildirim@std.yildiz.edu.tr, ilktan.gayretoğlu@std.yildiz.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, zerisir@yildiz.edu.tr

ÖZET

Volkanik patlamalar, yeryüzü topografyası ve kıyı çizgisinde ani ve kalıcı değişimlere yol açan dinamik jeomorfolojik olaylardır. Patlama sonrası oluşan bu değişimlerin yersel ölçüm yöntemleriyle izlenmesi, zaman ve maliyet gereksinimlerinin yanı sıra can güvenliği riskleri nedeniyle çoğu zaman uygulanabilir değildir. Bu çalışmada, 2021 yılında La Palma Adası'nda meydana gelen volkanik patlamanın karasal alanlar ve güneybatı kıyı şeridi üzerindeki etkileri Uzaktan Algılama (UA) teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Amaç, afetin tetiklediği arazi örtüsü ve kıyı çizgisi değişimlerini Landsat 8 uydu görüntüleri ve Google Earth Engine (GEE) platformunu kullanarak Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmaları ile karşılaştırmalı olarak analiz etmektir. Doğruluk analizi sonuçlarına göre, RO sınıflandırmaları patlama öncesi ve sonrası için sırasıyla %90,32 ve %89,15; DVM sınıflandırmaları ise sırasıyla %83,87 ve %80,68 Genel Doğruluk (GD) değerlerine ulaşmıştır. Sınıflandırma Sonrası Karşılaştırma (Post-Classification Comparison – PCC) yöntemi sonuçlarına göre RO algoritması tarım ve su gibi spektral heterojenliği yüksek alanlardaki dönüşümleri daha hassas belirleyerek sırasıyla 1.573,29 ha ve 11,34 ha değişim hesaplamıştır. DVM algoritması ise orman ve yerleşim alanlarındaki keskin sınırları yakalayarak sırasıyla 10.417,59 ha ve 1.421,10 ha değişim tespit etmiştir. Özellikle kıyı şeridinde belirlenen değişimler, yeni lav deltalarının mekânsal yayılımını ve kıyı çizgisindeki radikal değişimi ortaya koymuştur. Bu çalışmada elde edilen bulgular, uzaktan algılama ve makine öğrenme tabanlı analizlerin volkanik afetlerin neden olduğu arazi örtüsü ve kıyı çizgisi değişimlerinin izlenmesinde oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: değişim analizi, Destek Vektör Makineleri, Google Earth Engine, makine öğrenmesi, Rastgele Orman

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF LAND COVER AND COASTLINE CHANGES FOLLOWING THE LA PALMA VOLCANIC ERUPTION USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Volcanic eruptions are dynamic geomorphological events that cause abrupt and permanent changes in topography and coastlines. Monitoring these post-eruption changes using conventional field survey methods is often impractical due to time and cost constraints, as well as safety risks. In this study, the impacts of the 2021 volcanic eruption on La Palma Island on terrestrial areas and the southwestern coastline were investigated using Remote Sensing (RS) techniques. This study aimed to comparatively analyze disaster-induced land cover and coastline changes using Landsat 8 satellite imagery and the Google Earth Engine (GEE) platform with the Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM) algorithms. According to the accuracy assessment results, the RF classifications achieved Overall Accuracy (OA) values of 90.32% and 89.15% for the pre- and post-eruption periods, respectively, whereas the SVM classifications achieved OA values of 83.87% and 80.68%, respectively. According to the Post-Classification Comparison (PCC) results, the Random Forest (RF) algorithm estimated changes of 1,573.29 ha and 11.34 ha in agricultural and water areas, respectively, by more precisely delineating changes in spectrally heterogeneous areas. The Support Vector Machine (SVM) algorithm detected changes of 10,417.59 ha and 1,421.10 ha in forest and settlement areas, respectively, by capturing sharp class boundaries. The detected changes, particularly along the coastline, revealed the spatial expansion of newly formed lava deltas and the significant alteration of the coastline. The findings of this study demonstrate that remote sensing and machine learning-based analyses are highly effective in monitoring land cover and coastline changes caused by volcanic eruptions.

Keywords: change detection, Google Earth Engine, machine learning, Random Forest, Support Vector Machine

1. GİRİŞ

Volkanik patlamalar, yeryüzü topografyasını ve kıyı çizgisini aniden değiştiren jeomorfolojik süreçlerdir (Thouret, 1999). Afet sahalarında can güvenliği riskleri nedeniyle yersel ölçümler lojistik olarak imkânsızken, Uzaktan Algılama (UA) teknolojileri güvenli ve geriye dönük veri analizi imkânı sunar (Cigna vd., 2020). Bununla birlikte, volkanik patlama sonrasında oluşan aktif lav akıntıları, kül birikimleri, yanmış alanlar ve yeni oluşan yüzeyler gibi karmaşık arazi örtüsü sınıflarının ayrıştırılmasında geleneksel istatistiksel sınıflandırma yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Buna karşılık, Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmaları; yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamaları, doğrusal olmayan karmaşık veri yapılarının modellenmesindeki başarıları ve gürültülü verilere karşı dayanıklılıkları nedeniyle uzaktan algılama çalışmalarında yaygın olarak tercih edilen

makine öğrenmesi yöntemleri arasında yer almaktadır (Mountrakis vd., 2011; Belgiu ve Drăguţ, 2016; Sheykhmousa vd., 2020).

Uzaktan algılama ve makine öğrenmesi yöntemlerinin doğal afetlerin izlenmesi ve etkilerinin belirlenmesindeki kullanımına ilişkin çalışmalar literatürde geniş yer bulmaktadır. 2021 yılında İspanya'nın La Palma Adası'nda meydana gelen volkanik patlama, afetin geniş kapsamlı etkileri ve açık erişimli uydu verilerinin sağladığı olanaklar nedeniyle çok sayıda araştırmaya konu olmuştur. Akyürek (2022), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve yüksek çözünürlüklü uydu verilerinden yararlanarak volkanik patlamanın yerleşim alanları ve ulaşım altyapısı üzerindeki etkilerini incelemiş ve lav akıntılarının yaklaşık 1042 hektarlık bir alana yayıldığını ortaya koymuştur. Aynı yıl Kyriou ve Nikolakopoulos (2022), Sentinel-1 verilerini kullanarak InSAR ve "offset tracking" yöntemleriyle La Palma'daki lav akıntılarının gelişimini ve hızını incelemiştir. Çalışmada, lav akıntılarının izlenmesinde "offset tracking" yönteminin etkili olduğu ve lav akış hızlarının 2 m/gün'ün üzerine çıktığı belirlenmiştir. Caballero vd. (2022), Sentinel-2 ve Landsat-8 uydu verilerini kullanarak 2021 La Palma volkanik patlaması sırasında oluşan yeni lav deltasının kısa ve orta vadeli gelişimini ve kıyı suları üzerindeki etkilerini incelemiş; lav deltasının oluşumu ve buna bağlı olarak kıyı sularında meydana gelen bulanıklık değişimlerini ortaya koymuştur. Weiser (2023) ise volkanik gazların orman ekosistemleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla Sentinel-2 zaman serisi verilerini kullanmış ve patlama merkezinden yaklaşık 7 km'ye kadar uzanan alanda meydana gelen klorotik bitki hasarını haritalandırmıştır. Bu çalışmalar, uzaktan algılama verilerinin volkanik afetlerin mekânsal etkilerinin belirlenmesi, lav akıntılarının ve yeni oluşan kıyı alanlarının izlenmesi, hasar alanlarının haritalanması ve ekosistem üzerindeki etkilerin değerlendirilmesinde etkin bir araç olduğunu açıkça göstermektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırmalı performanslarının değerlendirildiği çalışmalarda ise algoritma başarısının veri setinin özelliklerine ve uygulama alanının koşullarına bağlı olarak değişebildiği görülmektedir. Avcı vd. (2023), eğitim verisi miktarının algoritma performansı üzerindeki etkisini incelemiş ve sınırlı eğitim verisi durumunda DVM'nin optimal hiper-düzlemi belirleme yaklaşımı sayesinde avantaj sağladığını, eğitim veri setinin büyümesiyle birlikte RO algoritmasının daha kararlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Tan vd. (2024), heterojen ve yanmış alanlarda RO algoritmasının topluluk öğrenmesi (ensemble learning) yapısı sayesinde spektral karışıklıkları daha etkin biçimde ayrıştırabildiğini; buna karşılık DVM'nin sınıf sınırlarının geometrik özelliklerini korumada daha başarılı olduğunu bildirmiştir. Baccari vd. (2025), yarı kurak bölgelerdeki arazi dönüşümlerinin haritalanmasında RO ve DVM algoritmalarını Landsat verileri kullanarak karşılaştırmış ve DVM'nin %95,91 Genel Doğruluk (GD) ile RO'ya (%86) kıyasla daha yüksek bir sınıflandırma performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, her iki makine öğrenmesi yönteminin de geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Bu bulgular, makine öğrenmesi algoritmalarının performansının yalnızca algoritmanın yapısına değil, aynı zamanda veri setinin büyüklüğüne, spektral ve mekânsal heterojenliğine ve uygulama alanının özelliklerine bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir.

Literatürde La Palma volkanik patlamasının etkilerinin uzaktan algılama verileriyle izlenmesine yönelik çalışmalar bulunmakla birlikte, aktif bir volkanik afet ortamının oluşturduğu yüksek spektral ve mekânsal heterojenlik içerisinde farklı makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırmalı performansını değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, 2021 yılında La Palma Adası'nda meydana gelen Tajogaite volkanik patlaması sonrasında oluşan dinamik afet ortamı, farklı makine öğrenmesi algoritmalarının performanslarının değerlendirilmesi açısından özgün bir çalışma alanı sunmaktadır. Aktif lav akıntıları, soğumuş bazalt yüzeyleri, yoğun kül birikimleri, okyanus suyu ve yangından etkilenmiş orman alanlarının aynı çalışma sahasında bir arada bulunması, sınıflandırma açısından yüksek düzeyde spektral ve mekânsal heterojenlik oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, lav akıntılarının denize ulaşması sonucunda oluşan yeni kıyı alanları ve lav deltaları (fajana), kıyı çizgisinde önemli ve kalıcı mekânsal değişimlere neden olmuştur. Bu kapsamda, açık erişimli ve küresel ölçekte düzenli veri sağlayan orta mekânsal çözünürlüklü Landsat 8 uydu görüntülerinin, yüksek mekânsal çözünürlüklü verilere başvurmadan geniş alanlardaki arazi örtüsü değişimlerinin ve yeni oluşan kıyı alanlarının belirlenmesinde etkin bir veri kaynağı olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, 2021 yılında La Palma Adası'nda meydana gelen Tajogaite volkanik patlamasının ardından, adanın güneybatı kesiminde meydana gelen arazi örtüsü değişimlerini ve lavların denize dökülmesiyle oluşan yeni kıyı çizgisini uzaktan algılama teknikleriyle belirlemektir. Bu kapsamda, Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak RO ve DVM makine öğrenmesi algoritmalarının arazi örtüsü sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması ve patlama sonrasında meydana gelen arazi örtüsü değişimlerinin nicel olarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca, lav akıntılarının denize ulaşması sonucunda oluşan yeni kıyı alanlarının piksel tabanlı nicel metriklerle belirlenmesi ve haritalanması hedeflenmiştir. Böylece, farklı makine öğrenmesi algoritmalarının dinamik ve spektral açıdan karmaşık bir volkanik afet ortamındaki performanslarının değerlendirilmesi ve erişilebilir, orta mekânsal çözünürlüklü uydu verilerinin bu tür afetlerin mekânsal etkilerinin belirlenmesindeki potansiyeli ele alınmaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, öncelikle patlama öncesi ve sonrasına ait çok zamanlı Landsat 8 uydu görüntüleri temin edilmiştir. Ardından, elde edilen görüntüler radyometrik, atmosferik ve geometrik ön işleme adımlarından geçirilerek analize hazır hâle getirilmiştir. Sonraki aşamada, çalışma alanındaki heterojen arazi örtüsü RO ve DVM

makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Son olarak, elde edilen tematik haritalar üzerinden arazi örtüsündeki alansal değişimler hesaplanmış ve kıyı şeridinde meydana gelen mekânsal değişimler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2. MATERYAL VE METHOD

2.1 Çalışma Alanı ve Veri Seti

İspanya'nın Kanarya Adaları takımadasında yer alan La Palma Adası, Atlantik Okyanusu'nun doğusunda konumlanan, sarp ve engebeli topografyası ile aktif volkanik karaktere sahip bir adadır (Şekil 1). Adanın güney kesiminde yer alan Cumbre Vieja volkanik sırtında 19 Eylül 2021 tarihinde başlayan Tajogaite volkanik patlaması yaklaşık 85 gün sürmüş ve bu süreçte gelişen lav akıntıları adanın güneybatı yamaçları boyunca ilerleyerek okyanusa ulaşmıştır. Patlama sonucunda oluşan lav akıntıları, yerleşim alanları, tarımsal alanlar ve özellikle muz plantasyonları ile orman ekosistemlerinde önemli mekânsal değişimlere ve kayıplara neden olmuştur. Lavların okyanusa ulaşmasıyla birlikte ise yeni kıyı alanları ve lav deltaları oluşmuş, buna bağlı olarak bölgenin kıyı çizgisinde belirgin mekânsal değişimler meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, söz konusu etkilerin yoğun olarak gözlendiği ve lav akıntılarının yerleşim, tarım ve orman alanları ile kıyı sistemleri üzerindeki etkilerinin bir arada değerlendirilebildiği La Palma Adası'nın güneybatı sektörü çalışma alanı olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. La Palma adası (Google Earth Pro – 2026)

Çalışmada, volkanik patlama öncesinde (Eylül 2021) ve sonrasında meydana gelen arazi örtüsü ve kıyı çizgisi değişimlerini belirlemek amacıyla, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından açık erişime sunulan Landsat 8 uydusuna ait Seviye-2 yüzey yansıtım (Surface Reflectance) ürünlerinden yararlanılmıştır. Sınıflandırma aşamasında, Landsat 8'in OLI sensörüne ait Mavi (B2), Yeşil (B3), Kırmızı (B4), Yakın Kızılötesi (B5) ve Kısa Dalga Kızılötesi (B6 ve B7) bantları öznitelik olarak kullanılmıştır. Özellikle B6 ve B7 Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR) bantlarının, kül birikimleri ve bazaltik yüzeylerin diğer arazi örtüsü sınıflarından ayrılmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Uzaktan algılama çalışmalarında büyük hacimli ve çok zamanlı (multi-temporal) uydu görüntülerinin yerel bilgisayarlara indirilmesi, depolanması ve işlenmesi; yüksek hesaplama kapasitesi, depolama alanı ve zaman gereksinimi doğurabilmektedir. Bu çalışmada, Landsat 8 görüntülerinin temini, ön işlenmesi, Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmaları kullanılarak sınıflandırılması ve değişim analizi süreçlerinin tamamı, bulut tabanlı bir coğrafi veri analiz platformu olan Google Earth Engine (GEE) üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.2 Makine Öğrenmesi Algoritmaları ve Hiperparametre Optimizasyonu

Rastgele Orman, çok sayıda karar ağacının bağımsız olarak oluşturulması ve elde edilen sonuçların birleştirilmesi esasına dayanan bir topluluk öğrenmesi (ensemble learning) algoritmasıdır. Algoritma, her bir karar ağacının farklı eğitim örnekleri ve rastgele seçilen öznitelik alt kümeleri üzerinden oluşturulması sayesinde sınıflandırma performansını artırmakta ve aşırı öğrenmeye riskini azaltabilmektedir (Breiman, 2001). Destek Vektör Makineleri ise sınıfları birbirinden en uygun şekilde ayıran hiper-düzlemi belirleyerek sınıflandırma gerçekleştiren ve özellikle yüksek boyutlu veri kümelerinde etkili sonuçlar sağlayan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Cortes ve Vapnik, 1995). Doğrusal olarak ayrılamayan veri kümelerinde çekirdek fonksiyonlarından yararlanarak doğrusal olmayan karar sınırlarının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, çalışma alanındaki arazi örtüsü sınıflarını temsil etmek üzere su, orman, yerleşim, tarım ve örtüsüz/tahrip olmuş alan olmak üzere beş temel sınıf belirlenmiştir. Referans verilerin oluşturulması kapsamında, bu sınıfları temsil eden spektral olarak homojen toplam 500 örneklem poligonu oluşturulmuş ve yaklaşık 12.000 pikselden oluşan bir referans veri seti elde edilmiştir. Elde edilen veri seti, aşırı öğrenmeyi (overfitting) önlemek ve sınıflandırma performansını bağımsız veriler üzerinden değerlendirmek amacıyla %70 eğitim ve %30 test verisi olacak şekilde iki bağımsız kümeye ayrılmıştır.

Google Earth Engine (GEE) ortamında, RO algoritması için ağaç sayısı 100 ve her düğümde değerlendirilecek değişken sayısı 6 olarak belirlenmiştir. DVM algoritmasında ise Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function - RBF) çekirdeği kullanılmış; C parametresi 10 ve Gamma (γ) parametresi 0,5 olarak belirlenmiştir.

2.3 Sınıflandırma Doğruluğu ve Değişim Analizi

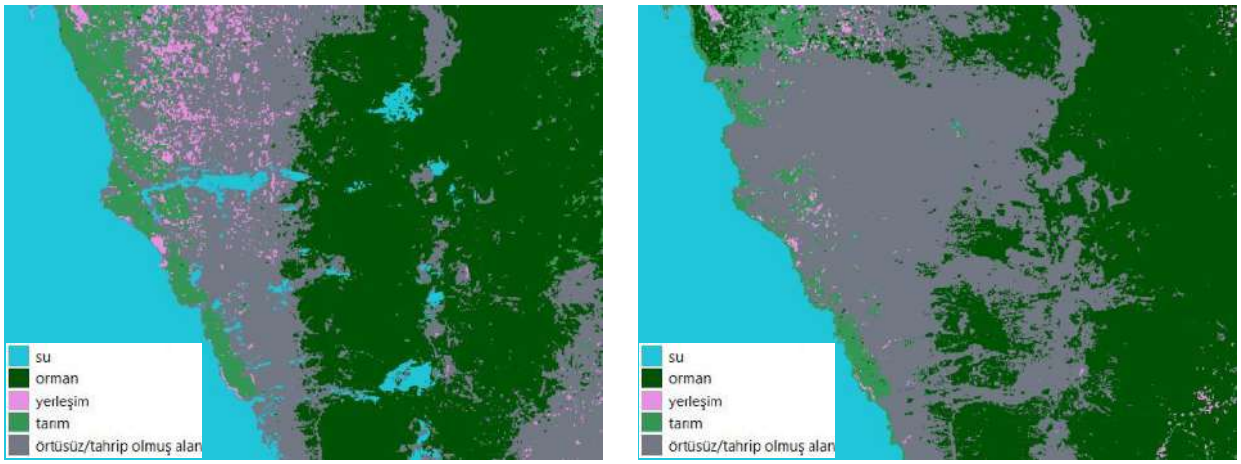
Doğruluk analizi, sınıflandırma sonucunda üretilen tematik haritaların referans verilerle olan uyumunun ve sınıflandırma performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bir değerlendirme sürecidir. Sınıflandırma sonuçları ile referans verilerin karşılaştırılması sonucunda hata matrisi (Confusion Matrix) oluşturulmakta ve bu matris üzerinden sınıflandırma performansını değerlendirmeye yönelik Genel Doğruluk (Overall Accuracy, GD), Üretici Doğruluğu (Producer's Accuracy, ÜD), Kullanıcı Doğruluğu (User's Accuracy, KD) ve Kappa Katsayısı (κ) gibi temel doğruluk ölçütleri hesaplanmaktadır (Congalton and Green, 2019).

Değişim analizi, aynı coğrafi alana ait farklı tarihlerde elde edilen uzaktan algılama verilerinin karşılaştırılması yoluyla zamansal ve mekânsal değişimlerin belirlenmesini sağlayan bir yaklaşımdır (Singh, 1989). Literatürde yaygın olarak kullanılan değişim analizi yöntemleri arasında, farklı tarihlere ait görüntülerin piksel değerlerinin karşılaştırılmasına dayanan Görüntü Farkı (Image Differencing), spektral indekslerdeki değişimlerin analizine dayanan yaklaşımlar ve farklı tarihlere ait sınıflandırılmış tematik haritaların karşılaştırılmasını esas alan Sınıflandırma Sonrası Karşılaştırma (Post-Classification Comparison - PCC) yöntemi yer almaktadır.

Bu çalışmada, sınıflandırma doğruluğu, bağımsız test pikselleri kullanılarak oluşturulan hata matrisinden Genel Doğruluk ve Kappa Katsayısı hesaplanarak değerlendirilmiştir. Ardından, RO ve DVM algoritmaları ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonrasında elde edilen sınıflandırma haritaları, Sınıflandırma Sonrası Karşılaştırma yöntemi kullanılarak piksel bazında karşılaştırılmış ve arazi örtüsü değişimleri hektar cinsinden hesaplanmıştır.

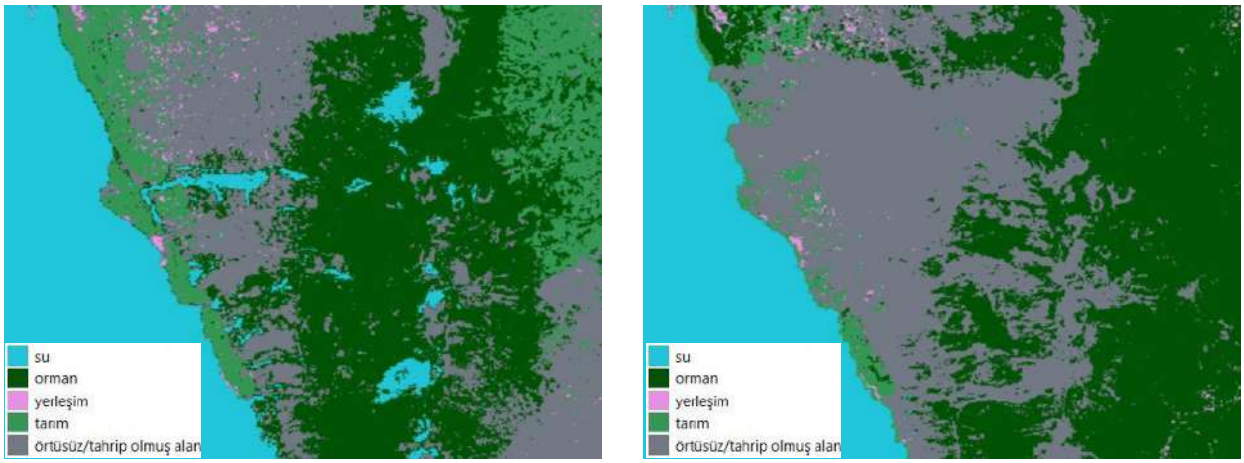
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma alanına ait arazi örtüsü sınıflandırma sonuçları, Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmaları kullanılarak elde edilen tematik haritalar üzerinden değerlendirilmiştir. Sınıflandırma sonuçları, patlama öncesi ve sonrası dönemlere ait arazi örtüsü sınıflarının mekânsal dağılımının karşılaştırılmasına ve iki farklı makine öğrenmesi algoritmasının performansının görsel ve sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 2 ve Şekil 3'de, sırasıyla RO ve DVM algoritmaları ile elde edilen sınıflandırma sonuçları gösterilmektedir. RO ve DVM algoritmalarına ait Genel Doğruluk değerleri ile Kappa Katsayıları ise Çizelge 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 2. RO algoritması ile elde edilen patlama öncesi tematik arazi örtüsü haritası (a) ve patlama sonrası tematik arazi örtüsü haritası (b).



(a) (b)

Şekil 3. DVM algoritması ile elde edilen patlama öncesi tematik arazi örtüsü haritası (a) ve patlama sonrası tematik arazi örtüsü haritası (b).

Çizelge 1. Sınıflandırma Yöntemlerinin Genel Doğruluğu ve Kappa Katsayıları.

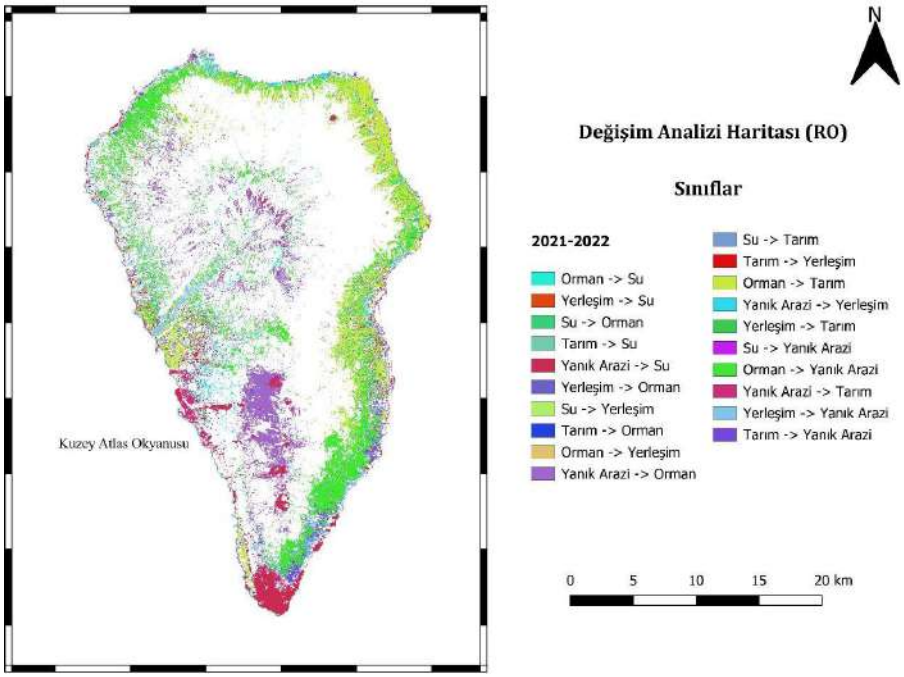
Değerlendirme Metriği	RO (patlama öncesi)	RO (patlama sonrası)	DVM (patlama öncesi)	DVM (patlama sonrası)
Genel Doğruluk (GD)	%90,32	%89,15	%83,87	%80,68
Kappa Katsayısı (κ)	0,8743	0,8592	0,7883	0,7515

Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde, volkanik patlama sonrasında çalışma alanındaki arazi örtüsü dağılımında belirgin değişimler meydana geldiği görülmektedir. Patlama öncesi ve sonrası tematik haritaların karşılaştırılması, özellikle orman alanlarının azaldığını ve örtüsüz/tahrip olmuş alanların genişlediğini göstermektedir. Bu değişimlerin, lav akıntılarının ilerlediği güzergâhlar boyunca daha belirgin olduğu görülmektedir. RO ve DVM algoritmaları ile elde edilen haritalar genel değişim eğilimi bakımından benzerlik göstermekle birlikte, özellikle orman ve örtüsüz/tahrip olmuş alanların mekânsal dağılımında farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum, iki algoritmanın spektral olarak heterojen alanları sınıflandırma biçimlerindeki farklılığı görsel olarak da ortaya koymaktadır.

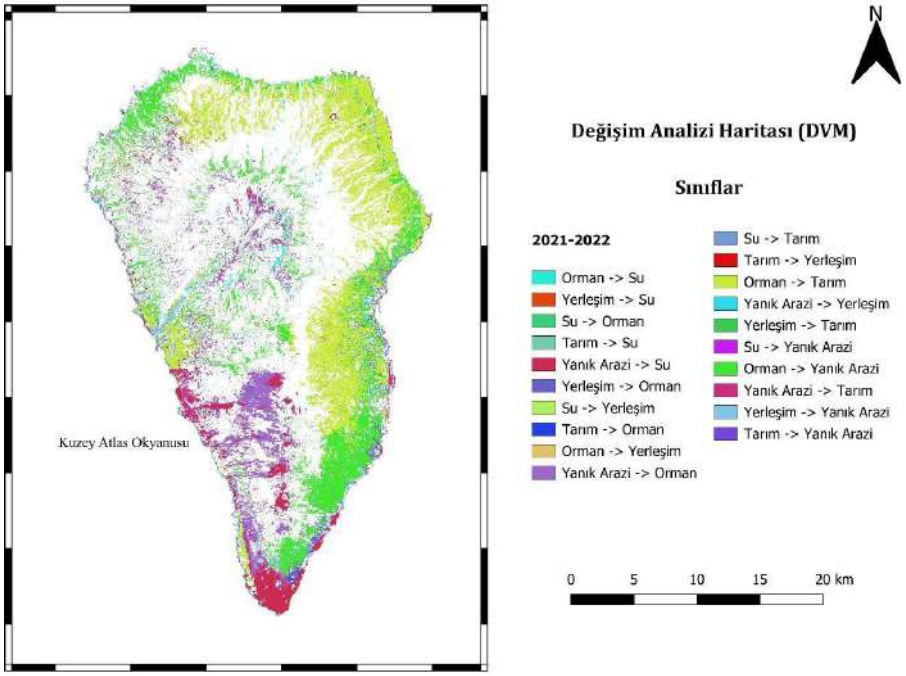
Çizelge 1 incelendiğinde ise, patlama öncesi ve sonrası dönemlerde RO algoritmasının, Genel Doğruluk ve Kappa Katsayısı açısından DVM algoritmasına kıyasla daha yüksek sınıflandırma performansı sergilediği görülmektedir. Patlama sonrasında meydana gelen belirgin jeomorfolojik değişimlere rağmen RO algoritması, GD değerinin %90,32'den %89,15'e gerilemesine karşın yüksek sınıflandırma başarısını korumuştur. RO algoritmasının topluluk

öğrenmesi (ensemble learning) yapısı ve çok sayıda karar ağacının birleştirilmesine dayanan sınıflandırma yaklaşımı, çalışma alanındaki heterojen arazi örtüsü sınıflarının ve spektral olarak karmaşık geçiş bölgelerinin ayrıştırılmasında daha kararlı sonuçlar üretmesini sağlamıştır. Buna karşılık, DVM algoritmasının GD değeri patlama sonrasında %83,87'den %80,68'e gerilemiştir. Bu sonuçlar, Tan vd. (2024) tarafından ortaya konulan ve sınıflandırma verilerindeki heterojenliğin arttığı durumlarda RO algoritmasının daha kararlı sonuçlar sağlayabildiğini belirten bulgularla örtüşmektedir.

Sınıflandırma sonuçlarının karşılaştırılmasının ardından, RO ve DVM ile elde edilen tematik haritalar Sınıflandırma Sonrası Karşılaştırma yöntemiyle analiz edilerek patlama öncesi ve sonrası arazi örtüsü değişimleri belirlenmiştir. RO ve DVM sınıflandırma sonuçlarının analizi sonucunda elde edilen değişim haritaları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmektedir. Volkanik patlama sonrasında arazi örtüsü sınıflarında meydana gelen değişim miktarları ise hektar cinsinden Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 4. RO sınıflandırma sonuçlarının analizi ile elde edilen değişim haritası.



Şekil 5. DVM sınıflandırma sonuçlarının analizi ile elde edilen değişim haritası.

Çizelge 2. Arazi Örtüsü Sınıflarının Örtüsüz/Tahrip Olmuş Alan Sınıfına Dönüşüm Miktarları.

Sınıf Dönüşüm Türü	RO ile Değişen Alan (ha)	DVM ile Değişen Alan (ha)
Su → Örtüsüz/Tahrip Olmuş Alan	11,34	34,56
Orman → Örtüsüz/Tahrip Olmuş Alan	9.023,85	10.417,59
Yerleşim → Örtüsüz/Tahrip Olmuş Alan	1.749,60	1.421,10
Tarım → Örtüsüz/Tahrip Olmuş Alan	1.573,29	892,17
Örtüsüz → Örtüsüz (Sabit Kalan Alan)	14.193,54	14.909,76

Şekil 4, Şekil 5 ve Çizelge 2 birlikte incelendiğinde, volkanik lav akıntılarının en büyük etkisinin orman alanlarında meydana geldiği görülmektedir. RO algoritmasına göre 9.023,85 ha orman alanı örtüsüz/tahrip olmuş alana dönüşürken, DVM algoritmasında bu değer 10.417,59 ha olarak hesaplanmıştır. RO ve DVM algoritmaları arasındaki bu farklılık, sınıflandırma sonuçlarında orman ve yerleşim alanlarının farklı şekilde ayrıştırılmasıyla ilişkilendirilebilir. RO algoritmasının topluluk öğrenmesine dayalı yapısının, spektral değişkenliğin yüksek olduğu bölgelerde farklı arazi örtüsü sınıflarının ayrıştırılmasına katkı sağladığı; buna karşılık DVM algoritmasının sınıf sınırlarını belirlemeye dayalı yapısının, özellikle spektral olarak karmaşık ve geçiş bölgelerinin bulunduğu alanlarda sınıflandırılan alanların daha geniş hesaplanmasına katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir.

Kıyı kesimindeki değişimler incelendiğinde, su sınıfından örtüsüz/tahrip olmuş alana gerçekleşen değişimin RO algoritmasında 11,34 ha, DVM algoritmasında ise 34,56 ha olduğu görülmektedir. Söz konusu değişimler, lav akıntılarının okyanusa ulaşması sonucunda oluşan yeni kıyı alanlarını ve kıyı çizgisindeki mekânsal genişlemeyi ortaya koymaktadır. DVM algoritmasında belirlenen daha yüksek alan değeri, iki sınıflandırma yöntemi arasındaki kıyı alanlarının ayrıştırılmasına ilişkin farklılıkları göstermektedir. Elde edilen kıyı çizgisi değişimlerine ilişkin nicel sonuçlar, 2021 Tajogaite patlaması sonrasında oluşan fajana gelişimini inceleyen Caballero vd. (2022) tarafından bildirilen bulgularla uyumludur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, La Palma Adası'nda meydana gelen volkanik patlamanın arazi örtüsü ve kıyı çizgisi üzerindeki mekânsal etkileri Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, RO ve DVM makine öğrenmesi algoritmalarının arazi örtüsü sınıflandırma performansları karşılaştırılmış ve patlama sonrasında meydana gelen arazi örtüsü değişimleri ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, RO algoritmasının Genel Doğruluk (GD) ve Kappa Katsayısı (κ) bakımından DVM algoritmasına kıyasla daha yüksek sınıflandırma performansı sergilediğini göstermiştir. Volkanik patlamanın neden olduğu belirgin arazi örtüsü değişimlerine rağmen RO algoritması sınıflandırma başarısını büyük ölçüde korurken (%89,15 GD), DVM algoritmasının patlama sonrasında %80,68 Genel Doğruluk değerine gerilediği belirlenmiştir. Bu sonuç, patlama sonrasında oluşan spektral ve mekânsal heterojenliğin DVM algoritmasının sınıflandırma performansı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

Çalışma sonuçları, lav akıntılarının en büyük etkisinin Kanarya Çamı ormanları üzerinde gerçekleştiğini ve lavların denize ulaşması sonucunda oluşan yeni lav deltalarıyla birlikte kıyı çizgisinde belirgin mekânsal değişimlerin meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bulguların, afet yönetimi kapsamında acil durum hasar tespit haritalarının oluşturulmasına, tahliye planlamasına yönelik mekânsal altlıkların güncellenmesine ve volkanik faaliyetlere bağlı kıyı jeomorfolojisindeki değişimlerin izlenmesine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Gelecekte benzer dinamik ve yüksek riskli doğal afetlerin izlenmesinde, yoğun duman ve bulutluluk koşullarından daha az etkilenen Sentetik Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar - SAR) verilerinin analize dâhil edilmesi, afetlerin zamansal süreklilik içerisinde izlenmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, yerleşim alanlarındaki bina hasarlarının daha ayrıntılı belirlenmesi ve kıyı çizgisindeki değişimlerin daha yüksek mekânsal doğrulukla izlenebilmesi amacıyla daha yüksek mekânsal çözünürlüklü uydu görüntülerinden yararlanılması ve nesne tabanlı görüntü analizi (Object-Based Image Analysis, OBIA) yaklaşımının uygulanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Akyürek, Ö., 2022. Volkan patlamalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama yöntemleri ile izlenmesi: Cumbre Vieja Volkanı (İspanya) örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi,* 8(2): 280-291.

Avcı, C., Budak, M., Yagmur, N. ve Bektas Balcik, F., 2023. Comparison between random forest and support vector machine algorithms for LULC classification. *International Journal of Engineering and Geosciences,* 8(1): 1-10.

Baccari, N., Hamza, M. H., Slama, T., Sebei, A., Ouerghi, S., Elsheikh, R., Rebai, N., Hasanean, H., Almazroui, M. ve Elhag, M., 2025. Assessment of machine learning techniques in mapping land use/land cover changes in a semi-arid environment. *Earth Systems and Environment,* 9(2): 519-539.

Belgiu, M. ve Drăguţ, L., 2016. Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 114: 24–31.

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning,* 45(1): 5–32.

Caballero, I., Román, A., Tovar-Sánchez, A. ve Navarro, G., 2022. Water quality monitoring with Sentinel-2 and Landsat-8 satellites during the 2021 volcanic eruption in La Palma (Canary Islands). *Science of the Total Environment,* 822: 153433.

Cigna, F., Tapete, D. ve Lu, Z., 2020. Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk. *Remote Sensing,* 12(16): 2567.

Congalton, R. G. ve Green, K., 2019. *Assessing the accuracy of remotesensed data: principles and practices*. 3. basım, CRC Press. 346 sayfa.

Cortes, C. ve Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. *Machine Learning,* 20: 273–297.

Kyriou, A. Ve Nikolakopoulos, K. G., 2022. Lava mapping using Sentinel-1 data after the occurrence of a volcanic eruption—The case of Cumbre Vieja eruption on La Palma, Canary Islands, Spain. *Sensors,* 22(22): 8768.

Mountrakis, G., Im, J. ve Ogole, C., 2011. Support Vector Machines in Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 66(3): 247–259.

Sheykhmousa, M., Mahdianpari, M., Ghanbari, H., Mohammadimanesh, F., Ghamisi, P. ve Homayouni, S., 2020. Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,* 13: 6308–6325.

Singh, A., 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing,* 10(6): 989–1003.

Tan, Y. C., Duarte, L. ve Teodoro, A. C., 2024. Comparative Study of Random Forest and Support Vector Machine for Land Cover Classification and Post-Wildfire Change Detection. *Land,* 13(11): 1878.

Thouret, J. C., 1999. Volcanic geomorphology-An overview. *Earth-Science Reviews,* 47(1–2): 95–131.

Weiser, F., 2023. Linking in-situ and remote sensing data for a better understanding of ecological changes in forest ecosystems of La Palma, Spain. *Doktora tezi*. Universität Bayreuth, Bayreuth. 182 sayfa.

ARKTİK BÖLGEDE DENİZ BUZU SEGMENTASYONU İÇİN TOPLULUK VE DERİN ÖĞRENME MİMARİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

Melih ALTAY[1], Fatih Fehmi ŞİMŞEK[2], Saygın ABDİKAN[3]

1 Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, melihaltay17@hacettepe.edu.tr
2 TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, 06800, Ankara, fehmi.simsek@tubitak.gov.tr
3 Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, sayginabdikan@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, yüksek çözünürlüklü Arktik deniz buzu konsantrasyonu (DBK) segmentasyonu için derin öğrenme ve topluluk makine öğrenmesi mimarilerinin başarımını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. SIGRID-3 formatında kodlanmış referans maskelerle eşleştirilmiş 3.392 optik uydu görüntüsünden oluşan bir veri kümesi üzerinde U-Net ve DeepLab V3+ derin evrişimli sinir ağları, Random Forest ve LightGBM topluluk öğrenme yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Derin öğrenme mimarileri belirgin üstünlük göstermektedir: DeepLab V3+, 0,891 Kesişim-Birleşim (IoU) değeriyle en yüksek başarıma ulaşırken U-Net 0,823 ile onu izlemektedir. Topluluk yöntemleri 0,768 (LightGBM) ve 0,712 (Random Forest) IoU değerleri elde etmiştir. Hesapsal açıdan LightGBM, 0,035 s/görüntü çıkarım süresiyle DeepLab V3+'a kıyasla 8,9 kat daha hızlı çalışmakta ve parametre verimliliğinde yaklaşık 29,6 kat üstünlük sağlamaktadır. Bu bulgular, yüksek hassasiyetli bilimsel haritalama ile gerçek zamanlı operasyonel izleme arasında model seçimini yönlendiren nicel bir karar çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Arktik deniz buzu, anlamsal segmentasyon, U-Net, DeepLab V3+, Random Forest, LightGBM, uydu görüntüsü, SIGRID-3

ABSTRACT

BENCHMARKING ENSEMBLE AND DEEP LEARNING ARCHITECTURES FOR ACCURATE SEA ICE SEGMENTATION IN THE ARCTIC REGION

This study presents a comparative evaluation of deep learning and ensemble machine learning architectures for high-resolution Arctic sea ice concentration (SIC) segmentation. Using a spatiotemporal dataset of 3,392 optical satellite image patches paired with SIGRID-3 encoded reference masks, we benchmark U-Net and DeepLab V3+ against Random Forest and LightGBM. Deep learning models achieve clear superiority: DeepLab V3+ reaches an IoU of 0.891 and U-Net reaches 0.823, while LightGBM peaks at 0.768 and Random Forest at 0.712. On the computational side, LightGBM processes each image in 0.035 s — 8.9 times faster than DeepLab V3+ and delivers approximately 29.6 times higher parameter efficiency (IoU per million parameters). These findings provide a quantitative decision framework for algorithm selection between high-precision scientific charting and real-time operational monitoring.

Keywords: Arctic sea ice, semantic segmentation, U-Net, DeepLab V3+, Random Forest, LightGBM, satellite imagery, SIGRID-3

1. GİRİŞ

Arktik kriyosferi, deniz buzu kalınlığı ve kapsamında ölçülen doğrusal olmayan azalmayı da kapsayan hızlı ve önemli değişimler yaşamaktadır. Bu değişimler iklim sistemiyle güçlü geri besleme mekanizmaları aracılığıyla bağlantılı olup deniz güvenliğini, kutup biyolojik çeşitliliğini ve gezegenin enerji dengesini doğrudan etkilemektedir (IPCC, 2021; Serreze ve Barry, 2011; Stroeve ve Notz, 2018). Uydu tabanlı uzaktan algılama, bu değişimlerin büyük ölçekli izlenmesinde hâlâ kullanılabilen tek pratik yöntemdir. Kuzey Deniz Yolu'nun stratejik öneminin artmasıyla birlikte, geleneksel analitik iş akışlarının sınırlılıklarını aşan yüksek doğruluklu deniz buzu

konsantrasyonu (DBK) ürünleri sunan yeni nesil Yer Gözlemi (YG) servislerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Deniz buzu haritalama, geleneksel olarak çok-sensörlü SAR ve optik uydu verilerinin uzman analistler tarafından el ile yorumlanmasına dayanmaktadır (Karvonen vd., 2005). Bu yaklaşım, özerk kutup navigasyonunun gerektirdiği gerçek zamanlı ortamlarda yetersiz kalmaktadır. Makine öğrenmesi mimarileri bu açığı kapatmak amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır; derin evrişimli sinir ağları, anlamsal segmentasyonda çok ölçekli uzamsal hiyerarşileri özerk biçimde öğrenerek üstün başarım sınırları belirlemiştir (Long vd., 2015; Garcia-Garcia vd., 2017; Wang vd., 2016). Derin öğrenmenin uzaktan algılama verilerine uygulanmasına ilişkin kapsamlı değerlendirmeler için LeCun vd. (2015) ve Zhang vd. (2016) incelenebilir.

Ne var ki derin öğrenme modellerinin kaynak kısıtlı ortamlarda konuşlandırılmasına odaklanan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Mevcut literatür, derin mimarilerin ikili bağlamlardaki öngörü doğruluğunu ön plana çıkarırken SIGRID-3 standardı kapsamındaki çok sınıflı segmentasyonun hesapsal yükünü büyük ölçüde göz ardı etmektedir. Uyduda gömülü işlemci sistemleri ve sınır hesaplama platformları için segmentasyon hassasiyeti ile hesapsal karmaşıklık arasındaki denge kritik bir tasarım parametresi oluşturmaktadır. Kutup bölgelerindeki operasyonel haritalamada SAR verisinin bulutluluk ve aydınlanma koşullarından bağımsız çalışma avantajı tartışılmaz olsa da; karmaşık çok-sensörlü veri füzyonuna geçilmeden önce, hesapsal iş yükü ve mimari karşılaştırmaların daha net anlaşılabilir bir referans (baseline) üzerinden yapılabilmesi amacıyla bu çalışmada öncelikle optik uydu verilerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, iki derin özellik çıkarıcı (U-Net ve DeepLab V3+) ile iki hesapsal açıdan verimli topluluk çerçevesinin (Random Forest ve LightGBM) karşılaştırmalı değerlendirmesiyle bu boşluğu kapatmayı amaçlamaktadır.

Araştırmanın üç temel katkısı bulunmaktadır: (i) SIGRID-3 uyumlu segmentasyon için birleşik bir karşılaştırma ortamı oluşturulması, (ii) hesapsal yük ve çıkarım gecikmesini kapsayan çok boyutlu bir verimlilik analizi yapılması ve (iii) çevresel değişkenlikle algoritmik işlem hacmini ilişkilendiren nicel bir model seçim çerçevesi formüle edilmesi.

2. VERİ VE YÖNTEMLER

2.1. Veri Kümesi

Çalışmanın deneysel temeli, her biri 256×256 piksel boyutlu ve üç spektral kanallı toplam 3.392 uydu görüntü yamasından oluşmaktadır. Görüntüler, Landsat-8 ve Sentinel-2 uydu konstellasyonlarından elde edilmiş üç bantlı optik görüntülerden oluşmakta olup 2016–2021 yılları arasında Hudson Körfezi bölgesini kapsamaktadır. Kullanılan bant birleşimi, görünür bölge RGB yerine yakın kızılötesi (YKÖ), kırmızı ve yeşil bantların sırasıyla kırmızı, yeşil ve mavi kanallara atandığı sahte renkli bir kompozittir; Şekil 1'deki kara yüzeylerinde görülen kırmızımsı tonlar, bitki örtüsünün YKÖ bölgedeki yüksek yansıtımından kaynaklanmaktadır. Landsat-8 OLI (30 m) ve Sentinel-2 MSI (10 m) sahnelerinden kesilen yamalar 256×256 piksele yeniden örneklendiğinden, yamaların yer örnekleme mesafesi kaynak sensöre ve yama kapsama alanına bağlı olarak değişmektedir. Referans segmentasyon maskeleri, Kanada Buz Servisi'nin (KBS) NSIDC aracılığıyla yayımladığı Hudson Körfezi Bölgesel Buz Haritalarından türetilmiştir (KBS, 2009). Bu haritalar, uluslararası alanda kabul görmüş SIGRID-3 (Standart Buz Raporu Dijital, Sürüm 3) kodlama düzenini kullanmaktadır. Operasyonel olarak üretilmesi, KBS haritalarının el ile hazırlanan araştırma odaklı notasyon veri kümelerine kıyasla dış geçerliliği ve transfer edilebilirliği daha yüksek referanslar sunmasını sağlamaktadır.

Orijinal SIGRID-3 kodları bu çalışmada sekiz sınıfa basitleştirilmiştir. Çizelge 1, her sınıfa karşılık gelen SIGRID-3 kodlarını, konsantrasyon aralıklarını ve tanımlayıcı buz koşullarını göstermektedir. Bitişik sınıfların sınır değerlerinde çakışma oluşmaması için her SIGRID-3 kodu yalnızca bir sınıfa eşlenmiştir.

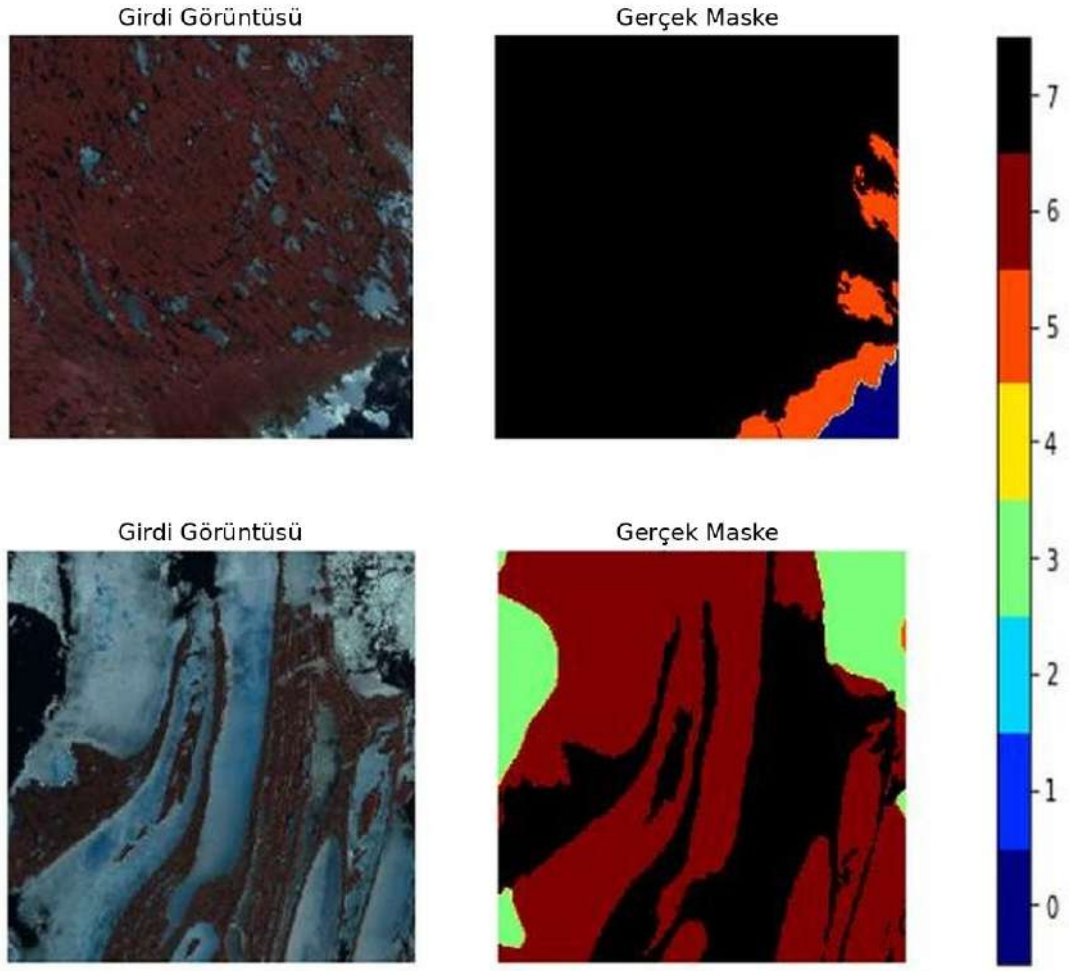
Çizelge 1. SIGRID-3 standardından türetilen basitleştirilmiş deniz buzu konsantrasyon sınıfları.

Sınıf	Konsantrasyon (%)	SIGRID-3 Kodu	Buz Koşulu
0	0 – Açık Su	00	Açık su, buz parçacıklı su
1	10 – 20	01 – 02	Çok gevşek buz
2	20 – 40	03 – 04	Gevşek buz
3	40 – 60	05 – 06	Sık buz
4	60 – 80	07 – 08	Çok sık buz
5	80 – 90	09	Sıkışık buz
6	90 – 100	10	Konsolide / sabit buz
7	—	LD / 99	Kara kütlesi, veri yok

Veri kümesinde belirgin sınıf dengesizliği gözlemlenmektedir: Sınıf 0 (açık su), 5, 6 ve 7 (kara) toplam piksel sayısının büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu dengesizliği gidermek amacıyla azınlık sınıfı piksellerini %30'dan fazla içeren görüntüler eğitim kümesinde aşırı örneklenmiştir. Aşırı örnekleme, eğitim–doğrulama ayrımı yapıldıktan sonra yalnızca eğitim kümesine uygulanmış ve doğrulama kümesi özgün sınıf dağılımıyla korunmuştur; çalışmada belirtilen 3.392 görüntü sayısı, aşırı örnekleme öncesindeki özgün yama sayısını ifade etmektedir.

2.2. Veri Ön İşleme

Tüm görüntüler 256×256 piksele yeniden boyutlandırılmış ve [0, 1] aralığına normalize edilmiştir. Derin öğrenme modelleri için rastgele yatay–dikey çevirme ile ±5° döndürme içeren veri artırma uygulanmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin (Random Forest ve LightGBM) eğitiminde ise uzamsal özelliklerin ve koordinat ilişkilerinin bozulmasını önlemek amacıyla veri artırma yöntemleri uygulanmamış, doğrudan özgün veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesi, her görüntüdeki baskın buz sınıfına dayalı tabakalı örnekleme yöntemiyle eğitim (%80) ve doğrulama (%20) kümelerine ayrılmıştır. Bağımsız bir test kümesinin yokluğu, raporlanan metriklerin gerçek genelleme başarımını hafif ölçüde abartabileceği anlamına gelmekte olup bu durum bir kısıtlama olarak kabul edilmektedir (bkz. Kısıtlamalar bölümü). Şekil 1, çalışmada kullanılan örnek girdi görüntülerini (solda) ve bunlara karşılık gelen referans segmentasyon maskelerini (sağda) göstermektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan örnek girdi görüntüleri (solda) ve bunlara karşılık gelen referans (gerçek) segmentasyon maskeleri (sağda). Renk skalası sekiz konsantrasyon sınıfını temsil etmektedir.

3. MODEL MİMARİLERİ

3.1. U-Net

U-Net, simetrik U biçimli geometrisiyle anlamsal bağlamı hassas uzamsal lokalizasyonla dengeleyen tam evrişimli bir ağdır (Ronneberger vd., 2015). Daralan yol (kodlayıcı) yüksek düzeyli özellikleri yakalarken genişleyen yol (kodçözücü) atlama bağlantıları aracılığıyla ince uzamsal bilgiyi kurtarmaktadır. Bu çalışmada ağ, 32'den 512'ye kadar filtre derinlikleriyle beş seviyeden oluşmakta; aşırı öğrenmeyi sınırlamak amacıyla 0,5 bırakma oranı uygulanmakta ve yaklaşık 23,5 milyon eğitilebilir parametre içermektedir.

3.2. DeepLab V3+

Çok ölçekli buz özelliklerinin işlenmesindeki güçlükler göz önünde bulundurularak Atrous Uzamsal Piramit Havuzlamayı (ASUPH; İng. Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP) etkili bir kodlayıcı-kodçözücü yapısıyla entegre eden DeepLab V3+ tercih edilmiştir (Chen vd., 2018b). Atrous evrişim ve ASUPH yaklaşımı DeepLab model ailesinin önceki sürümlerinde tanıtılmış olup (Chen vd., 2018a), DeepLab V3+ bu yapıyı bir kodçözücü modülüyle genişletmektedir. [6, 12, 18] olarak yapılandırılan değişken atlamalı (atrous) evrişimler, önemli bir uzamsal çözünürlük kaybı olmaksızın çok ölçekli bağlamsal bilgiyi yakalamaktadır. ResNet-50 omurgası üzerine inşa edilen mimari toplam 41,2 milyon parametreye sahiptir.

3.3. Random Forest

Random Forest (RF), varyansı azaltmak ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla birden fazla karar ağacını topluluk halinde kullanan güçlü bir yöntemdir (Breiman, 2001). RF modeli, uzamsal bağlamı dolaylı biçimde yakalamak amacıyla 3×3 ve 5×5 komşuluk bölgelerinden çıkarılan spektral yoğunlukları, uzamsal koordinatları ve doku tanımlayıcılarını birleştiren piksel bazlı özellik vektörleri üzerinde eğitilmektedir. 100 tahminleyici ve maksimum 20 ağaç derinliğiyle yapılandırılan model yaklaşık 0,8 milyon etkin parametre içermektedir.

3.4. LightGBM

Yüksek hızlı operasyonel gereksinimler için büyük ölçekli veri kümelerinde üstün eğitim hızı sağlamak üzere optimize edilmiş LightGBM uygulanmıştır (Ke vd., 2017). Yaprak bazlı büyüme stratejisi ve histogram tabanlı algoritmalar kullanan model, RF ile benzer piksel bazlı özellik kümelerinden yararlanmaktadır. 100 artırma yinelemesi, 0,1 öğrenme hızı ve maksimum 15 ağaç derinliğiyle yapılandırılan model yaklaşık 1,2 milyon parametreye sahiptir.

4. EĞİTİM YAPILANDIRMASI

Tüm modeller NVIDIA A100 GPU (40 GB VRAM) donanımlı bir iş istasyonunda eğitilmiştir; derin öğrenme denemeleri TensorFlow 2.10, topluluk modelleri scikit-learn 1.1 ve LightGBM 3.3 kütüphaneleriyle çalıştırılmıştır. Derin öğrenme modellerinde 1×10^{-3} başlangıç öğrenme hızıyla Adam eniyileyici (Kingma ve Ba, 2015) ve seyrek kategorik çapraz entropi kayıp işlevi kullanılmıştır. Doğrulama kaybının art arda sekiz dönem boyunca iyileşmemesi durumunda öğrenme hızını 0,8 çarpanıyla azaltan dinamik bir öğrenme hızı düşürme politikası uygulanmıştır. Eğitim, erken durdurma uygulanmaksızın 64'lük mini-yığın büyüklüğüyle sabit 100 dönem boyunca sürdürülmüştür. Topluluk modelleri kendi yerel protokolleriyle eniyilenmiş; ağaç derinliği ve tahminleyici sayısı gibi hiper-parametreler ızgara arama yöntemiyle ayarlanmıştır. Hiper-parametrelerin belirlenmesinde iki farklı strateji izlenmiştir. Derin öğrenme mimarileri (U-Net, DeepLab V3+) için temel yapılandırma seçenekleri — Adam eniyileyicinin 1×10^{-3} başlangıç öğrenme hızı (Kingma ve Ba, 2015), DeepLab V3+ için [6, 12, 18] atrous oranları ve ResNet-50 omurgası (Chen vd., 2018b), U-Net için 0,5 bırakma oranı gibi — ilgili mimarilerin özgün yayınlarında önerilen ve uzaktan algılama görüntü segmentasyonu literatüründe yaygın biçimde benimsenen değerlerdir; bu seçim, aşırı geniş bir hiper-parametre uzayında arama yapmak yerine karşılaştırmanın mimariler arasındaki temel tasarım farklılıklarına odaklanmasını sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Bu temel değerler üzerinden yalnızca mini-yığın büyüklüğü (donanım belleği kısıtına göre) ve öğrenme hızı düşürme sabrı (doğrulama kaybındaki düzlenme davranışına göre) doğrulama kümesi performansı gözlemlenerek hafifçe ayarlanmıştır. Topluluk yöntemleri (Random Forest, LightGBM) için ise ağaç derinliği, tahminleyici/yineleme sayısı ve LightGBM öğrenme hızı gibi hiper-parametreler, doğrulama kümesi IoU değerini eniyileme ölçütü olarak kullanan bir ızgara arama (grid search) prosedürüyle belirlenmiştir; arama, hesaplama süresi ile aşırı öğrenme riski arasında makul bir denge gözetilerek sınırlı bir değer kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm mimariler için nihai olarak raporlanan yapılandırmalar, ilgili doğrulama kümesi IoU değerinin en yüksek olduğu ayardır.

5. DEĞERLENDİRME METRİKLERİ

Segmentasyon başarımı, istatistiksel doğruluk ve hesapsal işlem hacmini kapsayan çok boyutlu bir çerçeve ile değerlendirilmektedir. Kesişim-Birleşim (IoU, Jaccard İndeksi), öngörülen segment (A) ile gerçek maske (B) arasındaki örtüşme oranını tanımlar:

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \tag{1}$$

Buna ek olarak genel piksel doğruluğu, kesinlik, çağrım ve F1-skoru hesaplanmıştır. Çizelge 2'de raporlanan genel IoU, doğruluk, kesinlik, çağrım ve F1 değerleri her doğrulama görüntüsü için ayrı hesaplanıp tüm doğrulama görüntüleri üzerinden ortalaması alınan görüntü bazlı ortalamalardır; Çizelge 3'teki sınıf bazlı IoU değerleri ise tüm doğrulama pikselleri birleştirilerek her sınıf için ayrı hesaplanmıştır. Bu nedenle genel değerler, sınıf bazlı değerlerin basit aritmetik ortalamasıyla (makro ortalama) birebir örtüşmemektedir. F1-skoru, karmaşık buz konsantrasyon gradyanlarında Tip-I ve Tip-II hataları en aza indirme kapasitesini ölçmektedir:

$$F1 = \frac{2 \times (Kesinlik \times Çağrım)}{(Kesinlik + Çağrım)} \tag{2}$$

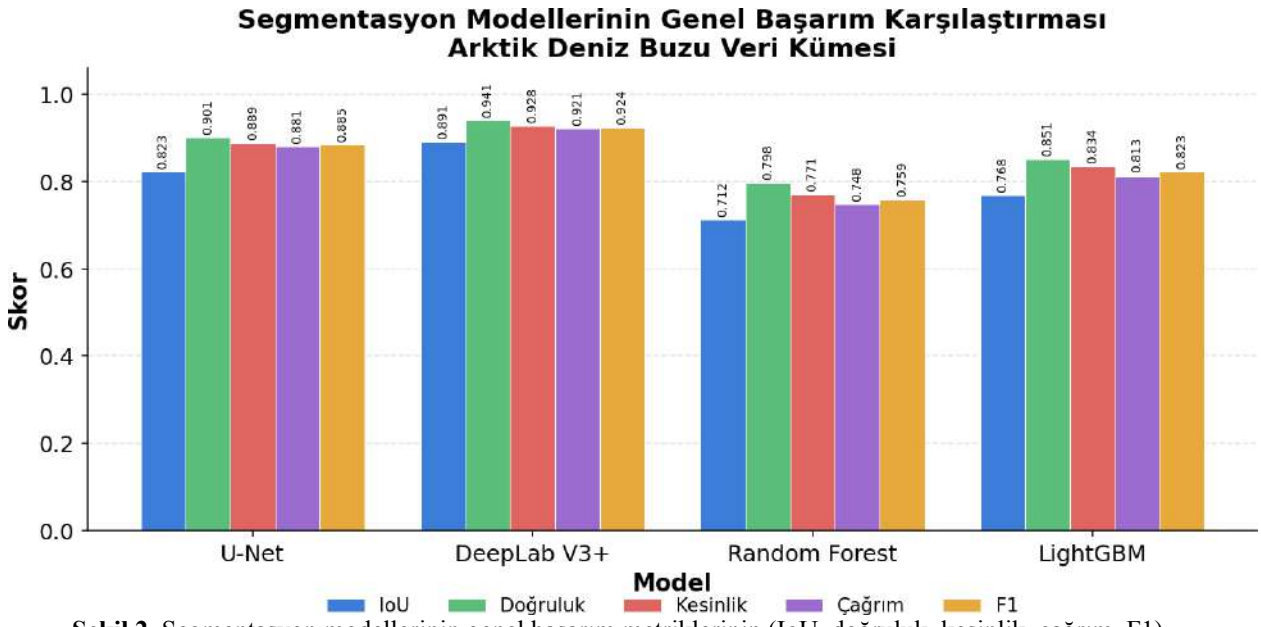
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Genel Başarım

Tüm modellere ait genel başarım sonuçları Çizelge 2'de verilmekte, Şekil 2'de ise görsel olarak özetlenmektedir. DeepLab V3+, 0,891 IoU değeriyle en yüksek başarıma ulaşmıştır; bu değer U-Net'i (0,823) %8,3, Random Forest'ı (0,712) ise %25,1 oranında geride bırakmaktadır. DeepLab V3+ genel doğruluk (%94,1), kesinlik (%92,8) ve F1-skoru (%92,4) açısından da diğer modelleri geride bırakmıştır. Bu başarım farklarının mimari kökenli teorik nedenleri "Yöntemlerin Teorik Karşılaştırması: Başarım Farklarının Kaynağı" alt başlığında ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır.

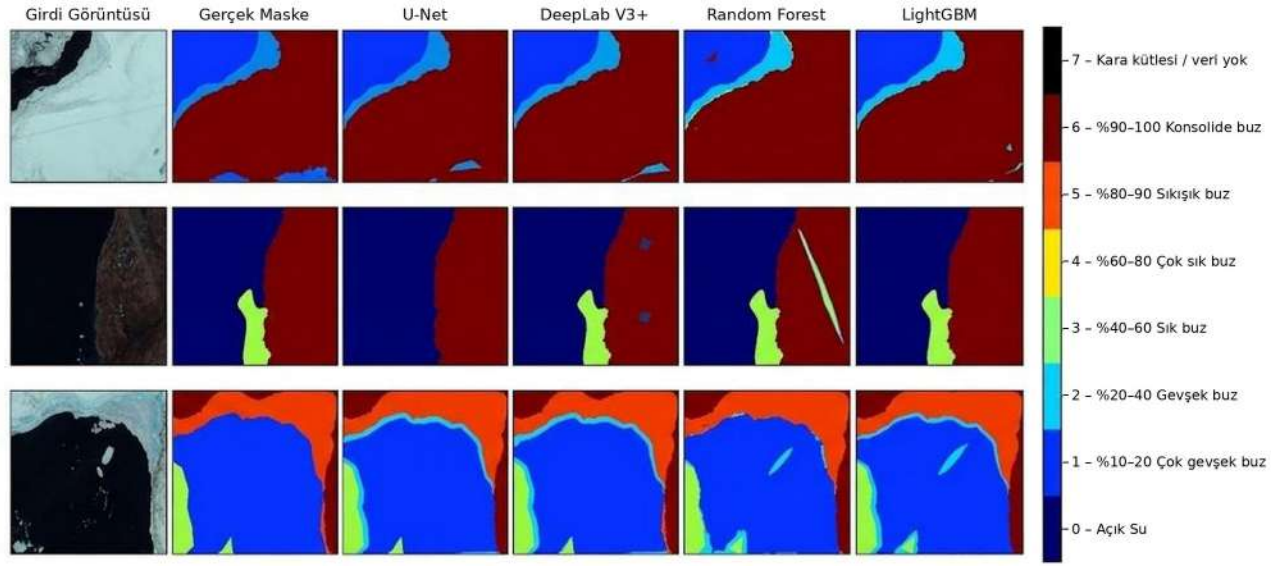
Çizelge 2. Segmentasyon modellerinin genel başarım karşılaştırması (her sütundaki en iyi değer koyu).

Model	IoU	Doğruluk	Kesinlik	Çağrım	F1
DeepLab V3+	**0,891**	**0,941**	**0,928**	**0,921**	**0,924**
U-Net	0,823	0,901	0,889	0,881	0,885
LightGBM	0,768	0,851	0,834	0,813	0,823
Random Forest	0,712	0,798	0,771	0,748	0,759



Şekil 2. Segmentasyon modellerinin genel başarım metriklerinin (IoU, doğruluk, kesinlik, çağrım, F1) karşılaştırması.

Şekil 3, üç örnek doğrulama görüntüsü için modellerin ürettiği segmentasyon haritalarını referans maskeyle birlikte nitel olarak karşılaştırmaktadır. Derin öğrenme modelleri, özellikle buz–su sınırlarında ve dar geçişli bölgelerde referans maskeye daha yakın, daha tutarlı sonuçlar üretirken topluluk modellerinde küçük yanlış sınıflandırma adacıkları gözlemlenmektedir.



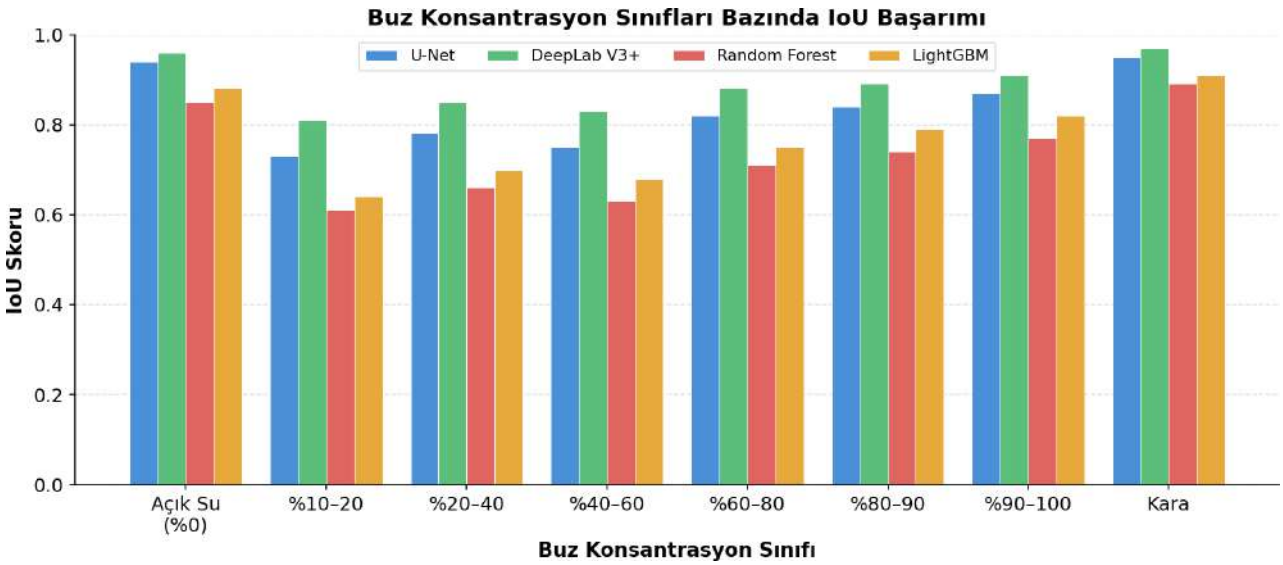
Şekil 3. Üç örnek doğrulama görüntüsü için model öngörülerinin nitel karşılaştırması. Soldan sağa: orijinal girdi görüntüsü, referans maske ve sırasıyla U-Net, DeepLab V3+, Random Forest ve LightGBM tarafından üretilen segmentasyon haritaları. Renk skalası Çizelge 1'deki sınıfları göstermektedir.

6.2. Sınıf Bazlı Başarım

Sınıf bazlı IoU değerleri Çizelge 3'te özetlenmekte, Şekil 4'te görsel olarak sunulmaktadır. DeepLab V3+, baskın sınıflarda (Sınıf 0 ve 7) 0,96–0,97 düzeyinde mükemmel başarım gösterirken azınlık sınıflarında (Sınıflar 1–4) 0,81 –0,88 aralığında yüksek değerlerini korumuştur. Random Forest'ın azınlık sınıflarındaki IoU değerleri 0,61–0,71 aralığında kalmış; bu durum piksel bazlı öğrenmenin uzamsal bağlamı kavramadaki sınırlılığını ortaya koymuştur. Bu sınırlılığın teorik kökeni ve yöntemler arası karşılaştırmalı değerlendirme "Yöntemlerin Teorik Karşılaştırması: Başarım Farklarının Kaynağı" alt başlığında sunulmaktadır.

Çizelge 3. Model başına sınıf bazlı IoU değerleri (S = Sınıf).

Model	S.0	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5	S.6	S.7
DeepLab V3+	0,96	0,81	0,85	0,83	0,88	0,89	0,91	0,97
U-Net	0,94	0,73	0,78	0,75	0,82	0,84	0,87	0,95
LightGBM	0,88	0,64	0,70	0,68	0,75	0,79	0,82	0,91
Random Forest	0,85	0,61	0,66	0,63	0,71	0,74	0,77	0,89



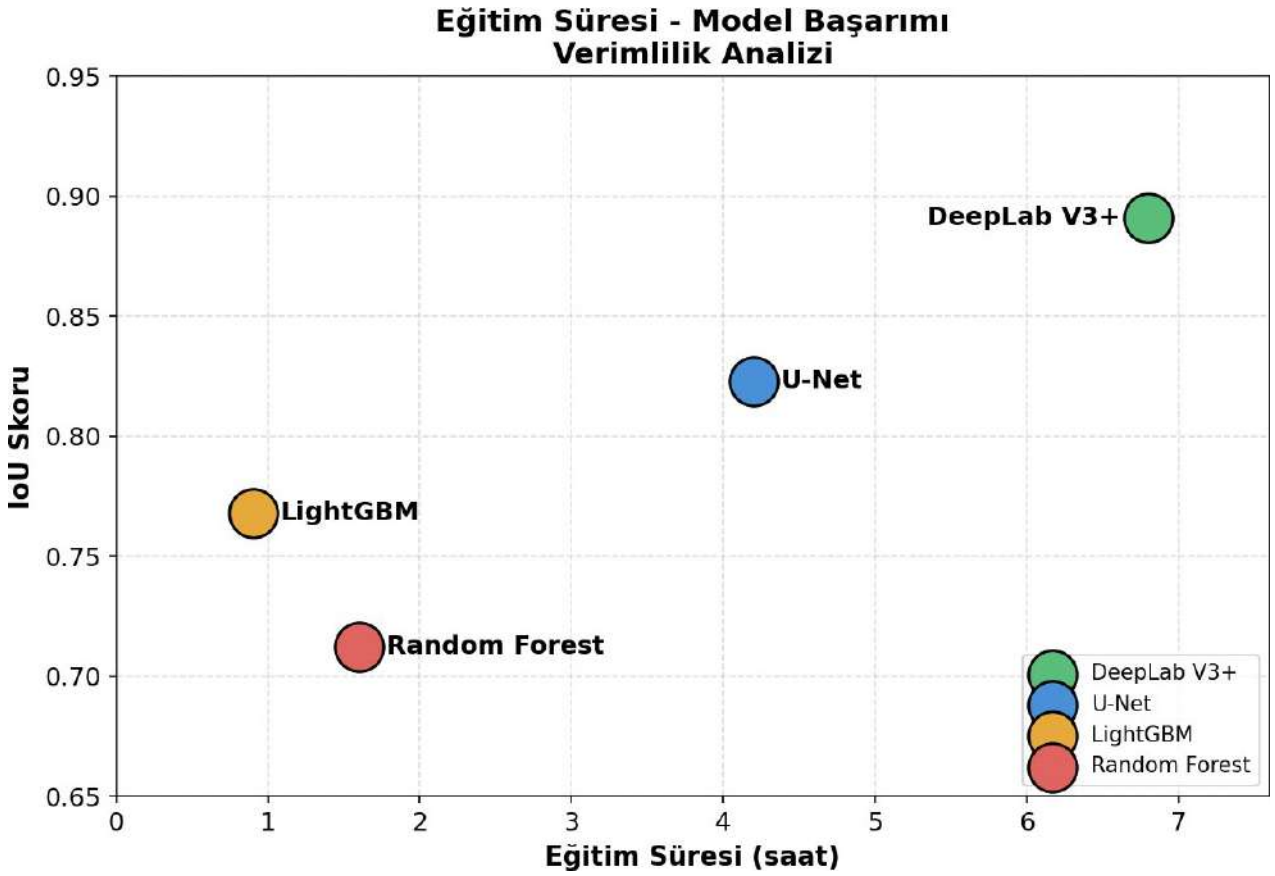
Şekil 4. Buz konsantrasyon sınıfları bazında modellerin IoU başarımı. Azınlık sınıflarında (%10–60) derin öğrenme ile topluluk modelleri arasındaki fark belirginleşmektedir.

6.3. Hesapsal Verimlilik

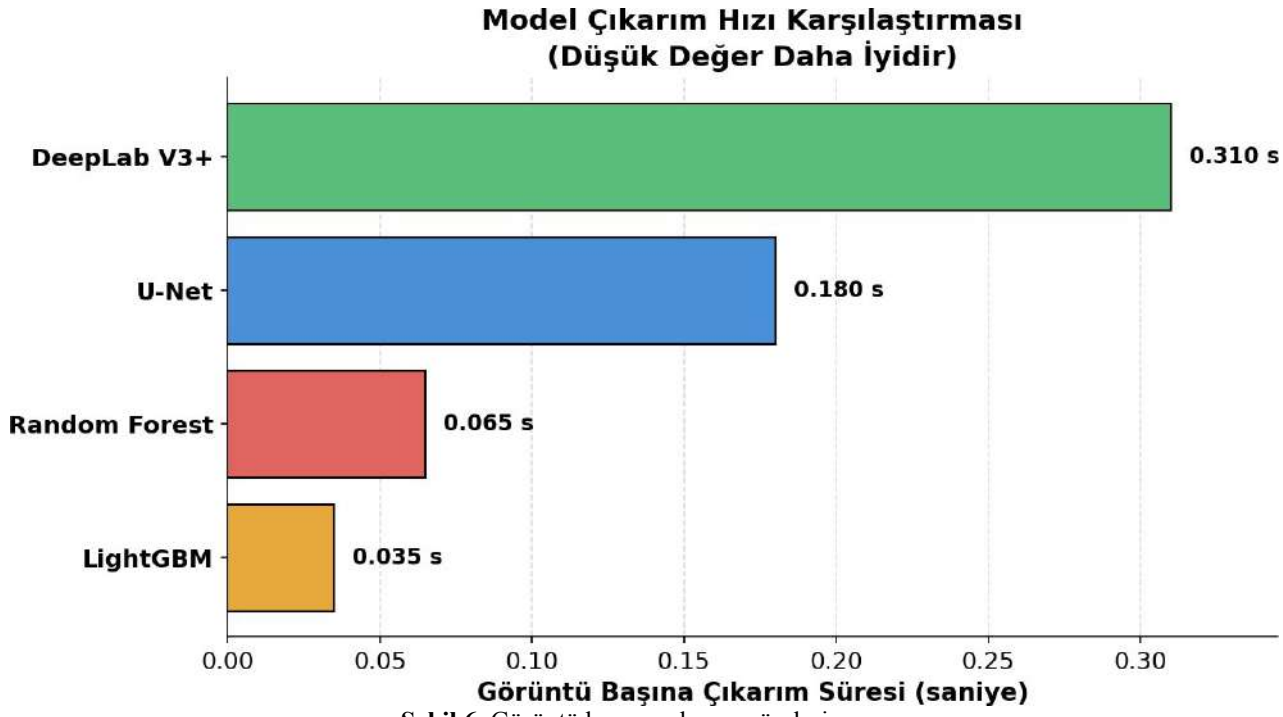
Çizelge 4, hesapsal verimlilik metriklerini sunmaktadır. DeepLab V3+'ın 6,8 saatlik eğitim süresi, LightGBM'nin 0,9 saatiyle karşılaştırıldığında 7,6 katlık bir farka işaret etmektedir. Eğitim süresi ile başarım arasındaki bu ödünleşim Şekil 5'te görselleştirilmiştir. Çıkarım hızı açısından LightGBM, görüntü başına 0,035 s işlem süresiyle DeepLab V3+'a (0,310 s) göre 8,9 kat ve U-Net'e (0,180 s) göre 5,1 kat daha hızlıdır; modellerin çıkarım hızları Şekil 6'da karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4. Model karmaşıklığı ve hesapsal verimlilik.

Model	Eğitim Süresi (sa)	Çıkarım Hızı (s/görüntü)	Parametre (M)	IoU/M-param
DeepLab V3+	6,8	0,310	41,2	0,022
U-Net	4,2	0,180	23,5	0,035
LightGBM	0,9	0,035	1,2	0,640
Random Forest	1,6	0,065	0,8	0,890

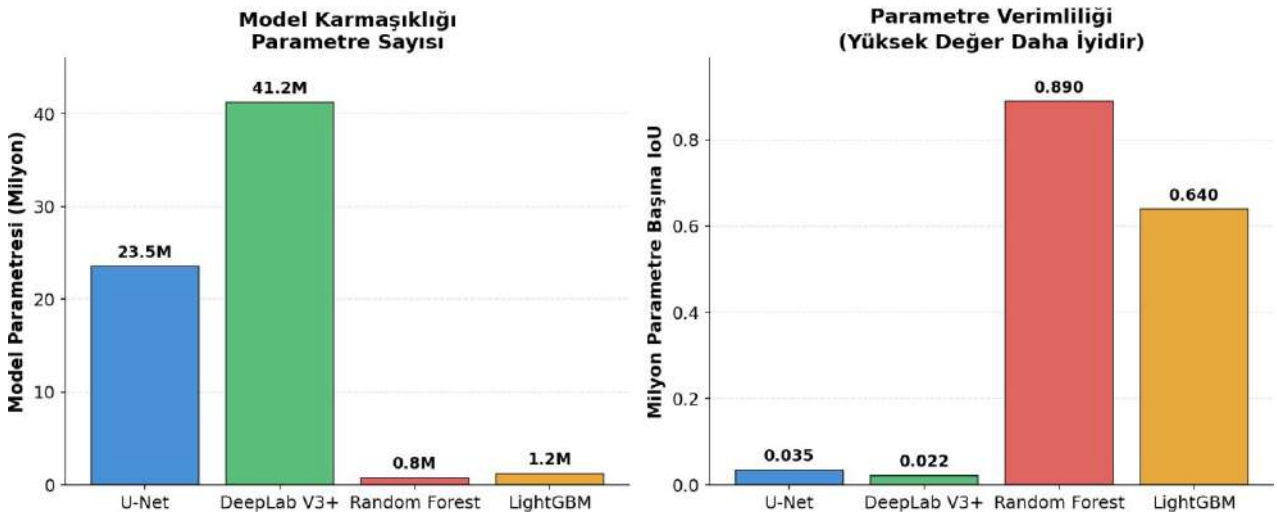


Şekil 5. Eğitim süresi ile IoU başarımı arasındaki ödünleşim.



Şekil 6. Görüntü başına çıkarım süreleri.

Parametre verimliliği (IoU/M-parametre) açısından LightGBM (0,640) ve Random Forest (0,890), DeepLab V3+'ı (0,022) belirgin biçimde geride bırakmaktadır (Şekil 7). LightGBM ile DeepLab V3+ arasındaki verimlilik oranı, yuvarlanmamış değerler üzerinden yaklaşık 29,6 kattır. Bu fark, sınırlı bellek kapasitesine sahip gömülü sistemlerde ağaç tabanlı modellerin pratik üstünlüğüne işaret etmektedir. Bununla birlikte karar ağacı düğümleri ile sinir ağı ağırlıklarının doğrudan karşılaştırılabilir büyüklükler olmadığı ve bu oranın sezgisel bir rehber olarak yorumlanması gerektiği vurgulanmalıdır.



Şekil 7. Model karmaşıklığı (sol: parametre sayısı) ve parametre verimliliği (sağ: milyon parametre başına IoU). Ağaç tabanlı modeller en yüksek başarım/ağırlık oranını sunmaktadır.

6.4. Operasyonel Çerçeve

Deneysel bulgular, model seçiminin görevin gereksinimlerine göre yönlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. DeepLab V3+, hesaplama maliyetinin ikincil öneme sahip olduğu yüksek hassasiyetli bilimsel araştırmalar için en uygun seçenektir. U-Net, doğruluk ile işlem gecikmesi arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Donanım kaynaklarının kısıtlı olduğu sınır hesaplama ortamları için LightGBM düşük bellek ayak izi ve yüksek çıkarım hızı sayesinde öne çıkmaktadır. Random Forest ise çok aşamalı analizlerde ön eleme aşaması olarak değerini korumaktadır.

Önemli bir bağlam notu olarak belirtmek gerekir ki tüm modeller optik görüntüler üzerinde test edilmiştir. Operasyonel deniz buzu haritalamada yaygın biçimde kullanılan SAR verisine doğrudan genelleme yapılabilmesi için ayrı bir doğrulama çalışması gerekmektedir. Ayrıca çıkarım hızı ölçümlerinde topluluk modelleri CPU, derin öğrenme modelleri ise A100 GPU üzerinde çalıştırılmıştır. Derin öğrenme modellerinin GPU hızlandırmasından yararlanmasına karşın LightGBM'in daha hızlı olması, uyduda gömülü işlemciler gibi yalnızca CPU bulunan ortamlarda iki grup arasındaki hız farkının daha da artacağına işaret etmektedir.

6.5. Yöntemlerin Teorik Karşılaştırması: Başarım Farklarının Kaynağı

DeepLab V3+'ın diğer üç yöntem karşısındaki üstünlüğü, mimarinin çok ölçekli bağlamsal bilgiyi uzamsal çözünürlük kaybı olmaksızın yakalayabilmesinden kaynaklanmaktadır. [6, 12, 18] atrous oranlarıyla yapılandırılan ASUPH modülü, farklı genişleme oranlarına sahip evrişim çekirdekleri aracılığıyla aynı katmanda birden fazla etkin alım alanını (receptive field) eş zamanlı olarak örneklemekte; bu sayede hem geniş, homojen buz/su yüzeylerinin (Sınıf 0, 7) hem de dar, kademeli konsantrasyon geçişlerinin (Sınıf 1–4) aynı ağ içinde temsil edilmesini sağlamaktadır. Kodçözücü modülü, düşük seviyeli özellik haritalarını kodlayıcı çıktısıyla birleştirerek sınıf sınırlarındaki uzamsal hassasiyeti geri kazandırmakta; bu özellik, Çizelge 3'te gözlenen azınlık sınıflarındaki (Sınıf 1–4) göreli üstünlüğü açıklamaktadır. U-Net de benzer bir kodlayıcı-kodçözücü ilkesini paylaşmakla birlikte, çok ölçekli bağlamsal havuzlama modülünden yoksun olması nedeniyle geniş alım alanı gerektiren homojen bölgelerde DeepLab V3+'ın gerisinde kalmaktadır; buna karşın atlama bağlantıları sayesinde ince sınır detaylarını Random Forest ve LightGBM'e kıyasla çok daha başarılı korumaktadır.

Random Forest'ın diğer üç yönteme kıyasla geride kalmasının temel nedeni, yöntemin uzamsal bağlamı öğrenilmiş bir hiyerarşi yerine sabit boyutlu, elle tasarlanmış özellik pencereleri (3×3 ve 5×5 komşuluklar) üzerinden dolaylı biçimde temsil etmesidir. Bu sabit ve sınırlı alım alanı, konsantrasyon sınıfları arasındaki kademeli, çok ölçekli geçişleri — özellikle azınlık sınıflarda (Sınıf 1–4) — yakalamakta yetersiz kalmakta; bu durum Çizelge 3'te gözlenen 0,61–0,71 aralığındaki düşük IoU değerleriyle ve Şekil 3'te bildirilen küçük yanlış sınıflandırma adacıklarıyla örtüşmektedir. Ayrıca Random Forest, her pikseli göreli olarak bağımsız bir örnek olarak sınıflandırdığından, komşu piksel tahminleri arasında CNN'lerin evrişim katmanlarında örtük biçimde var olan uzamsal tutarlılık kısıtı bulunmamaktadır; bu da parçalı ve gürültülü segmentasyon haritalarına yol açmaktadır. LightGBM, yaprak bazlı büyüme stratejisi ve histogram tabanlı ayrıştırma sayesinde aynı özellik kümesini Random Forest'a kıyasla daha etkin biçimde kullanabilmekte ve bu sayede IoU'da belirgin bir iyileşme (0,712 → 0,768) sağlamaktadır; ancak temel özellik kısıtı (sabit boyutlu komşuluk pencereleri) her iki topluluk yöntemi için de geçerliliğini korumakta ve iki topluluk yönteminin de derin öğrenme mimarilerinin gerisinde kalmasının ortak kök nedenini oluşturmaktadır. Dört yöntemin temel çalışma ilkeleri, teorik avantajları ve sınırlılıkları Çizelge 5'te özetlenmektedir.

Çizelge 5. Değerlendirilen dört yöntemin temel çalışma ilkeleri, teorik avantajları, sınırlılıkları ve bu çalışmadaki ampirik karşılıkları.

Yöntem	Temel Çalışma İlkesi	Teorik Avantajları	Teorik Sınırlılıkları	Bu Çalışmadaki Karşılığı
U-Net	Simetrik kodlayıcı-kodçözücü yapı; atlama bağlantılarıyla ince uzamsal bilginin korunması	Sınır bölgelerinde yüksek uzamsal hassasiyet; nispeten az parametreyle etkin öğrenme	Çok ölçekli bağlamsal havuzlama modülünün yokluğu; geniş, homojen bölgelerde sınırlı alım alanı (receptive field)	DeepLab V3+'ın gerisinde (IoU: 0,823), topluluk yöntemlerinin belirgin biçimde önünde
DeepLab V3+	ASUPH ([6,12,18] atrous oranları) + kodçözücü ile çok ölçekli bağlamsal öznitelik çıkarımı	Çözünürlük kaybı olmadan geniş alım alanı; hem homojen hem kademeli geçiş bölgelerinde güçlü temsil	Yüksek parametre sayısı (41,2 M) ve hesaplama maliyeti; ResNet-50 omurgasının getirdiği bellek yükü	En yüksek genel ve sınıf bazlı IoU (0,891); en yüksek eğitim/çıkarım maliyeti
Random Forest	Sabit boyutlu (3×3/5×5) elle tasarlanmış öznitelik pencereleri üzerinde karar ağaçları topluluğu	Düşük parametre sayısı; hızlı eğitim; yorumlanabilirlik; küçük veri kümelerinde aşırı öğrenmeye direnç	Öğrenilmiş uzamsal hiyerarşi yokluğu; sabit/sınırlı alım alanı; piksellerin göreli bağımsız sınıflandırılması	En düşük genel IoU (0,712); azınlık sınıflarda (S.1–4) belirgin başarım kaybı ve parçalı segmentasyon
LightGBM	Yaprak bazlı büyüme ve histogram tabanlı ayrıştırmayla gradyan artırımlı ağaç topluluğu	RF'ye kıyasla daha etkin öznitelik kullanımı; düşük bellek ayak izi; en hızlı çıkarım	Random Forest ile aynı sabit komşuluk penceresi kısıtını paylaşması; öğrenilmiş uzamsal hiyerarşi yokluğu	RF'den daha başarılı (IoU: 0,768), ancak derin öğrenme mimarilerinin gerisinde

7. KISITLAMALAR

Çalışmanın başlıca kısıtlamaları şöyle özetlenebilir: (i) Sınırlı sayıdaki yüksek kaliteli etiketli veri yamasının (n=3.392) derin öğrenme modellerinin eğitim gereksinimlerini ancak karşılaması nedeniyle veri kümesi daha fazla bölünememiş, bu nedenle bağımsız bir test kümesi ayrılamayarak öğrenme hızı çizelgelemesi ve hiper-parametre seçimi için de kullanılan doğrulama kümesi üzerinden raporlama yapılmıştır; bu durum gerçek genelleme başarımının belirli bir ölçüde abartılmasına yol açmış olabilir. (ii) Azınlık sınıfı aşırı örnekleme eşiği (%30) deneysel olarak belirlenmiş olup daha sistematik sınıf ağırlıklandırma stratejileri alternatif olarak değerlendirilebilir. (iii) Başarımın Hudson Körfezi dışındaki Arktik bölgelere transferi ayrı bir coğrafi doğrulama gerektirmektedir. (iv) Çalışma optik görüntülerle sınırlı olup SAR verisi üzerindeki karşılaştırmalar gelecek çalışmaların kapsamında ele alınmalıdır.

8. SONUÇ

Bu çalışma, 3.392 görüntülük bir SIGRID-3 uyumlu veri kümesi üzerinde dört modelin karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmaktadır. DeepLab V3+, 0,891 IoU değeriyle en üstün segmentasyon başarımına ulaşmış; bu durum özellikle azınlık buz konsantrasyon sınıflarında çok ölçekli bağlamsal özellik işlemenin etkinliğini kanıtlamıştır. LightGBM ise 8,9 katlık çıkarım hızı avantajı ve yaklaşık 29,6 katlık parametre verimliliğiyle kaynak kısıtlı operasyonel konuşlandırma için en uygulanabilir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalar; (i) SAR ve çok modaliteli veri entegrasyonunun değerlendirilmesini, (ii) bilgi damıtma yoluyla hibrit derin öğrenme topluluk çerçevelerinin geliştirilmesini ve (iii) mevsimsel buz geçişlerini modelleyen zamansal mimarilerin araştırılmasını kapsamalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2224-B Yurt İçi Bilimsel Etkinliklere Katılımı Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Veriler, NSIDC'nin SIGRID-3 havuzundan temin edilmiştir (DOI: 10.7265/N51V5BW9).

KAYNAKLAR

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32.

Chen, L.C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K. ve Yuille, A.L. (2018a). DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 40(4), 834–848.

Chen, L.C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F. ve Adam, H. (2018b). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. European Conference on Computer Vision (ECCV), Münih, Almanya, ss. 801–818.

Garcia-Garcia, A., Orts-Escolano, S., Oprea, S., Villena-Martinez, V. ve Garcia-Rodriguez, J. (2017). A review on deep learning techniques applied to semantic segmentation. arXiv:1704.06857.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kanada Buz Servisi [KBS] (2009). Canadian Ice Service Arctic Regional Sea Ice Charts in SIGRID-3 Format (G02171, Sürüm 1) [Veri kümesi]. Ulusal Kar ve Buz Veri Merkezi (NSIDC), Boulder, Colorado, ABD. https://doi.org/10.7265/N51V5BW9

Karvonen, J., Similä, M. ve Mäkynen, M. (2005). Open water detection from Baltic Sea ice Radarsat-1 SAR imagery.

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2(3), 275–279.

Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. ve Liu, T.Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), Long Beach, CA,

ss. 3149–3157.

Kingma, D.P. ve Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. International Conference on Learning Representations (ICLR), San Diego, CA.

LeCun, Y., Bengio, Y. ve Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444.

Long, J., Shelhamer, E. ve Darrell, T. (2015). Fully convolutional networks for semantic segmentation. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, ss. 3431–3440.

Ronneberger, O., Fischer, P. ve Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation.

Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Münih, Almanya, ss. 234–241.

Serreze, M.C. ve Barry, R.G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and Planetary Change, 77(1–2), 85–96.

Stroeve, J.C. ve Notz, D. (2018). Changing state of Arctic sea ice across all seasons. Environmental Research Letters, 13(10), 103001.

Wang, L., Scott, K.A., Xu, L. ve Clausi, D.A. (2016). Sea ice concentration estimation during melt from dual-pol SAR scenes using deep convolutional neural networks: A case study. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(8), 4524–4533.

Zhang, L., Zhang, L. ve Du, B. (2016). Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 4(2), 22–40.

KENTSEL ISI ADASI VE YEŞİL ALAN ERİŞİLEBİLİRLİĞİNİN VERİ ODAKLI KARAR DESTEK YAKLAŞIMIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Büşra ERTAŞ[1], Gökçe Betül ÇAKMAK[2],

[1] İstanbul Teknik Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Doktora Programı, 34469, Maslak, İstanbul, ertas24@itu.edu.tr
[2] GVG Danışmanlık A.Ş., Coğrafi Bilgi Sistemleri Uzmanı, 34469, Beşiktaş, İstanbul, gokcebetulcakmak@gmail.com

ÖZET

Günümüzde iklim değişikliği, doğal ve insan sistemleri üzerinde çok boyutlu etkiler yaratan küresel ölçekteki en önemli çevresel sorunlardan biridir. Özellikle kentsel alanların kontrolsüz ve hızlı biçimde büyümesi; yapılaşmış yüzeylerin artmasına, doğal arazi örtüsünün azalmasına, ormansızlaşmaya ve geçirimsiz yüzey oranının artmasına neden olmaktadır. Bu süreç, kentlerin mikroklimatik yapısını önemli ölçüde değiştirerek sel, kuraklık, orman yangınları ve sıcak hava dalgası gibi doğal tehlikelere karşı savunmasızlığını artırmaktadır.

Bu bağlamda küresel iklim değişikliği ve hızlı kentleşmenin en belirgin sonuçlarından biri kentsel ısı adası etkisidir. Kentsel ısı adası etkisi, yoğun yapılaşmış alanlarda çevredekilere göre daha yüksek sıcaklıklarla karakterize edilen, kendine özgü bir kentsel iklim olarak tanımlanmaktadır (Oke, 2002). Bu olgu, binaların ve geçirimsiz yüzeylerin geliştirilmesi gibi doğal çevrenin insan kaynaklı olarak değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Kentsel ısı adası etkisi sıcak hava dalgalarıyla birlikte değerlendirildiğinde, şehirlerde insan sağlığı, yaşam kalitesi, yaşanabilirlik ve çevresel adalet açısından tehditler oluşturmaktadır (Fischer vd., 2025; Manoli vd., 2019).

Kentsel yeşil alanlar (örneğin, parklar, ağaç gölgeleri, yeşil yollar), kentsel ısı adası etkisini azaltılmasında temel planlama araçlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır (Eckart vd., 2017; Keith vd., 2021). Yeşil alanlar; buharlaşma, gölgeleme, yüzey sıcaklığını azaltma ve mikroklimatik koşulları iyileştirme yoluyla kentsel sıcaklıkların dengelenmesine önemli katkı sağlamaktadır (Cai vd., 2025). Bununla birlikte yeşil alanların, mekânsal dağılımı, erişilebilirliği, büyüklüğü, niteliği ve ısı azaltıcı kapasitesi de iklim uyum politikaları açısından belirleyici olmaktadır. Bu nedenle yeşil alan planlaması, kişi başına düşen yeşil alan miktarını artırmaya yönelik bir yaklaşım olmakla birlikte kentsel ısı stresi altında bulunan bölgelerde iklimsel faydanın adil ve erişilebilir biçimde dağıtılmasını hedefleyen stratejik bir planlama alanı olarak ele alınması önemlidir.

Son yıllarda yapılan araştırmalarda kentsel ısı adası riski ve kentsel yeşil alan erişilebilirliği birlikte değerlendirilmekte; müdahale için hangi alanlara ve hangi toplumsal gruplara öncelik verilmesi gerektiği belirlenmeye çalışılmaktadır (Massaro vd., 2023; Zhang vd., 2024; Yu vd., 2025). Bazı çalışmalarda ise yeşil altyapının mekânsal dağılımı ve bu alanlara erişebilen nüfus grupları ile yeşil alan hizmetlerinden yararlanma düzeyi çevresel adalet perspektifiyle değerlendirilmektedir (Liu vd., 2021). Bu kapsamda uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri, mekânsal erişilebilirlik analizleri ve çok ölçütlü değerlendirme yöntemleri; kentsel planlamada veriye dayalı, mekana özgü ve uygulanabilir iklim uyum stratejilerinin geliştirilmesinde kullanılan önemli araçlardır (D'Auria vd., 2025; Zhao vd., 2025). Veri odaklı karar destek yaklaşımları, kentsel ısı adası etkisinin nerelerde yoğunlaştığını, yeşil alanların bu alanlarla nasıl ilişkilendiğini ve planlama müdahalelerinin hangi bölgelerde önceliklendirilmesi gerektiğini ortaya koyması bakımından kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda çalışma, İstanbul il ölçeğinde kentsel ısı adası alanlarını belirlemeyi ve kentsel ısı adası stresine maruz kalan nüfusu saptayarak nitelikli yeşil alanlara yürünebilir mesafe erişimini mekânsal olarak analiz eden veri odaklı bir karar destek yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen yaklaşım ile, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması bakımından yeşil alan müdahalesine ihtiyaç duyulan öncelikli bölgeler tespit edilmiştir.

Çalışma alanı olarak İstanbul ili ve bu metropoliten yapının en yüksek iklimsel risk taşıyan bölgesi olarak Esenyurt ilçesi seçilmiştir. İstanbul; yüksek nüfus yoğunluğu, ulaşım ve yapılaşma baskısı, geçirimsiz yüzey yaygınlığı, hızlı arazi kullanım değişimleri ve yeşil alan dağılımındaki mekânsal eşitsizlikler nedeniyle kentsel ısı adası (KIA) etkisinin son derece belirgin yaşandığı bir metropoldür. İdari ilçeler arasında açık alan niteliği, iklimsel kırılganlık ve yeşil alana erişim düzeyleri bakımından gözlenen farklılıklar, kentin bütüncül bir karar destek çerçevesiyle incelenmesini önemli kılmaktadır. Bu doğrultuda Esenyurt ilçesi; 12,35 km² ile en yüksek mutlak kentsel ısı adası yüzölçümüne ve ilçe nüfusunun %49,5'ini kapsayan 496.773 kişi ile en yüksek maruziyet büyüklüğüne sahip bölge olarak tespit edilmiştir. Ayrıca ilçe, çocuk nüfusunun %52,0'sinin ve yaşlı nüfusunun %44,0'ünün doğrudan ısı adası sınırları içinde yaşamasıyla, hassas grup kırılganlığı açısından da il genelinde ilk sırada yer almaktadır. Yoğun konut stoku, yüksek geçirimsiz yüzey oranı, hızlı ve kontrolsüz kentleşme baskısı ile nitelikli yeşil alanların mekânsal dağılımındaki dengesizlikler, Esenyurt'ta kentsel ısı adası etkisini ve iklimsel riskleri aşırı düzeyde belirginleştirmektedir.

*Bu çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı dört aşamalı bir mekânsal analiz metodolojisi izlenmiştir. Araştırma kapsamında, kentsel ısı adası ve yeşil alan erişilebilirliğini bütüncül biçimde değerlendirmek amacıyla **iki aşamalı bir ölçek stratejisi** benimsenmiştir. Analizin **ilk aşamasında**, İstanbul il ölçeğinde kentsel yüzey sıcaklıklarının (LST) yüksek çözünürlüklü olarak elde edilmesi ve iklimsel sıcaklık farklılıklarının haritalanması için 2025 yılı yaz dönemine ait Landsat 8 OLI/TIRS (Collection 2 Level-2, ST_B10) uydu verileri Google Earth Engine (GEE) bulut bilişim platformunda medyan kompoziti alınarak işlenmiştir. Tek bir görüntü yerine medyan kompozit kullanılması, tekil atmosferik anomalilerin sonucu çarpıtmasını önlemek amacıyla tercih edilmiştir. Uzaktan algılama ve bulut bilişim teknolojilerinin entegrasyonu, güncel kentsel ısı adası izleme ve değerlendirme sistemlerinin temelini oluşturmaktadır (Zhao vd., 2025). Kırsal ve tarım arazilerinin sıcaklıklardan kaynaklanan gürültüleri önlemek için ESA WorldCover (2021) arazi örtüsü verisinden yapılaşmış alan (sınıf 50) maskesi oluşturulmuş; LST katmanı bu maskeyle kırpılarak tarım, orman ve su yüzeyleri analiz dışı bırakılmıştır (Martin vd., 2014). Yapılaşmış piksellerin yüzey sıcaklığı ortalamasına 1 standart sapma eklenerek (LST_eşik = μ + 1σ) kentsel ısı adası (KIA) poligonları izole edilmiştir.*

Bu yaklaşım, klasik kent-kırsal fark yöntemi yerine, kırsal referans alanı gerekliliğini ortadan kaldıran "kent-içi ısı adası" yaklaşımına dayanmaktadır (Martin vd., 2014; Oke, 1982).

***İkinci aşamada**, elde edilen kentsel ısı adası poligonları 2025 yılına ait mahalle nüfus verileriyle kesiştirilerek riske maruz kalan toplam nüfus ile hassas grup (0-14 yaş çocuk ve 65+ yaş yaşlı) maruziyet oranları hesaplanmıştır (TÜİK, 2025). İl ölçeğindeki hesaplama sonucunda, mutlak ısı adası alanı (12,35 km²) ve maruz kalan nüfus büyüklüğü (496.773 kişi, ilçe nüfusunun %49,5'i) bakımından en dezavantajlı ilçe olan Esenyurt, erişilebilirlik analizlerinin derinleştirileceği vaka alanı olarak önceliklendirilmiştir.*

***Üçüncü aşamada**, Esenyurt sınırları içinde OpenStreetMap/Overpass API verileriyle tespit edilen ve büyüklüğü 1.000 m² ve üzerinde olan 74 nitelikli parkın giriş noktalarından başlanarak topolojik yol ağı analizi gerçekleştirilmiştir (OpenStreetMap, t.y.). Analize dahil edilen parkların veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla, OpenStreetMap üzerinden çekilen veriler belediye açık veri portalları ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ile doğrulanmış; kamusal kullanıma açık, vejetasyon örtüsüne sahip aktif yeşil alanlar çalışmaya dahil edilmiştir. Ortalama 4.5 km/saat yürüme hızı baz alınarak günlük/anlık kullanımı temsil eden 5 dakikalık (≤ 400 m) ve mahalle ölçeğinde kabul edilebilir yürüme erişimini temsil eden 10 dakikalık (≤ 800 m) izokron poligonları üretilmiştir. Literatürde vurgulandığı üzere, izokron tabanlı CBS yaklaşımları, kentsel alanda mekânsal erişilebilirliğin modellenmesinde en güvenilir yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (D'Auria vd., 2025). Isı adası sınırları ile izokron poligonlarının farkı alınarak ($\text{KIA} \setminus \text{Erişilebilir\_Alan}$), ısı stresi altında olup yürüme mesafesinde yeşil alana erişimi bulunmayan kentsel bölgeler filtrelenmiş ve fiziksel erişim boşlukları çıkarılmıştır. Elde edilen bu erişim boşlukları, kentsel yeşil altyapının iklim uyum kapasitesini değerlendirmek açısından son derece kritik bir göstergedir. Nitekim yeşil alanların kent içinde adil ve dengeli dağılmaması, özellikle yüksek sıcaklık maruziyeti altındaki mahallelerde çevresel ve iklimsel eşitsizliklerin derinleşmesine yol açmaktadır (Mitchell ve Chakraborty, 2014; Wolch vd., 2014).*

***Son aşamada ise**, mahalle idari sınırlarında nüfusun homojen dağıldığını varsayan alan bazlı yöntemin doğruluğunu test etmek amacıyla bina bazlı dasimetrik haritalama tekniği uygulanmıştır (Eicher & Brewer, 2001; Mennis, 2003; Wright, 1936). Alansal ağırlıklandırma, her mahallenin nüfusunun kendi sınırları içinde homojen dağıldığını varsaymaktadır. Ancak gerçekte nüfus, mahalle içinde bina, arsa ve arazi kullanımına göre son derece eşitsiz dağılmaktadır (Wright, 1936). Bu sorunu gidermek için geliştirilen dasimetrik haritalama, nüfusu idari sınırlar yerine yardımcı bir mekânsal değişkene (arazi örtüsü, arazi kullanımı, bina stoku vb.) göre yeniden dağıtan bir enterpolasyon tekniğidir. Wright (1936) tarafından Cape Cod örneğiyle tanıtılmasından bu yana nüfus haritalamasında kullanılan önemli bir yöntem haline gelmiştir. Bu doğrultuda, açık erişimli, küresel ve yüksek çözünürlüklü LoD1 3D bina stoku verisi sunan Global Building Atlas (Zhu vd., 2025) verisetinden yararlanılmış; Esenyurt'taki 32.127 binanın taban alanı ve yükseklik değerleri çekilerek bina hacimleri ($\text{Taban Alanı} \times \text{Yükseklik}$) hesaplanmıştır. Elde edilen bina hacimleri oranında mahalle nüfusları yapılara dağıtılarak 10 dakikalık erişim boşluğunda kalan kritik nüfus doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, alan bazlı klasik hesaplamaların erişim krizini küçültmediğini teyit etmiş ve yeni yeşil alan yatırımlarının nereye yapılması gerektiğini ortaya koyan veri odaklı bir karar destek mekanizması oluşturmuştur.*

Çalışma, kentsel ısı adası etkisinin özellikle yoğun yapılaşmış, geçirimsiz yüzey oranı yüksek ve sıkışık konut dokularının bulunduğu bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Bu bölgelerde yüzey sıcaklığı değerlerinin belirgin biçimde yükseldiği; buna karşılık büyük ve nitelikli yeşil alanların yetersiz ve dengesiz dağıldığı tespit edilmiştir. İstanbul ölçeğinde mutlak ısı adası büyüklüğü (12,35 km²) ve maruz kalan nüfus oranı (%49,5 ile 496.773 kişi) bakımından en dezavantajlı olarak Esenyurt ilçesi ön plana çıkmıştır. İlçede mahalle ve yol ağı ölçeğinde yapılan erişilebilirlik analizi, ısı stresi altındaki nüfusun nitelikli yeşil alanlara erişim krizini ortaya koymuştur. Esenyurt'taki 74 nitelikli park (≥ 1.000 m^2) üzerinden yürütülen analizlerde, 5 dakikalık (≤ 400 m) yürüme eşiğinde ısı adasında yaşayıp yeşil alana erişemeyen kritik nüfusun 443.163 kişi (%44,1) olduğu; eşik 10 dakikaya (≤ 800 m) genişletildiğinde dahi 247.385 kişinin (%24,6) erişim dışı kaldığı saptanmıştır. Binaların kat ve hacim verilerine dayalı dasimetrik doğrulama analizi ise 10 dakikalık kritik nüfusu %29,8 (298.875 kişi) olarak hesaplamıştır. Dasimetrik doğrulama analizi sonucunda kritik nüfus oranının %24,6'dan %29,8'e yükselmesi; Esenyurt'taki konut stokunun ve nüfus yoğunluğunun kentsel ısı adasının yoğunlaştığı yapılaşmış alanlarda kümelendiğini kanıtlamaktadır. Bu durum, klasik alansal ağırlıklandırma yöntemlerinin kentsel iklim risklerini küçültme eğiliminde olduğunu ampirik olarak ortaya koymaktadır. Ayrıca çocuk nüfusun %52,0 oranında ısı stresi altında bulunması, planlama önceliklerinin çevresel adalet perspektifiyle yeniden ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, yeşil alan planlamasında kişi başına düşen yeşil alan miktarı gibi geleneksel göstergelerin tek başına yeterli olmadığını doğrulamaktadır. Bir kentte toplam yeşil alan miktarı yüksek olsa bile, bu alanların sıcak bölgelerde yaşayan nüfusa uzak, parçalı, küçük veya erişimi sınırlı olması, iklim uyum kapasitesini zayıflatabilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, İstanbul ili Esenyurt ilçesinde kentsel ısı adası alanları ile nitelikli yeşil alanlara erişim düzeyini bütüncül olarak değerlendiren mekânsal bir analiz yaklaşımı sunmaktadır. Araştırma; Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden üretilen kent-içi yüzey sıcaklığı haritalarını, topolojik yol ağı (izokron) analizlerini ve bina bazlı dasimetrik doğrulama tekniklerini entegre eden veri odaklı bir karar destek modeli geliştirmektedir. Çalışma, kentsel yeşil altyapının yalnızca niceliksel varlığını değil, ısı stresi altındaki hassas toplumsal kesimler açısından mekânsal ve fiziksel erişilebilirliğini sorgulamasına önemli katkı sunmaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda; Esenyurt'un Talatpaşa, Saadetdere, Hürriyet ve Pınar gibi yüksek risk grubunda yer alan mahallelerinde kamulaştırma, dikey yeşil altyapı, cep parkları ve mikroklimatik serinleme koridorlarının öncelikli iklim uyum stratejileri olarak hayata geçirilmesi gerekmektedir. Sunulan bu metodolojik çerçeve, iklim değişikliğine dirençli, adil ve yaşanabilir kentlerin planlanmasına yönelik uygulanabilir ve farklı metropoliten alanlara aktarılabilir bir araç niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel Isı Adası, Yeşil Alan Erişebilirliği, Google Earth Engine, Ağ Analizi, İstanbul.

KAYNAKÇA

Cai, M., Li, M., & Liu, H. (2025). Optimizing cooling efficiency of urban greenspaces across local climate zones in Wuhan, China. Urban Forestry & Urban Greening, 105, 128691. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.12869

D'Auria, A., Di Ruocco, I., & Gioia, A. (2025). An integrated isochrone-based geospatial analysis of mobility policies and vulnerability hotspots in the Lazio Region, Italy. ISPRS International Journal of Geo-Information, 14(10), 395. https://doi.org/10.3390/ijgi14100395

Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development–A review. Science of the Total Environment, 607, 413-432. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254

Eicher, C. L., & Brewer, C. A. (2001). Dasymetric mapping and areal interpolation: Implementation and evaluation. Cartography and Geographic Information Science, 28(2), 125-138. https://doi.org/10.1559/152304001782173042

ESA WorldCover. (2021). v200 Land cover dataset. European Space Agency. https://esa-worldcover.org/

Fischer, E. M., Bador, M., Huser, R., Kendon, E. J., Robinson, A., & Sippel, S. (2025). Record-breaking extremes in a warming climate. Nature Reviews Earth & Environment, 6(7), 456-470. https://doi.org/10.1038/s43017-025-00680-8

Keith, H., Vardon, M., Obst, C., Young, V., Houghton, R. A., & Mackey, B. (2021). Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting. Science of the Total Environment, 769, 144341. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144341

Liu, D., Kwan, M. P., & Kan, Z. (2021). Analysis of urban green space accessibility and distribution inequity in the City of Chicago. Urban Forestry & Urban Greening, 59, 127029. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127029

Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., ... & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. Nature, 573(7772), 55-60. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9

Martin, P., Baudouin, Y., & Gachon, P. (2014). An alternative method to characterize the surface urban heat island. International Journal of Biometeorology, 59(7), 849–861. https://doi.org/10.1007/s00484-014-0902-9

Massaro, E., Schifanella, R., Piccardo, M., Caporaso, L., Taubenböck, H., Cescatti, A., & Duveiller, G. (2023). Spatially-optimized urban greening for reduction of population exposure to land surface temperature extremes. Nature Communications, 14(1), 2903. https://doi.org/10.1038/s41467-023-38596-1

Mennis, J. (2003). Generating surface models of population using dasymetric mapping. The Professional Geographer, 55(1), 31-42. https://doi.org/10.1111/0033-0124.10042

Mitchell, B. C., & Chakraborty, J. (2014). Urban heat and climate justice: A landscape of thermal inequity in Pinellas County, Florida. Geographical Review, 104(4), 459–480. https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2014.12039.x

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1-24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Oke, T. R. (2002). Boundary layer climates (2nd ed.). Routledge.

OpenStreetMap. (t.y.). Overpass API. https://overpass-api.de/

TÜİK. (2025). Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi (ADNKS) sonuçları. Türkiye İstatistik Kurumu. https://www.tuik.gov.tr/

Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities "just green enough". Landscape and Urban Planning, 125, 234–244. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017

Wright, J. K. (1936). A method of mapping densities of population: With Cape Cod as an example. Geographical Review, 26(1), 103-110. https://doi.org/10.2307/209467

Yu, H., Zahidi, I., & Fai, C. M. (2025). Mitigating urban heat islands (UHI) through vegetation restoration: Insights from mining communities. Global Challenges, 9(3), 2400288. https://doi.org/10.1002/gch2.202400288

Zhang, H., Kang, M. Y., Guan, Z. R., Zhou, R., Zhao, A. L., Wu, W. J., & Yang, H. R. (2024). Assessing the role of urban green infrastructure in mitigating summertime Urban Heat Island (UHI) effect in metropolitan Shanghai, China. Sustainable Cities and Society, 112, 105605. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105605

Zhao, L., Fan, X., & Hong, T. (2025). Urban heat island effect: Remote sensing monitoring and assessment—Methods, applications, and future directions. Atmosphere, 16(7), 791. https://doi.org/10.3390/atmos16070791

Zhu, X. X., Chen, S., Zhang, F., Shi, Y., & Wang, Y. (2025). GlobalBuildingAtlas: an open global and complete dataset of building polygons, heights and LoD1 3D models. Earth System Science Data, 17(12), 6647-6668. https://doi.org/10.5194/essd-17-6647-2025

HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMASINDA AŞIRI ÖĞRENME MAKİNESİ HİPERPARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON ALGORİTMALARIYLA AYARLANMASI

Berra Nur TUNÇ[1], Selver GÜNGÖR[2], Ümit Haluk ATASEVER[3], Erkan BEŞDOK[4]

[1]Arş. Gör., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, berranursen@erciyes.edu.tr
[2]Arş. Gör., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, selvergungor@erciyes.edu.tr
[3]Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, uhatasever@erciyes.edu.tr
[4]Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, ebesdok@erciyes.edu.tr

ÖZET

Hiperspektral görüntüler yüzlerce dar spektral bantta yüksek boyutlu veri sağlarken sınırlı sayıda etiketli örnek boyutluluk laneti nedeniyle sınıflandırma başarımını sınırlamaktadır. Aşırı öğrenme makinesi (Extreme Learning Machine, ELM) gizli katman ağırlıklarını rastgele atayıp yalnızca çıkış ağırlıklarını analitik olarak çözdüğünden hızlı eğitilebilen bir sınıflandırıcıdır. Ancak başarı gizli nöron sayısı, etkinleştirme fonksiyonu ve düzenlileştirme katsayısı gibi hiperparametrelere belirgin biçimde bağlıdır. Bu çalışmada ELM hiperparametrelerinin ayarlanmasında toplamda sekiz metasezgisel ve Bayesçi optimizasyon algoritması olan Runge-Kutta Optimizasyonu (RUN), Ağaç-yapılı Parzen Kestiricisi (TPE), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Kum Kedisi Sürü Optimizasyonu (SCSO), Diferansiyel Evrim (DE), Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA), Cüce Firavun Faresi Optimizasyonu (DMOA) ve Yapay Goril Sürüsü Optimizasyonu (GTO) varsayılan (Default) yapılandırmayla karşılaştırılmıştır. Deneyler Indian Pines, Pavia University ve Salinas hiperspektral kıyas veri kümeleri üzerinde, gizli nöron sayısı [10,500], etkinleştirme fonksiyonu {sigmoid, tanh, ReLU, sin} ve düzenlileştirme katsayısı [10^{-3},10^{3}] arama uzayında, sabit 100 işlev değerlendirmesi bütçesi ve beş rastgele tohumla yürütülmüştür. Bulgular tüm optimizasyon algoritmalarının üç veri kümesinde de varsayılan yapılandırmayı anlamlı biçimde geçtiğini göstermiştir. En büyük kazanım sınıf dağılımı dengesiz olan Indian Pines'ta elde edilmiştir. Genel doğruluk RUN ile 0,5938'den 0,7387'ye (yaklaşık 14,5 puan) yükselmiştir. Pavia University'de 0,8379'dan 0,9118'e (AOA/TPE), Salinas'ta 0,8561'den 0,9189'a (DMOA) çıkan genel doğruluk her iki veri kümesinde 6-7 puanlık iyileşmeye karşılık gelmektedir. Friedman sıralama testinde en iyi ortalama sırayı RUN (2,77) ve TPE (2,83) almıştır. Varsayılan yapılandırma tüm veri kümelerinde son sırada (9,00) kalarak Nemenyi testinde optimize edilmiş sekiz algoritmanın yedisinden anlamlı biçimde ayrışmıştır. Optimize edilen yapılandırmalar ortalamada geniş bir gizli katman ile ReLU etkinleştirmesini tercih etmiştir. Sonuçlar düşük bir hesaplama bütçesiyle uygulanan otomatik hiperparametre ayarının ELM tabanlı hiperspektral sınıflandırma için sağlam ve pratik bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: aşırı öğrenme makinesi, hiperparametre optimizasyonu, hiperspektral görüntü, optimizasyon algoritmaları, sınıflandırma

ABSTRACT

TUNING EXTREME LEARNING MACHINE HYPERPARAMETERS WITH OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR HYPERSPECTRAL IMAGE CLASSIFICATION

Hyperspectral images provide high-dimensional data in hundreds of narrow spectral bands, while a limited number of labelled samples restricts classification performance because of the curse of dimensionality. The Extreme Learning Machine (ELM) is a fast-trainable classifier that assigns hidden-layer weights randomly and solves only the output weights analytically. However, its performance depends markedly on hyperparameters such as the number of hidden neurons, the activation function and the regularization coefficient. This study compares a total of eight metaheuristic and Bayesian optimization algorithms -Runge-Kutta Optimization (RUN), the Tree-structured Parzen Estimator (TPE), Particle Swarm Optimization (PSO), Sand Cat Swarm Optimization (SCSO), Differential Evolution (DE), the Arithmetic Optimization Algorithm (AOA), the Dwarf Mongoose Optimization Algorithm (DMOA) and the Artificial Gorilla Troops Optimizer (GTO)- against the default configuration for tuning ELM hyperparameters. Experiments were carried out on the Indian Pines, Pavia University and Salinas benchmark hyperspectral data sets, over a search space of hidden neurons in [10,500], activation function in {sigmoid, tanh, ReLU, sin} and regularization coefficient in [10^{-3},10^{3}], under a fixed budget of 100 fitness evaluations and five random seeds. The findings show that all optimization algorithms significantly outperformed the default configuration on all three data sets. The largest gain was obtained on the class-imbalanced Indian Pines data set. Overall accuracy rose from 0.5938 to 0.7387 with RUN (about 14.5 percentage points). On Pavia University, accuracy rose from 0.8379 to 0.9118 (AOA/TPE), and on Salinas from 0.8561 to 0.9189 (DMOA), corresponding to 6-7 point gains on both data sets. In the Friedman rank test, RUN (2.77) and TPE (2.83) achieved the best mean ranks, while the default configuration ranked last on every data set (9.00) and was significantly separated from seven of the eight optimized algorithms in the Nemenyi test (only the comparison with GTO was borderline). On average, optimized configurations favored a large hidden layer with ReLU activation. The results show that automatic hyperparameter tuning under a low computational budget is a robust and practical strategy for ELM-based hyperspectral classification.

Keywords: classification, extreme learning machine, hyperparameter optimization, hyperspectral image, optimization algorithms

1. GİRİŞ

Hiperspektral görüntüleme sistemleri bir yeryüzü sahnesini görünür ve yakın kızılötesi tayf aralığında yüzlerce dar ve bitişik spektral bantta örnekleyerek her piksel için neredeyse sürekli bir spektral imza elde etmeyi mümkün kılar. Bu zengin spektral içerik tarımsal izleme, ormancılık, çevresel gözlem, jeolojik haritalama, mineral tespiti ve arazi örtüsü

kullanımı, sınıflandırması gibi uzaktan algılama uygulamalarında geleneksel çok bantlı (multispektral) görüntülerle ayırt edilemeyen ince spektral farklılıkların ortaya konmasına olanak tanır (Ghamisi vd., 2017). Bununla birlikte bant sayısının fazlalığı sınırlı sayıda etiketli eğitim örneğiyle bir araya geldiğinde boyutluluk laneti olarak bilinen soruna yol açmaktadır. Özellik uzayının boyutu arttıkça sabit sayıda eğitim örneğiyle eğitilen bir sınıflandırıcının genelleme başarımı belirli bir noktadan sonra düşmeye başlar (Hughes 1968). Bu nedenle hiperspektral görüntü sınıflandırmasında hem yüksek boyutlu doğrusal olmayan karar sınırlarını öğrenebilen hem de sınırlı örneklemle aşırı öğrenmeye karşı dirençli sınıflandırıcılara gereksinim duyulmaktadır.

Literatürde bu amaçla destek vektör makineleri (Melgani ve Bruzzone, 2004), çekirdek tabanlı yöntemler (Camps-Valls ve Bruzzone, 2005) gibi klasik makine öğrenmesi modelleri ile evrişimli sinir ağları başta olmak üzere derin öğrenme mimarileri (Chen vd., 2014) yaygın biçimde kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar yüksek sınıflandırma başarımı sunmakla birlikte çoğunlukla uzun eğitim süreleri, çok sayıda hiperparametre ve büyük miktarda etiketli veri gerektirmektedir. Aşırı öğrenme makinesi (Extreme Learning Machine, ELM) tek gizli katmanlı ileri beslemeli sinir ağları için önerilen alternatif bir öğrenme algoritmasıdır (Huang vd., 2006). ELM'de girdi ağırlıkları ve gizli katman eğilimleri rastgele atanıp eğitim boyunca sabit tutulmaktadır. Yalnızca gizli katman ile çıkış arasındaki ağırlıklar Moore-Penrose genelleştirilmiş tersi yardımıyla kapalı formda çözülür. Bu özelliği sayesinde ELM iteratif geri yayılıma dayanan klasik sinir ağlarına kıyasla çok daha kısa sürede eğitilir, yerel minimuma takılma riski taşımaz ve düşük hesaplama maliyeti nedeniyle hiperspektral görüntü sınıflandırması gibi yüksek boyutlu problemlerde tercih edilmektedir (Pal 2009; Zhou vd., 2015).

Bununla birlikte ELM'in başarımı gizli nöron sayısı, gizli katmanda kullanılan etkinleştirme fonksiyonu ve çözümün kararlılığını sağlayan düzenlileştirme (ridge) katsayısı gibi hiperparametrelere belirgin biçimde bağlıdır. Gizli nöron sayısının yetersiz seçilmesi modelin ayırt edicilik gücünü sınırlarken; aşırı büyük bir gizli katman ya da uygun olmayan bir düzenlileştirme düzeyi aşırı uyuma yol açabilmektedir. Geleneksel uygulamalarda bu hiperparametreler çoğunlukla deneme yanılma yoluyla ya da sabit varsayılan değerlerle (örn. 100 gizli nöron, sigmoid etkinleştirme, düzenlileştirme katsayısı 1) kullanılmaktadır. Izgara (grid) araması ise arama uzayının yalnızca küçük ve önceden belirlenmiş bir bölümünü tarayabildiğinden boyut arttıkça hesaplama açısından sürdürülemez hale gelmektedir. Rastgele arama bu sınırlamayı kısmen hafifletse de sistematik bir yönlendirme mekanizmasından yoksundur.

Son yıllarda keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) arasındaki dengeyi gözeterek küresel arama yapabilen metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile örnekleme geçmişinden olasılıksal bir model kuran Bayesçi optimizasyon yöntemleri hiperparametre ayarı için özellikle etkili alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Kennedy ve Eberhart, 1995) ve diferansiyel evrim (DE) (Storn ve Price, 1997) gibi klasik yöntemlerin yanı sıra Runge-Kutta optimizasyonu (RUN) (Ahmadianfar vd., 2021), aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) (Abualigah vd., 2021), kum kedisi sürü optimizasyonu (SCSO) (Seyyedabbasi ve Kiani, 2023), cüce firavun faresi optimizasyonu (DMOA) (Agushaka vd., 2022) ve yapay goril sürüsü optimizasyonu (GTO) (Abdollahzadeh vd., 2021) gibi 2019 sonrası önerilen yeni nesil metasezgisel algoritmalar farklı doğa esinli arama mekanizmaları sunmaktadır. Ağaç-yapılı Parzen kestiricisi (TPE) (Bergstra vd., 2011) ise sıralı model tabanlı bir Bayesçi optimizasyon yöntemi olarak önceki değerlendirme sonuçlarından öğrenerek bir sonraki adayı olasılıksal biçimde önermektedir. Bu yöntemlerin mealpy (Van Thieu ve Mirjalili, 2023) ve Optuna (Akiba vd., 2019) gibi açık kaynaklı kütüphaneler aracılığıyla standartlaştırılmış biçimde uygulanabilir olması farklı arama paradigmalarının aynı deneysel koşullar altında adil biçimde karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmanın amacı ELM tabanlı hiperspektral görüntü sınıflandırmasında gizli nöron sayısı, etkinleştirme fonksiyonu ve düzenlileştirme katsayısının ayarlanmasında sekiz farklı optimizasyon algoritmasını (RUN, TPE, PSO, SCSO, DE, AOA, DMOA, GTO) sistematik olarak karşılaştırmaktır. Çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

(i) Sürü zekası, evrimsel arama, matematiksel/fiziksel esinli arama ve olasılıksal Bayesçi modelleme olmak üzere dört farklı arama paradigmasını temsil eden sekiz algoritma aynı arama uzayı, aynı işlev değerlendirme bütçesi ve aynı beş rastgele tohum altında adil biçimde karşılaştırılmıştır,

(ii) Karşılaştırma farklı algılayıcı, çözünürlük ve arazi örtüsü özelliklerine sahip üç kıyas veri kümesi (Indian Pines, Pavia University, Salinas) üzerinde yürütülerek bulguların genellenebilirliği sınanmıştır,

(iii) Algoritmalar arasındaki farkların istatistiksel anlamlılığı Friedman sıralama testi ve Nemenyi ardıl karşılaştırmasıyla değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Veri Kümeleri

Deneyler uzaktan algılama yazınında yaygın kabul gören üç kıyas hiperspektral veri kümesi üzerinde yürütülmüştür. Indian Pines veri kümesi AVIRIS algılayıcısı ile ABD'nin Indiana eyaletindeki tarımsal ağırlıklı bir bölgeden elde edilmiştir (Baumgardner vd., 2015). Su emilim bantları çıkarıldıktan sonra 200 spektral bant ve büyük ölçüde tarım ürünlerinden oluşan 16 sınıf içermektedir. Sınıflar arası örnek sayısı dengesizliğinin yüksek olması bu veri kümesini sınıflandırma açısından görece zorlu kılmaktadır. Pavia University veri kümesi ROSIS algılayıcısı ile İtalya'nın Pavia

kentinden elde edilmiş kentsel bir sahneyi kapsamakta olup 103 spektral bant ve 9 sınıftan oluşmaktadır (Fauvel vd., 2008). Salinas veri kümesi ise yine AVIRIS algılayıcısı ile ABD'nin Kaliforniya eyaletindeki Salinas Vadisi'nden elde edilmiştir. 204 spektral bant ve 16 sınıf içeren yüksek uzamsal çözünürlüklü bir tarım sahnesidir (Gualtieri vd., 1999). Bu üç veri kümesinin farklı algılayıcı, uzamsal çözünürlük ve arazi örtüsü özellikleri incelenen yöntemlerin farklı koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Her veri kümesinde etiketli pikseller sınıf oranları korunacak biçimde önce %70 eğitim ve %30 test olarak ayrılmıştır. Ardından eğitim kümesinin %10'luk katmanlı bir alt kümesi (D_hpo) hiperparametre araması için ayrılmıştır. Test kümesi hiperparametre arama sürecinin hiçbir aşamasında kullanılmamıştır. Örnek sayısı üç ya da daha az olan az temsil edilen sınıflarda 3 katlı çapraz doğrulamanın bozulmaması amacıyla D_hpo alt kümesi her sınıftan en az 3 örnek içerecek biçimde tamamlanmıştır. Nihai model protokol gereği yine D_hpo alt kümesi üzerinde eğitilmiş ve bağımsız test kümesi üzerinde değerlendirilmiştir.

2.2 Aşırı Öğrenme Makinesi (ELM)

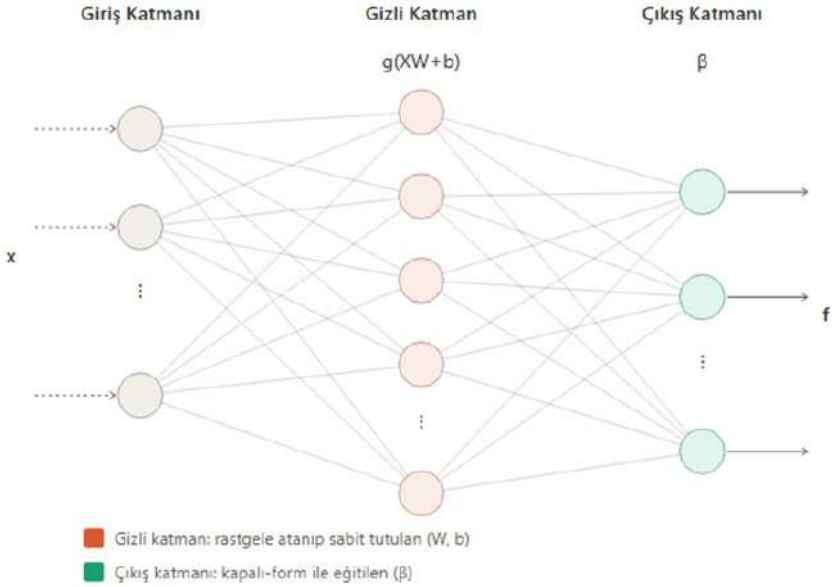
ELM N adet eğitim örneği $\{(x_i, t_i)\}$, i=1,...,N için L gizli nöronlu tek gizli katmanlı bir ileri beslemeli ağ olarak tanımlanmaktadır (Huang vd., 2012). Girdi ağırlıkları ve gizli katman eğilimleri [-1,1] aralığında rastgele atanır ve eğitim boyunca güncellenmez. Gizli katman çıktı matrisi H Eşitlik (1)'deki gibi hesaplanır (Huang vd., 2006):

$$H = g(XW + b) \quad (1)$$

Burada X girdi öznitelik matrisini, W rastgele girdi ağırlıklarını, b eğilim vektörünü ve g(·) etkinleştirme fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu çalışmada dört farklı etkinleştirme fonksiyonu (sigmoid, tanh, ReLU, sin) arama uzayına dahil edilmiştir. Yalnızca gizli katman ile çıkış arasındaki ağırlıklar β en küçük kareler anlamında çözülmesi gereken bilinmeyenlerdir. Sayısal kararlılığı artırmak ve aşırı öğrenmeyi sınırlamak amacıyla çözüme Eşitlik (2)'de gösterildiği gibi bir düzenlileştirme (ridge) terimi eklenmiştir (Huang vd., 2012):

$$\beta = (H^T H + \alpha I)^{-1} H^T T \quad (2)$$

Burada T hedef matrisini, I birim matrisi ve $\alpha > 0$ düzenlileştirme katsayısını göstermektedir. α'nın büyük değerleri çözümü daha fazla düzenlileştirerek varyansı azaltırken sapmayı artırmaktadır. Küçük değerleri ise eğitim verisine daha sıkı uyum sağlar. Bu formülasyon ELM'in tek bir kapalı form matris işlemiyle eğitilebilmesini sağlar ve iteratif geri yayılım gerektirmez. Bununla birlikte g(·), L ve α'nın seçimi sınıflandırma başarımını doğrudan belirleyen ve bu çalışmada optimize edilen üç temel hiperparametredir (Huang vd., 2012). Ağın genel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ELM mimarisi

2.3 Arama Uzayı

Optimize edilen ELM hiperparametreleri ve arama sınırları Çizelge 1'de özetlenmiştir. Gizli nöron sayısı tam sayı değerli, düzenlileştirme katsayısı sürekli değerli ve etkinleştirme fonksiyonu kategorik bir değişken olarak tanımlanmıştır. Düzenlileştirme katsayısı geniş bir büyüklük mertebesi aralığını verimli biçimde taramak amacıyla logaritmik ölçekte kodlanmıştır. Karşılaştırma tabanı (Default) olarak sıklıkla varsayılan kabul edilen yapılandırma olan 100 gizli nöron, sigmoid etkinleştirme, α=1 kullanılmıştır.

Çizelge 1. ELM için optimize edilen hiperparametreler ve arama uzayı.

Hiperparametre	Alt sınır - Üst sınır / Küme	Açıklama
Gizli nöron sayısı (L)	10 - 500 (tam sayı)	Gizli katman boyutu
Etkinleştirme fonksiyonu (g)	{sigmoid, tanh, ReLU, sin} (kategorik)	Gizli katman doğrusal olmayanlığı
Düzenlileştirme katsayısı (α)	10^{-3} - 10^{3} (logaritmik ölçek)	Ridge çözümünün düzenlileştirme gücü

2.4 Optimizasyon Algoritmaları

Çalışmada karşılaştırılan sekiz algoritma dört farklı arama paradigmasını temsil etmektedir. Sürü zekası ailesinde PSO parçacıkların önceki en iyi konumlarından (bilişsel bileşen) ve sürünün en iyi konumundan (sosyal bileşen) esinlenen bir hız-konum güncellemesi kullanmaktadır (Kennedy ve Eberhart, 1995). SCSO kum kedilerinin düşük frekanslı işitme duyarlılığına dayanan bir arama yarıçapı ile av yakalama (sömürü) ve rastgele gezinme (keşif) davranışları arasında geçiş yapmaktadır (Seyyedabbasi ve Kiani, 2023). DMOA cüce firavun faresi kolonisinin alfa dişi öncülüğünde yiyecek arama, bebek bakıcılığı ve keşif davranışlarını modelleyerek üç aşamalı bir arama gerçekleştirir (Agushaka vd., 2022). GTO goril sürülerinin gümüş sırtlı bireyi izleme, göç etme ve rekabet davranışlarından esinlenmektedir (Abdollahzadeh vd., 2021).

Evrimsel arama ailesinde DE popülasyon bireyleri arasındaki fark vektörlerine dayalı bir mutasyon operatörünü çaprazlama ve seçim adımlarıyla birleştirmektedir (Storn ve Price, 1997). Matematiksel ve fiziksel esinli arama ailesinde RUN Runge-Kutta sayısal integrasyon şemasının eğim tahmin mantığından yararlanarak arama uzayında yön ve adım büyüklüğünü belirlemektedir (Ahmadianfar vd., 2021). AOA ise çarpma ve bölme operatörlerini geniş ölçekli keşif, toplama ve çıkarma operatörlerini ise yerel sömürü için kullanan Matematiksel Optimize Edici Hızlandırılmış (MOA) katsayısıyla iki aşama arasında geçiş yapan bir algoritmadır (Abualigah vd., 2021). Olasılıksal Bayesçi modelleme ailesinde TPE değerlendirilen konfigürasyonları iyi ve kötü olmak üzere iki gruba ayırıp her hiperparametre için bu iki grubun yoğunluk oranını (Parzen kestirimi) enbüyükleyen adayı önermektedir. Bu sayede arama geçmişinden uyarlamalı biçimde öğrenmektedir (Bergstra vd., 2011). Bu dört paradigmanın bir arada ele alınması yöntemlerin göreli başarımının belirli bir arama felsefesine bağlı kalmaksızın adil biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Metasezgisel algoritmalar mealpy kütüphanesi (Van Thieu ve Mirjalili, 2023), TPE ise Optuna kütüphanesi (Akiba vd., 2019) aracılığıyla uygulanmıştır.

2.5 Deney Protokolü ve Değerlendirme Ölçütleri

Adil bir karşılaştırma sağlamak amacıyla tüm algoritmalara popülasyon/örnekleme büyüklüğü N=100 birey ve azami işlev değerlendirme sayısı (max_fe) 100 olmak üzere eşit bir hesaplama bütçesi tanınmıştır. Her algoritma veri kümesi ikilisi için beş farklı rastgele tohumla bağımsız koşular gerçekleştirilmiştir. Popülasyon büyüklüğünün değerlendirme bütçesine eşit tutulması nedeniyle popülasyon tabanlı algoritmalar (PSO, DE, AOA, RUN, SCSO, DMOA, GTO) başlangıç popülasyonunu oluşturup değerlendirdikleri anda bütçeyi tükettiklerinden pratikte tek bir nesil icra edebilmiştir. Buna karşılık TPE aynı 100 değerlendirmeyi ardışık ve uyarlamalı biçimde kullanabilmiştir. Metasezgisel algoritmaların başlangıç popülasyonlarından bir birey varsayılan ELM yapılandırmasıyla tohumlanmıştır. Geri kalan bireyler arama uzayında rastgele üretilmiştir. Uygunluk fonksiyonu D_hpo alt kümesi üzerinde katmanlı 3 kat çapraz doğrulama ile hesaplanan ortalama sınıflandırma doğruluğunun tümleyeni olarak Eşitlik (3)'teki gibi tanımlanmıştır:

$$f(\theta) = 1 - (1/3)\cdot(OA_1 + OA_2 + OA_3) \quad (3)$$

Burada $\theta=(L,g,\alpha)$ aday hiperparametre kümesini, OA_k ise k. kattan (k=1,2,3) elde edilen genel doğruluğu göstermektedir. Sınıflandırma başarımı seçilen hiperparametrelerle D_hpo üzerinde eğitilen nihai ELM modelinin bağımsız test kümesi üzerindeki genel doğruluk (OA), ortalama doğruluk (AA), şans düzeltmeli uyum ölçütü Kappa katsayısı ve sınıf dengesizliğine duyarlı makro-F1 skoru ile değerlendirilmiştir. Algoritmalar arasındaki farkların istatistiksel anlamlılığı çoklu veri kümesi/algoritma karşılaştırmaları için önerilen Friedman sıralama testi ve Nemenyi ardıl testi (Demšar 2006) ile yeni nesil metasezgisel algoritmalar (AOA, RUN, SCSO, DMOA, GTO) ile klasik temel algoritmalar (PSO, DE) arasındaki ikili farklar ise Holm düzeltmeli Wilcoxon işaretli sıra testi ile sınanmıştır.

3. BULGULAR

Çizelge 2 dokuz yapılandırmanın (sekiz optimizasyon algoritması ve varsayılan ELM) her üç veri kümesindeki beş tohum üzerinden ortalama genel doğruluğunu ve Friedman ortalama sırasını özetlemektedir. Sonuçlar incelenen tüm optimizasyon algoritmalarının her üç veri kümesinde de varsayılan yapılandırmayı belirgin biçimde geçtiğini göstermektedir.

Çizelge 2. Üç veri kümesinde genel doğruluk (OA, ort.±std) ve Friedman ortalama sırası.

Algoritma	Indian Pines	Pavia University	Salinas	Ort. Sıra
RUN	0,7387±0,0073	0,9106±0,0022	0,9188±0,0008	2,77
TPE	0,7307±0,0131	0,9118±0,0019	0,9177±0,0012	2,83
PSO	0,7355±0,0119	0,9078±0,0031	0,9177±0,0020	4,20
SCSO	0,7284±0,0127	0,9100±0,0008	0,9174±0,0020	4,33
DE	0,7332±0,0150	0,9091±0,0031	0,9166±0,0026	5,03
AOA	0,7285±0,0115	0,9118±0,0009	0,9187±0,0014	5,27
DMOA	0,7214±0,0066	0,9083±0,0055	0,9189±0,0011	5,67
GTO	0,7056±0,0143	0,9093±0,0017	0,9165±0,0014	5,90
Default	0,5938±0,0035	0,8379±0,0063	0,8561±0,0105	9,00

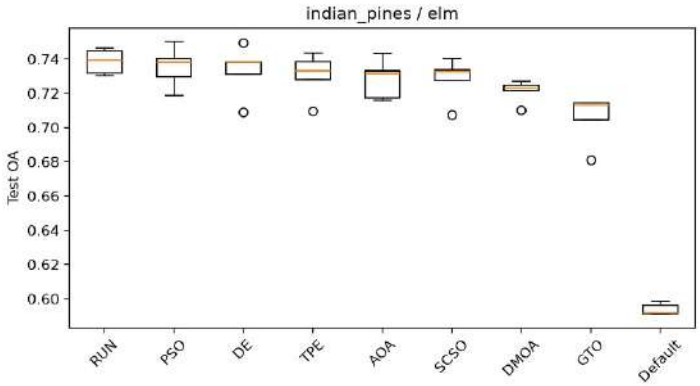
En büyük kazanım sınıf sayısı yüksek ve örnek dağılımı dengesiz olan Indian Pines veri kümesinde gözlenmiştir. Genel doğruluk varsayılandaki 0,5938±0,0035 değerinden RUN ile 0,7387±0,0073'e yükselerek yaklaşık 14,5 puanlık bir iyileşme sağlamıştır. Aynı yapılandırmada Kappa katsayısı 0,5235'ten 0,6988'e, makro-F1 skoru ise 0,4421'den 0,6367'ye çıkmıştır. Bu artışlar optimizasyonun yalnızca genel doğruluğu değil sınıf dengesizliğine duyarlı ölçütleri de kayda değer biçimde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Indian Pines'ta en yüksek ortalama doğruluk (0,6183) ve makro-F1 (0,6541) değerlerine RUN değil AOA ulaşmıştır. Bu durum azınlık sınıflarına duyarlılık açısından farklı algoritmaların birbirini tamamlayıcı üstünlükler sunabileceğine işaret etmektedir.

Pavia University veri kümesinde genel doğruluk varsayılandaki 0,8379±0,0063 değerinden AOA ve TPE ile birlikte 0,9118'e yükselmiş (7,4 puan), Kappa ve makro-F1 değerleri de her iki algoritmada 0,88 düzeyine ulaşmıştır. Salinas veri kümesinde genel doğruluk 0,8561±0,0105'ten DMOA ile 0,9189'a çıkmıştır (6,3 puan). RUN (0,9188) ve AOA (0,9187) neredeyse aynı başarımı göstermiş ve ortalama doğruluk %95'in üzerine ulaşmıştır. En iyi bulunan yapılandırmalar üç veri kümesinde de ortalama olarak geniş bir gizli katman ile ReLU etkinleştirme fonksiyonunu tercih ederken varsayılan yapılandırma yalnızca 100 nöron ve sigmoid fonksiyonu kullanmaktadır (Çizelge 3). Bu ortak eğilim ELM'de yeterli sayıda gizli birim ile doğrusal olmayan ReLU etkinleştirmesinin ayırt ediciliği belirgin biçimde artırdığına işaret etmektedir. Buna karşılık optimum düzenlileştirme katsayısı veri kümesine ve algoritmaya göre geniş bir aralıkta (yaklaşık 0,004-1000) değişmektedir. Bu da α'nın veri kümesine özgü koşullandığını göstermektedir.

Çizelge 3. Indian Pines veri kümesinde, beş tohum içinde en yüksek test OA değerine ulaşan koşuya ait ELM hiperparametreleri.

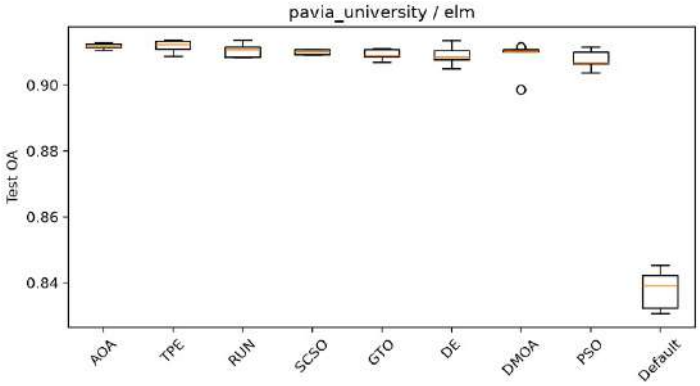
Algoritma	L (Gizli Nöron)	g (Etkinleştirme)	α (Düzenlileştirme)	Test OA
RUN	454	ReLU	767,57	0,7463
PSO	483	ReLU	568,78	0,7502
DE	460	ReLU	619,14	0,7493
TPE	490	ReLU	416,00	0,7437
AOA	455	ReLU	225,11	0,7434
SCSO	458	ReLU	1000,00	0,7405
DMOA	500	ReLU	134,00	0,7272
GTO	298	ReLU	57,77	0,7145
Default	100	sigmoid	1,00	0,5987

Yöntemlerin birden çok veri kümesi üzerindeki göreli başarımı Friedman sıralama testiyle değerlendirilmiş (χ^2=56,50, $p=2{,}25\times10^{-9}$) ve algoritmalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur. En düşük (en iyi) ortalama sırayı RUN (2,77) ve onu çok yakından izleyen TPE (2,83) elde etmiştir. Bunları sırasıyla PSO (4,20), SCSO (4,33), DE (5,03), AOA (5,27), DMOA (5,67) ve GTO (5,90) izlemiştir. Varsayılan yapılandırma tüm veri kümelerinde son sırada (9,00) kalmıştır ve Nemenyi ardıl karşılaştırmasında sekiz optimize edilmiş algoritmanın yedisinden istatistiksel olarak anlamlı biçimde ayrılmıştır ($p<0{,}05$; en düşük p=0,0001). Yalnızca GTO ile karşılaştırmasında anlamlılık sınırında kalmıştır (p=0,0503). Bu sonuçlar hiperparametre optimizasyonunun varsayılan yapılandırmaya kıyasla sağladığı kazancın güçlü ve istikrarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Üstelik RUN optimize edilen sekiz algoritma arasında GTO'ya karşı istatistiksel olarak da anlamlı bir üstünlük sağlayan tek yöntem olmuştur (p=0,0455). Bu da RUN'ın hem en iyi ortalama sıraya hem de somut istatistiksel ayrışmaya sahip yöntem olarak öne çıktığını göstermektedir. Bu bulgular bir bütün olarak doğru bir optimizasyon stratejisinin ELM'in sınıflandırma başarımını varsayılan yapılandırmaya kıyasla belirgin biçimde artırdığını ve bu sekiz algoritma arasında RUN ile TPE'nin en güvenilir, en yüksek performanslı seçenekler olarak öne çıktığını ortaya koymaktadır. Beş rastgele tohum arasındaki test OA dağılımları veri kümelerine göre ayrı ayrı Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur.



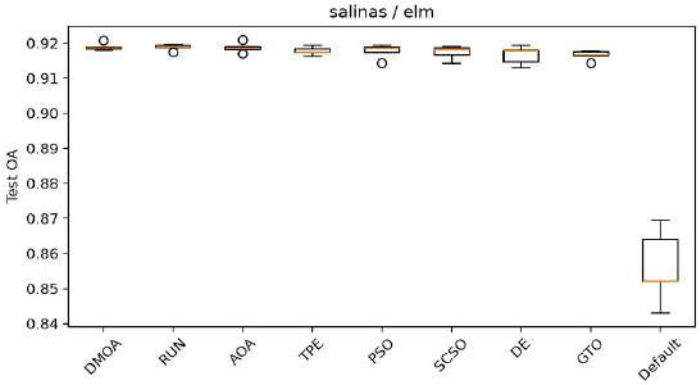
Şekil 2. Indian Pines veri kümesinde beş rastgele tohum üzerinden elde edilen test OA dağılımları kutu grafiği.

Şekil 2'de görüldüğü üzere Indian Pines'ta optimize edilmiş sekiz algoritmanın kutuları birbirine yakın ancak görece geniş bir bantta (0,71-0,75) yer almaktadır. RUN en yüksek medyana ve en dar kutuya sahipken GTO görece daha geniş bir dağılım ve düşük bir aykırı değer (0,68) sergilemektedir. Varsayılan yapılandırmanın kutusu (0,59-0,60) bu kümeden büyük bir boşlukla ayrışmaktadır. Bu görsel ayrışma Çizelge 2'de raporlanan 14,5 puanlık kazanımla örtüşmektedir.



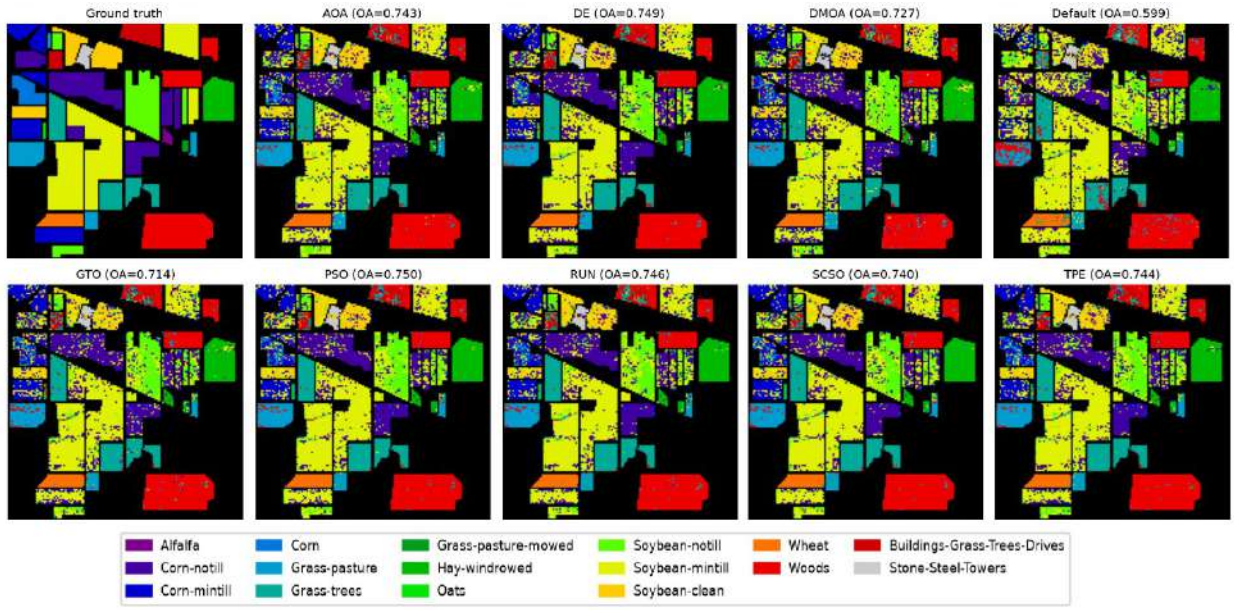
Şekil 3. Pavia University veri kümesinde beş rastgele tohum üzerinden elde edilen test OA dağılımları kutu grafiği.

Şekil 3'de Pavia University'de optimize edilmiş algoritmaların kutularının neredeyse üst üste bindiği görülmektedir. Yalnızca DMOA'da tek bir düşük aykırı değer (0,90) bulunmaktadır. Varsayılan yapılandırmanın kutusu (0,83-0,845) bu kümeden ayrışmakla birlikte bu ayrışma Indian Pines'takinden orantılı biçimde daha dardır. Bu da Çizelge 2'de raporlanan görece küçük puan artışıyla (7,4 puan) görsel olarak örtüşmektedir.



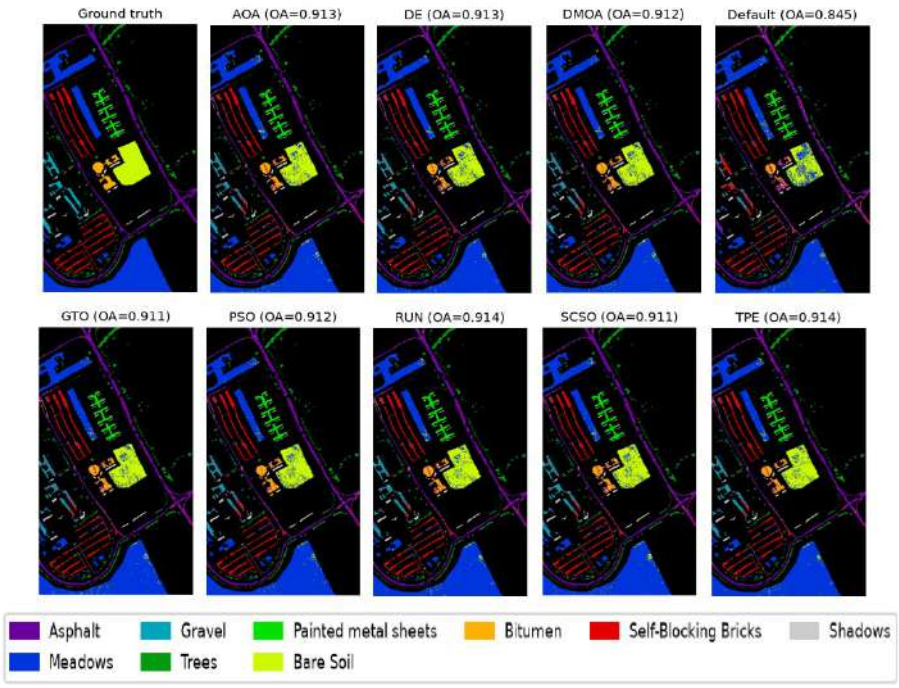
Şekil 4. Salinas veri kümesinde beş rastgele tohum üzerinden elde edilen test OA dağılımları kutu grafiği.

Şekil 4'te Salinas için de benzer bir örüntü gözlenmektedir. Ancak varsayılan yapılandırmanın kutusu Pavia University'dekinden belirgin biçimde daha geniştir. Bu fark Çizelge 2'de raporlanan standart sapma değerleriyle (Salinas'ta 0,0105'e karşı Pavia University'de 0,0063) birebir örtüşmektedir. Üç veri kümesinde de optimize edilmiş algoritmaların kutuları büyük ölçüde örtüşmekte olup bu görünüm RUN'ın Nemenyi testinde GTO'ya karşı sağladığı istatistiksel olarak anlamlı üstünlük (p=0,0455) dışında diğer algoritmalar arasında keskin bir ayrışma bulunmamasıyla uyumludur. Bu durum, hiperparametre optimizasyonunun ELM başarımını belirgin biçimde artıran asıl etken olduğunu doğrulamakla birlikte RUN ve TPE'nin sağladığı ek kazanımın bu üstünlüğü daha da pekiştirdiğine işaret etmektedir. Şekil 2-4'te gözlenen dar kutular elde edilen sonuçların düşük varyanslı ve tekrarlanabilir olduğunu yani RUN ve TPE ile elde edilen yüksek başarımın farklı rastgele tohumlar altında da istikrarlı biçimde korunduğunu göstermektedir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 sırasıyla Indian Pines, Pavia University ve Salinas veri kümeleri için her algoritmanın beş tohum arasından en yüksek test OA değerine ulaşan koşusuna ait piksel bazlı sınıflandırma haritalarını göstermektedir.



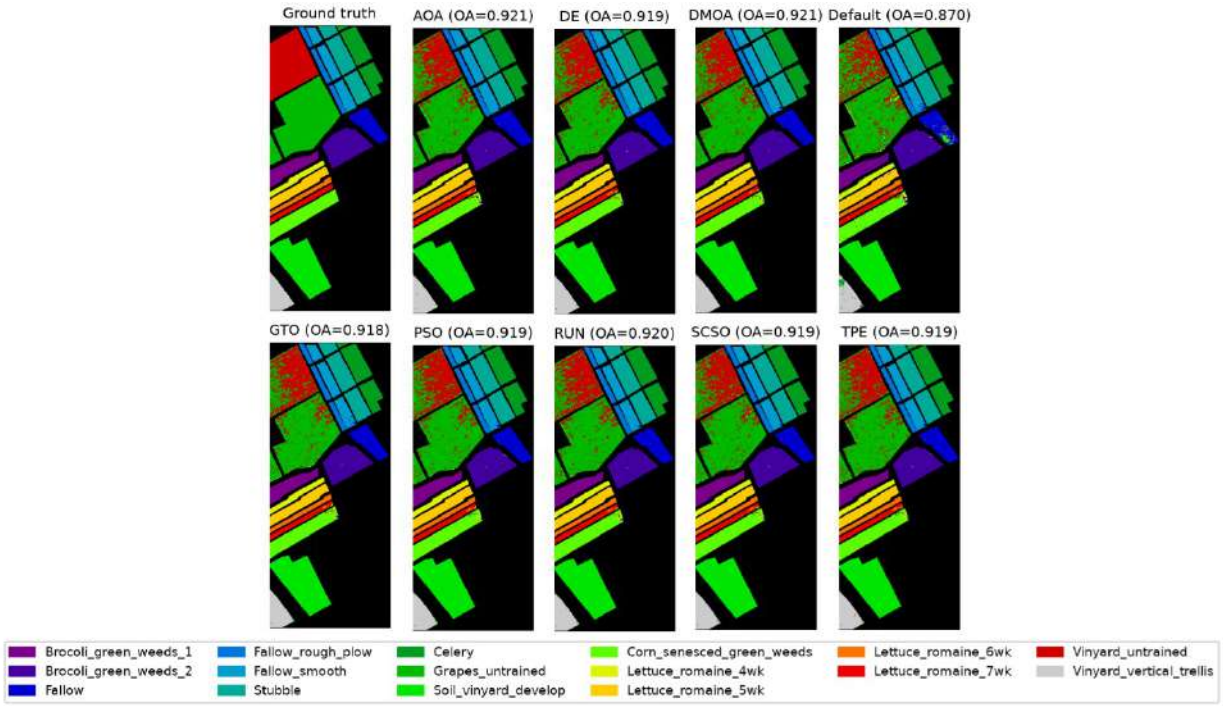
Şekil 5. Indian Pines veri kümesi için gerçek arazi örtüsü (Ground truth) ve her algoritmanın en yüksek OA değerine ulaşan koşusuna ait sınıflandırma haritaları.

Şekil 5'te varsayılan yapılandırmanın ürettiği harita özellikle Soybean-mintill, Soybean-notill ve Corn-notill gibi geniş tarımsal parsellerin iç kısımlarında yoğun tuz-biber tipi yanlış sınıflandırmalar içermektedir. Buna karşılık optimize edilmiş yapılandırmalar (özellikle RUN, PSO, TPE ve AOA) bu parsellerin iç bütünlüğünü belirgin biçimde daha iyi korumaktadır. Bu görsel fark Çizelge 2'de raporlanan sayısal iyileşmenin sahada da anlamlı, tutarlı bir karşılığı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 6. Pavia University veri kümesi için gerçek arazi örtüsü (Ground truth) ve her algoritmanın en yüksek OA değerine ulaşan koşusuna ait sınıflandırma haritaları.

Şekil 6'da varsayılan yapılandırmanın haritasında özellikle Bare Soil sınıfı içerisinde belirgin bir piksel gürültüsü gözlenirken optimize edilmiş sekiz yapılandırmanın ürettiği haritalar birbirinden görsel olarak neredeyse ayırt edilemeyecek kadar benzerdir. Bu durum Çizelge 2'de raporlanan birbirine çok yakın OA değerleriyle (0,911-0,914) tutarlıdır.



Şekil 7. Salinas veri kümesi için gerçek arazi örtüsü (Ground truth) ve her algoritmanın en yüksek OA değerine ulaşan koşusuna ait sınıflandırma haritaları.

Şekil 7'de varsayılan yapılandırma sahnenin üst kısmındaki Fallow_rough_plow ve Stubble parsellerinde belirgin tuz-biber tipi hatalar içermektedir. Optimize edilmiş yapılandırmalar bu parsellerin sınırlarını daha keskin biçimde korumaktadır. Üç veri kümesinde de optimize edilmiş algoritmaların ürettiği haritalar arasındaki görsel fark çok küçüktür.

Kararlılık açısından genel doğruluğun beş tohum arasındaki standart sapması tüm yapılandırmalarda düşük kalmıştır (çoğu hücrede 0,015'in altında, en yüksek değer Salinas-Default'ta 0,0105). Bu da elde edilen sonuçların yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Hesaplama maliyeti veri kümesi büyüklüğüne ve algoritmaya göre değişmekle birlikte belirgin bir örüntü izlemektedir. Her algoritmanın üç veri kümesindeki ortalama arama süresi Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Üç veri kümesinde algoritma başına ortalama hiperparametre arama süresi (sn).

Algoritma	Indian Pines	Pavia University	Salinas
RUN	4,26	17,43	17,38
TPE	7,00	19,14	16,16
PSO	5,65	13,91	12,29
SCSO	7,28	8,84	8,87
DE	7,62	8,77	8,66
AOA	7,32	8,88	8,89
DMOA	10,98	24,34	21,53
GTO	14,61	16,12	16,19

Varsayılan yapılandırmanın eğitimi saniyenin çok altında (0,02-0,06 sn) tamamlanırken optimizasyon araması Indian Pines'ta 4,3-14,6 sn, Pavia University'de 8,8-24,3 sn ve Salinas'ta 8,7-21,5 sn aralığında ek süre gerektirmiştir. Pavia University ve Salinas'ta DE ve SCSO en düşük hesaplama maliyetine sahip yöntemler olurken Indian Pines'ta bu sırayı RUN ve PSO almıştır. En yüksek süre ise Pavia University ve Salinas'ta popülasyon içi etkileşimleri paralelleştirmesi güç olan DMOA'da, Indian Pines'ta ise GTO'da gözlenmiştir. Elde edilen doğruluk kazanımları göz önüne alındığında bu ek maliyetin tamamen kabul edilebilir olduğu değerlendirilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma ELM tabanlı hiperspektral görüntü sınıflandırmasında hiperparametre optimizasyonunun etkisini sekiz farklı metasezgisel ve Bayesçi algoritma ile üç kıyas veri kümesi üzerinde sistematik biçimde incelemiştir. Bulgular iki temel çıkarım sunmaktadır. Birincisi hiperparametre optimizasyonu kullanılan algoritmadan bağımsız olarak ELM'in sınıflandırma başarımını varsayılan yapılandırmaya kıyasla veri kümesine bağlı olarak 6,3 ila 14,5 puan aralığında ve tutarlı biçimde artırmaktadır. Bu kazanım özellikle sınıf dağılımı dengesiz olan Indian Pines gibi zorlu senaryolarda daha da belirgindir. İkincisi Friedman sıralama testi RUN (2,77) ve TPE'yi (2,83) en başarılı yöntemler olarak öne çıkarmıştır. Bununla birlikte TPE'nin RUN'a bu denli yakın bir başarım sergilemesi Yöntem bölümünde

açıklandığı üzere değerlendirme bütçesini ardışık ve uyarlamalı biçimde kullanabilmesiyle açıklanabilmektedir. Bu da sıralı örnekleme yapabilen yöntemlerin kısıtlı bütçeler altında bir avantaj taşıyabileceğine işaret etmektedir.

Bu bulgular uygulamada güçlü bir metasezgisel (örneğin RUN) ya da TPE ile görece düşük bir değerlendirme bütçesinin ELM tabanlı hiperspektral sınıflandırma için sağlam ve pratik bir başlangıç noktası oluşturduğuna işaret etmektedir. Çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Deneyler tek bir sınıflandırıcı (ELM) ve göreli olarak düşük bir işlev değerlendirme bütçesiyle sınırlı tutulmuş, popülasyon tabanlı algoritmaların çok nesilli davranışı gözlemlenememiştir. Gelecek çalışmalarda; (i) daha yüksek bir değerlendirme bütçesiyle (max_fe > pop_size, çok nesilli) metasezgisel algoritmaların gerçek yakınsama dinamiklerinin incelenmesi, (ii) yöntemin destek vektör makineleri ve XGBoost (Chen ve Guestrin, 2016) gibi farklı sınıflandırıcılara genişletilmesi ve (iii) öznitelik/bant seçimi ile hiperparametre optimizasyonunun eş zamanlı ele alınması planlanmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından [FBA-2025-14681] numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Abdollahzadeh, B., Soleimanian Gharehchopogh, F. ve Mirjalili, S., 2021. Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. International Journal of Intelligent Systems, 36(10): 5887-5958.

Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M. ve Gandomi, A.H., 2021. The arithmetic optimization algorithm. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 376(2): 113609.

Agushaka, J.O., Ezugwu, A.E. ve Abualigah, L., 2022. Dwarf mongoose optimization algorithm. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 391(10): 114570.

Ahmadianfar, I., Heidari, A.A., Gandomi, A.H., Chu, X. ve Chen, H., 2021. RUN beyond the metaphor: An efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method. Expert Systems with Applications, 181: 115079.

Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T. ve Koyama, M., 2019. Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, Anchorage, ABD, syf: 2623-2631.

Baumgardner, M.F., Biehl, L.L. ve Landgrebe, D.A., 2015. 220 Band AVIRIS Hyperspectral Image Data Set: June 12, 1992 Indian Pine Test Site 3. Purdue University Research Repository. doi:10.4231/R7RX991C.

Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y. ve Kégl, B., 2011. Algorithms for hyper-parameter optimization. Advances in Neural Information Processing Systems, 24: 2546-2554.

Camps-Valls, G. ve Bruzzone, L., 2005. Kernel-based methods for hyperspectral image classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(6): 1351-1362.

Chen, T. ve Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, ABD, syf: 785-794.

Chen, Y., Lin, Z., Zhao, X., Wang, G. ve Gu, Y., 2014. Deep learning-based classification of hyperspectral data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(6): 2094-2107.

Demšar, J., 2006. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. Journal of Machine Learning Research, 7: 1-30.

Fauvel, M., Benediktsson, J.A., Chanussot, J. ve Sveinsson, J.R., 2008. Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(11): 3804-3814.

Ghamisi, P., Plaza, J., Chen, Y., Li, J. ve Plaza, A.J., 2017. Advanced spectral classifiers for hyperspectral images: A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(1): 8-32.

Gualtieri, J.A., Chettri, S.R., Cromp, R.F. ve Johnson, L.F., 1999. Support vector machine classifiers as applied to AVIRIS data. Summaries of the Eighth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 99-17: 217-227.

Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y. ve Siew, C.-K., 2006. Extreme learning machine: Theory and applications. Neurocomputing, 70(1-3): 489-501.

Huang, G.-B., Zhou, H., Ding, X. ve Zhang, R., 2012. Extreme learning machine for regression and multiclass classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 42(2): 513-529.

Hughes, G., 1968. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. IEEE Transactions on Information Theory, 14(1): 55-63.

Kennedy, J. ve Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, Avustralya, 4: 1942-1948.

Melgani, F. ve Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(8): 1778-1790.

Pal, M., 2009. Extreme-learning-machine-based land cover classification. International Journal of Remote Sensing, 30(14): 3835-3841.

Seyyedabbasi, A. ve Kiani, F., 2023. Sand Cat swarm optimization: A nature-inspired algorithm to solve global optimization problems. Engineering with Computers, 39: 2627-2651.

Storn, R. ve Price, K., 1997. Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of Global Optimization, 11(4): 341-359.

Van Thieu, N. ve Mirjalili, S., 2023. MEALPY: An open-source library for latest meta-heuristic algorithms in Python. Journal of Systems Architecture, 139(12): 102871.

Zhou, Y., Peng, J. ve Chen, C.L.P., 2015. Extreme learning machine with composite kernels for hyperspectral image classification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(6): 2351-2360.

YERDEN GÖRÜNTÜYE RFM YÖNTEMİ KULLANILARAK PLÉIADES NEO ÜÇLÜ BİNDİRMELİ PANKROMATİK GÖRÜNTÜLERİNDEN ÜÇ BOYUTLU KOORDİNAT HESABI

Hüseyin TOPAN[1], Kurtuluş Sedar GÖRMÜŞ[2], Kazimierz BECEK[3]

[1]Prof. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez, Zonguldak, topan@beun.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez, Zonguldak, ksgormus@beun.edu.tr
[3]Prof. Dr., Wroclaw Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Yerbilimleri, Madencilik ve Jeoloji Fakültesi, Jeodezi ve Jeoinformatik Bölümü, kazimierz.becek@pwr.edu.pl

ÖZET

Pléiades Neo, ticari optik uzaktan algılama uyduları arasında en yüksek geometrik çözünürlüğe sahip uydudur. Her ne kadar uyduya ait algılayıcıya bağımlı yöneltme yöntemi mevcut olsa da bu bildiride optik görüntülerden iki veya üç boyutlu konum bilgisi elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan RFM (Rational Function Model - Rasyonel İşlev Modeli) yöntemi ile üç boyutlu doğruluk araştırması yapılmıştır. Dönüşüm için gerekli olan katsayılar (RPC: Rational Polynomial Coefficients – Rasyonel Polinom Katsayıları) görüntü sağlayıcı kurum tarafından hesaplanarak kullanıcıya sağlanabildiği gibi kullanıcılar tarafından yer kontrol noktaları yardımıyla da hesaplanabilmektedir. Bu bildiride, Pléiades Neo uydu görüntüleri ile birlikte kullanıcıya sunulan RPC'ler kullanılarak yerden görüntüye RFM yöntemi ile üç boyutlu koordinat hesabı gerçekleştirilmiştir. Zonguldak şehir merkezine ait Pléiades Neo uydusuna ait bindirmeli görüntülerle yapılan çalışmada doğrudan yöneltme ile sırasıyla $m_X = \pm 13{,}93 \;\; m$, $m_Y = \pm 1{,}43 \;\; m$, $m_h = \pm 5{,}60 \;\; m$ *doğruluğa ulaşılırken, demet dengelemede birinci derece RFM ile yer kontrol noktalarında yaklaşık ±42,2 cm ve denetim noktalarında ±14,67 m doğruluğa ulaşılmıştır. Çalışma, birinci yazar tarafından MATLAB ortamında geliştirilen GeoTransform yazılımı ile gerçekleştirilmiş.*

Anahtar Sözcükler: 3B koordinat hesabı, GeoTransform, Pléiades Neo, RFM

ABSTRACT

3D GEOREFERENCING OF PLÉİADES NEO STEREO PANCHROMATIC IMAGES USING RFM METHOD WITH TYPE OF GROUND TO IMAGE

Pléiades Neo is a commercial optical remote sensing satellites with the highest geometric resolution. Although the satellite has a sensor-dependent orientation method, this paper investigates three-dimensional accuracy using the RFM (Rational Function Model) method, which is commonly used to obtain two- or three-dimensional geospatial information from optical images. The coefficients required for the transformation (RPC: Rational Polynomial Coefficients) can be calculated by the image provider with the images, or they can be calculated by the user using ground control points. In this paper, three-dimensional coordinates were calculated from the ground to the image RFM method for Pléiades Neo images using the RPCs provided. In this study run on Zonguldak city centre, direct orientation accuracies of $m_X = \pm 13{,}93 \;\; m$, $m_Y = \pm 1{,}43 \;\; m$, $m_h = \pm 5{,}60 \;\; m$. *Bundle adjustment with first-order RFM yielded accuracies of approximately ±42.2 cm at ground control points and ±14.67 m at independent check points. The study was conducted using GeoTransform software developed by the first author in MATLAB.*

Keywords: 3D reconstruction, GeoTransform, Pléiades Neo, RFM

1. GİRİŞ

Pléiades Neo 3 ve 4, Airbus Savunma ve Uzay tarafından tasarlanan, üretilen ve işletilen özdeş optik Dünya gözlem uydularıdır (Airbus Defence and Space, 2026). Sırasıyla Nisan ve Ağustos 2021'de fırlatılan bu uydular, görevdeki ticari optik uzaktan algılama uyduları pankromatik bantta 30 cm ve görünür ve yakın kızılötesi tayfta yedi bantla 1,2 m'lik yer örnekleme aralığına (YÖA) sahiptir. Airbus, görüntü işleme ile pankromatik görüntülerin çözünürlüğünü 15 cm'ye kadar azaltmakta ve OneAtlas hizmeti aracılığıyla dağıtmaktadır (Denis vd., 2026). Yüksek geometrik çözünürlüğü ve kalitesi, Pléiades Neo görüntülerini büyük ölçekli harita yapımı ve konuma bağlı bilgi üretimi açısından uygun hale getirmektedir.

Pléiades Neo görüntüleriyle gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde görüntü iyileştirme ve işleme çalışmaları, mikro titreşim etkilerinin incelenmesi (Ali vd., 2023), görüntü sıkıştırma (Candra vd., 2023), süper çözünürlük (Chouteau vd., 2022; Guardabrazo vd., 2023; Jangir ve Bahmanyar, 2024) ve uydu sistemi ile yeteneklerinin kapsamlı incelemelerini (Denis vd., 2026; Mukhopadhyay vd., 2024) içermektedir. Diğer çalışmalar arazi örtüsü sınıflandırması, nesne tespiti ve kentsel orman alanları, madencilik, mangrovlar, bitki örtüsü, obruklar, kıyı süreçleri

ve afet yönetimi de dahil olmak üzere çevresel izlemeye odaklanmıştır (Alrabayah vd., 2024; Balabathina vd., 2025; Ha vd., 2025; Mohammed vd., 2024; Prakash ve Saxena, 2025; Wang vd., 2025). Pléiades Neo görüntülerinin geometrik uygulamaları da giderek artan bir ilgi görmektedir. Önceki araştırmalar geometrik karşılaştırma (Loudjani vd., 2023), banttan banda geometrik ve radyometrik doğruluk (Cantrell vd., 2023), SYM üretimi (Falabella vd., 2025; Vivero vd., 2026), görüntü mozaikleme (Combarro Simon vd., 2026) konularını incelemiştir. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak, özellikle ticari fotogrametrik yazılımlarda yaygın olarak uygulanan Oransal İşlev Modeli (Rasyonel Fonksiyon Modeli, RFM) gibi yaklaşımlardır. Pléiades Neo görüntüleri için uyduya ait algılayıcıya bağımlı yöneltme yöntemi ile üç boyutlu (3B) konum belirlemek mümkündür ve yazarlar tarafından bu tür bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bildiride ise uydu görüntülerinden 3B konum bilgisi elde etmede sıkça kullanılan yerden görüntüye RFM ile 3B konum doğruluğu araştırması yapılmaktadır.

Uydu görüntülerinden 3B konum belirleme, temelde görüntü koordinatlarının yer (nesne) koordinatlarına dönüştürülmesiyle sağlanır. Dönüşüm doğruluğu kullanılan matematik modele, yardımcı verilerin doğruluğuna, kontrol noktalarının, çizgilerinin veya yüzeylerinin kalitesine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Wolf ve Dewitt, 2000). Bu amaçla genellikle iki tür algılayıcıya bağımlı yöntem kullanılır. Birincisi algılayıcı sistemin iç ve dış yöneltme ögelerini kullanan ve algılayıcıya göre farklılıklar gösterebilen yöntemler, diğeri ise algılayıcıya bağımlı RFM'dir. Bu bildiride kullanılan RFM, algılayıcının iç ve dış yöneltme ögelerine bağlı kalmadan, görüntü ve nesne koordinatları arasında oransal bir işlevle koordinat dönüşümü sağlamaktadır (OGC, 1999). RFM'nin beklenen ($m_0 \leq \pm 1$ *YÖA*) düzeyde doğruluk sağlaması ve algılayıcı geometrisinden bağımsız olması, 1999 yılında yörüngesine oturtulan IKONOS uydusundan buyana özellikle yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden yüksek doğrulukta 2B/3B koordinat elde edilmesine olanak sağlamıştır (Poli ve Toutin, 2012).

Bu bildiride ele alınan Pléiades Neo bindirmeli pankromatik görüntüleri, GeoEtrim®'in alt yazılımı olan GeoTransform'da değerlendirilmiş; hem görüntülerin sağladığı konum doğruluğu hem de yöntemin başarımı irdelenmiştir.

2. YÖNTEM

RFM, temelde algılayıcıdan bağımsız bir matematiksel model olarak değerlendirilebilir. Ancak Oransal Polinom Katsayısı (Rational Polinomial Coefficient – RPC) elde ediliş yöntemine göre algılayıcıdan bağımsız ve algılayıcıya bağımlı RFM olarak iki yaklaşım bulunmaktadır (Tao ve Hu, 2002). Ayrıca RFM, yerden görüntüye ve görüntüden yere dönüşümü de sağlayacak şekilde iki türe sahiptir. Bu bildiride algılayıcıya bağımlı RFM yöntemi incelenecek olup diğer yaklaşıma değinilmeyecektir.

Algılayıcıya bağımlı RFM'de RPC'ler algılayıcıya bağımlı yöneltme yöntemiyle tek veya bindirmeli görüntüler kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanan yer koordinatları ile bunlara karşılık gelen görüntü koordinatları yardımıyla hesaplanarak kullanıcıya sunulur. Bu katsayılar başlangıçta (1999'lu yıllarda) sadece yerden görüntüye dönüşümü sağlayacak şekilde kullanıcıya sunulurken günümüzde görüntüden yere dönüşümü sağlayan katsayılar da standart olarak verilmektedir. Bu bildiride kullanılan yerden görüntüye RFM yöntemi (1) ve (2) bağıntıları ile açıklanmaktadır.

$$r_n = \frac{\sum_{i=0}^{m_i}\sum_{j=0}^{m_j}\sum_{k=0}^{m_k} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m_i}\sum_{j=0}^{m_j}\sum_{k=0}^{m_k} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \tag{1.a}$$

$$c_n = \frac{\sum_{i=0}^{m_i}\sum_{j=0}^{m_j}\sum_{k=0}^{m_k} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m_i}\sum_{j=0}^{m_j}\sum_{k=0}^{m_k} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \tag{1.b}$$

$$r_n = \left(r - r_0\right) / s_r \tag{2}$$

Burada *r* ve *c* sırasıyla görüntü koordinat sistemindeki satır ve sütun koordinatlarını, *X, Y* ve *Z* yer koordinatlarını, *n* normalizasyon yapıldığını, *0* ötelemeyi, *s* ölçeği, *a, b, c* ve *d* katsayıları (RPC) ifade etmektedir. RFM'nin derecesi $i+j+k<3$ kuralına uymak zorundadır. (2) bağıntısı c_n, X_n, Y_n ve Z_n için benzer şekilde uyarlanabilir. Her ne kadar *X, Y* ve *Z* kartezyen dik koordinat gösterimi için kullanılsa da algılayıcıya bağımlı RFM WGS84 coğrafi koordinatları ile gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla *X* boylam, *Y* enlem ve *Z* yükseklik olarak düşünülebilir. Normalizasyon yapılarak koordinatlar ±1 aralığına getirilerek olası kötü şartlı matris oluşumu önlenir.

Yerden görüntüye koordinat dönüşümünü ifade eden (1) bağıntısı RFM kullanılarak ortogörüntü üretiminde dolaylı ölçüler dengelemesinin işlevsel (fonksiyonel) modelinin oluşturulmasında kullanılabilir. Ancak sayısal yükseklik modeli üretimi gibi uygulamalarda, bindirmeli görüntülerden 3B koordinat hesabının gerçekleştirilmesi gerekir. Bunun için, Tao ve Hu (2002) tarafından önerilen hesaba göre

$$r' = \frac{a_0' + a_1' Z_u + a_2' Y_u + a_3' X_u}{b_0' + b_1' Z_u + b_2' Y_u + b_3' X_u} \tag{3.a}$$

$$c' = \frac{c_0' + c_1' Z_u + c_2' Y_u + c_3' X_u}{d_0' + d_1' Z_u + d_2' Y_u + d_3' X_u} \tag{3.a}$$

$$\begin{aligned}
a_0' &= a_{000} Z_s Y_s X_s - a_{001} Z_o Y_s X_s - a_{010} Z_s Y_o X_s - a_{100} Z_s Y_s X_o \\
a_1' &= a_{110} Y_s X_s \\
a_2' &= a_{101} Z_s X_s \\
a_3' &= a_{011} Z_s Y_s \\
b_0' &= b_{000} Z_s Y_s X_s - b_{001} Z_o Y_s X_s - b_{010} Z_s Y_o X_s - b_{100} Z_s Y_s X_o \\
b_1' &= b_{110} Y_s X_s \\
b_2' &= b_{101} Z_s X_s \\
b_3' &= b_{011} Z_s Y_s \\
c_0' &= c_{000} Z_s Y_s X_s - c_{001} Z_o Y_s X_s - c_{010} Z_s Y_o X_s - c_{100} Z_s Y_s X_o \\
c_1' &= c_{110} Y_s X_s \\
c_2' &= c_{101} Z_s X_s \\
c_3' &= a_{011} Z_s Y_s \\
d_0' &= d_{000} Z_s Y_s X_s - d_{001} Z_o Y_s X_s - d_{010} Z_s Y_o X_s - d_{100} Z_s Y_s X_o \\
d_1' &= d_{110} Y_s X_s \\
d_2' &= d_{101} Z_s X_s \\
d_3' &= d_{011} Z_s Y_s
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} v_{r_{sol}} \\ v_{c_{sol}} \\ v_{r_{sağ}} \\ v_{c_{sağ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1\,sol}' - r_{sol} b_{1\,sol}' & a_{2\,sol}' - r_{sol} b_{2\,sol}' & a_{3\,sol}' - r_{sol} b_{3\,sol}' \\ c_{1\,sol}' - c_{sol} d_{1\,sol}' & c_{2\,sol}' - c_{sol} d_{2\,sol}' & c_{3\,sol}' - c_{sol} d_{3\,sol}' \\ a_{1\,sağ}' - r_{sağ} b_{1\,sağ}' & a_{2\,sağ}' - r_{sağ} b_{2\,sağ}' & a_{3\,sağ}' - r_{sağ} b_{3\,sağ}' \\ c_{1\,sağ}' - c_{sağ} d_{1\,sağ}' & c_{2\,sağ}' - c_{sağ} d_{2\,sağ}' & c_{3\,sağ}' - c_{sağ} d_{3\,sağ}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ Y \\ X \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{sol} b_{0\,sol}' - a_{0\,sol}' \\ c_{sol} d_{0\,sol}' - c_{0\,sol}' \\ r_{sağ} b_{0\,sağ}' - a_{0\,sağ}' \\ c_{sağ} d_{0\,sağ}' - c_{0\,sağ}' \end{bmatrix} \tag{5}$$

Burada *v* düzeltmeyi temsil etmektedir. (5) bağıntısı

$$\underline{v} = \underline{A}\ \ \underline{P} - \underline{l} \tag{6}$$

şeklinde matris gösterimi ile gösterilebilir. En küçük kareler yaklaşımı ile $\underline{v}^T \underline{v} = en\ \ küçük$ şeklinde kabul edilirse

$$\underline{P} = \left(\underline{A}^T \underline{A}\right)^{-1} \underline{A}^T \underline{l} \tag{7}$$

şeklinde yer koordinatları hesaplanabilir. RPC'ler hesaplanırken genellikle görüntülenen bölgeye ait YKN'ları elde mevcut değildir. Bu durumda, genellikle dış yöneltme elemanlarına (yani algılayıcının veya taşıyıcı sistemin konumu ve dönüklüğü vb.) ait değerler dengeli olarak belirlenemez. Bu şekilde hesaplanan RPC'ler sistematik bir hataya neden olurlar. Bu hatanın düzeltilmesi için bazı matematik modeller önerilmiştir. Bu bildiride (Teo, 2011) tarafından önerilen aşağıdaki modeller kullanılmıştır.

$$r_n^b = g_{01} + r_n' c_n^b = g_{11} + c_n' \tag{8}$$

$$r_n^b = g_{01} + g_{02} r_n' + g_{03} c_n' c_n^b = g_{11} + g_{03} r_n' + g_{02} c_n' \tag{9}$$

$$r_n^b = g_{01} + g_{02} r_n' + g_{03} c_n' c_n^b = g_{11} + g_{12} r_n' + g_{13} c_n' \tag{10}$$

Bu eşitliklerde r_n^b ve c_n^b öteleme düzeltmesi getirilmiş ve normalize edilmiş görüntü koordinatlarını, g dönüşüm katsayısını, $r_n^{'}$ ve $c_n^{'}$ ise (1.a-b) bağıntıları kullanılarak RPC'lerle hesaplanmış görüntü koordinatlarını belirtmektedir. Görüleceği üzere (8) eşitliği öteleme, (9) eşitliği benzerlik (Helmert), (10) eşitliği ise afin (1. Derece polinom) dönüşümdür. $r_n^{'}$ ve $c_n^{'}$ ile r_n^b ve c_n^b arasındaki bu dönüşüm bağıntıları yardımıyla r_n^b ve c_n^b'ye getirilecek düzeltmeler EKK (En Küçük Kareler) yaklaşımı ile hesaplanarak sistematik hata giderilmeye çalışılır.

Dengeleme hesabında görüntü koordinatları (*r* ve *c)* ölçü (*l*), RPC'lere ve denetim noktalarının yaklaşık yer koordinatlarına getirilecek düzeltmeler dengeleme bilinmeyeni (d_{RPC}) olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, dolaylı ölçüler dengelemesine göre demet dengelemenin işlevsel modeli

$$\underline{A}=\begin{bmatrix} \underline{A}_{RPC_{sol}} & \underline{0} & \\ \underline{0} & \underline{A}_{RPC_{sağ}} & \underline{A}_{XYZ} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\underline{A}_{RPC}=¿ \tag{12}$$

$$\underline{A}_{XYZ}=\begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial X} & \frac{\partial r}{\partial Y} & \frac{\partial r}{\partial Z} \\ \frac{\partial c}{\partial X} & \frac{\partial c}{\partial Y} & \frac{\partial c}{\partial Z} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\underline{d}_{unk}=[\,d\,a_{000}\ldots d\,d_{111}\;\; dX\;\; dY\;\; dZ\,]^T \tag{14}$$

$$\underline{d}_{unk}=\begin{bmatrix}\underline{d}_{RPC} & \underline{d}_{XYZ}\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\underline{l}-\underline{l}\big|_0=\begin{bmatrix} (r-r|_0)_{sol} & ¿ & (r-r|_0)_{sağ} \\ (c-c|_0)_{sol} & & (c-c|_0)_{sağ} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\underline{d}_{unk}=\left(\underline{A}^T\underline{A}+\kappa\,\underline{E}\right)^{-1}\underline{A}^T\left(\underline{l}-\underline{l}\big|_0\right) \tag{17}$$

$$\overline{\underline{RPC}}=\underline{RPC}\big|_0+\underline{d}_{RPC} \tag{18}$$

$$\overline{\underline{XYZ}}=\underline{XYZ}\big|_0+\underline{d}_{XYZ} \tag{19}$$

$$\underline{v}=\underline{l}\big|_0-\underline{l}+\underline{A}\;\;\underline{d}_{RPC} \tag{20}$$

$$\overline{\underline{l}}=\underline{l}+\underline{v} \tag{21}$$

$$m_0=\pm\sqrt{\frac{\underline{v}^T\underline{v}}{f}} \tag{22}$$

$$f=2n-u \tag{23}$$

Burada *v* düzeltmeleri, $|_0$ yaklaşık değerleri, $\underline{A}$ RPC ve denetim noktalarının yaklaşık yer koordinatlarına göre oluşturulan Jakobiyen matrisi, m_0 soncul karesel ortalama hatayı temsil etmektedir ve $m_0 \le \pm 1$ *piksel* olması beklenir (Leprince vd., 2007). κ düzenlileştirme için kullanılan Tikhonov katsayısıdır ve $\underline{A}^T\underline{A}$'nın özdeğerleri arasından seçilir. $\underline{E}$ ise birim matristir (Terlemezoğlu ve Topan, 2020a). *f* serbestlik derecesi, *n* toplam nokta sayısı, *u* ise bilinmeyen sayısıdır. $\underline{A}_{RPC}$'nin boyutları $2n\times u_{RPC}$, $\underline{A}_{XYZ}$'nin boyutları ise $2n\times 3n_{DN}$ (n_{DN} denetim noktası sayısı) kadardır. Burada kullanılan denetim noktaları, algılayıcıdan bağımsız bir modeldeki bağımsız denetim noktalarından farklı şekilde (15) bağıntısındaki hesapta kullanıldığından yer kontrol noktalarından tamamen bağımsız değildir. Dengeleme bilinmeyenleri ($\underline{d}_{unk}$) Cayley, Moore-Penrose (pseudo) veya Terlemezoğlu ve Topan (2020a) tarafından önerilen Tikhonov düzenlileştirmesi ile anlamlı bir m_0'a ulaşılacak şekilde hesaplanamamıştır. Bunun yerine

$$\underline{v}=\underline{A}_{RPC}\,\underline{d}_{RPC}+\underline{A}_{XYZ}\,\underline{d}_{XYZ}\;\;-\left(\underline{l}-\underline{l}\big|_0\right) \tag{24}$$

$$\underline{A}=\begin{bmatrix}\underline{A}_{RPC} & \underline{A}_{XYZ}\end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\underline{N}=\underline{A}^T\underline{A}=\begin{bmatrix}\underline{A}_{RPC}^T\underline{A}_{RPC} & \underline{A}_{RPC}^T\underline{A}_{XYZ} \\ \underline{A}_{XYZ}^T\underline{A}_{RPC} & \underline{A}_{XYZ}^T\underline{A}_{XYZ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{N}_{11} & \underline{N}_{12} \\ \underline{N}_{12}^T & \underline{N}_{22}\end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\begin{bmatrix}\underline{N}_{11} & \underline{N}_{12} \\ \underline{N}_{12}^T & \underline{N}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\underline{d}_{RPC} \\ \underline{d}_{XYZ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{n}_1 \\ \underline{n}_2\end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}\underline{N}_{11}\underline{d}_{RPC}+\underline{N}_{12}\underline{d}_{XYZ}&=\underline{n}_1 \\ \underline{N}_{12}^T\underline{d}_{RPC}+\underline{N}_{22}\underline{d}_{XYZ}&=\underline{n}_2\end{aligned} \tag{28}$$

$$\underline{N}_{22}^{-1}\underline{N}_{12}^{T}\underline{d}_{RPC}+\underline{N}_{22}^{-1}\underline{N}_{22}\underline{d}_{XYZ}=\underline{N}_{22}^{-1}\underline{n}_{2} \quad (29)$$

$\underline{N}_{22}^{-1}\underline{N}_{22}=\underline{I}$ olduğundan

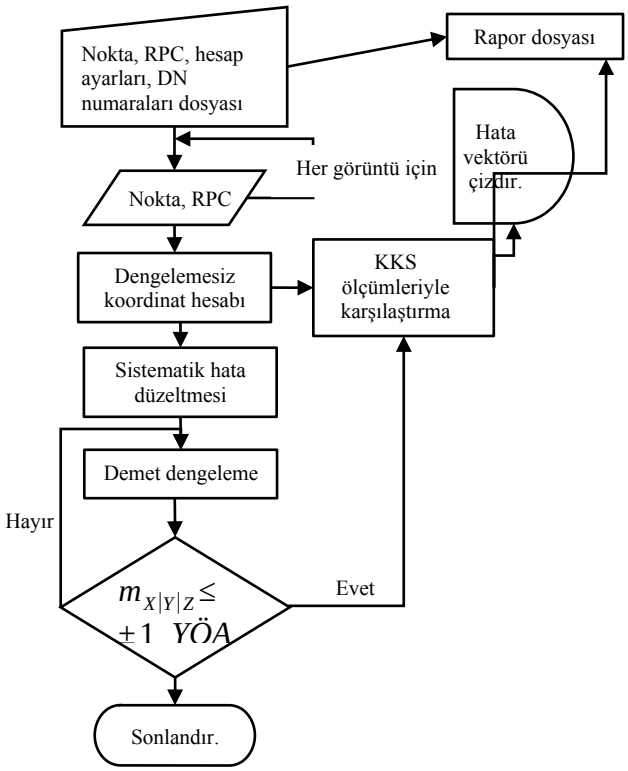
$$\underline{d}_{RPC}=\left(\underline{N}_{11}-\underline{N}_{12}\underline{N}_{22}^{-1}\underline{N}_{12}^{T}\right)^{-1}\left(\underline{n}_{1}-\underline{N}_{12}\underline{N}_{22}^{-1}\underline{n}_{2}\right) \quad (30)$$

$$\underline{d}_{XYZ}=\underline{N}_{22}^{-1}\underline{n}_{2}-\underline{N}_{22}^{-1}\underline{N}_{12}^{T}\underline{d}_{RPC} \quad (31)$$

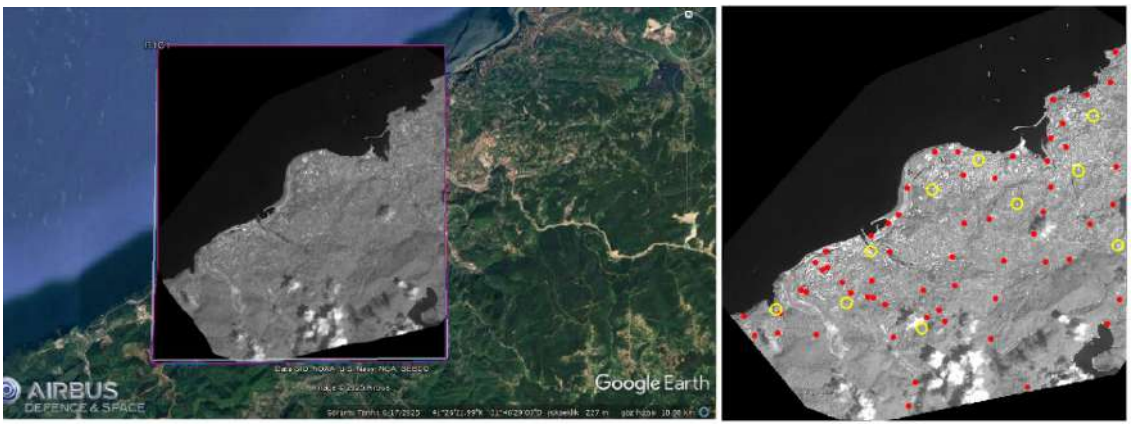
şeklinde hesaplanabilir. GeoTransform'a 3B RFM ile koordinat hesabı hakkındaki çalışmalar devam ettiğinden kestirim yanlılığı (bias) düzeltmesi, uyuşumsuz ölçü tespiti, ağırlıklı dengeleme hesabı ve öge anlamlılık testi gibi özellikler henüz kazandırılamamıştır. Bu nedenle bu bildiride bu konulara yer verilmemiştir. Tüm işlemler Şekil 1'deki gibi bir iş akışı ile gösterilebilir.

3. UYGULAMA

Uygulamada Zonguldak test bölgesine ait Pléiades Neo üçlü bindirmeli görüntülerden en büyük baza sahip olan iki görüntü ile bölgede tesis edilen 72 adet nokta kullanılmıştır. Görüntülerin kapladıkları alanlar ve nokta dağılımı Şekil 2'de gösterilmektedir. Noktalar, zeminde, olabildiğince bakışımlı ve zamanla değişime uğrama olasılığı düşük olan noktalar seçilmiştir. Görüntünün alt (güney) kısımlarındaki yoğun ormanlık alanda noktalar daha seyrektir. Tüm hesaplamalar birinci yazar tarafından MATLAB ortamında geliştirilen GeoTransform yazılımı ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1).

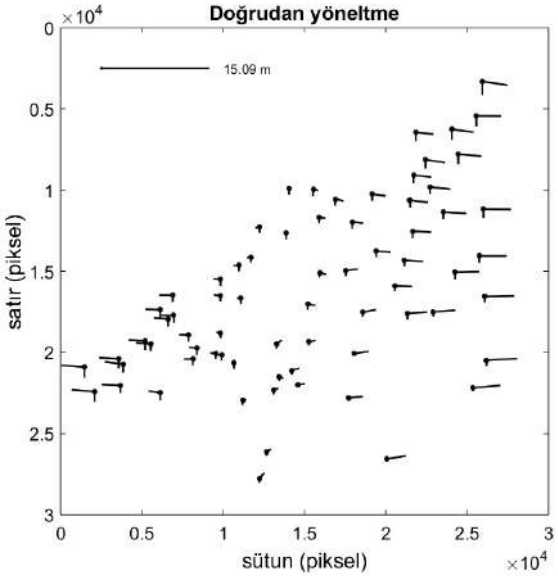


Şekil 1. GeoTransform'un RFM için iş akışı.



Şekil 2. Görüntünün kapladığı alan (sol) ve YKN (kırmızı, 62 adet) ve BDN (sarı, 10 adet) dağılımı (sağ)

Her ne kadar üçlü bindirme için görüntüler mevcut olsa da en büyük baza sahip stereoçift olan 8427 ve 9226 numaralı görüntüler için araştırma yapılmıştır. Bu stereo çift için baz/yükseklik 0.37, yaklaşma açısı ise 20.99°'dir. Öncelikle, doğrudan yöneltme sonuçları irdelendiğinde bu değerlerin $m_X = \pm 13,87 \;\; m$, $m_Y = \pm 1,42 \;\; m$, $m_h = \pm 5,61 \;\; m$ düzeyinde olduğu görülmektedir. Bu değerler, $m_0 = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_h^2} = 15.03 \;\; m$ şeklinde hesaplandığında, Airbus Defence and Space (2022) tarafından önerilen doğrudan yöneltme doğruluğunun epey üzerindedir. Doğrudan yöneltmeye ait hata vektörleri Şekil 3'de görülebilir.

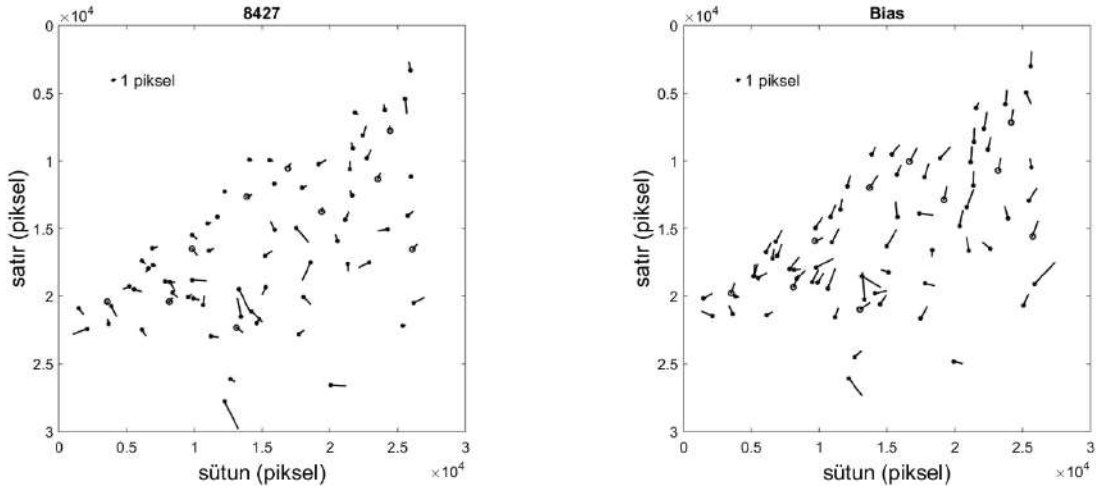


Şekil 3. Doğrudan yöneltmeye ait hata vektörleri.

Sistematik hata düzeltmesi, iki eksen yönünde olma olasılığına karşı afin dönüşüm (10. bağıntı) ile kullanılarak YKN'lerde ve BDN'lerde ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 1'de m_0 afin dönüşüm işleminin soncul karesel ortalama hatasını, σ ise sistematik hata düzeltmesi getirilmiş görüntü koordinatları ile bunların ham halleri arasındaki farkınn standart satmasını ifade etmektedir. Her iki görüntü için sistematik sistematik hata düzeltmesi işleminin hata vektörleri Şekil 4'te görülebilir.

Çizelge 1. Sistematik hata düzeltmesi (± piksel)

Öteleme Düzeltmesi		**8427**	**9266**
$m_0 = \pm\sqrt{\frac{v^T v}{f}}$	YKN	0.22	0.35
	BDN	0.22	0.36
$\sigma = \pm\sqrt{\frac{\Delta(r,c)}{n}}$	YKN	3.30	3.35
	BDN	1.56	1.57



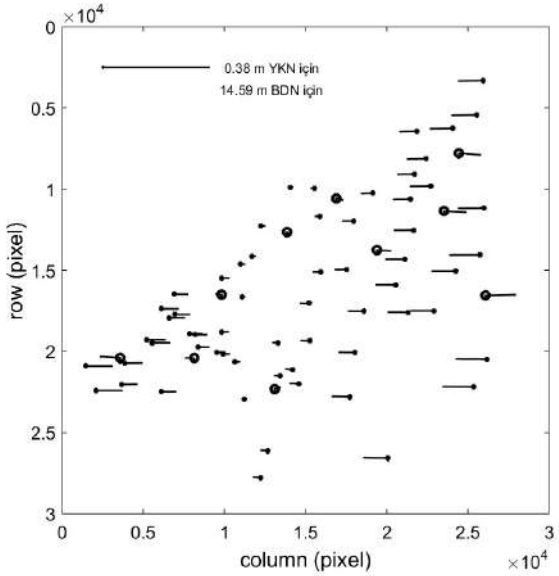
Şekil 4. Sistematik hata düzeltmesi sonucu elde edilen hata vektörleri.

Sistematik hata düzeltmesi sonrasında elde edilen doğruluk değerleri ise Çizelge 2'de sunulmuştur. Elde edilen hata vektörleri Şekil 5'te gösterilmektedir.

Çizelge 2. 3B konum doğrulukları (±m)

Model			m_X	m_Y	m_h
RFM (1°)	$\lambda = 0{,}134$	YKN	0,38	0,00	0,03
		BDN	14,23	1,05	3,00

Dengeleme hesabı ile elde edilen sonuçlar irdelendiğinde yeter sayıda nokta olduğu ve (24-31) numaralı bağıntılarla verilen yaklaşım ile YKN'lerde en iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da sadece 1° RFM ile uygun değerler elde edilebilmiştir. YKN'lerde cm düzeyinde doğruluk elde edilebilirken BDN'lerde doğruluk değerlerinin beklenen düzeyin (±1 YÖA) üzerinde olduğu görülmektedir. Burada Terlemezoğlu ve Topan (2020b) tarafından önerilen yaklaşımla BDN'lerin yaklaşık koordinatlarına getirilecek düzeltmelerle ilişkili olan $\underline{N_{22}}$ matrisinin özdeğerlerinden biri ($\lambda = 0.13$) Tikhonov katsayısı alınarak köşegene eklenmiştir.



Şekil 4. Demet dengeleme sonucu elde edilen hata vektörleri.

4. TARTIŞMA

Bu bildiride, Pléiades Neo görüntülerinin yerden görüntüye RFM yöntemi ile 3B konum doğruluğunun belirlenmesi konu edilmiştir. Her ne kadar RFM yöntemi algılayıcıdan bağımsız bir dönüşüm yöntemi olsa da özellikle polinom

derecesi arttıkça sayısal çözümleme açısından uğraştırıcı bir yöntemdir. Elde edilen sonuçlar, hem YKN'lerde hem de BDN'lerde sistematik bir hatanın olduğunu göstermektedir. Burada RPC'lerden kaynaklanan sistematik hata düzeltmesi yapıldığı halde diğer başka etkilerin varlığının irdelenmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca YKN'lerde arzu edilen doğruluğua erişildiği halde BDN'lerde erişilememesinin ardında BDN'lerin yaklaşık koordinatlarının hesabı veya dengeleme hesabında yaklaşık değerlere getirilecek düzeltmenin hesaplandığı kısmın farklı yöntemlerle irdelenmesi gerektiği düşünülmektedir. RPC'lerin tümünün yerine bazılarının dengeleme hesabında bilinmeyen olarak ele alındığı klasik veya yapay sinir ağları temelli yaklaşımların yanı sıra kötü şartlı veya seyrek matris yapılarının uygun düzenlileştirme yöntemleriyle çözümlendiği yaklaşımlar geliştirilmiştir. Yine ağırlıklı dolaylı ölçüler dengelemesi yaklaşımının da sonuçları iyileştirebileceği düşünülmektedir. Son olarak uyuşumsuz ölçü testi ile uyuşumsuz noktalar belirlenip doğruluk sonuçları irdelenmelidir.

5. SONUÇ

Görüntülerden konum bilgisi elde etme ve doğruluk araştırmaları genellikle kullanılan matematik modele, dengeleme hesabına ve görüntüleme sistemi ile taşıyıcı sistemin geometrik özelliklerine bağlıdır. Özellikle dengeleme hesabı sonucu elde edilen 3B konum doğruluğunun öncelikle görüntünün geometrik yapısına bağlı olduğu düşünülse de kullanılan matematik model, dengeleme hesabındaki matris yapıları ve ters alma yaklaşımları sonuçları önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bu durumda, RFM gibi genel ve pek çok yazılımda yer alan matematiksel modellerle çalışırken arka planda hesapların nasıl yapıldığının bilinmesi gerekmektedir. 1999 yılından itibaren yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri için önerilen RFM yöntemi bu bildiride konu edildiği gibi yeniden ele alınmıştır. Tartışma bölümünde açıklandığı üzere genel olarak RFM ile 3B koordinat hesabı yapılması yeterli değildir. RFM hakkında yapılan çalışmaların irdelenerek GeoTransform'a ek özelliklerin kazandırılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Pléiades Neo görüntüleri için Avrupa Uzay Ajansı'na (Proje Numarası: PP0092252), nokta takımı için yürütülen arazi çalışmalarına destekleri için TÜBİTAK'a (Proje Numarası: 114Y380) ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (Proje Numarası: 2014-47912266-01), deg2utm Matlab kodları için Rafael Palacios'a, dengeleme hesabındaki Matlab fonksiyonu için Yük. Müh. Ali Cam'a ve matris düzenlileştirme için Dr. Bilgi Terlemezoğlu'na teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Airbus Defence and Space, 2022. *Pléiades Neo User Guide*. 3 basım.

Airbus Defence and Space, 2026. 30 cm Very High-Resolution Imagery | Pléiades Neo. https://space-solutions.airbus.com/imagery/our-optical-and-radar-satellite-imagery/pleiades-neo/ [Erişim tarihi: 8th February].

Ali, M.A., Eltohamy, F., Abd-Elrazek, A. ve Hanafy, M.E., 2023. Assessment of micro-vibrations effect on the quality of remote sensing satellites images. *International Journal of Image and Data Fusion*, 14(3): 243-260.

Alrabayah, O., Caus, D., Watson, R.A., Schulten, H.Z., Weigel, T., Rüpke, L. ve Al-Halbouni, D., 2024. Deep-Learning-Based Automatic Sinkhole Recognition: Application to the Eastern Dead Sea. *Remote Sensing*, 16(13): 2264.

Balabathina, V.N., Mishra, S., Sharma, M., Sharma, S., Kumar, P. ve Narayan, A., 2025. Comparative evaluation of fast-learning classification algorithms for urban forest tree species identification using EO-1 hyperion hyperspectral imagery. *Frontiers in Environmental Science*, Volume 13 - 2025.

Candra, D.S., Ulfa, K., Rasyidy, F.H., Hestrio, Y.F., Prabowo, Y. ve Rahayu, M.I., 2023. Evaluation of Very-high Resolution Satellite Image Compression to Support Agriculture Monitoring. *2023 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*, syf: 1-6.

Cantrell, S.J., Sampath, A., Vrabel, J.C., Bresnahan, P., Anderson, C., Kim, M. ve Park, S., 2023. *System characterization report on the Pléiades Neo Imager*. Reston, VA. 62 sayfa.

Chouteau, F., Gabet, L., Fraisse, R., Bonfort, T., Harnoufi, B., Greiner, V., Le Goff, M., Ortner, M. ve Paveau, V., 2022. Joint Super-Resolution and Image Restoration for Pléiades Neo Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2022: 9-15.

Combarro Simon, M., Talbot, P., Danoy, G., Musial, J., Alswaitti, M. ve Bouvry, P., 2026. Constraint Model for the Satellite Image Mosaic Selection Problem. *29th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2023)*, Article No. 23, syf: 23: 21–23:16.

Denis, G., Cances, M., Gabet, L., Letourmy, D. ve Le Hors, L., 2026. Pléiades Neo satellites: new assets for emergency response and disasters management. *Acta Astronautica*, 240: 902-916.

Falabella, F., Pepe, A., Oštir, K., Gubaidullina, R., Trajkovski, K.K., Grigillo, D., Grabrovec, V., Hamza, V., Prešeren, P.P. ve Blaha, H., 2025. Utilization of multi-sensor remote sensing technologies for open pit mine monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 143(10483): 4.

Guardabrazo, T., Gutiérrez, A. ve Yubero, L., 2023. Process4eo: Super-Resolution Algorithms for Novel Satellite Sensors. *IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, syf: 4510-4513.

Ha, T., Singh, J.S., Nketia, K., van Steenbergen, S., Fernando, H., Zoerb, B. ve Shirtliffe, S.J., 2025. Mapping Kochia Patches Using Machine Learning and High-Resolution Satellite Imagery. *IGARSS 2025-2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, syf: 596-600.

Jangir, S.K. ve Bahmanyar, R., 2024. Enhancing Very High-Resolution Satellite Images At 15 cm: A Novel Pipeline With Synthetic Data and Single Image Superresolution. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 2670-2689.

Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. ve Avouac, J.P., 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1529-1558.

Loudjani, P., Lemajic, S., Parage, V. ve Rodrigues, C., 2023. *Report on new Pléiades Neo sensors benchmark, Geometric benchmarking over Maussane test site for CAP 2014+*

purposes.

Mohammed, A.H., Farg, E., Hanafy, M.H. ve Mohamed, S.A., 2024. Characterizing and Mapping Mangrove Species Using Spectral Signatures in the Red Sea, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 28(6).

Mukhopadhyay, A., Pal, I., Hati, J.P., Pramanick, N., Acharyya, R., Kumar, A., Jana, S.K. ve Mitra, D., 2024. High-resolution Pléiades data: an in-depth analysis of applications and future prospects. *Spatial Information Research*, 32(6): 739-755.

OGC, 1999. *The OpenGIS® Abstract Specification Topic 6: The Coverage Type and its Subtypes Version 4*.

Poli, D. ve Toutin, T., 2012. Review of Developments in Geometric Modelling for High Resolution Satellite Pushbroom Sensors. *The Photogrammetric Record*, 27(137): 58-73.

Prakash, P. ve Saxena, A., 2025. Hazard Tree Instance Detection via Deep Neural Network Models. *IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, syf: 3709-3713.

Tao, C.V. ve Hu, Y., 2002. 3D Reconstruction methods Based on the Rational Function Model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(7): 705-714.

Teo, T.-A., 2011. Bias Compensation in a Rigorous Sensor Model and Rational Function Model for High-Resolution Satellite Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(12): 1211–1220.

Terlemezoğlu, B. ve Topan, H., 2020a. Eigenvalue-Based Approaches for Solving an Ill-Posed Problem Arising in Sensor Orientation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(3).

Terlemezoğlu, B. ve Topan, H., 2020b. Eigenvalue-Based Approaches for Solving an Ill-Posed Problem Arising in Sensor Orientation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(3): 1920-1930.

Vivero, S., Pellet, C. ve Farías-Barahona, D., 2026. Evaluating Pléiades Neo capabilities for deriving rock glacier velocity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 148: 105207.

Wang, Q., Chinkaka, E., Richaud, R., Haghdadi, M., Wolk, C., Oromeng, K.V., Davis, K.F., Bianco, F.B., Peng, X. ve Klinger, J.M., 2025. MO-SAM: Testing the reliability and limits of mine feature delineation using Segment Anything Model to democratize mine observation and research. *PLOS Sustainability and Transformation*, 4(7): e0000182.

Wolf, P.R. ve Dewitt, B.A., 2000. *Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS*. 3rd basım, McGraw-Hill.

TARİHİ HAVA FOTOĞRAFLARININ SINIFLANDIRILMASINDA GRİ DÜZEY EŞ OLUŞUM MATRİSLERİNİN KATKISININ İNCELENMESİ

Ömer Gökberk NARİN[1], Çağlar BAYIK[2], Aliihsan ŞEKERTEKİN[3], Saygın ABDİKAN[4], Füsun BALIK ŞANLI[5]

[1]Doç. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez, Afyonkarahisar, gokberknarin@aku.edu.tr
[2]Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez, Zonguldak, caglarbayik@beun.edu.tr
[3]Prof. Dr., Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, aliihsan.sekertekin@igdir.edu.tr
[2]Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, sayginabdikan@hacettepe.edu.tr
[2]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, fbalik@yildiz.edu.tr

ÖZET

Arazi kullanımını ve zamansal olarak nasıl değiştiğini anlamak sürdürülebilir bir yaşam alanı için kritik bir gerekliliktir. Bu sebeple tarihi hava fotoğrafları uzun süreli analizler yapmak için önemli bir veri kaynağıdır. Bu çalışmada, Yeşilırmak Deltası (Çarşamba Ovası) üzerinde yer alan tarihi ortofotolar kullanılarak gri seviye eş-oluşum matrisi (Gray Level Co-occurrence Matrix - GLCM) tabanlı doku özelliklerinin sınıflandırma doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında 1953, 1966 ve 1972 yıllarına ait siyah-beyaz hava fotoğrafları kullanılmış ve veriler Google Earth Engine ortamında işlenmiştir. Tek bantlı görüntülerde sınıflandırma performansını artırmak amacıyla 5×5 pencere boyutu kullanılarak 16 adet GLCM doku özelliği türetilmiştir. Sınıflandırma işlemi, Rastgele Orman (RO) algoritması kullanılarak tarım, su ve ağaç olmak üzere üç sınıf için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, GLCM özelliklerinin sınıflandırma doğruluğunu belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. En dikkat çekici iyileşme 1972 yılına ait sonuçlarda gözlenmiş olup, genel doğruluk gri bantta 0.28 iken GLCM özellikleri ile yaklaşık 0.87 seviyesine ulaşmıştır. Kappa katsayısı da benzer eğilimler göstermiş ve özellikle gri bantta düşük olan değerlerin GLCM ile önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Sonuçlar, tek bantlı tarihi görüntülerde sınırlı olan spektral bilginin, doku özellikleri ile desteklenmesi durumunda sınıflandırma performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca tüm bantlar yerine seçili bantların kullanılmasıyla benzer doğruluk değerlerine ulaşılması, boyut indirgeme açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Tarihi ortofoto, GLCM, Rastgele orman, Yeşilırmak Deltası, Arazi Kullanımı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE GRAY LEVEL CO-OCCURENCE MATRIX CONTRIBUTION TO THE CLASSIFICATION OF HISTORICAL AERIAL PHOTOGRAPHS

Understanding land use and how it has changed over time is critical for creating a sustainable living environment. For this reason, historical aerial photographs serve as an important data source for conducting long-term analyses. In this study, the effect of texture features based on the Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) on classification accuracy was examined using historical orthophotos of the Yeşilırmak Delta (Çarşamba Plain). Black-and-white aerial photographs from 1953, 1966, and 1972 were used in the study, and the data were processed in the Google Earth Engine environment. To improve classification performance in single-band images, 16 GLCM texture features were derived using a 5×5 window size. The classification process was performed for three classes—agricultural land, water, and forest—using the random forest algorithm. The results indicate that GLCM features significantly improved classification accuracy. The most notable improvement was observed in the results from 1972, where the overall accuracy in the gray band was 0.28, but reached approximately 0.87 with GLCM features. The Kappa coefficient also showed similar trends, and it was determined that the values, which were low in the gray band, increased significantly with GLCM. The results demonstrate that the limited spectral information in single-band historical images can significantly improve classification performance when supported by texture features. Additionally, achieving similar accuracy levels by using selected bands instead of all bands offers a significant advantage in terms of dimensionality reduction.

Keywords: Historical orthophoto, GLCM, Random Forest, Yeşilırmak Delta, Land use

1. GİRİŞ

Arazi kullanımı, insan faaliyetlerinin etkisiyle ya da doğal süreçler ile değişebilmektedir. Bu değişim de canlı hayatını doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Bu sebeple arazi kullanımının zamansal olarak nasıl değiştiğini anlamak sürdürülebilir bir yaşam alanı için kritik bir gerekliliktir (Osgouei vd., 2022). Çok zamanlı uzaktan algılama verileri geçmişten günümüze yaşanan değişimlerin belirlenmesi ve zaman içindeki etkilerin tespiti açısından oldukça önemlidir. Siyah-beyaz görüntüler arazi kullanımının değişimi için araştırmacılara ve karar vericilere önemli bilgiler

sunmaktadır. Ancak siyah-beyaz görüntüler hakkında yeterli metaverinin bulunmaması, bu değerli veri grubunun bilimsel çalışmalarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Dahle vd., 2024). Bu görüntülerin arşivine sahip kurumlar görüntüleri ön işlem adımlarından geçirerek tarihi ortofotolara dönüştürmektedir. İsviçre için, 1946 yılında toplanan ülke çapındaki görüntülerden üretilen ortofotolar kamuya açık olarak sunulmaktadır (SWISSTOPO 2019). Türkiye için de Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM), Harita Genel Müdürlüğü (HGM) arşivlerinde 1955 yılından bu yana birçok siyah-beyaz görüntü mevcuttur (Soylu vd., 2014). Bununla birlikte 2023 yılında kullanıma açılan HGM Geoportal Uygulaması (https://geoportal.harita.gov.tr/) üzerinden tarihi ortofotolara ait bilgilere ulaşılabilmektedir.

Tarihi ortofoların arazi kullanımlarının sınıflandırılması multispektral görüntülere göre hem spektral hem de radyometrik çözünürlükteki kısıtlardan dolayı daha zordur. Vogels vd., (2017) siyah-beyaz fotoğraf sınıflandırmada orijinal tarihi hava fotoğrafı kullanmamışlardır. Bunun yerine 2008 ve 2009 yıllarında çekilen WorldView-1 uydu görüntüsünün tarihi hava fotoğrafı şeklinde simüle etmişlerdir. Sınıflandırmada tarım alanları ve diğerleri olarak iki sınıf kullanılmıştır. Veriyi sınıflandırmak için coğrafi obje tabanlı görüntü analizi (Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA) ile segmentasyon yapıp Rastgele Orman (RO) algoritması ile görüntüleri sınıflandırmışlardır. 5 farklı kategoride 25 farklı değişken de sınıflandırmada kullanılmıştır. Çalışma sonucunda iki farklı alanda %90 ve %96 genel doğruluk elde etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda özellikle gri seviye eş-oluşum matrisi (Gray-Level Co-Occurrence Matrix – GLCM) elemanlarının (GLCM entropy, GLCM homogeneity ve GCLM angular 2nd momentum) sınıflandırma doğruluğunu artırmada daha önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Huber vd. (2025) İsviçre'nin sekiz farklı alanında 1946 yılında çekilmiş ve ortorektifiye edilmiş siyah-beyaz hava fotoğraflarını kullanmışlardır. Yöntem olarak Vogels vd. (2017) çalışmasında olduğu gibi segmentasyon ve RO algoritmasını tercih etmişlerdir. Sınıflandırmada 15 farklı sınıf ve 6 farklı kategoride 26 farklı değişken kullanılmıştır. Çalışma sonucunda genel doğruluk değerini %67.8 olarak elde etmişlerdir. Dahle vd. (2024) Antartika'nın, Adelaide Adasında yaptıkları çalışmada siyah-beyaz hava fotoğrafları ile U-Net semantik segmentasyon yaklaşımını sınıflandırma algoritması olarak kullanmışlardır. Çalışmada altı farklı sınıf kullanılmış ve %73 doğruluk elde edilmiştir.

Bu çalışmada, tarihi ortofotoların sınıflandırılmasında GLCM elemanlarının katkısı araştırılmıştır. Bu kapsamda üç farklı tarihte tarihi ortofoto kullanılmış ve RO algoritması ile sınıflandırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

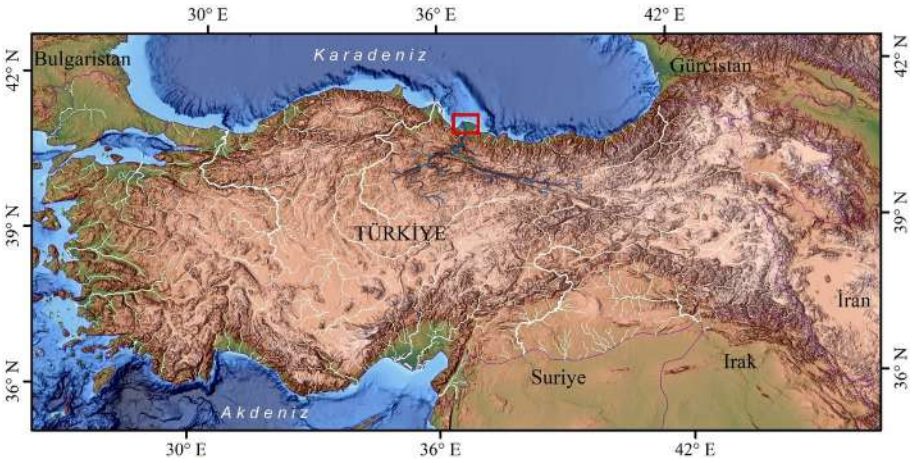
Tarihi ortofotoların sınıflandırılmasına yönelik bu çalışma dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) temin edilen 1953, 1966 ve 1972 yıllarına ait ortorektifiye edilmiş hava fotoğrafları Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamına aktarılmış ve tüm görüntüler aynı çalışma alanını kapsayacak şekilde kırpılmıştır. İkinci aşamada, görüntüler Google Earth Engine (GEE) platformuna yüklenmiş ve sınıflandırma performansını artırmak amacıyla Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi (GLCM) tabanlı doku özellikleri üretilmiştir. Böylece, orijinal görüntü ile birlikte 17 adet doku özelliğini içeren toplam 18 bantlı yeni bir veri seti oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada, görüntüler üzerinde su yüzeyleri, ağaçlık alanlar ve tarım arazilerine ait eğitim ve doğrulama örnekleri belirlenmiştir. Daha sonra RO algoritması kullanılarak üç farklı veri seti ayrı ayrı sınıflandırılmıştır: (i) yalnızca tek bantlı ortorektifiye edilmiş tarihi görüntü, (ii) tarihi görüntü ile GLCM tabanlı doku özelliklerinin birlikte kullanıldığı 18 bantlı görüntü ve (iii) özellik önem sıralamasına göre seçilen en etkili beş değişkenden oluşturulan 5 bantlı görüntü.

Son aşamada ise elde edilen sınıflandırma sonuçları doğruluk analizi ile değerlendirilmiş ve her bir sınıflandırma senaryosu için genel doğruluk (Overall Accuracy) ve Kappa katsayısı hesaplanarak yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır.

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı Yeşilırmak Deltası (Çarşamba Ovası) seçilmiştir (Şekil 1). Yeşilırmak Deltası 34340 hektarlık alana sahip olup delta alanı zengin bir flora ve faunaya sahiptir. Bununla birlikte delta tarım alanları, orman, mera, bataklık, su basar ormanları, gibi farklı arazi örtülerine sahiptir. Delta; kum zambağı, su mercimeği, sahil çamı ve daha birçok bitki türüne ev sahipliği yapmaktadır. Bununla birlikte karaca, çakal, tilki, ebabil kuşu, martı, yılan ve kurbağa türleri gibi birçok türde hayvana da ev sahipliği yapmaktadır (11. Bölge Müdürlüğü, t.y.).



Şekil 1. Çalışma alanını gösterir harita. Mavi hat Yeşilırmak Nehrini, beyaz hatlar Türkiye sınırları içerisinde bulunan diğer nehirleri, kırmızı poligon çalışma alanını göstermektedir.

2.2 Tarihi Ortofoto ve GLCM

Çalışmada HGM arşivleri kullanılmıştır. Çarşamba Ovası'na ait 1953, 1966 ve 1972 yıllarında elde edilmiş siyah beyaz görüntüler HGM'den resmi yazışmalar ile istenmiştir. HGM geoportal'da yer alan metaveri detayları kapsamında veriler alınmıştır. Her üç görüntü de analog hava kamerası ile çekilmiş film tabanlı görüntülerdir. Görüntülerin banyo işlemlerinden ortofoto üretimine ve kalite kontrol süreçlerinin tamamı HGM tarafından yapılmıştır. Görüntüler UTM projeksiyon sistemine göre koordinatlandırılmıştır. Her üç görüntüde de konum doğruluğu Karesel Ortalama Hata'ya (KOH) göre 10 m'dir. 1953 yılına ait görüntünün yer örneklem aralığı 1 m, 1966 ve 1972 yıllarına ait görüntüler 0.4 m'dir (Harita Genel Müdürlüğü (t.y.).

Görüntüler çalışma alanı sınırlarını içerecek şekilde CBS yazılımında kesildikten sonra GEE platformuna yüklenmiştir. Bu çalışmada sınıflandırma doğruluğunu artırmak ve tarihi otrofotoların yüzey karakteristiklerini daha ayrıntılı analiz etmek için GLCM yaklaşımı kullanılmıştır. GEE ortamında yer alan "glcmTexture" fonksiyonu kullanılarak özellikler elde edilmiştir. Bu kapsamda 5*5 pencere boyutu kullanılarak 16 adet GLCM doku özelliği üretilmiştir (Conners vd 1984; Haralick vd 2007) (Çizelge 1).

Çizelge 1. GLCM doku özellikleri

Özellik	Kısaltma	Formül	Referans
Angular Second Moment	asm	$\sum_i \sum_j P(i,j)^2$	Haralick vd., 2007
Contrast	contrast	$\sum_i \sum_j (i-j)^2 P(i,j)$	
Correlation	corr	$\frac{\sum_i \sum_j (i-\mu_x)(j-\mu_y) P(i,j)}{\sigma_x \sigma_y}$	
Variance	var	$\sum_i \sum_j (i-\mu)^2 P(i,j)$	
Inverse Difference Moment	idm	$\sum_i \sum_j \frac{P(i,j)}{1+(i-j)^2}$	
Sum Average	savg	$\sum_k k\, p_{x+y}(k)$	
Sum Variance	svar	$\sum_k (k-SAVG)^2 p_{x+y}(k)$	
Sum Entropy	sent	$-\sum_k p_{x+y}(k) \log p_{x+y}(k)$	
Entropy	ent	$-\sum_i \sum_j P(i,j) \log P(i,j)$	
Difference Variance	dvar	$Var\left(p_{\lvert x-y \rvert}\right)$	

Difference Entropy	dent	$-\sum_{k} p_{\lvert x-y\rvert}(k)\log p_{\lvert x-y\rvert}(k)$	Conners vd., 1984
IMCORR1	imcorr1	$\frac{HXY - HXY1}{max(HX, HY)}$	
IMCORR2	imcorr2	$\sqrt{1-\exp\left[-2(HXY2 - HXY)\right]}$	
Dissimilarity	diss	$\sum_{i}\sum_{j} \lvert i-j\rvert P(i,j)$	
Cluster Shade	shade	$\sum_{i}\sum_{j} (i+j-\mu_x-\mu_y)^3 P(i,j)$	
Cluster Prominence	prom	$\sum_{i}\sum_{j} (i+j-\mu_x-\mu_y)^4 P(i,j)$	

burada; P(i,j), Normalize edilmiş GLCM, N_g, gri seviye sayısı, $\mu_x$ve μ_y, sırasıyla satır ve sütun yönündeki ortalama değerleri; $\sigma_x$ve $\sigma_y$ise bu yönlere ait standart sapmaları ifade eder.

2.3 Rastgele Orman Algoritması

Çalışmada sınıflandırma aracı olarak RO algoritması kullanılmıştır (Breiman 2001). RO algoritması, birden fazla karar ağacını birleştirerek doğru sonucu bulmayı amaçlayan bir algoritmadır ve piksel tabanlı sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan denetimli bir yaklaşımdır. Ayrıca, RO sınıflandırıcılarının topluluk yapısı, gürültüye ve aşırı uyuma karşı daha iyi direnç sağlar; bu da diğer modellere kıyasla kapsamlı parametre ayarlaması ihtiyacını azaltır ve belirsizlik azaltma yöntemlerini mümkün kılar (Pal, 2005; Rodriguez-Galiano vd., 2012). Bu çalışmada, tarihi hava fotoğraflarını sınıflandırmak için GEE platformu kullanılmıştır. RO algoritmasının performansından ziyade GLCM özelliklerinin sınıflandırmaya etkisini görebilmek için algoritma parametreleri detaylı şekilde incelenmemiştir. Ağaç sayısı çalışmada 100 olarak seçilmiştir. Diğer parametreler, GEE platformunda yer alan "ee.Classifier.smileRandomForest" GEE sınıflandırıcısının varsayılan parametreleri olarak tercih edilmiştir. Sınıflandırmada, tarım arazisi, su (kalıcı su kütleleri) ve ağaç olmak üzere üç farklı sınıf dikkate alınmıştır. Sınıflar üç farklı tarihte de değişmeyen arazi örtülerinden seçilmiştir. Su sınıfından 806, ağaç sınıfından 720 ve tarım sınıfından 870 piksel seçilmiştir. Seçilen pikseller %70 eğitim ve %30 test olarak rastgele algoritma tarafından seçilmiştir. Sınıflandırma doğruluğu genel doğruluk ve kappa metriklerine göre incelenmiştir.

3. BULGULAR

Çalışma kapsamında 1953, 1966 ve 1972 yıllarına ait ortofotolar kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları hem görsel hem de genel doğruluk ve kappa metrikleri ile değerlendirilmiştir.

3.1 Görüntü ve Sınıflandırma Sonuçlarının Görsel Değerlendirilmesi

Tarihi ortofotolarının tek bantlı şekilde sınıflandırılmasında, görüntülerdeki ton farklılıklarının ve şeritlenmenin sınıflandırmayı doğrudan etkilediği görülmektedir (Şekil 2). 1953 tarihli ortofoto incelendiğinde oval yapıda gerçekleşen parlaklık değişimleri ve diğer tarihlerde doğu-batı eksenli şeritlenme sınıflandırma sonuçlarında benzer yapılarda görülmektedir. Bu sebeple sınıflandırılmış haritalarda sonuçlar arazi örtüsünden çok bu hatalar temelinde oluşmuştur. GLCM doku özellikleri ile birlikte yapılan sınıflandırma da özellikle yüzey pürüzlülüğü, homojenlik ve yönelimsellik gibi mekansal özellikler ortaya çıkarak sınıflar arasındaki ayırt edilebilirlik artmıştır (Şekil 2).

Sınıflandırılmış haritalar karşılaştırıldığında, yalnızca gri bant kullanılarak elde edilen sonuçların özellikle tarım ve ağaç sınıflarında parçalı ve gürültülü bir yapı sergilediği dikkat çekmektedir. Buna karşın, tüm bantların (GLCM özellikleri dahil) kullanıldığı durumda sınıfların mekânsal sürekliliği belirgin şekilde artmıştır. Seçili bantlar ile elde edilen sonuçlar ise hem gürültünün azaltılması hem de sınıf sınırlarının daha net tanımlanması açısından en dengeli sonucu sunmaktadır. Su sınıfı tüm senaryolarda yüksek doğrulukla belirlenirken, iyileşmenin tarım ve ağaç sınıflarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

3.2 Sınıflandırma Doğruluklarının Karşılaştırılması

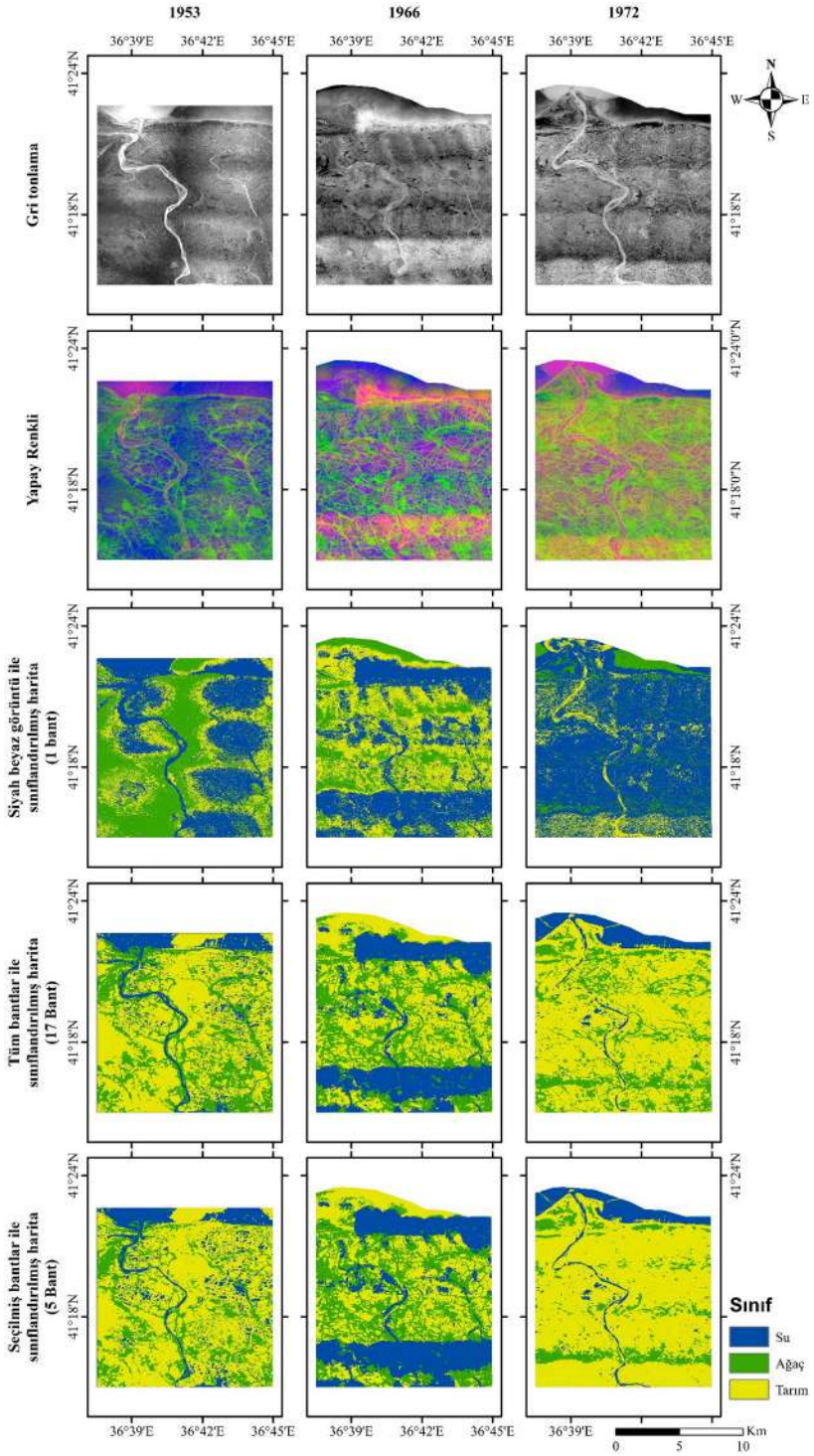
Genel doğruluk ve kappa katsayısı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, GLCM tabanlı doku özelliklerinin sınıflandırma performansına katkısı her üç tarih için de açık biçimde ortaya çıkmaktadır. 1953 yılına ait sonuçlar incelendiğinde, yalnızca gri bant kullanımı ile elde edilen genel doğruluk değerinin yaklaşık 0.66 olduğu, buna karşılık GLCM özelliklerinin eklenmesiyle (tüm bantlar) bu değerin yaklaşık 0.88'e yükseldiği görülmektedir. Seçili bantlar kullanıldığında ise doğruluk yaklaşık 0.90 seviyesine ulaşarak en yüksek değeri vermiştir. Benzer şekilde kappa

katsayısı gri bant için yaklaşık 0.49 iken, tüm bantların kullanımı ile 0.82'ye, seçili bantlar ile ise 0.85'e yükselmiştir. Bu durum, doku özelliklerinin özellikle sınıflar arası ayrımı belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir (Şekil 3).

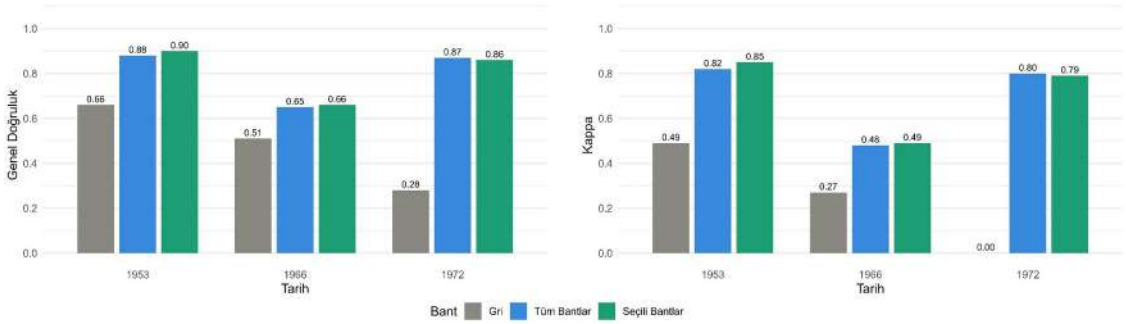
1966 yılı sonuçları da benzer bir eğilim sergilemektedir. Gri bant ile elde edilen genel doğruluk yaklaşık 0.51 düzeyinde kalırken, GLCM özelliklerinin dahil edilmesiyle bu değer yaklaşık 0.65–0.66 aralığına yükselmiştir. Kappa katsayısı da gri bant için yaklaşık 0.27 iken, tüm bantlar ve seçili bantlar için sırasıyla yaklaşık 0.48 ve 0.49 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, doğruluk artışının 1953 yılına kıyasla daha sınırlı olmakla birlikte, GLCM özelliklerinin yine de anlamlı bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Şekil 3).

1972 yılına ait sonuçlar ise GLCM özelliklerinin etkisinin en belirgin olduğu durumu göstermektedir. Gri bant kullanımı ile genel doğruluk oldukça düşük bir değer olan yaklaşık 0.28 olarak hesaplanırken, tüm bantların kullanımı ile bu değer yaklaşık 0.87'ye yükselmiştir. Seçili bantlar ile elde edilen doğruluk ise yaklaşık 0.86 olup benzer bir performans sergilemiştir. Kappa katsayısı açısından bakıldığında, gri bant için değerin yaklaşık 0.00 olduğu, yani sınıflandırmanın rastlantısal düzeye yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık GLCM özelliklerinin kullanımı ile kappa değerinin yaklaşık 0.79–0.80 seviyelerine yükseldiği belirlenmiştir (Şekil 3).

Genel olarak değerlendirildiğinde, her üç tarih için de GLCM tabanlı doku özelliklerinin sınıflandırma doğruluğunu belirgin biçimde artırdığı görülmektedir. Özellikle tek bantlı (pankromatik) tarihi görüntülerde spektral bilginin sınırlı olması nedeniyle, doku temelli metriklerin sınıflandırmaya önemli katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Ayrıca tüm bantların kullanımı ile elde edilen yüksek doğruluk değerlerinin, seçili bantlar ile de büyük ölçüde korunabilmesi, özellik seçiminin model karmaşıklığını artırmadan benzer performans düzeylerine ulaşmada etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.



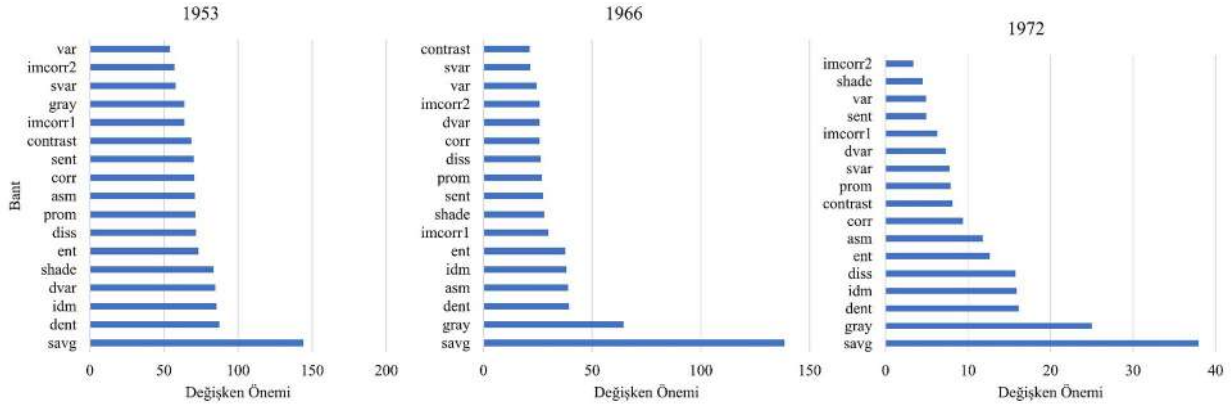
Şekil 2. Sınıflandırma sonuçları.



Şekil 3. Genel doğruluk ve Kappa değerlerini gösterir grafik.

3.3 Değişken Önem Analizi

Her üç tarih için de savg, dent ve idm doku elemanları büyük önem taşımaktadır. Savg değişkeni tüm görüntüler için en önemli değişken olmuştur. Tarihi ortofoto (gray) 1966 ve 1972 tarihlerinde ikinci önemli değişken olurken 1953'te düşük öneme sahiptir. Ayrıca ent ve diss değişkenleri de önemli değişkenler arasında yer almaktadır. Burada en az öneme sahip değişkenler svar, imcorr2 ve var doku elemanları olmuştur (Şekil 4). Genel olarak değerlendirildiğinde, GLCM tabanlı doku metriklerinin özellikle mekânsal yapı bilgisini temsil eden bileşenleri (homojenlik, varyans ve ortalama ilişkili metrikler) sınıflandırma performansını artırmada belirleyici olmuştur.



Şekil 4. Tarihi ortofoto (gray) ve GLCM doku özellikleri'nin RO modelindeki önemlerini göstermektedir. X ekseni, sınıflandırmada yer alan değişkenleri (bant) göstermektedir. Y ekseni değişkenlerin önemini göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, tarihi ortofotoların sınıflandırılmasında GLCM tabanlı doku özelliklerinin etkinliği test edilmiştir. Elde edilen bulgular, yalnızca gri bant kullanımı ile yapılan sınıflandırmaların yetersiz kaldığını, buna karşılık GLCM özelliklerinin eklenmesiyle hem genel doğruluk hem de kappa katsayısında belirgin iyileşmeler sağlandığını ortaya koymuştur. Bu iyileşme, özellikle spektral ayrımın zayıf olduğu tarım ve ağaç sınıflarında daha belirgin hale gelmiştir. Su sınıfı ise tüm senaryolarda yüksek doğrulukla belirlenmiştir.

Ayrıca, tüm GLCM bantlarının kullanımı ile elde edilen yüksek doğruluk değerlerinin, seçili bantlar ile de büyük ölçüde korunabildiği görülmüştür. Bu durum, gereksiz değişkenlerin elenmesiyle daha sade ve hesaplama açısından daha verimli modeller oluşturulabileceğini göstermektedir. Değişken önem analizleri, özellikle ortalama, varyans ve homojenlik temelli doku özelliklerinin sınıflandırmada belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, GLCM tabanlı doku özelliklerinin tarihi hava fotoğraflarının sınıflandırılmasında güçlü bir tamamlayıcı veri kaynağı olduğu ve RO algoritması ile birlikte kullanıldığında yüksek doğrulukta sonuçlar üretebildiği belirlenmiştir. Bu yaklaşım, benzer özelliklere sahip diğer arşiv görüntülerinin analizinde de etkin bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca, bu çalışmada odak noktası GLCM'nin etkisini incelemek olduğundan algoritma parametreleri varsayılan değerlerde tutulmuştur. Gelecek çalışmalarda RO algoritması için hiper-parametre ayarlaması (hyper-parameter tuning) yapılarak sınıflandırma başarısı daha da ileri taşınabilir. Buna ek olarak, model eğitiminde kullanılan piksel örneklemlerinin nispeten sınırlı boyutları göz önüne alındığında, gelecek araştırmalarda k-katlı çapraz doğrulama (k-fold cross-validation) gibi yöntemlerin kullanılması elde edilen doğruluk metriklerinin güvenilirliğinin artmasına katkı sağlayacaktır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: [FBA-2025-6704]. Tarihi hava fotoğrafını sağlayan Harita Genel Müdürlüğüne ve personeline teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR

Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine learning*, *45*(1), 5-32.

Conners, R. W., Trivedi, M. M., ve Harlow, C. A. 1984. Segmentation of a high-resolution urban scene using texture operators. *Computer vision, graphics, and image processing*, *25*(3), 273-310.

Dahle, F., Lindenbergh, R., ve Wouters, B. 2024**.** Revisiting the Past: A comparative study for semantic segmentation of historical images of Adelaide Island using U-nets. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 11, 100056. https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2023.100056

Google Earth Engine. (2025). *ee.Image.glcmTexture*. Google Developers.

Huber, N., Bürgi, M., Ginzler, C., Eben, B., Baltensweiler, A., ve Price, B. 2025. Historical habitat mapping from black-and-white aerial photography: A proof of concept for post World War II Switzerland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *138*, 104464. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104464

Haralick, R. M., Shanmugam, K., ve Dinstein, I. H. (2007). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, (6), 610-621. https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314

Harita Genel Müdürlüğü., (Tarih yok). Tarihi (Siyah-Beyaz) ortofoto. https://geoportal.harita.gov.tr/ [Erişim tarihi:22.04.2026]

Osgouei, E, P., Sertel, E., ve Kabadayı, M. E. 2022. Integrated usage of historical geospatial data and modern satellite images reveal long-term land use/cover changes in Bursa/Turkey, 1858–2020. *Scientific Reports*, *12*(1), 9077. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11396-1

Pal, M. 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. *International journal of remote sensing*, *26*(1), 217-222.

Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., ve Rigol-Sanchez, J. P. 2012. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, *67*, 93-104.

Soylu, M., Bakıcı, S., Erkek, B. ve Özmüş, L., 2014. Arşiv Hava Fotoğraflarından Ortofoto Üretimi. *5. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2014)*, İstanbul, Türkiye, syf: 1-6. https://www.kongresistemi.com/root/dosyalar/uzalcbs2014/274.pdf

SWISSTOPO,. 2019. SWISSIMAGE HIST 1946. geodata- news 42. https://www.swisstopo.admin.ch/en/orthoimage-swissimage-hist-1946 [20.04.2026]

Vogels, M. F., de Jong, S. M., Sterk, G., ve Addink, E. A. 2017. Agricultural cropland mapping using black-and-white aerial photography, object-based image analysis and random forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, *54*, 114-123. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.003

11. Bölge Müdürlüğü., (Tarih yok) Yeşilırmak Deltası Ulusal Öneme Haiz Sulak Alanı. https://bolge11.tarimorman.gov.tr/Menu/73/YesilirmakDeltasiUOHSA [Erişim tarihi:21.04.2026].

TERMAL ORTOMOZAİK ÜRETİMİNDE BÜTÜNLEŞİK VE BAĞIMSIZ VERİ İŞLEME STRATEJİLERİNİN GEOMETRİK DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ersin ONAY[1], Samed Furkan TALAS[1], İlyas AYDIN[1], Umut Güneş SEFERCİK[1]

1Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli e.onay2022@gtu.edu.tr
1Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli s.talas2022@gtu.edu.tr
1Arş.Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli ilyasaydin@gtu.edu.tr
1Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, sefercik@gtu.edu.tr

ÖZET

İnsansız Hava Araçlarına (İHA) entegre RGB sensörler, düşük maliyetli ve yüksek mekansal çözünürlüklü yapılarıyla fotogrametrik ortomozaik üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Son yıllarda, İHA ile haritalamada oldukça popüler bir diğer teknoloji ise termal sensör kullanımıdır. Özellikle, yüzey deformasyonlarının belirlenmesi, yapısal ısı değişimi izleme, arkeolojik nesne tespiti, milli savunma, tarım, ormancılık, çevre ve enerji uygulamaları gibi alanlarda termal İHA teknolojisi kullanımı yükselen bir ivme ile yaygınlaşmaktadır. Ancak, termal görüntülerde RGB'ye kıyasla birkaç kat düşük mekansal çözünürlük ve zayıf kontrast, ortomozaik üretimi için kritik olan ortak özellik noktalarının çıkarımını zorlaştırmakta, nihai ürünlerde veri boşluklarına veya bozulmalara yol açarak kaliteyi sınırlamaktadır. Ayrıca, termal verilerin tek başına sunduğu kısıtlı bilgi içeriği, bu görüntülerin RGB veya multispektral verilerle birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu noktada, yüksek kalitede nihai ürüne erişebilmek için optik ve termal sensörlerden elde edilen görüntülerin ortak kullanımında piksel düzeyinde konumsal uyuşumun sağlanması önemli bir problemdir. Bu çalışmada, RTK GNSS donanımlı İHA kullanımı ile elde edilen termal ve RGB görüntülerden yer kontrol noktası (YKN) destekli ve desteksiz şekillerde bağımsız ve bütünleşik sensör verisi olarak ayrı ayrı üretilen ortomozaikler arasındaki konumsal uyuşmazlıklar değerlendirilmiş ve farklı veri işleme stratejilerinin ürün doğruluğuna etkileri incelenmiştir. Fotogrametrik veri işlemede; RGB-RTK, RGB-RTK+YKN, Termal-RTK, Termal-RTK+YKN, Bütünleşik-1 (RGB+Termal-RTK+YKN) ve Bütünleşik-2 (RGB+Termal-RTK) olmak üzere altı farklı strateji uygulanmış ve çıktılar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sahasında, 15 m uçuş irtifasından elde edilen veriler ile üretilmiş ortomozaiklerin 2B ve 3B konum doğrulukları incelendiğinde, YKN'li çözümlerin yalın RTK'lı çözümlere göre hem RGB hem de termal ortomozaikler için 2B ve 3B konum doğruluklarında artış sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, bütünleşik çözümlerde RGB ve termal sensörlerin mutlak konumlamalarında tespit edilen yatay kayıklıklara (offset) bağlı olarak 2B ve 3B doğruluklarda düşüşler gözlemlenmiştir. Bütünleşik YKN'li çözümler hem RGB hem de termal görüntüler üzerinden ayrı ayrı YKN işaretlemeleri ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ayrı ayrı ortaya konmuştur. Sonuç olarak, termal ve RGB görüntülerin SfM (Structure from Motion) algoritmaları ile bütünleşik işlenmesinin, çerçeve genişlikleri farklarından kaynaklı bağlama noktası vb. problemler nedeniyle bağımsız işlemeye nazaran daha düşük geometrik konum doğruluğu sunduğu belirlenmiştir. Çalışmanın önerisi, yüksek geometrik doğruluk gerektiren uygulamalarda, termal ve RGB görüntülerin bağımsız olarak işlenmesi ve sonrasında yatay kayıklık ötelemelerinin (shift) yapılarak hizalanmasıdır.

Anahtar Sözcükler: İHA, RGB, Termal, Ortomozaik, Geometrik Doğruluk Analizi.

ABSTRACT

Effects of Integrated and Independent Data Processing Strategies on Geometric Accuracy in Thermal Orthomosaic

RGB sensors integrated into Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are widely preferred in photogrammetric orthomosaic production due to their low cost and high spatial resolution. In recent years, another technology that has become quite popular in UAV-based mapping is the use of thermal sensors. In particular, the use of thermal UAV technology is spreading with increasing momentum in fields such as surface deformation determination, structural heat change monitoring, archaeological object detection, national defense, agriculture, forestry, environmental and energy applications. However, the spatial resolution and poor contrast of thermal images, which are several times lower than RGB, make it difficult to extract common feature points, which are critical for orthomosaic production, and lead to data gaps or distortions in the final products, limiting quality. In addition, the limited information content offered by thermal data alone necessitates the evaluation of these images together with RGB or multispectral data. At this point, achieving pixel-level spatial agreement in the combined use of images obtained from optical and thermal sensors is a significant problem in order to achieve a high-quality final product. This study evaluates the positional discrepancies between orthomosaics produced separately as independent and integrated sensor data, with and without ground control point (GCP) support, from thermal and RGB images obtained using an RTK GNSS-equipped UAV. The effects of different data processing strategies on product accuracy were also investigated. Six different strategies were applied in photogrammetric data processing: RGB-RTK, RGB-RTK+GCP, Thermal-RTK, Thermal-RTK+GCP, Integrated-1 (RGB+Thermal-RTK+GCP), and Integrated-2 (RGB+Thermal-RTK) and the outputs were analyzed comparatively. When examining the 2D and 3D positional accuracies of orthomosaics produced from data obtained from a 15 m flight altitude in the study area, it was determined that GCP-supported solutions provided an increase in 2D and 3D positional accuracies for both RGB and thermal orthomosaics compared to RTK-only solutions. However, in integrated solutions, decreases in 2D and 3D accuracy were observed due to horizontal offsets detected in the absolute positioning of RGB and thermal sensors. Integrated GCP solutions were implemented with separate GCP labeling on both RGB and thermal images, and the results were presented separately. As a result, it was determined that integrated processing of thermal and RGB images with SfM (Structure from Motion) algorithms offers lower geometric positional accuracy

compared to independent processing due to problems such as coupling points arising from frame width differences. The study proposes that in applications requiring high geometric accuracy, thermal and RGB images should be processed independently and then aligned by performing horizontal offset adjustments.

Keywords: UAV, RGB, Thermal, Orthomosaic, Geometric Accuracy Analysis.

1. GİRİŞ

Termal algılayıcıların küçülmesi, hafiflemesi ve soğutmasız mikrobolometre teknolojisinin yaygınlaşmasıyla, 2010'lu yılların ortalarından itibaren İHA tabanlı yakın mesafeli termal uzaktan algılama uygulamalarında belirgin bir artış yaşanmıştır. İHA sistemleri, görünür bölge ve termal kızılötesi verilerin görece düşük maliyetle, kısa zaman aralıklarında ve yüksek mekânsal ayrıntıyla elde edilmesini sağlamaktadır. RGB görüntüler yüzeylerin biçim, doku ve renk özelliklerini temsil ederken, termal görüntüler yayılan kızılötesi enerjiyi kaydederek sıcaklık dağılımlarının değerlendirilmesine olanak vermektedir.

RGB ve termal verilerin tamamlayıcı niteliği; orman yangınlarının belirlenmesi, fotovoltaik sistemlerde sıcak nokta ve arıza tespiti ile yapılarda ısı kaybının incelenmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ghali ve Akhloufi (2024), görünür ve termal hava görüntülerinin birlikte kullanımının yangın ve dumanın gündüz ve gece koşullarında ayırt edilmesine katkı sağladığını göstermiştir. Choi ve Suh (2023), İHA tabanlı termal görüntülerle fotovoltaik modüllerde farklı arıza türlerini belirlemiş; Mayer vd. (2023) ise uçuş mesafesi ve görüntüleme açısının termal görüntü kalitesini etkilediğini ortaya koymuştur.

Bununla birlikte, termal görüntülerin düşük çözünürlüğü, sınırlı kontrastı ve homojen olmayan tepkisi, standart fotogrametrik iş akışlarında güvenilir eşlenik nokta çıkarımını zorlaştırabilmektedir. Yuan ve Hua (2022), sensör ısınma süresi ve vinyet etkisinin görüntü içi sıcaklık dağılımını değiştirebildiğini; Szostak vd. (2023) ise örtüşen termal görüntüler arasındaki tutarlılığın işlem sonrası kalibrasyonla iyileştirilebileceğini göstermiştir. Kalibrasyonda hedeflerin termal görüntüde ayırt edilebilirliği de önemlidir. Fryskowska-Skibniewska vd. (2022) farklı desen ve malzemelerin etkisini incelemiş, Roshan vd. (2024) ise kısmen görüntülenen ChArUco hedeflerinden yararlanılan bir yaklaşım önermiştir.

RGB ve termal kameraların aynı platformda bulunması, görüntülerin piksel düzeyinde doğrudan çakıştığı anlamına gelmemektedir. Sensör çözünürlüğü, odak uzaklığı, görüş alanı, lens distorsiyonu, kamera merkezleri arasındaki baz mesafesi ve eksen yönelimlerindeki farklılıklar, özellikle düşük uçuş yüksekliklerinde paralaks kaynaklı konumsal kaymalara yol açabilmektedir. Ferrari vd. (2024), DJI Mavic 3T görüntülerinde kamera dizilimi ve bağıl yöneltme etkilerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Güidi vd. (2025) ise ısıtılmış bir satranç tahtasıyla Mavic 3T sensörlerinin geometrik kalibrasyonunu gerçekleştirmiş ve farklı derinliklerde tek bir küresel dönüşümün paralaks etkisini tamamen gideremeyebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı, DJI Mavic 3T ile eş zamanlı elde edilen RGB ve termal görüntülerden üretilen ortomozaiklerin RTK, YKN ve bütünleşik çoklu kamera yaklaşımlarındaki geometrik doğruluğunu karşılaştırmak ve konumsal uyum açısından en uygun işlem stratejisini belirlemektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma, Gebze Teknik Üniversitesi Güney Kampüsü sınırları içerisinde yaklaşık 1600 m² büyüklüğündeki bir test alanında gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı, bitki örtüsüyle kaplı zemin ve çıplak toprak yüzey olmak üzere farklı doku, yansıtma ve ısıl özelliklere sahip iki belirgin yüzey tipini içermektedir. Bu yüzeylerin ortak bir sınır boyunca yer alması, RGB ve termal görüntülerden üretilen ürünler arasındaki konumsal farklılıkların karşılaştırılması açısından uygun bir test ortamı sağlamıştır.

Çalışma alanında toplam beş yer kontrol noktası (YKN) kullanılmıştır. YKN'ler, alanı geometrik olarak temsil edecek ve farklı yüzey tiplerini kapsayacak biçimde dağıtılmıştır. Noktaların hem RGB hem de termal görüntülerde ayırt edilebilir olmasına dikkat edilmiştir. YKN koordinatları, CHC i80 GNSS alıcısı kullanılarak belirlenmiştir. RTK veri alımı sırasında düzeltme verileri TUSAGA-Aktif (CORS-TR) sistemi üzerinden sağlanmıştır. Elde edilen koordinatlar, tüm fotogrametrik çözümlerde ortak referans verisi olarak kullanılmıştır.

Veri alımında RGB ve termal algılayıcılara sahip DJI Mavic 3T insansız hava aracı kullanılmıştır. RGB ve termal görüntüler, aynı uçuş sırasında bundle alım modunda eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Uçuş, yerden 15 m yükseklikte, kamera optik ekseni yüzeye dik olacak şekilde 90° kamera açısıyla gerçekleştirilmiştir. Uçuş planında %90 ön ve %80 yan bindirme oranları kullanılmıştır.

Fotogrametrik işlemler Agisoft Metashape yazılımında yürütülmüştür. RGB ve termal görüntüler öncelikle RTK ve YKN destekli bağımsız veri setleri olarak işlenmiş; ayrıca RGB ve termal görüntüler Multi-Camera System yapısında bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda RGB-RTK, RGB-YKN, Termal-YKN, Termal-RTK, Bütünleşik-RTK ve Bütünleşik-YKN olmak üzere toplam altı farklı çözüm oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Görüntü işleme aşamalarında sırasıyla görüntü hizalama, bağlama noktalarının oluşturulması, kamera iç yöneltme parametrelerinin optimizasyonu, derinlik haritası ve yoğun nokta

bulutu üretimi, sayısal yüzey modeli oluşturulması ve ortomozaik üretimi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çözümler arasında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla bütün veri setlerinde mümkün olduğunca aynı görüntü işleme parametreleri kullanılmıştır.

Konumsal doğruluk, YKN koordinatları ile ilgili fotogrametrik ürünlerden elde edilen koordinatlar arasındaki farklar kullanılarak hesaplanmıştır. Yatay bileşene ait karesel ortalama hata değeri,

$$RMSE_{2B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2]}{n}}$$

eşitliğiyle, üç boyutlu karesel ortalama hata değeri ise,

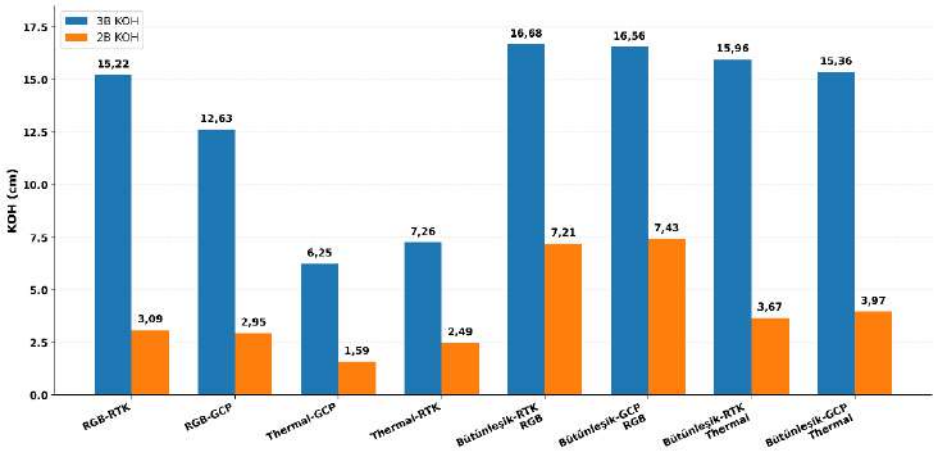
$$RMSE_{3B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2]}{n}}$$

eşitliğiyle hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan beş YKN'nin aynı zamanda fotogrametrik blokların yöneltilmesinde kullanılması nedeniyle hesaplanan değerler bağımsız dış doğruluğu doğrudan temsil etmemektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, fotogrametrik çözüm ile referans noktaları arasındaki uyum kapsamında değerlendirilmiştir. Altı farklı çözümden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak RTK, YKN ve Multi-Camera System yaklaşımlarının RGB ve termal ürünler arasındaki konumsal uyuma etkisi incelenmiştir.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

RTK ve YKN destekli sekiz farklı yaklaşım sonucunda elde edilen analiz sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Bağımsız işleme sonuçları incelendiğinde en düşük hata değerleri Termal-YKN çözümünde elde edilmiş; 2B KOH 1,59 cm, 3B KOH ise 6,25 cm olarak hesaplanmıştır. Termal-RTK çözümü de 2,49 cm 2B KOH ve 7,26 cm 3B KOH değerleriyle Termal-YKN sonucuna yakın bir doğruluk göstermiştir. RGB verilerinde ise YKN destekli çözüm, RTK çözümüne göre sınırlı bir iyileşme sağlamış; 2B KOH 3,09 cm'den 2,95 cm'ye, 3B KOH ise 15,22 cm'den 12,63 cm'ye düşmüştür. Termal-YKN çözümünde elde edilen hata değerlerinin RGB-YKN çözümüne göre daha düşük olması, doğrudan termal sensörün daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır. Ayrıca, yalnızca beş YKN ile gerçekleştirilen değerlendirme ve çalışma alanının sınırlı büyüklüğü bu sonucun genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle elde edilen düşük hata değerleri, kullanılan veri setine özgü bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. İşlem yaklaşımlarına ait 2B ve 3B KOH değerlerinin karşılaştırılması.

Bütünleşik Multi-Camera System yaklaşımında sonuçlar, koordinatların alındığı bant türüne göre değerlendirilmiştir. Bütünleşik-RTK-RGB ve Bütünleşik-YKN-RGB sonuçları birleştirilmiş görüntülerde RGB banttan; Bütünleşik-RTK-Termal ve Bütünleşik-YKN-Termal sonuçları ise termal banttan alınan koordinatlara göre elde edilmiştir. RGB bant üzerinden yapılan değerlendirmelerde hata değerleri daha yüksek çıkmış; Bütünleşik-RTK-RGB ve Bütünleşik-YKN-RGB çözümlerinde 2B KOH sırasıyla 7,21 cm ve 7,43 cm, 3B KOH ise 16,68 cm ve 16,56 cm olarak hesaplanmıştır. Termal bant üzerinden elde edilen bütünleşik sonuçlarda 2B KOH değerleri 3,67–3,97 cm aralığında kalırken, 3B KOH değerleri 15,36–15,96 cm aralığına yükselmiştir.

Bu sonuçlar, RTK ve YKN seçiminin etkisinin, bütünleşik/bağımsız işleme stratejisi ve koordinatların alındığı bant seçimine göre daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Ayrıca 3B KOH değerlerinin 2B KOH değerlerinden belirgin biçimde yüksek olması, düşey bileşenin toplam hataya önemli katkı sağladığını göstermektedir. 3B doğruluk

açısından elde edilen hata değerlerinin, özellikle düşey bileşendeki farklılıklar nedeniyle 2B değerlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma, 15 m gibi düşük bir uçuş yüksekliğinde eş zamanlı olarak elde edilen RGB ve termal görüntülerin bütünleşik işlenmesinin her durumda geometrik doğruluğu artırmadığını göstermiştir. Bağımsız çözümler arasında en başarılı sonuç, termal görüntülerin YKN destekli olarak işlenmesiyle elde edilmiş; bütünleşik Multi-Camera System yaklaşımında ise özellikle 2B ve 3B KOH değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. RTK ve YKN destekli çözümler arasındaki doğruluk farklarının, bağımsız ve bütünleşik işleme yaklaşımları arasındaki farklara kıyasla daha sınırlı kaldığı görülmüştür.

Bu bulgular doğrultusunda, yüksek geometrik doğruluk gerektiren uygulamalarda RGB ve termal görüntülerin ayrı fotogrametrik bloklar hâlinde dengelenmesi ve daha sonra ortak hedefler, kontrol noktaları veya uygun öteleme ve dönüşüm parametreleri kullanılarak hizalanması önerilmektedir. Böylece farklı sensör çözünürlükleri, görüş alanları ve kamera merkezleri arasındaki farklılıklardan kaynaklanan konumsal uyuşmazlıkların daha kontrollü biçimde giderilmesi mümkün olabilir.

Gelecek çalışmalarda, model yöneltmesinde kullanılan YKN'lerden bağımsız denetim noktalarının kullanılması, hata değerlerinin X, Y ve Z bileşenleri için ayrı ayrı raporlanması, her iki spektral bölgede belirgin olarak algılanabilen hedeflerin tasarlanması ve farklı uçuş yüksekliklerinde sensörler arası paralaks etkisinin araştırılması önerilmektedir. Ayrıca, kamera optimizasyonu uygulamaları ayrı bir değerlendirme başlığı olarak incelenmiş olup, elde edilen sonuçların gelecek çalışmalarda ayrıntılı biçimde ele alınması planlanmaktadır. Farklı arazi örtüleri, uçuş geometrileri ve bindirme oranları altında yapılacak tekrar deneyleri, elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve genellenebilirliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

Choi, K., & Suh, J. (2023). Fault detection and power loss assessment for rooftop photovoltaics installed in a university campus, by use of UAV-based infrared thermography. *Energies, 16*(11), 4513. https://doi.org/10.3390/en16114513

Ferrari, E., Meyer, J., Koch, A., & Nebiker, S. (2024). Automatic generation of high-resolution thermal 3D building envelope models exploiting UAV imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W8-2024*, 155–161. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-155-2024

Fryskowska-Skibniewska, A., Delis, P., Kędzierski, M., & Matusiak, D. (2022). The conception of test fields for fast geometric calibration of the FLIR VUE PRO thermal camera for low-cost UAV applications. *Sensors, 22*(7), 2468. https://doi.org/10.3390/s22072468

Ghali, R., & Akhloufi, M. A. (2024). Deep learning approach for wildland fire recognition using RGB and thermal infrared aerial image. *Fire, 7*(10), 343. https://doi.org/10.3390/fire7100343

Güidi, N. E., di Filippo, A., & Barba, S. (2025). High-resolution 3D thermal mapping: From dual-sensor calibration to thermally enriched point clouds. *Applied Sciences, 15*(19), 10491. https://doi.org/10.3390/app151910491

Mayer, Z., Epperlein, A., Vollmer, E., Volk, R., & Schultmann, F. (2023). Investigating the quality of UAV-based images for the thermographic analysis of buildings. *Remote Sensing, 15*(2), 301. https://doi.org/10.3390/rs15020301

Roshan, M. C., Isaksson, M., & Pranata, A. (2024). A geometric calibration method for thermal cameras using a ChArUco board. *Infrared Physics & Technology, 138*, 105219. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105219

Szostak, R., Zimnoch, M., Wachniew, P., & Jasek-Kamińska, A. (2023). Self-calibration of UAV thermal imagery using gradient descent algorithm. *Drones, 7*(11), 683. https://doi.org/10.3390/drones7110683

Yuan, W., & Hua, W. (2022). A case study of vignetting nonuniformity in UAV-based uncooled thermal cameras. *Drones, 6*(12), 394. https://doi.org/10.3390/drones6120394

YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ORTOFOTOLARDAN ÇATI SEGMENTASYONUNDA RESNET ENCODER KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALIZI

Sibel CANAZ SEVGEN

Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Üniversitesi, Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Bölümü, 06100, Beşevler, Ankara, ssevgen@ankara.edu.tr

ÖZET

Yüksek çözünürlüklü ortofotolardan güvenilir çatı segmentasyonu; kentsel gözlem, kadastro güncelleme, bina envanteri üretimi, afet değerlendirmesi, dijital ikiz oluşturma ve güneş enerjisi potansiyeli analizleri gibi birçok coğrafi uygulama için önemli bir ön koşuldur. Çok yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinin yaygınlaşması, kentsel nesnelerin otomatik çıkarımı için önemli fırsatlar sunarken; çatıların geometrik karmaşıklığı, çatılar ile çevre yüzeyler arasındaki spektral benzerlikler, bitki örtüsü ve gölge etkileri segmentasyon işlemini zorlaştırmaktadır. Geleneksel görüntü işleme yöntemlerinin elle tasarlanmış özniteliklere ve kural tabanlı yaklaşımlara dayanması, farklı kentsel alanlara genellenebilirliklerini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle derin öğrenme tabanlı anlamsal segmentasyon yöntemleri güçlü alternatifler olarak öne çıkmıştır. Bu yöntemler içerisinde U-Net, kodlayıcı-çözücü yapısı ve atlama bağlantıları sayesinde ince mekânsal detayları koruyarak yüksek seviyeli anlamsal özellikleri öğrenebilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonu amacıyla U-Net mimarisine entegre edilen farklı ResNet tabanlı kodlayıcıların performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, kodlayıcı derinliğinin segmentasyon başarısı üzerindeki etkisini aynı eğitim ve test koşulları altında değerlendirmektir. Bu kapsamda ResNet18, ResNet34, ResNet50 ve ResNet101 kodlayıcıları kullanılmıştır. Çalışmada Ankara'daki bir kentsel alana ait yaklaşık 25 cm GSD değerine sahip RGB ortofotolar kullanılmıştır. Ortofotolar karo tabanlı bir iş akışı ile işlenmiş ve toplam 20 karo, 16 eğitim ve 4 bağımsız test verisi olarak ayrılmıştır. Çatı referans maskeleri CBS tabanlı manuel sayısallaştırma ile oluşturulmuştur. Modeller Precision, Recall, F1-Skoru, IoU ve Dice Katsayısı ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tüm kodlayıcıların yüksek segmentasyon başarısı sağladığını, ancak performansların mimariye bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. En başarılı model ResNet50 tabanlı U-Net olmuş ve Precision 0.9570, Recall 0.9696, F1-Skoru 0.9583, IoU 0.9199 ve Dice 0.958 değerlerine ulaşmıştır. Bulgular, ResNet50'nin yerel mekânsal detaylar ile üst düzey anlamsal özellikler arasında etkili bir denge sağladığını göstermektedir. Çalışma, kodlayıcı seçiminin yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinden çatı çıkarımındaki önemini ortaya koymakta ve kentsel uzaktan algılama uygulamalarına katkı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Çatı Segmentasyonu, U-Net; Derin Öğrenme, Yüksek Çözünürlüklü Ortofoto

COMPARATIVE EVALUATION OF RESNET ENCODER BACKBONES FOR ROOF SEGMENTATION FROM HIGH-RESOLUTION ORTHOPHOTOS

ABSTRACT

High-resolution roof segmentation is an important prerequisite for various geospatial applications, including urban monitoring, cadastral updating, building inventory generation, disaster assessment, digital twin development, and solar energy potential analysis. The increasing availability of very high-resolution aerial imagery has created new opportunities for automatic urban object extraction. However, geometric complexity, spectral similarities between roofs and surrounding surfaces, vegetation-induced occlusions, and shadows remain significant challenges. Traditional image processing methods often rely on handcrafted features and rule-based approaches, limiting their generalization across diverse urban environments. Consequently, deep learning-based semantic segmentation methods have emerged as effective alternatives. Among these, U-Net is widely adopted due to its encoder–decoder structure and skip connections, which facilitate the preservation of fine spatial details while learning high-level semantic features. Nevertheless, the influence of encoder architecture on roof segmentation performance remains an important research issue. This study presents a comparative analysis of ResNet-based encoders integrated into the U-Net architecture for roof segmentation from high-resolution orthophotos. The primary objective was to investigate the effect of encoder depth on segmentation performance under identical training and testing conditions. ResNet18, ResNet34, ResNet50, and ResNet101 were evaluated using RGB orthophotos acquired from an urban area in Ankara, Türkiye, with an approximate ground sampling distance of 25 cm. A tile-based workflow was implemented, and roof reference masks were manually generated through GIS-based digitization. A total of 20 orthophoto tiles were prepared, with 16 used for training and four independent tiles for testing. All models were trained using the same dataset, preprocessing procedures, training parameters, and evaluation protocol. Performance was assessed using Precision, Recall, F1-Score, Intersection over Union (IoU), and Dice Coefficient. All encoder configurations achieved high segmentation performance, although measurable differences were observed. The U-Net model with the ResNet50 encoder achieved the best overall results, with Precision of 0.9570, Recall of 0.9696, F1-Score of 0.9583, IoU of 0.9199, and Dice Coefficient of 0.958. These results indicate that ResNet50 provides an effective balance between local

spatial detail preservation and high-level feature representation. The findings highlight the importance of encoder selection in U-Net-based roof extraction and provide practical insights for deep learning applications in urban remote sensing..

Keywords: Roof Segmentation; U-Net; ResNet Encoders; High-Resolution Orthophotos

1. GİRİŞ

Yüksek çözünürlüklü ortofotolardan doğru çatı çıkarımı; uzaktan algılama, fotogrametri ve kentsel jeoinformatik alanlarında önemli bir araştırma konusu olup kadastro güncelleme, kentsel gelişim izleme, bina envanteri üretimi, afet değerlendirmesi, dijital ikiz oluşturma, güneş enerjisi potansiyeli analizi ve CBS tabanlı planlama gibi birçok uygulamanın temelini oluşturmaktadır. Çok yüksek çözünürlüklü hava görüntülerinin yaygınlaşması, kentsel nesnelerin otomatik olarak çıkarılması için önemli fırsatlar sunmuştur. Bununla birlikte, çatı yapılarının geometrik karmaşıklığı, çatılar ile yollar veya çıplak zemin gibi çevresel yüzeyler arasındaki spektral benzerlikler, gölge ve bitki örtüsü kaynaklı örtülmeler ile farklı çatı malzemeleri ve renkleri segmentasyon işlemini zorlaştırmaktadır. Bu sorunlar özellikle yoğun ve düzensiz kentsel alanlarda gürültülü tahminlere, eksik maskelere ve zayıf sınır belirlemeye neden olabilmektedir.

Bina ve çatı çıkarımı üzerine ilk çalışmalar çoğunlukla geometrik analiz, kenar belirleme, görüntü bölütleme ve olasılıksal modellere dayanmaktadır. Lin ve Nevatia (1998), tek hava görüntülerinden bina tespiti ve üç boyutlu çatı hipotezlerinin oluşturulmasına yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Stassopoulou vd. (2000), bina tanımlama için çoklu segmentasyon ve bağlamsal bilgileri birleştiren Bayesçi bir yaklaşım önermiştir. Elaksher vd. (2003), bina tel-kafeslerinin yeniden oluşturulmasını ele alırken, Ahmadi vd. (2010) bina sınırlarının çıkarımı için bölge tabanlı aktif kontur modelini kullanmıştır. Merabet vd. (2015) ise çatı çıkarımı için işbirlikçi watershed segmentasyon yaklaşımı geliştirmiştir. Ok (2009), ortofotolardan bina ayak izlerinin çıkarılmasında renk ve morfoloji tabanlı bir yöntem sunarken, Dornaika vd. (2016) segmentasyon ve matris kovaryans özniteliklerini kullanan denetimli bina tespitini araştırmıştır. Bu yöntemler önemli katkılar sağlamış olmakla birlikte, elle tasarlanmış özniteliklere dayanmaları ve karmaşık kentsel ortamlardaki yüksek sınıf içi değişkenlik nedeniyle genellenebilirlik açısından sınırlılıklar taşımaktadır.

Derin öğrenmenin gelişmesiyle birlikte, görüntülerden hiyerarşik mekânsal ve anlamsal özniteliklerin doğrudan öğrenilebilmesi bina ve çatı çıkarımı çalışmalarında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Özellikle U-Net, kodlayıcı-çözücü yapısı ve atlama bağlantıları sayesinde hem yüksek seviyeli anlamsal özelliklerin öğrenilmesini hem de ince mekânsal detayların korunmasını sağlayarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Arikan Ispir ve Yildiz (2025), yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden bina çıkarımında U-Net mimarisinin yüksek segmentasyon doğruluğu sağlayabildiğini göstermiştir. Aghayari vd. (2023), U-Net ve Inception ResNet U-Net mimarilerinin bina sınırlarının korunmasındaki etkinliğini ortaya koyarken, Gyekye (2024) yoğun ve düzensiz yerleşimlerde Residual U-Net'in standart U-Net'e göre daha başarılı sonuçlar verebildiğini bildirmiştir. Döş ve Uysal (2019) ise yüksek çözünürlüklü ortofotolardan kentsel nesnelerin çıkarımında SegNet tabanlı derin öğrenme yaklaşımının uygulanabilirliğini göstermiştir.

Farklı derin öğrenme mimarilerinin karşılaştırılması da çatı ve bina segmentasyonu literatüründe önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Cai vd. (2021), çatı tespitinde U-Net, FCN ve DeepLabV3+ mimarilerini karşılaştırarak hem mimari seçiminin hem de eğitim verisi miktarının performans üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Murtiyoso vd. (2021), cephe segmentasyonu için ResNet-18 omurgalı DeepLabv3+ kullanarak anlamsal segmentasyonun üç boyutlu nokta bulutları ve yapıların modellenmesi gibi daha geniş uygulamalara aktarılabileceğini ortaya koymuştur. Li vd. (2024), İHA kaynaklı ortofotolardan çatı alt bileşenlerinin tanımlanmasında PointRend ve DeepLabV3 modellerinden yararlanırken, Kucharczyk vd. (2025) fırtına sonrası çatı hasarlarının belirlenmesinde Mask2Former yaklaşımını kullanmıştır. Bu çalışmalar, çatı segmentasyonunun yalnızca bina ayak izlerinin çıkarılmasıyla sınırlı kalmayıp yapısal özellik, hasar ve diğer ayrıntılı kentsel analizlere doğru genişlediğini göstermektedir.

Bunun yanında, bazı araştırmalar çatıların yalnızca alan olarak segmentasyonuna değil, geometrik yapısının ve topolojisinin belirlenmesine odaklanmıştır. Kolibarov vd. (2022), LoD2+ şehir modellerinin oluşturulmasını desteklemek amacıyla çatı mahya ve saçak çizgilerinin çıkarımını gerçekleştirmiştir. Krapf vd. (2022), baca ve çatı penceresi gibi çatı üstyapılarını çıkararak anlamsal üç boyutlu şehir modellerinin zenginleştirilmesini ele almıştır. Van den Broeck ve Goedemé (2022), ultra yüksek çözünürlüklü görüntülerden bireysel çatı parçalarının sürekli poligon haritalarının oluşturulmasını araştırmıştır. Faltermeier vd. (2023) ise mevcut anlamsal üç boyutlu şehir modellerinden yararlanarak otomatik anotasyon üretmiş ve çatı segmentasyonu çalışmalarındaki eğitim verisi eksikliğine yönelik bir yaklaşım sunmuştur.

Segmentasyon performansının önemli bir diğer boyutu ise sınırların ve geometrik yapıların doğru biçimde korunmasıdır. Yüksek piksel doğruluğuna sahip modeller dahi çatı kenarlarını, köşelerini ve düzenli geometrik yapılarını tam olarak koruyamayabilmektedir. Bu durum özellikle segmentasyon çıktılarının raster formatından CBS'de kullanılabilecek vektör poligonlarına dönüştürülmesi sırasında önem kazanmaktadır. Jung vd. (2021), bina

ayak izlerinin sınır keskinliğini artırmaya yönelik bir sınır iyileştirme yaklaşımı önerirken, He ve Jiang (2021) bina morfolojisinin daha iyi korunması için sınır öğrenme mekanizması geliştirmiştir. Zorzi ve Fraundorfer (2019) ise bina sınırlarını daha kartografik ve düzenli şekillere dönüştürmek amacıyla düzenlileştirilmiş FCN yaklaşımını kullanmıştır. Bu çalışmalar, segmentasyon başarısının yalnızca IoU, F1-score veya Dice gibi piksel tabanlı ölçütlerle değerlendirilmesinin yeterli olmayabileceğini ve geometrik doğruluğun ayrıca incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Mevcut literatür önemli ilerlemeler sağlamış olsa da bazı araştırma boşlukları bulunmaktadır. Çalışmaların büyük bölümü piksel tabanlı segmentasyon doğruluğuna odaklanırken, elde edilen çatı poligonlarının geometrik güvenilirliği ve CBS uygulamalarındaki kullanılabilirliği daha sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca çok yüksek çözünürlüklü ortofotolarda yaygın olarak kullanılan karo tabanlı iş akışlarında karo sınırı etkileri, birleşmiş çatı yapıları ve rasterdan vektöre dönüşüm kaynaklı geometrik bozulmalar yeterince incelenmemiştir. Bununla birlikte, farklı encoder mimarilerinin karşılaştırılmasını sınır doğruluğu ve CBS tabanlı poligon iyileştirme ile aynı çerçevede ele alan çalışmaların sayısı da sınırlıdır.

Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonu için U-Net mimarisi içerisinde ResNet18, ResNet34, ResNet50 ve ResNet101 encoder'larının karşılaştırıldığı ve geometrik doğruluğun ayrıca değerlendirildiği bir çerçeve önerilmektedir. Aynı deneysel koşullar altında modeller Precision, Recall, F1-score, IoU ve Dice ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Böylece çalışmada yalnızca en başarılı encoder'ın belirlenmesi değil, yüksek piksel tabanlı segmentasyon doğruluğunun geometrik olarak güvenilir ve CBS'de kullanılabilir çatı poligonları üretip üretmediğinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Çalışmanın temel katkısı, encoder seçimini sınır kalitesi, raster-vektör dönüşümü ve nesne düzeyindeki geometrik güvenilirlik ile birlikte ele alan bütünleşik bir değerlendirme yaklaşımı sunmasıdır.

2. VERİ TANIMI

Çalışma alanı, heterojen kentsel yapısı ve farklı çatı tiplerini içermesi nedeniyle Ankara, Türkiye'deki Sincan ilçesinden seçilmiştir. Alan; yoğun konut bölgeleri ile daha seyrek yapılaşmış kesimleri bir arada barındırmakta ve yaklaşık 25 cm mekânsal çözünürlüğe sahip, Harita Genel Müdürlüğü tarafından üretilen yüksek çözünürlüklü ortofotolardan oluşmaktadır (General Directorate of Mapping, 2022). Çatıların boyut, geometri, yönelim ve malzeme bakımından çeşitlilik göstermesi ile gölge ve bitki örtüsü etkileri, alanı derin öğrenme tabanlı çatı segmentasyon modellerinin değerlendirilmesi için uygun bir test ortamı hâline getirmektedir. Modellerin genellenebilirliğini değerlendirmek amacıyla çalışma alanı eğitim ve test bölgelerine ayrılmıştır. Eğitim alanı yaklaşık 3.98 km², test alanı ise 0.98 km² büyüklüğündedir.

Ortofotolar anlamsal segmentasyon için daha küçük görüntü karolarına ayrılmıştır. Eğitim veri seti, 16 karo ve 3,498 binadan, test veri seti ise 4 karo ve 955 binadan oluşturulmuştur. Her görüntü karosu, karşılık gelen çatı maskesi ile eşleştirilerek denetimli model eğitimi ve bağımsız değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanındaki düzensiz kentsel yapılaşma, çatı ve çevre yüzeyler arasındaki spektral benzerlikler, belirsiz çatı sınırları ve gölge kaynaklı aydınlanma farklılıkları, segmentasyon modellerinin gerçekçi ve zorlu koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonu için sınır duyarlı bir derin öğrenme iş akışı önerilmiştir. Önerilen yöntem; (i) ortofoto görüntülerinin hazırlanması, (ii) referans verilerin manuel olarak oluşturulması, (iii) karo tabanlı veri setinin oluşturulması, (iv) U-Net mimarileri ile anlamsal segmentasyonun gerçekleştirilmesi, (v) encoder seviyesinde performans karşılaştırması, (vi) raster çıktılarının vektör poligonlara dönüştürülmesi ve CBS tabanlı geometrik iyileştirme ve (vii) CBS'de kullanıma hazır çatı poligonlarının üretilmesi olmak üzere yedi temel aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada, yüksek çözünürlüklü ortofotolar hazırlanarak mekânsal olarak bağımsız eğitim ve test bölgelerine ayrılmıştır. Daha sonra çatı alanları manuel olarak sayısallaştırılmış ve ikili referans maskeleri oluşturulmuştur. Görüntü ve bunlara karşılık gelen maskeler, model eğitimini daha verimli gerçekleştirmek amacıyla daha küçük görüntü karolarına bölünmüştür. Oluşturulan karolar kullanılarak farklı encoder omurgalarına sahip U-Net modelleri eğitilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır.

Anlamsal segmentasyon sonrasında modeller tarafından üretilen çatı maskeleri vektör poligonlara dönüştürülmüş ve CBS tabanlı geometrik işlemlerle iyileştirilmiştir. Bu aşamada poligonların düzenliliğinin artırılması, küçük ve anlamsız parçaların giderilmesi ve birleşmiş çatı yapılarının azaltılması amaçlanmıştır. Son aşamada ise tahmin edilen ve referans çatı sınırları arasındaki geometrik uyuma bakılmıştır. Böylece çalışma kapsamında yalnızca piksel tabanlı

segmentasyon başarısı değil, elde edilen çatı sınırlarının geometrik doğruluğu ve CBS uygulamalarında kullanılabilirliği de birlikte değerlendirilmiştir.

3.1 Referans Verilerinin Oluşturulması

Doğru ve güvenilir ground truth verileri, denetimli anlamsal segmentasyon için temel öneme sahiptir. Bu çalışmada, yüksek geometrik doğruluk ve güvenilir sınır gösterimi sağlamak amacıyla çatı maskeleri ArcGIS kullanılarak manuel olarak oluşturulmuştur. Anotasyon sürecinde, ortofotolar üzerinde görülebilen çatı alanları vektör poligonlar olarak sayısallaştırılmış ve daha sonra raster tabanlı ikili maskelere dönüştürülmüştür. Bu maskelerde çatı pikselleri 1, diğer tüm pikseller ise 0 değeri ile etiketlenmiştir. Böylece problem ikili anlamsal segmentasyon problemi olarak tanımlanmıştır.

ArcGIS kullanılarak gerçekleştirilen manuel anotasyon; çatı sınırlarının hassas biçimde belirlenmesi, karmaşık çatı geometrilerinin kontrol edilebilmesi, gölge ve çevresel nesnelerden kaynaklanan belirsizliklerin azaltılması ve derin öğrenme eğitimi için yüksek kaliteli referans verilerin oluşturulması açısından avantaj sağlamıştır.

3.2. Derin Öğrenme Tabanlı Çatı Segmentasyonu ve Değerlendirme

Yüksek çözünürlüklü ortofotoların işlenmesinde bellek kullanımını azaltmak ve modelin yerel mekânsal özellikleri daha etkin öğrenmesini sağlamak amacıyla karo (tile) tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Veri seti 20 ana karo bölgesine ayrılmış, her karo RGB görüntüsü ve buna karşılık gelen ikili çatı maskesi ile eşleştirilmiştir. Görüntüler [0,1] aralığında normalize edilmiş, maskeler ise tek kanallı ikili raster olarak hazırlanmıştır.

Çatı segmentasyonu için U-Net mimarisi (Ronneberger vd. 2015) kullanılmıştır. U-Net'in kodlayıcı-çözücü yapısı yüksek seviyeli anlamsal özelliklerin çıkarılmasını sağlarken, atlama bağlantıları ince mekânsal detayların ve çatı sınırlarının korunmasına katkıda bulunmaktadır. Encoder'ın segmentasyon performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla U-Net içerisinde ResNet18, ResNet34, ResNet50 ve ResNet101 omurgaları kullanılmıştır. ResNet mimarilerindeki artık öğrenme yapısı, derin ağların daha kararlı biçimde eğitilmesine ve daha güçlü özniteliklerin öğrenilmesine olanak sağlamaktadır. Farklı encoder derinlikleri sayesinde sığ ve derin özniteliklerin korunması, bağlamsal bilgi ve hesaplama karmaşıklığı arasındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. Tüm encoder'lar ImageNet üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklarla başlatılmıştır.

Modeller *Python, PyTorch ve segmentation_models_pytorch kütüphaneleri kullanılarak geliştirilmiştir. U-Net modeli RGB görüntüler için 3 giriş kanalı ve çatı/çatı dışı sınıfları için 1 çıkış kanalı olacak şekilde yapılandırılmıştır. Model tarafından üretilen tek kanallı çıktı, sigmoid fonksiyonu ile çatı olasılık haritasına dönüştürülmüştür. Elde edilen olasılık haritalarının ikili maskelere dönüştürülmesinde 0.4, 0.5 ve 0.6 eşik değerleri değerlendirilmiştir. Düşük eşik değerlerinin daha fazla çatı alanı yakalaması ancak yanlış pozitifleri artırabilmesi, yüksek eşik değerlerinin ise daha temiz sonuçlar üretirken küçük veya düşük kontrastlı çatıların kaçırılmasına neden olabilmesi dikkate alınmıştır. En dengeli sonuç veren eşik değeri sonraki poligonlaştırma ve CBS işlemlerinde kullanılmıştır.

Model performansı Precision, Recall, F1-Score, IoU ve Dice Coefficient ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu ölçütlerin hesaplanmasında doğru pozitif (TP), yanlış pozitif (FP), yanlış negatif (FN) ve doğru negatif (TN) piksel sınıfları kullanılmıştır. Precision, tahmin edilen çatı piksellerinin ne kadarının gerçekten çatı olduğunu; Recall ise gerçek çatı piksellerinin ne kadarının doğru şekilde tespit edildiğini göstermektedir. F1-Score, Precision ve Recall'un harmonik ortalamasını ifade ederken, IoU ve Dice segmentasyon ile referans maske arasındaki örtüşme düzeyini değerlendirmektedir.

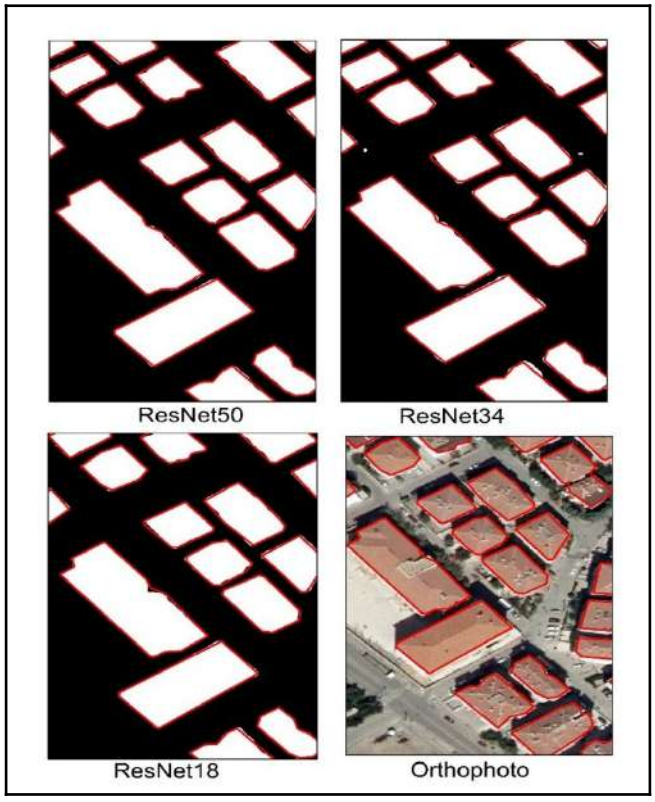
4. SONUÇLAR

İlk olarak, U-Net mimarisine entegre edilen ResNet18, ResNet34, ResNet50 ve ResNet101 encoder'larının performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Farklı ResNet encoder'larına sahip U-Net modellerinin performans karşılaştırması

Model	Precision	Recall	F1-score	IoU	Dice
U-Net + ResNet18	0.9523	0.9571	0.9547	0.9133	0.955
U-Net + ResNet34	0.9494	0.9612	0.9552	0.9143	0.955
U-Net + ResNet50	0.9570	0.9696	0.9583	0.9199	0.958
U-Net + ResNet101	0.8759	0.9653	0.9184	0.8491	0.918

Sonuçlar, encoder seçiminin segmentasyon performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. ResNet50, Precision (0.9570), Recall (0.9696), F1-score (0.9583), IoU (0.9199) ve Dice (0.958) değerleriyle en başarılı model olmuştur. Bu sonuç, ResNet50'nin çatıların yerel detaylarını koruma ve üst düzey anlamsal özellikleri öğrenme arasında uygun bir denge sağladığını göstermektedir. Şekil 1'de ResNet18, ResNet34 ve ResNet50 modellerine ait segmentasyon sonuçlarının yakın gösterimleri sunulmuştur.



Şekil 1. Elde edilen sonuçların göserimi

ResNet18 ve ResNet34 de yüksek ve birbirine yakın performans göstermiştir. ResNet34'ün Recall değeri (0.9612) ResNet18'den (0.9571) biraz yüksekken, ResNet18 daha yüksek Precision (0.9523) elde etmiştir. Bu durum, daha hafif encoder'ların da çatı segmentasyonunda etkili olabileceğini ve özellikle hesaplama maliyetinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilebileceğini göstermektedir.

Buna karşılık, ResNet101 diğer modellerden belirgin biçimde düşük performans göstermiştir. Recall değeri 0.9653 ile yüksek kalmasına rağmen Precision'ın 0.8759'a düşmesi, daha fazla yanlış pozitif üretildiğini ve modelin aşırı segmentasyona eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır. F1-score (0.9184) ve IoU (0.8491) değerlerindeki düşüş de bu durumu desteklemektedir. Bu bulgu, encoder derinliğinin artırılmasının her zaman daha iyi sonuç vermediğini; sınırlı veri koşullarında gereksiz model karmaşıklığı ve bu bulgu, encoder derinliğinin artırılmasının her zaman daha iyi sonuç vermediğini ve mevcut veri koşullarında daha yüksek model karmaşıklığının genelleme performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla mevcut veri setinde orta düzey derinliğe sahip ResNet50, hem anlamsal özelliklerin öğrenilmesi hem de çatı sınırlarının ayırt edilmesi açısından daha uygun bir yapı sunmuştur.

En başarılı modelin belirlenmesinin ardından, U-Net + ResNet50 için eşik değerine duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Model çıktıları 0.4, 0.5 ve 0.6 eşik değerleri kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı eşik değerlerine göre performans karşılaştırması

Threshold	Precision	Recall	F1-score	IoU	Dice
0.4	0.9512	0.9653	0.9582	0.9197	0.958
0.5	0.9570	0.9696	0.9583	0.9199	0.958
0.6	0.9622	0.9533	0.9577	0.9189	0.958

Eşik analizi, 0.4–0.6 aralığında model performansının genel olarak kararlı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, eşik değerinin değiştirilmesi Precision ve Recall arasında farklı dengeler oluşturmuştur. 0.4 eşik değerinde Recall 0.9653 ile yüksek olurken Precision 0.9512'de kalmış ve daha fazla yanlış pozitif oluşmuştur. 0.6 eşik değerinde ise en yüksek Precision (0.9622) elde edilmiş, ancak Recall 0.9533'e düşmüştür. Bu durum, yüksek eşik değerlerinin daha temiz sonuçlar üretirken bazı gerçek çatı alanlarının gözden kaçmasına neden olabileceğini göstermektedir. 0.5 eşik değeri, en dengeli sonuçları sağlamıştır. Bu değer ile F1-score (0.9583) ve IoU (0.9199) en yüksek seviyeye ulaşmış, aynı zamanda en yüksek Recall (0.9696) elde edilmiştir.

Genel olarak sonuçlar, U-Net + ResNet50 ve 0.5 eşik değerinin çalışma alanı için en uygun yapılandırma olduğunu göstermektedir. ResNet18 ve ResNet34 rekabetçi sonuçlar sunarken, ResNet101'in belirgin performans kaybı daha derin encoder kullanımının her zaman avantaj sağlamadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, yüksek piksel tabanlı doğruluğun tek başına yeterli olmadığı; çatı sınırlarının ve geometrik yapının da değerlendirilmesi gerektiği görülmüştür. Bu nedenle sonraki aşamada, segmentasyon çıktılarının geometrik doğruluğu ve CBS'de kullanılabilirliği ayrıca incelenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, çok yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonu için derin öğrenme tabanlı ve sınır duyarlı bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Bulgular, karo tabanlı derin öğrenme yaklaşımının yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonu için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, encoder seçiminin segmentasyon performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Değerlendirilen encoder'lar arasında U-Net + ResNet50 modeli en yüksek genel performansı sağlayarak yerel çatı detaylarının korunması ile bağlamsal özelliklerin öğrenilmesi arasında en uygun dengeyi sunmuştur. Buna karşılık, encoder derinliğinin artırılmasının her zaman segmentasyon doğruluğunu yükseltmediği ve çok yüksek çözünürlüklü ortofotolarda genelleme performansını olumsuz etkileyebileceği görülmüştür.

Eşik değerlerine yönelik analizlerde 0.4–0.6 aralığında sonuçların genel olarak kararlı olduğu belirlenmiştir. 0.5 eşik değeri, Precision, Recall ve örtüşme tabanlı ölçütler arasında en dengeli sonucu vermiş ve sonraki analizler için uygun değer olarak seçilmiştir. Karo tabanlı işleme yaklaşımı ise büyük boyutlu ortofotoların daha düşük hesaplama maliyetiyle işlenmesine ve modelin hem yerel çatı özelliklerini hem de çevresel bağlamı öğrenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca ArcGIS kullanılarak oluşturulan manuel referans maskeleri, çatı sınırlarının doğru biçimde öğrenilmesine katkı sağlamış ve özellikle sonuçların CBS tabanlı vektör verilere dönüştürülmesi açısından güvenilir bir referans oluşturmuştur.

Bununla birlikte, çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak yalnızca RGB ortofotoların kullanılması, spektral belirsizliğin yüksek olduğu alanlarda performansı sınırlayabilir. DSM veya LiDAR gibi ek veri kaynaklarının kullanılması segmentasyon başarısını artırabilir. İkinci olarak, eğitimde yalnızca Binary Cross Entropy kayıp fonksiyonu kullanılmıştır; Dice Loss veya hibrit kayıp fonksiyonlarının gelecekte denenmesi performans artışı sağlayabilir. Son olarak, deneylerin tek bir coğrafi bölgede gerçekleştirilmesi modelin farklı kentsel alanlardaki genellenebilirliğinin ayrıca test edilmesini gerektirmektedir.

Gelecek çalışmalarda çoklu veri füzyonu, sınır duyarlı öğrenme stratejileri ve gelişmiş kayıp fonksiyonlarının yanı sıra morfolojik filtreleme ve poligon düzenlileştirme gibi son işlem yöntemlerinin kullanılması planlanmaktadır. Ayrıca farklı kentsel alanlarda gerçekleştirilecek bağımsız testlerle modelin genellenebilirliği araştırılabilir.

Sonuç olarak, U-Net + ResNet50 modeli yüksek çözünürlüklü ortofotolardan çatı segmentasyonunda yüksek doğruluk sağlamış ve mevcut veri koşullarında en başarılı encoder olarak belirlenmiştir. Çalışmanın temel katkısı, yalnızca piksel düzeyindeki segmentasyon performansını değil, aynı zamanda çatı sınırlarının geometrik doğruluğunu ve CBS'de kullanılabilirliğini birlikte değerlendirmesidir. Önceki çalışmaların önemli bir bölümü IoU, F1-score ve Dice gibi doğruluk ölçütlerine odaklanırken, bu çalışma anlamsal segmentasyon, sınır duyarlı geometrik değerlendirme ve CBS tabanlı poligon iyileştirmeyi bütünleşik bir çerçevede ele almaktadır. Bulgular, yüksek piksel doğruluğunun tek

başına GIS-ready çatı poligonlarının pratik kullanılabilirliğini garanti etmediğini ve bu nedenle geometrik değerlendirmelerin çatı çıkarım iş akışlarına dâhil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen çatı segmentasyonu yaklaşımının farklı coğrafi, morfolojik ve mimari özelliklere sahip kentsel alanlarda test edilerek genellenebilirliğinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, farklı sensörlerden elde edilen RGB ortofoto, DSM, LiDAR ve multispektral verilerin çoklu veri füzyonu yaklaşımıyla birlikte kullanılması ve özellikle çatı yüzeyleri ile çevresindeki nesneler arasındaki spektral ve geometrik belirsizliklerin azaltılması planlanmaktadır. Bunun yanı sıra, Dice Loss, Focal Loss ve sınır duyarlı hibrit kayıp fonksiyonlarının U-Net tabanlı mimarilerle birlikte değerlendirilmesi ve çatı sınırlarının daha hassas biçimde öğrenilmesi amaçlanmaktadır. Model performansının yalnızca piksel tabanlı metriklerle değil, sınır doğruluğu, Hausdorff mesafesi, Average Symmetric Surface Distance (ASSD), alan ve çevre farkları ile poligon geometrisinin doğruluğu gibi nesne ve sınır tabanlı ölçütlerle değerlendirilmesi de gelecekteki çalışmaların önemli bir bileşeni olacaktır. Ayrıca, segmentasyon çıktılarının otomatik olarak düzenlenmesi amacıyla morfolojik işlemler, sınır düzeltme, poligon sadeleştirme ve geometrik düzenlileştirme yöntemlerinin derin öğrenme modeliyle bütünleştirilmesi planlanmaktadır. Böylece, yalnızca yüksek piksel doğruluğu sağlayan değil, aynı zamanda doğrudan CBS, kentsel modelleme ve 3B şehir modelleme uygulamalarında kullanılabilecek geometrik olarak güvenilir ve GIS-ready çatı poligonlarının üretilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Aghayari, S., Hadavand, A., Mohamadnezhad Niazi, S. ve Omidalizarandi, M., 2023. Building detection from aerial imagery using inception resnet unet and unet architectures. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 10: 9-17.

Ahmadi, S., Zoej, M.V., Ebadi, H., Moghaddam, H.A. ve Mohammadzadeh, A., 2010. Automatic urban building boundary extraction from high resolution aerial images using an innovative model of active contours. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12(3): 150-157.

Arikan Ispir, D. ve Yildiz, F., 2025. Using deep learning algorithms for built-up area extraction from high-resolution GÖKTÜRK-1 satellite imagery. Earth Science Informatics, 18(1): 21.

Cai, Y., He, H., Yang, K., Fatholahi, S.N., Ma, L., Xu, L. ve Li, J., 2021. A comparative study of deep learning approaches to rooftop detection in aerial images. Canadian Journal of Remote Sensing, 47(3): 413-431.

Dornaika, F., Moujahid, A., El Merabet, Y. ve Ruichek, Y., 2016. Building detection from orthophotos using a machine learning approach: An empirical study on image segmentation and descriptors. Expert Systems with Applications, 58: 130-142.

Döş, M.E. ve Uysal, M., 2019. Uzaktan algılama verilerinin derin öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılması. Turkish Journal of Remote Sensing, 1(1): 28-34.

Elaksher, A.F., Bethel, J.S. ve Mikhail, E.M., 2003. Roof boundary extraction using multiple images. The Photogrammetric Record, 18(101): 27-40.

Faltermeier, F.L., Krapf, S., Willenborg, B. ve Kolbe, T.H., 2023. Improving semantic segmentation of roof segments using large-scale datasets derived from 3D city models and high-resolution aerial imagery. Remote Sensing, 15(7): 1931.

Gyekye, J., 2024. Extraction of building roof outlines from remote sensing imagery using deep learning. University of Mines and Technology.

He, S. ve Jiang, W., 2021. Boundary-assisted learning for building extraction from optical remote sensing imagery. Remote Sensing, 13(4): 760.

Jung, H., Choi, H.-S. ve Kang, M., 2021. Boundary enhancement semantic segmentation for building extraction from remote sensed image. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60: 1-12.

Kolibarov, N., Wästberg, D., Naserentin, V., Petrova-Antonova, D., Ilieva, S. ve Logg, A., 2022. Roof segmentation towards digital twin generation in LoD2+ using deep learning. IFAC-PapersOnLine, 55(11): 173-178.

Krapf, S., Willenborg, B., Knoll, K., Bruhse, M. ve Kolbe, T.H., 2022. Deep learning for semantic 3D city model extension: Modeling roof superstructures using aerial images for solar potential analysis. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 10: 161-168.

Kucharczyk, M., Nesbit, P.R. ve Hugenholtz, C.H., 2025. Automated mapping of post-storm roof damage using deep learning and aerial imagery: A case study in the Caribbean. Remote Sensing, 17(20): 3456.

Li, J., Tao, B., Bosché, F., Lu, C.X. ve Wilson, L., 2024. Extracting roof sub-components from orthophotos using deep-learning-based semantic segmentation. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. **[Cilt/sayı/sayfa bilgisi eksik.]**

Lin, C. ve Nevatia, R., 1998. Building detection and description from a single intensity image. Computer Vision and Image Understanding, 72(2): 101-121.

Merabet, Y.E., Meurie, C., Ruichek, Y., Sbihi, A. ve Touahni, R., 2015. Building roof segmentation from aerial images using a line-and region-based watershed segmentation technique. Sensors, 15(2): 3172-3203.

Murtiyoso, A., Lhenry, C., Landes, T., Grussenmeyer, P. ve Alby, E., 2021. Semantic segmentation for building façade 3D point cloud from 2D orthophoto images using transfer learning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. **[Cilt/sayı/sayfa bilgisi eksik.]**

Ok, A., 2009. Automated description of 2-D building boundaries from a single color aerial ortho-image. Proceedings of ISPRS, High Resolution Earth Imagery for Geospatial Information, 1417-1420.

Ronneberger, O., Fischer, P. ve Brox, T., 2015. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 234-241.

Stassopoulou, A., Caelli, T. ve Ramirez, R., 2000. Automatic extraction of building statistics from digital orthophotos. International Journal of Geographical Information Science, 14(8): 795-814.

Van den Broeck, W.A. ve Goedemé, T., 2022. Combining deep semantic edge and object segmentation for large-scale roof-part polygon extraction from ultrahigh-resolution aerial imagery. Remote Sensing, 14(19): 4722.

Zorzi, S. ve Fraundorfer, F., 2019. Regularization of building boundaries in satellite images using adversarial and regularized losses. IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1858-1861.

MOBİL LİDAR NOKTA BULUTLARININ DENETİMSİZ ALAN ADAPTASYONU İLE SINIFLANDIRILMASI

Eray SEVGEN[1],

[1]TPAO Genel Müdürlüğü, Söğütözü Mah. Nizami Gencevi Cad. No: 10 06530, Çankaya, Ankara, eraysevgen@gmail.com

ÖZET

Derin öğrenme yöntemleri 3B nokta bulutlarının sınıflandırılmasında son yıllarda elde ettiği başarılı sonuçlar ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, derin öğrenme yöntemlerinin etkin sonuçlar vermesi büyük miktarda etiketli eğitim verisine bağlıdır. Ancak 3B nokta bulutlarının karmaşık yapısı ve nokta düzeyinde etiketleme işleminin zaman alıcı ve maliyetli olması, özellikle yeni veri setleri için yeterli miktarda veri oluşturulmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle mevcut etiketli veri setlerinden öğrenilen bilginin yeni ve etiketsiz veri setlerine aktarılması önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu tür bilgi aktarımındaki en temel güçlüklerden biri, kaynak ve hedef veri dağılımları arasıdaki dağılım farkıdır. Özellikle farklı sensörler, platformlar ve veri toplama koşulları ile elde edilen 3B nokta bulutları arasında geometrik yapı, nokta yoğunluğu ve verilerin dağılımı açısından farklar bulunmaktadır. Alan kayması olarak tanımlanan bu durum, kaynak veri üzerinde eğitilen bir derin öğrenme modelinin hedef veri üzerindeki genelleme başarısını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Denetimsiz alan uyarlaması, etiketli bir kaynak alanda öğrenilen bilginin, etiket bilgisi bulunmayan hedef alana aktarılmasını amaçlamaktadır. Böylece, hem alan kaymasının etkilerini azaltılarak derin öğrenme modelinin genelleme kapasitesi artacak hem de hedef alanda yeni etiketli veri oluşturuma gereksinimini sınırlanmış olacaktır. Bu çalışmada, etiketsiz mobil LiDAR nokta bulutları, etiketli hava LiDAR nokta bulutlarından öğrenilen bilgi kullanılarak sınıflandırılması ve iki veri alanı arasındaki bilgi aktarımının denetimsiz alan adaptasyonu ile incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, alan adaptasyonu sonrasında doğruluk yaklaşık 2 puan artmış, kesişim birleşim oranında ise yaklaşık 6 puanlık lık bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, performanstaki iyileşmenin daha çok nokta sayıları yüksek baskın sınıflarda gerçekleştiği, az sayısa örneğe ait azınlık sınıflarında ise bir gelişme sağlanmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar, hava LiDAR verilerinden öğrenilen bilginin mobil LiDAR verilerine aktarılmasında denetimsiz alan uyarlamasının uygulanabilirliğine işaret etmekte ve farklı sensör ve platformlardan elde edilen 3B nokta bulutları arasındaki alan farklılıklarının giderilmesine yönelik gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Alan adaptasyonu, Anlamsal bölütleme, Sınıflandırma, Derin öğrenme, Mobil LiDAR, Nokta bulutu.

ABSTRACT

UNSUPERVISED DOMAIN ADAPTATION FOR MOBILE LIDAR POINT CLOUD CLASSIFICATION

Deep learning methods have attracted considerable attention in recent years due to their successful results in the classification of 3D point clouds. However, the effective performance of deep learning methods depends heavily on large amounts of labeled training data. The complex structure of 3D point clouds and the time-consuming and costly nature of point-level annotation make it difficult to generate sufficient labeled data, particularly for new datasets. Therefore, transferring knowledge learned from existing labeled datasets to new unlabeled datasets has become an important research topic. One of the fundamental challenges in such knowledge transfer is the difference between the source and target data distributions. In particular, 3D point clouds acquired using different sensors, platforms, and data collection conditions may exhibit differences in geometric structure, point density, and overall data distribution. This phenomenon, referred to as domain shift, can significantly reduce the generalization performance of a deep learning model trained on the source domain when applied to the target domain. Unsupervised domain adaptation aims to transfer knowledge learned from a labeled source domain to an unlabeled target domain. In this way, it aims both to reduce the effects of domain shift and to improve the generalization capability of deep learning models while limiting the need to generate new labeled data in the target domain. In this study, the classification of unlabeled mobile LiDAR point clouds using knowledge learned from labeled airborne LiDAR point clouds was investigated through unsupervised domain adaptation According to the results, the overall accuracy increased by approximately 2 percentage points, while the mean Intersection over Union (mIoU) increased by approximately 6 percentage point after domain adaptation,. However, the performance improvement was mainly observed in the dominant classes with a high number of points, whereas no substantial improvement was achieved for the minority classes with relatively few samples. These results indicate the applicability of unsupervised domain adaptation for transferring knowledge learned from airborne LiDAR data to mobile LiDAR data and provide a basis for future studies aimed at addressing domain differences between 3D point clouds acquired from different sensors and platforms.

Keywords: Domain adaptation, Semantic segmentation, Classification, Deep learing, Mobile LiDAR, Point Cloud.

1. GİRİŞ

Üç boyutlu (3B) nokta bulutlarının sınıflandırılması, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri, akıllı şehirler, kent modelleme, otonom sürüş gibi bir çok farklı uygulama alanında temel işlemden biridir. Farklı sensör ve platformdan (yersel, hava veya mobil) elden edilen 3B nokta bulutları, sınıflandırma işleminde her bir noktaya daha önceden belirlenmiş bir sınıf veya etiket atanması ile anlamlı hale gelir. Son yıllarda yapılan çalışmalar genellikle makina öğrenme yöntemlerine dayanmaktadır (Duran vd., 2021; Atik vd., 2015). Klasik bir makine öğrenme işleminde (Weinmann vd., 2015) öncelikle, 3B nokta bulutundaki her bir nokta için, belli bir komşuluk tanımlaması izlenerek ayırıcı öznitelikler çıkartılır (Hackel vd., 2016; Thomas vd.,2018); ardından herhangi bir makina öğrenme yöntemi ile (Sevgen ve Abdikan, 2023a; Sevgen ve Abdikan, 2023b) nokta bulutu her bir noktaya bir sınıf olacak şekilde sınıflandırılır. Burada komşuluk ilişkisine dayanan öznitelik vektörü kullanıcı tarafından belirlenir; tek komşuluk ve tek seviye ile sınıflandırma yapılabildiği gibi, çoklu komşuluk ve seviye ile noktalar arasındaki ilişkiler daha net olarak çıkarılabilmekte ve makine öğrenme algoritması sonuçlarını iyileştirmektedir (Blomley vd., 2016; Niemeyer vd., 2014). Makine öğrenme yöntemlerinden yapay sinir ağları ailesine ait derin öğrenme yönteminde ise noktalar arasındaki ilişkinin, görüntü temelli evrişimsel derin öğrenme modellerinde olduğu gibi, aşamalı olarak öğrenilmesi beklenir. Literatürde, düzensiz nokta bulutlarının işlenmesine yönelik önemli bir başlangıç Pointnet (Qi vd., 2017a) yapısı ile gerçekleştirilmiş ve düzensiz nokta bulutları simetrik bir fonksiyon ile sıralama bağımsız bir şekilde işlenebilmiştir. Pointnet++ (Qi vd., 2017b) modeli bir önceki Pointnet yapısını genişletmiş ve yerel komşuluklar kullanılarak aşamalı olarak geometrik ilişkilerin öğrenilmesini sağlamıştır. Bunların ardından KpConv (Thomas vd., 2019) ve PointTransformer (Engel vd., 2021) gibi farklı geometrik işlem mekanizmalarını kullanan mimariler geliştirilmiştir.

Her ne kadar derin öğrenme yöntemleri 3B nokta bulutu sınıflandırmada önemli sonuçlar elde etseler ve önemli bir etki yaratsalar da derin öğrenme yöntemleri eğitim ve test veri setleri arasındaki dağılımın özelliklerinden bağımsız değildir. Belirli bir alan, zaman aralığı, sensör veya platformdan elde edilen veri tipinde eğitilen bir model, farklı koşullarda elde edilen veriler ile test edildiğinde performans kaybı yaşabilmektedir. Özellikle 3B nokta bulutlarındaki sensör tipi, platform, tarama geometrisi, nokta yoğunluğu ve veri toplama koşullarındaki farklılıklar, veri setleri arasındaki belirgin dağılım farklılıklarının oluşmasına neden olabilmektedir. Farklı verilerin arasındaki bu dağılım farklılığı alan kayması olarak tanımlanmaktadır.

Bu durum, 3B nokta bulutu sıflandırmasında önemli bir sorunu ortaya çıkarmaktadır. Bir veri alanında yeterli performans gösteren bir modelin, yeni bir veri alanında aynı başarıyı gösterebilmesi için o alana özgü etiketli veriye ihtiyaç duyabilmektedir. Oysa 3B nokta bulutlarının doğası gereği karmaşık, düzensiz ve büyük ölçekli olduğu göz önüne alındığında etiketleme maliyeti hem zaman hem de ekonomik açıdan klasik yöntemlere göre çok daha fazladır. Bunun için alternatif yöntemler kullanılarak etiketli verilerle eğitilen modellerin tamamen etiketsiz verilere uyarlanmasını sağlayan ve farklı veri tipleri arasındaki dağılımı birbirine yaklaştıran transfer öğrenme yaklaşımlarından biri alan adaptasyonu öne çıkmaktadır. Denetimsiz alan adaptasyonunda etiketli kaynak veri ile etiketsiz hedef veri arasındaki dağılım farklılığının azaltılması ve kaynak alanda öğrenilen bilginin hedef alana aktarılması amaçlanmaktadır. Böylece hedef alan için yeni etiketli veri oluşturma gereksiniminin azaltılması ve farklı veri toplama koşullarından kaynaklanan alan kaymasının etkilerinin sınırlandırılması hedeflenmektedir.

3B nokta bulutları değerlendirildiğinde, farklı sensör tipleri (hava, mobil, yersel), tarama yapılandırmaları, görüş geometrileri ve nokta yoğunluklar kaynak ve hedef verileri arasında bir alan kayması yaratmaktadır. Bu nedenle, 3B nokta bulutları için alan adaptasyonu için aktif araştırma alanlarından biridir. Önceki çalışmalar alan adaptasyonun farklı yönlerine odaklanmıştır. Qin vd. (2019) 3B nesne setlerinin sınıflandırılması için bir yaklaşım geliştirmiş; Wu vd. (2019) sentetik verilerini, Luo vd. (2020) , Shen vd. (2023), Peng vd. (2022) mobil LiDAR verilerini ve Xie vd. (2021) hava LiDAR verilerini kaynak alarak denetimsiz alan adaptasyonu çalışmışlardır.

Bu çalışmada, farklı sensör ve platformlardan elde edilen 3B nokta bulutuları arasındaki adaptasyon sınıflarını incelemek amacıyla, etiketli hava LiDAR veri setinden öğrenilen bilginin etiketsiz mobil LiDAR veri setine aktarılması denetimsiz alan adaptasyonu kapsamında ele alınmıştır. Bir sonraki bölümde veri setleri ve özellikleri verilmiştir. Sonraki bölümde, tasarlanan derin öğrenme yaklaşımı tanıtılacaktır. Son bölümde sonuçlar verilerek, diğer çalışmalarla karşılaştırması yapılacaktır.

2. VERİ SETLERİ

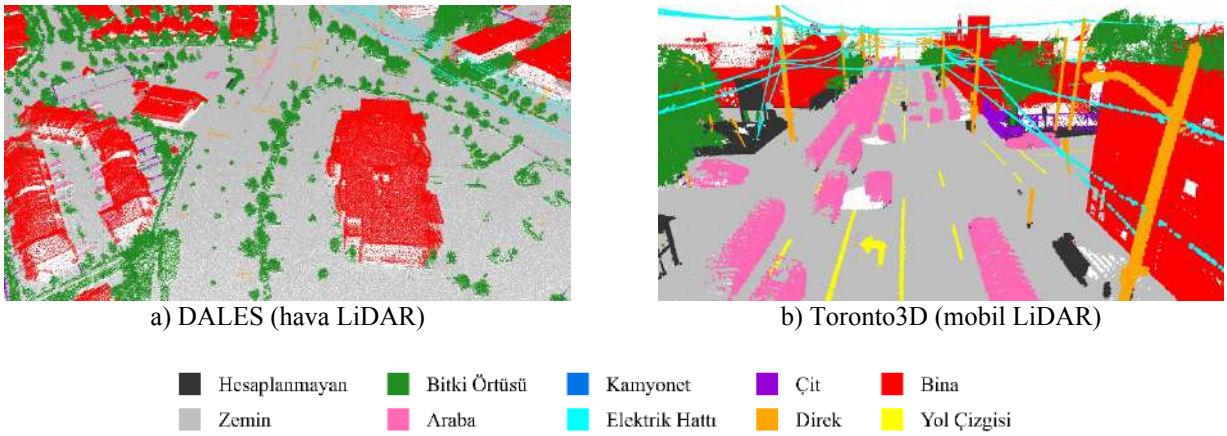
Bu çalışmada kaynak veri seti olarak DALES (Dayton Annotated LiDAR Earth Scan) (Varney vd., 2020) hava LiDAR verileri ve hedef veri seti için de Toronto3D (Tan vd., 2020) mobil LiDAR verisi kullanılmıştır. İki veri seti de internet üzerinden dağıtılan, araştırmacıların kullanımına açık verilerdir.

DALES hava LiDAR veri seti Britanya Kolumbiyası, Kanada'da toplanmış, ortalama nokta sıklığı 50 nokta/m2 olarak toplamda sekiz sınıf olarak paylaşılmıştır. Toronto3D mobil LiDAR veri seti ise Toronto, Ontorio, Kanada'da yaklaşık 1km'lik bir yol boyunca toplanmış, ortalama nokta sıklığı 1000 nokta/m2 ve toplamda sekiz sınıf olarak internette araştırmacılar ile paylaşılmıştır. Çizelge 1'de verildiği üzere iki veri seti de farklı sensör, nokta sıklığı ve bölgelerde toplanmışlardır.

Çizelge 1. DALES ve Toronto3D veri setlerinin genel özellikleri.

	DALES	**Toronto3D**
Nokta Sayısı	550 milyon	78.3 milyon
Nokta Yoğunluğu	50 nokta/m2	1000 nokta/m2
Sınıf Sayısı	8	8
Sensör	Riegl Q1560	Teledyne Optech Maverick
Konum	Surrey, Britanya Kolumbiyası, Kanada	Toronto, Ontario, Kanada

İki veri seti alan adaptasyonu açısından bir çok noktadan birbirinden farklıdır. Sekil 1'de gösterildiği gibi iki veri seti aynı sınıftaki objeleri geometrik olarak farklı olarak ifade etmektedir. DALES veri setinde nesneler tepeden, Toronto3D veri setinde ise yerden gösterildiği için nesneler farklı açılardan toplanan noktalara sahiptir. DALES veri setinde binalara ait noktalar genelde çatılardan oluşup bina dış yüzeyleri seyrek noktalarla gösterilirken, mobile LiDAR verilerinde binalar dış yüzeyleri ile ifade edilmektedir. Bunların yanında nokta yoğunluğu, sensör farkları, çalışma bölgesi gibi farklar da iki veri seti arasındaki dağılımda alan kayıklığı yaratmaktadır.



a) DALES (hava LiDAR) b) Toronto3D (mobil LiDAR)

Şekil 1. Farklı sensör tiplerinden elde edilen nokta bulutlarındaki bakış açısı ve farkları. (a) Havadan tarama yapan DALES verisinde bakış açısından dolayı üst yüzeyler sık nokta bulutu ile ifade edilirken, (b) mobil tarama yapan Toronto3D verisinde ise yan yüzeyler belirgin olarak gösterilmektedir.

Diğer taraftan alan adaptasyonu için iki verinin de ortak özniteliklere sahip olması gerekir. DALES veri setinde noktalara ait konum bilgilerinin yanında lazer dönüş sırası (return number) ve toplam dönüş bilgileri (number of returns) mevcutken, Toronto3D verisinde konum bilgileri ile birlikte yoğunluk ve renk bilgileri de verilmiştir. İki verinin ortak özniteliği olan xyz konum bilgileri denetimsiz alan adaptasyonu modelinin eğitimi için kullanılmıştır.

Diğer taraftan, her iki veri setinde de toplamda sekiz sınıf olsa da (Çizelge 2) bunlardan ortak olanlar alan adaptasyonu çalışmasında kullanılmıştır. Her iki veri setinin kesişimi olan yedi sınıf (Zemin, Bitki Örtüsü, Bina, Elektrik Hattı, Direk, Araba ve Çitler) bu çalışmadaki analize dahil edilmiştir. DALES veri setindeki Kamyonet sınıfı çalışmaya

Çizelge 2. DALES, Toronto3D ve alan adaptasyonunda kullanılan ortak sınıflar.

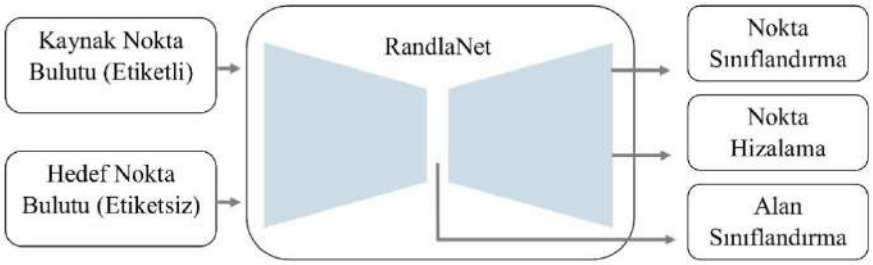
DALES	Toronto3D	Ortak sınıflar
Zemin	Yol	Zemin
-	Yol çizgisi	Zemin
Bitki örtüsü	Bitki örtüsü	Bitki örtüsü
Bina	Bina	Bina
Elektrik hattı	Elektrik hattı	Elektrik hattı
Direk	Direk	Direk
Araba	Araba	Araba
Çit	Çit	Çit
Kamyonet	-	-

dahil edilmezken, Toronto3D veri setindeki Yol ve Yol Çizgisi sınıfları Zemin olarak ifade edilmiştir. Sınıfların veri setleri içerisindeki dağılımları dikkat alındığında uzamsal 3B nokta bulutlarının doğası gereği iki veri seti ve dolaylı olarak ortak sınıflarda sınıf dengesizliği mevcuttur; Zemin ve Bitki örtüsü sınıfları milyonlarca nokta ile veri setlerini domine ederken, Direk, Araba ve Çitler sınıfları binler ile ifade edilen noktalar ile gösterilmektedir.

3. YÖNTEM

Denetimsiz alan adaptasyonunu kaynak ve hedef nokta bulutları arasındaki dağılım farklarını ortak bir öznitelik uzayında hizalayarak, etiketsiz hedef nokta bulutu için nokta bazlı sınıf tahmini yapmayı amaçlamaktadır (Şekil 2).

Mimarinin öznitelik çıkarıcı temel omurgası olarak, düşük bellek kullanımı ve yüksek işlem hızı sebebiyle klasik gizyazar– gizçözer (encoder-decoder) yapısındaki RandlaNet (Hu vd., 2020) modeli tercih edilmiştir. Bu model, 3B nokta bulutu derin öğrenme modeli ailelerinden nokta tabanlı gruba ait olup, Pointnet++ mimarisinin ana hatlarını takip etmektedir. Nokta tabanlı derin öğrenme modelleri, gizyazar aşamasında nokta bulutu verilerini alt-örnekleme ile genel özniteliklere indirgergen, gizçözer aşamasında atlama bağlantıları (skip-connections) ve yukarı-örnekleme işlemleriyle yüksek çözünürlüklü öznitelikler üretilmektedir.



Şekil 2. Alan adaptasyonu mimarisi. Birinci seviyedeile genel özellikler hizalanırken, ikinci seviyede kaynak prototipleri ile anlamsal nokta aktarımı sağlanmaktadır. Nokta sınıflandırma derin öğrenme yöntemlerinde bulunan klasik sınıflandırıcıdır.

Özellik çıkarımının ardından ağ, üç görev modülüne ayrılmaktadır:

- **Nokta Sınıflandırma**: Gizçözerden elde edilen nokta bazlı öznitelikler standart bir yapay sinir ağına aktarılarak her bir nokta için sınıf olasılıkları hesaplanır. Bu aşamada yalnızca etiketli kaynak nokta bulutu kullanılarak standart Çarpraz Entropi kaybı optimize edilir.
- **Alan Hizalama**: Sensör bakış açısı ve nokta yoğunluğundan kaynaklanan genel geometrik kaymayı gidermek amacıyla, gizyazar modülünün sonunda elde edilen öznitelikler kullanılır. Gradyan Tersine Çevirme Katmanı ve alan sınıflandırma hizmeti göre yapay sinir ağı ile model verinin kaynak mı yoksa hedef alandan geldiğini ayırt edemez hale getirerek iki veri setinin aynı uzayda hizalanmasını amaçlar (Ganin vd., 2016; Ganin vd., 2015).
- **Nokta Hizalama**: Yalnızca genel hizalama, farklı sınıfların özellik uzayında birbirine karışmasını engellemek için yeterli değildir. Bunun için, gizçözer modülünden gelen nokta bazlı öznitelikler sınıf bazlı olarak hizalanır. Bu modülde, Snell vd. (2017) benzer şekilde, öncelikle kaynak veriler üzerinden her bir sınıfın özellik uzayındaki merkezi (prototipi) hesaplanır. Hedef alanda gerçek etiket bulunmadığı için modelin ürettiği sınıf olasılıkları arasından güven eşiğini (confidence threshold) aşanlar sözde etiket (pseudo-label) olarak kabul edilir. Son aşamada, hedef alandaki noktaların öznitelik vektörleri kendi sınıflarına ait kaynak prototiplerine çekilerek sensörler arası anlamsal özellik aktarımı tamamlanır. Peng vd. (2022) benzer

şekilde nokta bazlı öznitelikleri ortak alanda hizalamaya çalışmaktadır. Bu çalışma, Peng vd. (2022) den farklı olarak gizçözer katmanında gelen nokta özniteliklerini kullanmaktadır, gizyazar öznitelik bilgileri süper-noktalara ait genel öznitelik bilgilerini içereceğinden onlar alan hizalama modelinde kullanılmaktadır.

Bu aşamada not etmek gerekir ki, verilerde bulunan düzensiz sınıf dengesizliği düşünülerek, her bir sınıf için farklı bir güven eşiği uygulanmıştır. Zemin ve bitki örtüsü gibi kolay öğrenilen baskın sınıflar için sahte etiket kabul eşiği %90 seviyesinde tutulurken, direk, çit ve araba gibi azınlık sınıfları için bu eşik %60-%65 seviyelerine çekilmiştir.

Denetimsiz alan adaptasyonu modeli genel durumu aşağıdaki (1) numaralı eşitlik ile ifade edilebilir.

$$L = L_{NS} + \lambda_{PH} \; L_{PH} + \lambda_{AS} L_{AS} \tag{1}$$

Eşitlikte L_{NS} nokta sınıflandırma, L_{PH} nokta hizalama ve L_{AS} alan sınıflandırmaya ait kayıp fonksiyonları ifade etmektedir. λ_{PH} ve λ_{AS} eğitim sırasında kullanılan dengeleme parametreleridir, her ikisi için de 0.1 olarak kullanılmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sonuçların, sınıf tabanlı karşılaştırma için kesişim-birleşim oranı (KBO), genel değerlendirme için de doğruluk ve ortalama KBO kullanılmıştır.

$$Ortalama \;\; KBO \; = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} \frac{TP_i}{\left(TP_i + \; FP_i + \; FN_i\right)} \tag{2}$$

$$Doğruluk \; = \frac{\left(\sum_{i=0}^{K-1} TP_i\right)}{\left(\sum_{i=0}^{K-1} \left(TP_i + \; FN_i\right)\right)} \tag{3}$$

(2) ve (3) numaralı eşitliklerde;

- TP_i: Gerçekte i sınıfına ait olan ve model tarafından doğru şekilde i sınıfı olarak tahmin edilen noktalardır.
- FP_i : Gerçekte i sınıfına ait olmadığı halde, model tarafından yanlışlıkla i sınıfı olarak tahmin edilen noktalardır.
- FN_i: Gerçekte i sınıfına ait olan ancak model tarafından başka bir sınıf olarak tahmin edilen noktalardır.
- K: Sınıf sayısını göstermektedir.

Derin öğrenme modelinin eğitim ve testi Python programlama dilinde, Pytorch kullanılarak Google Colab bulut ortamında yapılmıştır. İlk olarak DALES eğitim ve test verileri kullanılarak RandlaNet modeli eğitilmiş ve test edilmiştir. DALES test veri seti ile %96.73 ve ortalama KOB %74.39 değerlerine ulaşılmıştır. Burada eğitilen model, alan adaptasyonu modelinde ön-eğitilmiş model olarak kullanılmıştır. Alan adaptasyonu modeli 50 epoch, 0.001 öğrenme hızı ile eğitilmiştir.

Elde edilen ilk sonuçlara göre, DALES verileri ile eğitilmiş RandLaNet modeli doğrudan Toront3D veri seti ile test edildiğinde %85.27 doğruluk, %36.43 mIoU değerlerine ulaşılmıştır. DALES verisine göre gözle görülür bir fark mevcuttur. Alan adaptasyonu modeli ile Toronto3D veri setinde hiç bir etiket kullanmadan %87.24 doğruluk ve %42.26 ortalama KBO değerlerine ulaşılmıştır. Buna göre doğrulukta yaklaşık 2 yüzde puanlık bir artış olurken, ortalama KBO değerinde yaklaşık 6 yüzde puanlık bir artış meydana gelmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Toronto3D veri seti için elde edilen sonuçlar.

Model	Doğruluk (%)	mIoU(%)	Doğruluk Fark(%)	mIoU Fark(%)
Sadece kaynak	85.27	36.43	-	-
Alan adaptasyonu	87.24	42.26	+1.97	+5.83

Çizelge 4'te verilen sınıf tabanlı sonuçlara göre göre, önerilen çok seviyeli adaptasyon mimarisi özellikle hacimsel ve belirgin geometrik yapıya sahip nesnelerde üstün bir aktarılabilirlik sergilemiştir. Hedef alanda hiçbir etiket kullanılmamasına rağmen, Araba sınıfındaki sınıflandırma başarısı başlangıca göre yaklaşık 5 kat artarak %10 seviyelerine tırmanmış; Bina sınıfında %13'lik, Elektrik Hattı sınıfında %4'lük, Bitki Örtüsü sınıfında ise %15'lik net KBO kazanımları elde edilmiştir. Bu durum, modelin binaların, ağaçların veya araçların genel uzamsal formlarını iki farklı sensör tipi arasında başarıyla eşleştirebildiğini göstermektedir. Buna karşın, sınıfa duyarlı dinamik eşiklemelere ve prototip uzayındaki hizalama stratejilerine rağmen, "Direk" ve "Çitler" sınıflarında adaptasyon gerçekleşmemiş ve başarım sağlanamamıştır. Bu durum, modelin bir başarısızlığından ziyade, hava tarama ile mobil tarama arasındaki sensör bakış açısı farklılığının göstergesidir. Çünkü model bina gibi iki farklı veri setinde farklı şekilde ifade edilen objeleri öğrenme yoluna gitmiş ama bu sınıflarda bir başarı gösterememiştir. Bina sınıfı gibi sınıflardaki artış gelecekteki çalışmalar için umut vermektedir. Aynı zamanda öznitelik seti olarak sadece xyz konum bilgilerinin kullanılması, azınlık sınıflarının sınıflandırma performansını arttırmasına yardım etmemiş, alan adaptasyonu sırasında bunlara ait geometrik ilişkiler sadece xyz konum verileri ile sağlanamamıştır.

Çizelge 4. Toronto3D veri seti için ortak sınıfların KOB sonuçları.

Sınıf	Sadece Kaynak(%KOB)	Alan adaptasyonu (% KOB)
Zemin	96.95	95.21
Bitki örtüsü	65.73	80.21
Bina	39.45	52.37
Elektrik hattı	52.86	56.82
Direk	0.00	0.00
Araba	0.02	11.22
Çit	0.01	0.00
Ortalama	36.43	42.26

Literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında sonuçların geliştirilebileceği öngörülmektedir. Benzer bir çalışmada Wang vd.,(2025) Toront3D verileri için yaklaşık %92 doğruluk ve % 62.12 ortalama KBO değerlerine erişmiştir. Bu çalışmadan farklı olarak KpConv omurgasını kullanmış, kullanmış olduğu öznitelik uzayını belirtmemiştir. KpConv derin öğrenme yaklaşımı küçük nesnelerde daha iyi sonuçlar verdiği, bu çalışmada kulllanılan RandlaNet modelinin ise daha çok genel ve büyük nesnelerde daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir. Bunun için bu çalışmadaki sonuçların RandlaNet modelinden ziyade farklı bir model ile irdelenmesi gerekmektedir. Bunun yanında, elde edilen sonuçlar sadece xyz konum bilgilerinden elde edilmiştir; her ne kadar Wang vd. (2025), denetimsiz alan adaptasyonundan ziyade, test zamanı adaptasyon çalışsa da, bu çalışmada kullanılan öznitelik uzayının genişletilmesi ile daha iyi sonuçların alınabileceğini göstermektedir.

Bunlardan farklı olarak, Shen vd. (2023) çalışmasında yersel LiDAR verilerinden mobile LiDAR verilerine denetimsiz alan adaptasyonu çalışmıştır. Çalışılan veri her ne kadar farklı bir bölge olsa da, elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman bu çalışma ile paralel olduğu görülecektir. Peng vd. (2022) bu çalışma gibi DALES verilerini etiketli veri olarak kullanmış, fakat mobil için farklı bir veri seti kullanmıştır; Çit sınıfı gibi azınlık bir sınıfta ait sonuçlar bu çalışma ile paraleldir.

Sonuç olarak bu çalışma, etiketleme maliyetlerini azaltarak farklı perspektiflerden toplanan LiDAR verilerinin ortak bir anlamsal uzayda başarıyla sınıflandırılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, 3B alan adaptasyonu araştırmalarının yalnızca istatistiksel öznitelik hizalamasına dayanmaması gerektiğini; sensör bakış açılarından kaynaklanan bu köklü geometrik deformasyonları giderebilecek yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Her ne kadar azınlık sınıflarında dikkat çekici sonuçlar elde edilemese de gelecek çalışmalar için renk veya yoğunluk gibi ortak özniteliklerin iki modelde de kullanılmasıyla denetimsiz alan adaptasyonunu çalışmalarının daha iyi sonuçlar verebileceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda farklı derin öğrenme yöntemlerinin omurga olarak kullanılması performansı iyileştirebilecek etmenlerden biridir.

5. TEŞEKKÜR

DALES ve Toronto3D LiDAR verilerini paylaşan araştırmacılara teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Atik, M. E., Duran, Z., and Seker, D. Z. (2021). Machine learning-based supervised classification of point clouds using multiscale geometric features. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3).

Blomley, R., Jutzi, B., and Weinmann, M. (2016). Classification of Airborne Laser Scanning Data Using Geometric Multi-scale Features and Different Neighborhood Types. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, III-3:169–176.

Duran, Z., Ozcan, K., and Atik, M. E. (2021). Classification of photogrammetric and airborne lidar point clouds using machine learning algorithms. *Drones*, 5(4).

Engel, N., Belagiannis, V., and Dietmayer, K. (2021). Point transformer. *IEEE Access*, 9:134826–134840.

Ganin, Y. and Lempitsky, V. (2015). Unsupervised domain adaptation by backpropagation. *International Conference on Machine Learning (ICML)*, syf: 1180–1189

Ganin, Y., Ustinova, E., Ajakan, H., Germain, P., Larochelle, H., Laviolette, F., March, M., and Lempitsky, V. (2016). Domain-adversarial training of neural networks. *Journal of Machine Learning Research,* 17(59):1–35.

Hackel, T., Wegner, J. D., and Schindler, K. (2016). Fast Semantic Segmentation of 3D Point Clouds with Strongly Varying Density. *ISPRS 23. Kongresi - ISPRS Ann. of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Informaton Sciences*, Prag, Çek Cumhuriyeti, III-3:177–184.

Hu, Q., Yang, B., Xie, L., Rosa, S., Guo, Y., Wang, Z., Trigoni, N., and Markham, A. (2020). Randla-net: Efficient semantic segmentation of large-scale point clouds. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, syf:11108–11117.

Luo, H., Khoshelham, K., Fang, L., and Chen, C. (2020). Unsupervised scene adaptation for semantic segmentation of urban mobile laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169:253–267

Niemeyer, J., Rottensteiner, F., and Soergel, U. (2014). Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 87:152–165.

Peng, S., Xi, X.,Wang, C., Xie, R.,Wang, P., and Tan, H. (2022). Point-based multilevel domain adaptation for point cloud segmentation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19:1–5.

Qi, C. R., Su, H., Kaichun, M., and Guibas, L. J. (2017a). Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* syf:77–85.

Qi, C. R., Yi, L., Su, H., and Guibas, L. J. (2017b). Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. Guyon, I., Luxburg, U. V., Bengio, S.,Wallach, H., Fergus, R., Vishwanathan, S., and Garnett, R. (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, Curran Associates, Inc., 30:5099–5108.

Qin, C., You, H., Wang, L., Kuo, C.-C. J., and Ulrich, Y. (2019). Pointdan: A multiscale 3d domain adaptation network for point clouds. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS),* 30:6029–6039.

Sevgen, E. and Abdikan, S. (2023a). Classification of Large-Scale Mobile Laser Scanning Data in Urban Area with LightGBM. *Remote Sensing*, 15(15).

Sevgen, E. and Abdikan, S. (2023b). Point-wise Classification of High Density UAV-LiDAR Data using Gradient Boosting Machines. *39th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE-39) - The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* Antalya, Türkiye, XLVIII-M-1-2023, syf:587–593.

Shen, S., Xia, Y., Eich, A., Xu, Y., Yang, B., and Stilla, U. (2023). Segtrans: Semantic segmentation with transfer learning for mls point clouds. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20:1–5.

Snell, J., Swersky, K., & Zemel, R. (2017). Prototypical networks for few-shot learning. *Advances in neural information processing systems,* 30.

Tan, W., Qin, N., Ye, C., Fang, L., Wang, Y., and Li, J. (2020). Toronto-3d: A largescale mobile lidar dataset for semantic segmentation of urban roadways. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, syf:202–203.

Thomas, H., Goulette, F., Deschaud, J.-E., Marcotegui, B., and LeGall, Y. (2018). Semantic Classification of 3D Point Clouds with Multiscale Spherical Neighborhoods. *2018 International Conference on 3D Vision (3DV),* syf:390–398.

Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J., Marcotegui, B., Goulette, F., and Guibas, L. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, syf:6410–6419.

Varney, N., Shermeyer, J., Casey, G., and Yeh, S.-Y. (2020). Dales: A large scale aerial lidar dataset for semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, syf:186–187

Wang, P., Yao, W., Shao, J., and He, Z. (2025). Test-time adaptation for geospatial point cloud semantic segmentation with distinct domain shifts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 229:422–435.

Weinmann, M., Jutzi, B., Hinz, S., and Mallet, C. (2015). Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105:286–304.

Wu, B., Zhou, X., Zhao, S., Yue, X., and Keutzer, K. (2019). Squeezesegv2: Improved model structure and unsupervised domain adaptation for road-object segmentation from a lidar point cloud. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA*), syf:4376–4382.

Xie, Y., Schindler, K., Tian, J., and Zhu, X. X. (2021). Exploring cross-city semantic segmentation of als point clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2021*, syf: 247–254.

NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN BİNA SINIR GEOMETRİSİNİN OTOMATİK DÜZGÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK YENİ BİR ALGORİTMANIN GELİŞTİRİLMESİ VE TİCARİ YAZILIMLARA ENTEGRASYONU

Fevzi KARSLI[1], Erhan COŞKUN[1], Mustafa DİHKAN[1], Emirhan ÖZDEMİR[2], Fevzi DAŞ[2], Murat BAHADIR[1,3], Ahmad Shakib SAHAK[4], Feride Seçil YILDIRIM[1], Fatih Tunahan DİNÇER[1],

[1]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, fkarsli@ktu.edu.tr
[1]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, erhan@ktu.edu.tr
[1]Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, mdihkan@ktu.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, emirhan.ozdemir@igdir.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 76000, Merkez, Iğdır, fevzi.das@igdir.edu.tr
[3]Öğr. Gör., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 24700, İliç, Erzincan, murat.bahadir@erzincan.edu.tr
[4]Dr., Kabul Polytechnic University, GIS and Remote Sensing department, Faculty of Geomatics Engineering, Afghanistan, sh.sahak@kpu.edu.af
[1]Yüksek Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, sclyldrm01@gmail.com
[1]Harita Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, fatihtunahandincer@gmail.com

ÖZET

Kentsel alanların temel bileşenlerinden biri olan binaların nokta bulutu verilerinden tespit edilmesi, çıkarılması ve sınırlarının geometrik olarak düzgünleştirilmesi; coğrafi bilgi sistemleri, kentsel planlama, kadastro ve afet yönetimi gibi birçok uygulama açısından büyük önem taşımaktadır. Nokta bulutu verilerinden elde edilen bina sınırları, veri kaynaklı gürültü noktaları, eksik veri ve sınırlı planimetrik doğruluk nedeniyle çoğu zaman geometrik düzensizlikler içermektedir. Bu durum, elde edilen bina sınırlarının doğrudan vektörel bir harita üzerinde kullanılabilirliğini sınırlandırmakta ve ilave işlem adımlarını gerekli kılmaktadır. Özellikle uzaktan algılama verilerinden çıkarılan bina sınırlarının, Detay Seviyesi 0 (LoD0) kapsamında otomatik olarak düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması, güncel kentsel veri tabanlarının oluşturulması ve güncellenmesi açısından önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, Trabzon, Antalya, Erzurum, İstanbul ve Ordu illerinde yer alan, farklı mimari özelliklere sahip eğrisel ve karma geometrili (ortogonal + eğrisel) 10 adet binanın iki boyutlu sınırları, LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu verilerinden elde edilmiş ve düzgünleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımda, ortogonal niteliğe sahip bina sınırlarının düzgünleştirilmesi için Automatic Building Outline Regularization (ABORE) yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, istatistiksel mesafe, yoğunluk ve açı tabanlı üç farklı karar mekanizması yardımıyla bina kenar tipleri otomatik olarak ortogonal ve eğrisel olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Sınıflandırma sonucunda eğrisel olarak belirlenen bina kenarları bézier eğrileri kullanılarak modellenmiş ve böylece karma geometrik özelliklere sahip bina sınırlarının LoD0 düzeyinde temsil edilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda, ABORE yaklaşımı genişletilerek karma geometrili bina sınırlarının otomatik düzgünleştirilmesini sağlayan Generalized Automatic Building Outline Regularization (G-ABORE) yöntemi geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, yaklaşık %99 düzeyindeki IoU ve F-score değerleri ile önerilen bina sınır düzgünleştirme yaklaşımının yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığını, ayrıca mevcut yöntemlere kıyasla yaklaşık %3 daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir. Ek olarak, önerilen yöntemin kullanıcılar tarafından kolaylıkla uygulanabilmesi amacıyla Quantum Geographic Information System (QGIS) ortamına entegre edilerek yerli ve milli bir bina sayısallaştırma modülü ortaya konulmuştur. Böylece önerilen yaklaşımın ve geliştirilen arayüzün, büyük ölçekli harita üretiminde bina sınırlarının hızlı, doğru ve standartlara uygun biçimde elde edilmesi sağlanarak; coğrafi veri üretimi, güncelleme ve yönetim süreçlerinde ulusal ve uluslararası ölçekte önemli katkılar sunması beklenilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Bézier eğrisi, bina sınır düzgünleştirme, nokta bulutu, ticari yazılım entegrasyonu, QGIS

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A NEW ALGORITHM FOR THE AUTOMATIC REGULARIZATION OF BUILDING BOUNDARY GEOMETRY FROM POINT CLOUD DATA AND ITS INTEGRATION INTO COMMERCIAL SOFTWARE

The detection, extraction, and geometric regularization of building boundaries from point cloud data—one of the fundamental components of urban areas—is of great importance for many applications, such as geographic information systems, urban planning, cadastral surveying, and disaster management. Building boundaries derived from point cloud data often contain geometric irregularities due to data-induced noise, missing data, and limited planimetric accuracy. This situation limits the direct usability of the derived building boundaries on a vector map and necessitates additional processing steps. In particular, the automatic regularization/digitization of building boundaries derived from remote sensing data within Level of Detail 0 (LoD0) has emerged as an important research topic for the creation and updating of current urban databases. In this study, the two-dimensional outlines of 10 buildings with curved and complex geometries (orthogonal + curved) and distinct architectural features, located in the provinces of Trabzon, Antalya, Erzurum, Istanbul, and Ordu, were derived from LiDAR and photogrammetric point cloud data and subsequently regularized. In the proposed approach, the Automatic Building Outline Regularization (ABORE)

method was used to regularize the building outlines with orthogonal characteristics. In addition, building edge types were automatically classified into two categories—orthogonal and curvilinear—using three different decision mechanisms based on statistical distance, density, and angle. As a result of the classification, building edges identified as curvilinear were modeled using Bézier curves, thereby ensuring that building boundaries with complex geometric features were represented at the LoD0 level. In this context, the ABORE approach was extended to develop the Generalized Automatic Building Outline Regularization (G-ABORE) method, which enables the automatic regularization of building boundaries with complex geometries. The results show that the proposed building boundary regularization approach achieves high accuracy and reliability, with IoU and F-score values of approximately 99%, and that it outperforms existing methods by approximately 3%. Furthermore, to ensure that the proposed method can be easily applied by users, it was integrated into the Quantum Geographic Information System (QGIS) environment, resulting in the development of a locally developed and nationally owned digitization module. Thus, the proposed approach and the developed interface are expected to ensure that building boundaries are obtained quickly, accurately, and in compliance with standards in large-scale map production, thereby making significant contributions to geographic data production, updating, and management processes at both the national and international levels.

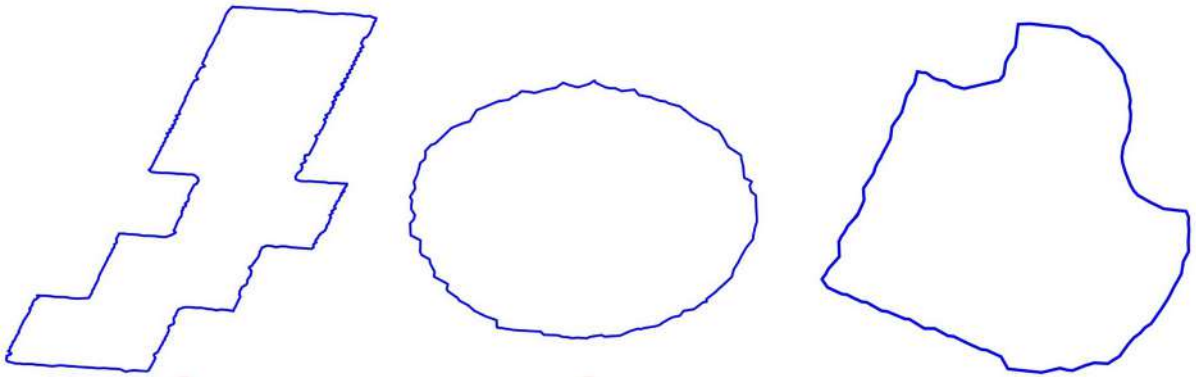
Keywords: Bézier curve, building boundary regularization, point cloud, commercial software integration, QGIS

1. GİRİŞ

Kentsel çevrenin temel bileşenlerinden biri olan binalar, kentsel gelişimin izlenmesi ve mekânsal analizlerin gerçekleştirilmesinde önemli bir yere sahiptir (Lai vd., 2019). Bu kapsamda uzaktan algılama verileri; kentsel planlama, arazi örtüsü ve kullanımı analizi, bina sınır çıkarımı ve düzgünleştirilmesi ile üç boyutlu şehir modelleme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Chen vd., 2018; Awrangjeb vd., 2010; Vosselman, 2002). Dolayısıyla bina geometrilerinin doğru ve etkin biçimde modellenmesi, şehircilik, harita ve inşaat mühendisliği açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Ayrıca bina verileri, güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve enerji taleplerinin tahmin edilmesi gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır (Biljecki vd., 2015).

Uzaktan algılama teknolojileri kapsamında doğrudan nokta bulutu verisi üreten LiDAR (Light Detection and Ranging) ve görüntü eşleştirme yoluyla dolaylı olarak elde edilen fotogrametrik nokta bulutları; bina, yol ve ağaç gibi kentsel detayların çıkarılması ve geometrik olarak düzgünleştirilmesinde önemli veri kaynaklarıdır (Lai vd., 2019). Bu veriler, konumsal analizler için gerekli yoğun ve üç boyutlu bilgilerin hızlı ve güvenilir biçimde üretilmesini sağlamakta; özellikle haritacılık başta olmak üzere farklı disiplinlerde üç boyutlu (3B) veri kullanımını yaygınlaştırarak önemli bir gereksinim hâline getirmektedir.

Ülkemizde kamu/özel kurum ve kuruluşlar tarafından üretilen tematik haritalarda en temel katman, bina detaylarını temsil eden katmandır (Karsli vd., 2024). Çeşitli uygulamalar için bina detaylarının çıkarılması ve sınırlarının düzgünleştirilmesi; kentsel planlama ve arazi yönetimi gibi şehirleşme alanında bilgi edinilmesi hususunda büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda farklı teknolojilerle üretilmiş nokta bulutları içerisinden harita katmanı özelliği taşıyan detayların (bina, yol, ağaç, vb.) çıkarımına yönelik çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Ancak özellikle nokta bulutundan çıkarılan bina geometrilerini temsil eden sınır noktaları, düzgün bir geometrik şekle sahip olmayıp, alfa şekil (düzgün olmayan geometri) yapısındadır (**Şekil 1**). Bu nitelikteki bina sınırları, harita ölçeğinde doğrudan temsil edilemeyecek düzeyde geometrik düzensizlikler içermekte olup, sınırların otomatik olarak düzgünleştirilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 1. Düzensiz bina başlangıç sınır geometrileri (ortogonal, eğrisel ve karma).

Şekil 1'de görüldüğü üzere, nokta bulutlarından otomatik olarak çıkarılan başlangıç bina sınırları, verinin düzensiz konumsal dağılımı ile binaların geometrik özelliklerinden kaynaklanan sınırlı planimetrik doğruluk ve LiDAR veri alım sürecinden kaynaklanan ölçme ve örnekleme etkileri nedenleriyle düzensiz bir geometriye (zikzaklı) sahip olmaktadır.

Son yıllarda bahsi geçen düzensiz geometrideki başlangıç sınırlarının düzgünleştirilmesi/sayısallaştırılması için nokta bulutu tabanlı birçok yöntem geliştirilmiştir. Genel olarak, literatürde mevcut düzgünleştirme yöntemlerinin büyük

çoğunluğunda ortogonal bina sınırlarının düzgünleştirilmesi üzerine yoğunlaşılmıştır (Awrangjeb, 2016; Jung vd., 2017; Feng vd., 2020; Albers vd., 2016; Ozdemir vd., 2022; Ďuračiová vd., 2026). Ancak teknolojinin gelişimi ve mimari tasarımların farklılıkları dikkate alındığında eğrisel ve karma (eğrisel+ortogonal) kenarlı binaların sayısı göz ardı edilemeyecek kadar çoktur. Bu kapsamda, bilinen ilk çalışmalardan biri olan dos Santos vd. (2020), alfa şekil ve Douglas–Peucker algoritmalarını kullanarak başlangıç bina sınırları ile kritik noktaları belirleyen ve sınırların düzgünleştirilmesini yinelemeli CD-Spline (Değiştirilebilir Gradyan Eğrisi) yaklaşımına dayandıran açı tabanlı bir genelleme yöntemi önermiştir. Ayrıca dos Santos vd. (2020) ve dos Santos vd. (2022) çalışmalarında sadece ortogonal bina sınırı geometrisini engelleyen ağaç vb. objelerin varlığı sebebiyle ortaya çıkan eğrisel yapılar tespit edilmesine rağmen, bütüncül olarak eğrisel ya da karma yapıdaki binalar üzerinde modelin uygulanmamış olması da önemli bir eksiklik olarak görülmektedir. Dos Santos vd. (2025), hava LiDAR verilerinden bina sınırlarının doğruluğunu artırmak amacıyla, kritik nokta seçimindeki hataları azaltan Geliştirilmiş İteratif Değişken Dereceli Spline (IICDS) yöntemini önermiştir. Kompleks binalar için yapılan çalışmalarda eğrisel ve doğrusal kenarların sınıflandırılması ve eğri derecesinden kaynaklı sorunlar yaşanmaktadır. Bu nedenle, karmaşıklık derecelerinden bağımsız olarak tüm eğrisel ve karma bina sınırlarını modelleyebilen bir metodun geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Automatic Building Outline Regularization (ABORE) yönteminin genelleştirilmiş bir versiyonu olan G-ABORE yöntemi kullanılarak, nokta bulutu verilerinden elde edilen karma ve eğrisel geometrili 10 binanın sınırlarının otomatik olarak düzgünleştirilmesi ele alınmıştır. ABORE yöntemiyle elde edilen ortogonal bina sınırları, Bézier eğrileri ile desteklenerek karma geometrili bina sınırlarının düzgünleştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bina kenarların otomatik bir şekilde ortogonal veya eğrisel olarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Yöntemin performansı; piksel tabanlı ölçütler, RMSE, PoLiS ve geliştirilen nokta tabanlı doğruluk analizleri kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Proje kapsamında, İstanbul, Antalya, Erzurum, Trabzon ve Ordu illerinde farklı mimari özelliklere ve geometrik karakteristiklere sahip binaları içeren çalışma alanları belirlenmiş olup, bu alanlara ilişkin bilgiler **Çizelge 1**'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Çalışma alanlarında, tamamen eğrisel geometrili yapıların yanı sıra ortogonal ve eğrisel kenarların birlikte bulunduğu karma geometrili bina örneklerine de yer verilmiştir. Bu çeşitlilik, G-ABORE yönteminin farklı bina geometrileri ve mimari özellikler üzerindeki uygulanabilirliğinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmada LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu veri setlerinden yararlanılmıştır. Arazi çalışmaları, 2025 yılında Matrice 350 RTK İnsansız Hava Aracı üzerine entegre edilen Zenmuse L2 LiDAR sensörü ve Zenmuse P1 fotogrametrik kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LiDAR verilerinden nokta bulutlarının oluşturulması ve ön işlenmesi DJI Terra, fotogrametrik görüntülerden nokta bulutlarının üretilmesi ise Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nokta bulutları, bina çatı sınırlarının çıkarılması ve G-ABORE yöntemiyle geometrik olarak düzgünleştirilmesinde temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan bina çatı nokta bulutlarına ilişkin detaylı bilgiler **Çizelge 2**'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Çalışma alanları.

Pilot Bölge	İl	İlçe	Mahalle
Moipark (1 adet)	İstanbul	Başakşehir	Mahmutbey
Küçükçekmece Belediyesi (1 adet)	İstanbul	Küçükçekmece	Halkalı Merkez
Concorde De Deluxe Otel ve Çevresi (2 adet)	Antalya	Aksu	Güzeloba
Erzurum Şehir Hastanesi Çevresi (2 adet)	Erzurum	Yakutiye	Atatürk
Gülyalı Sitesi / Yalıncak Villaları (2 adet)	Trabzon	Ortahisar	Gülyalı
Ordu Üniversitesi Kampüsü (2 adet)	Ordu	Altınordu	Cumhuriyet

Çizelge 2. Kullanılan bina çatı nokta bulutlarının özellikleri.

Pilot Bölge	ID	Uçuş İrtifası (m)	Nokta Bulutu	Nokta Yoğunluğu
Moipark	M1	115	LiDAR	1507,50
Moipark	M1	115	Fotogrametrik	289,19
Küçükçekmece	K1	110	LiDAR	991,94
Küçükçekmece	K1	110	Fotogrametrik	573,55
Antalya	A1	90	LiDAR	291,09
Antalya	A1	90	Fotogrametrik	222,21
Antalya	A2	90	LiDAR	491,29
Antalya	A2	90	Fotogrametrik	411,50

Erzurum	E1	100	LiDAR	1120,10
Erzurum	E1	100	Fotogrametrik	68,87
Erzurum	E2	100	LiDAR	513,64
Erzurum	E2	100	Fotogrametrik	108,53
Trabzon	T1	100	LiDAR	340,10
Trabzon	T1	100	Fotogrametrik	455,95
Trabzon	T2	100	LiDAR	1436,70
Trabzon	T2	100	Fotogrametrik	447,48
Ordu	O1	80	LiDAR	349,36
Ordu	O1	80	Fotogrametrik	181,44
Ordu	O2	80	LiDAR	350,22
Ordu	O2	80	Fotogrametrik	1322,80

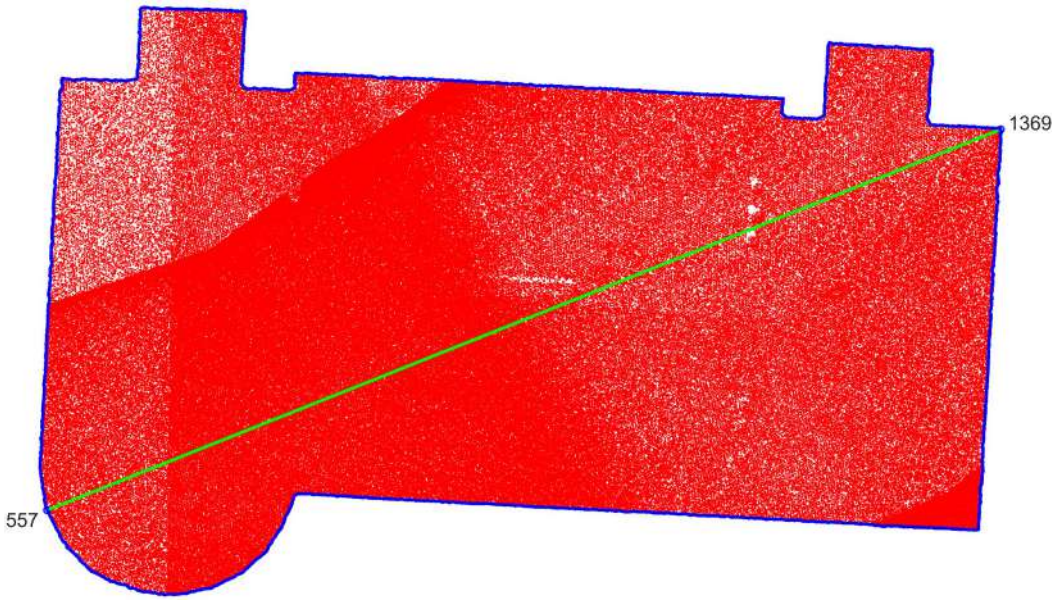
3. YÖNTEM

Bu çalışmada, bina çatı noktalarının nokta bulutu verilerinden çıkarılması amacıyla I-Octree tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, bina sınırlarının çıkarılmasından ziyade, elde edilen ham bina sınırlarının G-ABORE yöntemi kullanılarak otomatik ve geometrik olarak tutarlı biçimde düzgünleştirilmesidir. Bu doğrultuda, ön işlem aşamasında elde edilen bina çatı noktalarından türetilen sınırlar G-ABORE yöntemiyle işlenerek, eğrisel ve karma geometrili bina sınırlarının harita üretimine uygun bir geometrik yapıya dönüştürülmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın genel iş akışı; (1) ABORE ile ortogonal kenarların düzgünleştirilmesi, (2) G-ABORE ile karma geometrili bina sınırlarının düzgünleştirilmesi, (3) doğruluk analizi ve (4) arayüz entegrasyonu olmak üzere dört temel alt başlık altında değerlendirilmiştir.

3.1. ABORE İle Ortogonal Kenarların Düzgünleştirilmesi

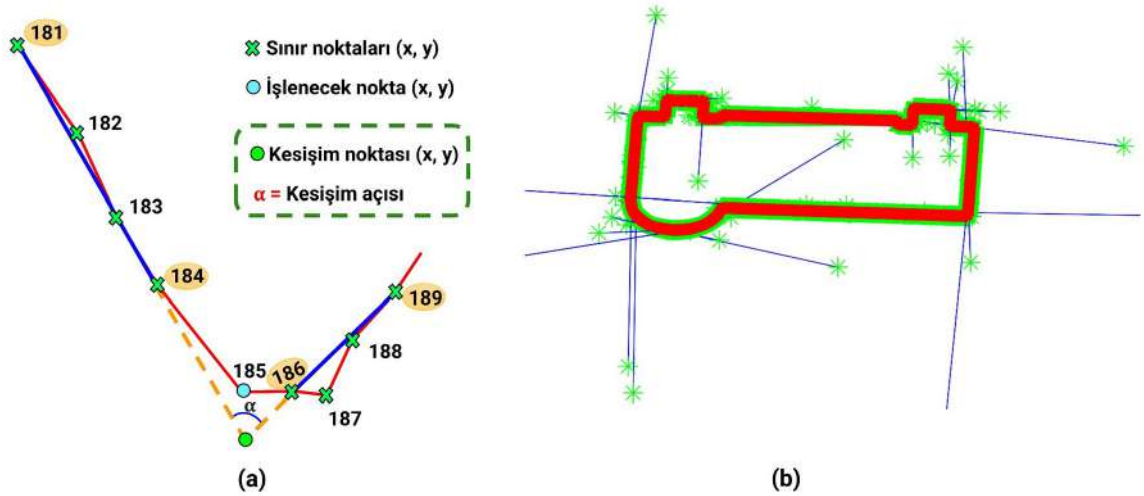
ABORE yönteminin ilk aşamasında, düzensiz bina çatı sınırlarının elde edilmesi amacıyla MATLAB ortamında bulunan boundary fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, giriş olarak verilen bina çatı nokta bulutundan dış sınırı belirlerken Shrink Factor (küçültme faktörü-s) parametresini esas almakta ve bu parametreye bağlı olarak konveks veya konkav karakterde sınır geometrileri üretebilmektedir. Sonuç olarak, bina sınırında gerçek geometriyi temsil etmeyen girinti-çıkıntılar (zikzak etkisi) ve düzensizlikler oluşmakta (**Şekil 2**), bu durum ise sınırın geometrik kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Sınır noktaları içerisinde birbirine en uzak Öklid mesafesine sahip olan sınır noktaları (557 ve 1369) belirlenmiştir. Bu iki nokta birleştirilerek bina sınırını temsil eden referans (temsili) doğru oluşturulmuştur.



Şekil 2. Düzensiz geometrideki bina başlangıç sınırı (O1 etiketli).

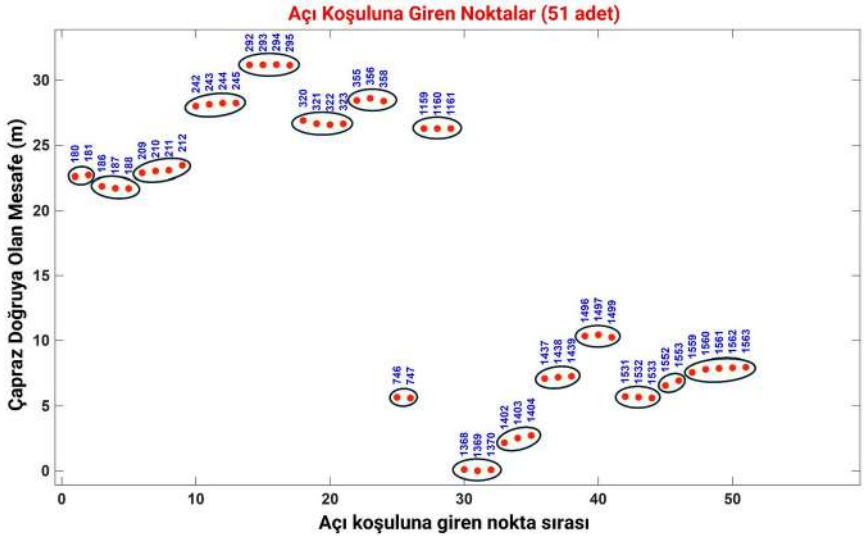
ABORE yönteminde, düzensiz bina başlangıç sınırlarının elde edilmesinin ardından aday bina köşe noktalarının belirlenmesi amacıyla açı tabanlı bir köşe çıkarım yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımda, boundary fonksiyonu ile elde edilen sınır noktalarının saat yönünde ardışık olarak sıralandığı bilinmektedir. Her bir sınır noktası için, ilgili noktanın öncesinde ve sonrasında yer alan dörder komşu nokta (*mp=4*) kullanılarak iki ayrı doğru oluşturulmaktadır (**Şekil 3**). Nokta dağılımının düzensiz ve gürültülü yapısı nedeniyle, elde edilen doğrular genellikle doğrudan kesişmemekte, ancak analitik uzantıları kullanılarak iki boyutlu düzlemde teorik kesişim noktaları

hesaplanabilmektedir. Elde edilen bu nokta "*kesişim noktası*" olarak adlandırılmaktadır. İki doğrunun oluşturduğu açı ise bina geometrisinin yerel kırılma karakteristiğini temsil etmekte olup "*kesişim açısı*" olarak tanımlanmaktadır. Doğruların yönleri, hesaplanan açının bina sınırının iç açısını temsil edecek şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3. Sınır noktalarında geçirilen doğrular ile gerçekleştirilen işlemler: (a) kesişim açısı ve noktasının üretilmesine temsili örnek (*mp=4*), (b) tüm sınır noktalarına uygulanması.

Düzensiz bina sınırını oluşturan noktaların açı değerleri, tanımlanan tolerans aralıklarına göre analiz edilerek aday köşe noktaları belirlenmiştir. Bu kapsamda, ortogonal bina geometrilerinin temel açı değerleri olan 90° ve 270° referans alınmış; 80°–110° ve 245°–290° tolerans aralıklarında kalan noktalar aday köşe, yaklaşık 180° açı oluşturan ve doğrusal geometriyi temsil eden noktalar ise köşe niteliği taşımayan noktalar olarak sınıflandırılmıştır. Böylece, köşe karakteristiği göstermeyen noktalar elenerek bina sınırının geometrik olarak sadeleştirilmesi sağlanmıştır. Açı tolerans koşullarını sağlayan bina sınır noktalarına ait örnek görsel **Şekil 4**'te sunulmuştur. Başlangıçtaki bina sınırını temsil eden 1635 adet sınır noktası içerisinden yalnızca 51 adet noktanın belirlenen açı tolerans aralıkları içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.



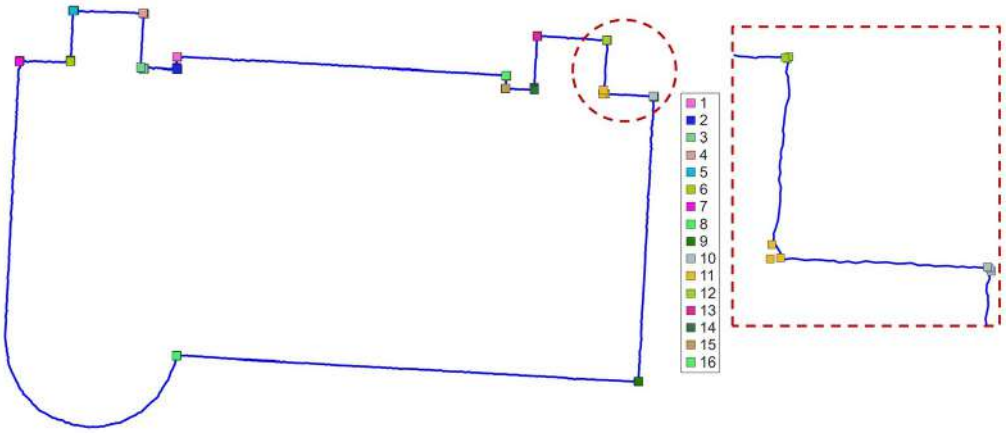
Şekil 4. Aday bina köşe noktalarının tespiti.

Şekil 4'te sunulan grafiğin düşey ekseni, açı koşulunu sağlayan bina sınır noktalarının **Şekil 2**'de tanımlanan referans (temsili) doğruya olan iki boyutlu 2B Öklid mesafelerini göstermektedir. Yatay eksende ise açı koşulunu sağlayan bina sınır noktalarının, sınır nokta numaraları yer almaktadır. Grafikte, hem sınır nokta numaraları hem de referans doğruya olan mesafe değerleri birbirine yakın olan noktalar, aynı bina köşesini temsil eden aday köşe noktası kümelerini oluşturmaktadır. Aday bina köşe noktalarının gruplandırılması/kümelendirilmesini sağlamak amacıyla Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) kümeleme algoritması (Ester vd., 1996) kullanılmıştır (**Şekil 5**).

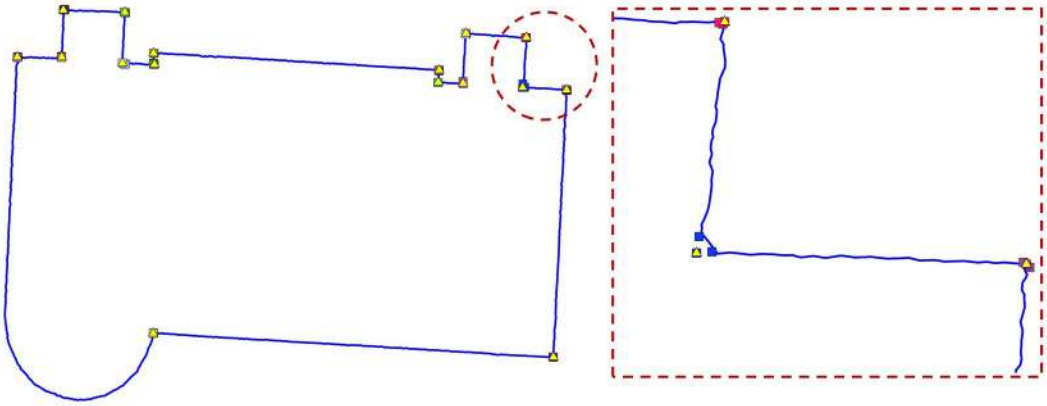
Aday bina köşe noktalarının DBSCAN algoritması ile kümelendirilmesinin ardından, her bir küme içerisinden gerçek bina köşe noktasını en ideal şekilde temsil eden aday noktanın belirlenmesi amacıyla, **Şekil 2**'de gösterilen temsili (referans) doğruya olan iki boyutlu (2B) Öklid mesafeleri analiz edilmiştir. İdeal bina köşe noktasını tespit edebilmek aşağıdaki 4 koşul dikkate alınmıştır. Örnek bina üzerinden tespit edilen ideal köşe noktaları **Şekil 6**'da gösterilmiştir.

- Mesafe değerleri sürekli artıyorsa, medyan mesafeye karşılık gelen nokta,

- Mesafe değerleri sürekli azalıyorsa, medyan mesafeye karşılık gelen nokta,
- Mesafeler önce artıp sonra azalıyorsa, temsili doğruya en uzak aday nokta,
- Mesafeler önce azalıp sonra artıyorsa, temsili doğruya en yakın aday nokta, ideal köşe noktası olarak belirlenir.

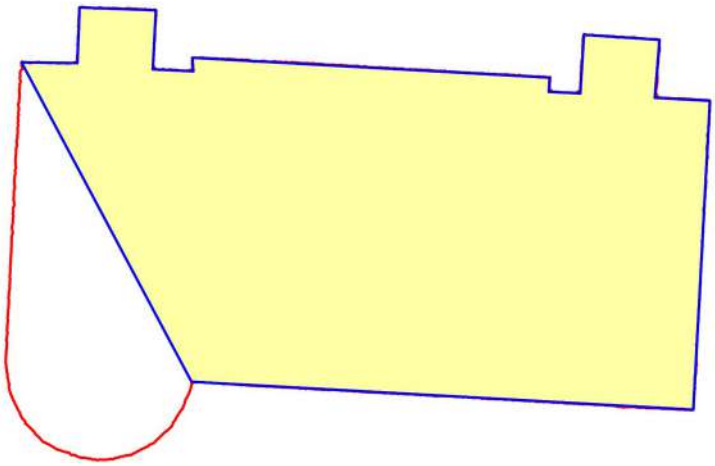


Şekil 5. Aday bina köşe noktalarının DBSCAN ile kümelenmesi.



Şekil 6. Aday bina köşe noktaları arasından ideal olanların seçilmesi.

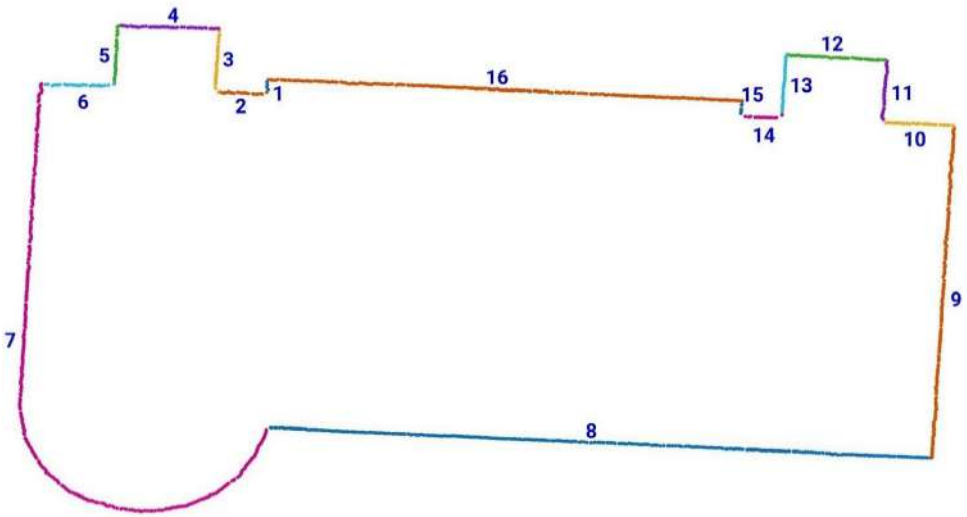
Bu aşamaya kadar ideal köşe noktaları, düzensiz bina sınırlarının geometrik özelliklerinden yararlanılarak belirlenmiştir. ABORE yöntemi, bina kenarları üzerinde yer alan noktaların da geometrik değerlendirmeye dâhil edilmesi amacıyla, ideal köşe noktalarının belirlenmesinin ardından ikinci bir geometrik düzenleme aşaması uygulamakta ve bu aşama sonucunda kesin köşe noktaları ile bina kenarlarını oluşturmaktadır. İkinci sınır düzgünleştirme aşamasında, ideal köşe noktaları arasında 10 cm genişliğinde tampon bölgeler oluşturulmakta ve bu bölgelerde yer alan sınır noktalarına birinci dereceden eğri (doğru) geçirilmektedir. Elde edilen doğruların kesişim noktaları örnek uzayda hesaplanarak kesin bina köşe noktaları belirlenmektedir (**Şekil 7**).



Şekil 7. ABORE sonucu düzgünleştirilen bina sınırı.

3.2. G-ABORE İle Karma Geometrili Bina Sınırlarının Düzgünleştirilmesi

G-ABORE yöntemi (Karsli vd., 2025), ABORE yaklaşımının eğrisel bina kenarlarını temsil etmedeki yetersizliğini gidermek amacıyla geliştirilmiş ve karma geometrili bina sınırlarının düzgünleştirilmesine yönelik yeni bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir. Yöntemin temel amacı, bina sınırını oluşturan her bir kenarın geometrik karakterini bağımsız olarak belirleyerek, ilgili kenar tipine uygun geometrik modelin uygulanmasını sağlamaktır. Bu kapsamda, ABORE yöntemi sonucunda elde edilen ardışık bina köşe noktaları referans alınmış ve bu noktalar arasında kalan başlangıçtaki düzensiz bina sınır noktaları bağımsız kenar gruplarına ayrılmıştır (**Şekil 8**). Çalışmada bina kenar tipinin belirlenmesi için üç farklı yaklaşım önerilmiştir.



Şekil 8. Bina başlangıç sınır noktalarının kenar bazlı kümelenmesi.

3.2.1. Mesafe tabanlı kenar tipi belirleme

Her bir bina kenarına ait sınır noktalarının ABORE kenarına olan iki boyutlu (2B) Öklid mesafeleri üzerinden aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Bu istatistiksel ölçütler, sınır noktalarının doğrusal kenar modeline olan uyum düzeyini nicel olarak değerlendirmek ve kenarın geometrik karakteristiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada genel olarak farklı geometrik özelliklere sahip farklı binalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel analizler sonucunda, standart sapma değerinin 0,25 m ve üzerinde (std ≥ 0,25 m) ve ortalama mesafe değerinin 0,40 m ve üzerinde (ort ≥ 0,40 m) olduğu kenarların büyük ölçüde eğrisel geometriye sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, bu eşik değerlerinin altında kalan kenarlar ise doğrusal (ortogonal) karakter sergileyerek doğrusal kenar olarak tanımlanmıştır.

3.2.2. Yoğunluk tabanlı kenar tipi belirleme

Ardışık ABORE köşe noktaları arasında oluşturulan her bir kenar segmenti boyunca 0,50 m genişliğinde tampon bölge (buffer) oluşturulmuştur. Daha sonra, başlangıçtaki düzensiz bina sınırını oluşturan noktalar arasından bu tampon bölge içerisinde kalan sınır noktaları belirlenmiş ve her bir kenar için nokta yoğunluğu hesaplanmıştır. Proje kapsamında gerçekleştirilen deneysel analizler sonucunda, tüm bina kenarları için hesaplanan yoğunluk değerlerinin kenar geometrisini ayırt etmede etkili bir gösterge olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, yoğunluk değerinin 1'den büyük olduğu kenarlar, doğrusal/ortogonal karaktere sahip olarak sınıflandırılırken; yoğunluk değerinin 1'den küçük olduğu kenarlar ise eğrisel karakterde kabul edilmiştir.

3.2.3. Açı tabanlı kenar tipi belirleme

ABORE yöntemi ile elde edilen ardışık köşe noktaları arasında kalan her bir kenar segmentine ait düzensiz sınır noktaları üzerinde Douglas–Peucker (DP) algoritması (Douglas & Peucker, 1973) uygulanarak kritik (kırılma) noktalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşımın temel mantığı, kenar boyunca meydana gelen geometrik yön değişimlerini analiz ederek ilgili kenarın doğrusal veya eğrisel karakter özelliğini otomatik olarak belirlemektir. Kırılma noktaları ABORE köşe noktaları ile belirli bir açı oluşturmaktadır. Bu yaklaşımda, DP algoritması sonucunda kritik nokta sayısının ≥1 olması durumunda ilgili kenar eğrisel, kritik nokta tespit edilememesi durumunda ise doğrusal olarak sınıflandırılmıştır.

3.2.4. Bézier eğrileri ile bina sınır düzgünleştirmesi

G-ABORE yöntemi kapsamında, doğrusal kenarlar ABORE yöntemi ile elde edilen sınırlar kullanılarak temsil edilirken, eğrisel kenarlar ise Bézier eğrileri ile düzgünleştirilmiştir. Bézier eğrileri, kontrol noktaları arasındaki doğrusal enterpolasyonların ardışık olarak uygulanmasıyla oluşturulan parametrik eğrilerdir. Eğrinin başlangıç ve bitiş noktaları kontrol noktalarıyla tanımlanırken, ara kontrol noktaları eğrinin yönünü ve eğriliğini belirlemektedir. Bu özellik, özellikle dairesel ve serbest biçimli bina kenarlarının geometrisinin başarılı biçimde modellenmesini

sağlamaktadır. Bézier eğrilerinin matematiksel temeli Bernstein polinomlarına dayanmakta, koordinatların hesaplanmasında ise De Casteljau algoritmasından yararlanılmaktadır (Hussain vd., 2014; Baydas ve Karakas, 2019).

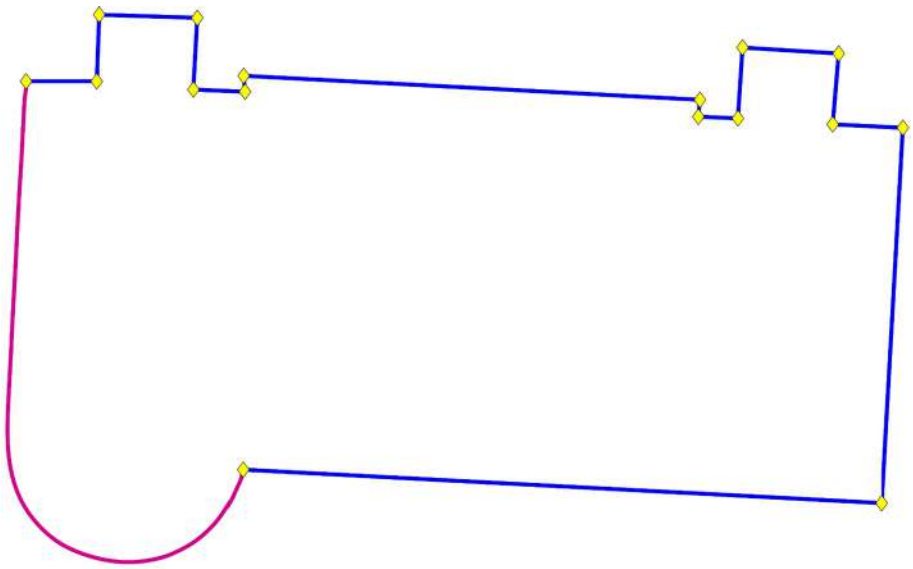
(1), (2) ve (3) numaralı eşitliklerde genel matematiksel formu özetlenmektedir.

$$B(t)=\sum_{i=0}^{n}\binom{n}{i}t^{i}(1-t)^{n-i} \qquad 0\le t\le 1$$

$$Bz(t)=\sum_{i=0}^{n}\binom{n}{i}t^{i}(1-t)^{n-i}P_{i} \qquad 0\le t\le 1$$

$$Bz(t)=(1-t)^{3}P_{1}+3t(1-t)^{2}P_{2}+3t^{2}(1-t)P_{3}+t^{3}P_{4}$$

Denklemlerde yer alan n ifadesi bézier eğrisi için kullanılan kontrol noktalarının sayısını, t parametrik değişkeni [0-1] aralığındaki doğrusal (lineer) enterpolasyon oranını, P_i ise kontrol noktalarını ifade etmektedir. Denklem (1) Bernstein polinomunu, Denklem (2) ve (3) ise De Casteljau algoritması kullanılarak elde edilen bézier eğrisinin genel denklemini temsil etmektedir. Çalışmada eğrisel bina kenarlarının düzgünleştirilmesi amacıyla kullanılan Bézier eğrilerinin oluşturulmasında, ABORE yöntemi ile belirlenen bina köşe noktaları eğrinin başlangıç ve bitiş noktaları olarak tanımlanmıştır. Başlangıç ve bitiş noktaları ile bu iki nokta arasında yer alan düzensiz dağılımlı bina sınır noktaları ise Bézier eğrisinin kontrol noktalarını oluşturmaktadır. Örnek bina üzerinde düzgünleştirilen sınır **Şekil 9**'da paylaşılmaktadır.



Şekil 9. G-ABORE bina sınır düzgünleştirmesi (ABORE + Bézier).

3.3. Doğruluk Analizi

Önerilen düzgünleştirme yönteminin doğruluk analizinde, LiDAR nokta bulutlarından manuel olarak sayısallaştırılan bina sınırları referans veri olarak kabul edilmiştir. Doğruluk değerlendirmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan piksel tabanlı doğruluk ölçütlerinin yanı sıra RMSE ve Polygon Line Segment (PoLiS) ölçütleri ile bu çalışma kapsamında geliştirilen nokta tabanlı doğruluk ölçütlerinden yararlanılmıştır. Tamlık (Cp), Doğruluk (Cr), Birleşim Üzerindeki Kesişim (IoU) ve F-skor (F1) metriklerinin formülleri (4) ile (7) numara arasındaki eşitliklerde; RMSE ve PoLiS metrikleri ise (8) ve (9) numaralı eşitliklerde paylaşılmaktadır.

$$Cp=\frac{TP}{TP+FN}$$

$$Cr=\frac{TP}{TP+FP}$$

$$Q=\frac{TP}{TP+FN+FP}$$

$$F1=\frac{2\times Cp\times Cr}{Cp+Cr}$$

$$RMSE(S_e,S_r)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\min_{a_i\in S_e,b_j\in S_r}\left\|a_i-b_j\right\|\right)^{2}}$$

$$PoLiS: p(A,B) = \frac{1}{2q}\sum_{a_j \in A} \min_{b \in \partial B} \left\| a_j - b \right\| + \frac{1}{2r}\sum_{b_k \in B} \min_{a \in \partial A} \left\| b_k - a \right\|$$

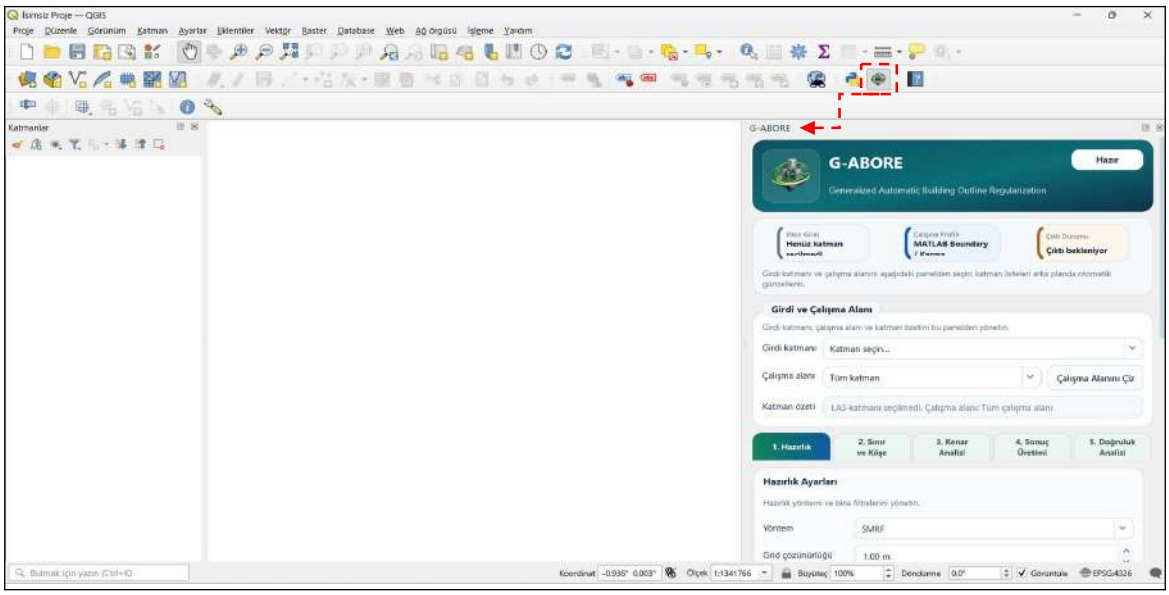
Geliştirilen nokta tabanlı performans değerlendirme metodolojisi sekiz kriterden oluşmaktadır:

- İlgili köşe noktası ile referans köşe noktası arasındaki mesafe kriteri
- Açısal fark kriteri
- Kenar paralellik ve doğrusallık kriteri
- Kenar uzunluğu kriteri
- En uzun doğruya olan mesafe kriteri
- Minimum Bounding Rectangle (MBR) ağırlık merkezine olan mesafe kriteri
- Ağırlık merkezine olan mesafe kriteri
- Alan kriteri

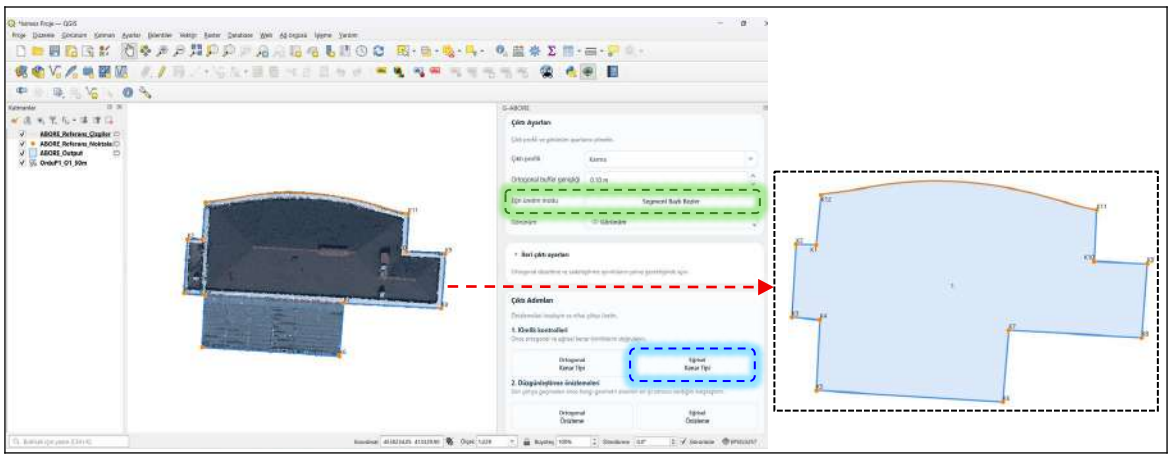
Bu kriterler birlikte değerlendirilerek bina geometrisinin konumsal doğruluğu, yönelim uyumu, şekil korunumu ve boyutsal tutarlılığı çok yönlü olarak incelenmiştir. Böylece algoritmanın yalnızca doğru sonuç üretip üretmediği değil, oluşabilecek geometrik hataların hangi özelliklerden kaynaklandığı da ayrı ayrı belirlenebilmektedir.

3.4. Arayüz Entegrasyonu

G-ABORE algoritmasının kullanıcı arayüzüne dönüştürülmesi ve yaygın kullanıma sunulması amacıyla; açık kaynaklı yapısı, ücretsiz erişim imkânı, geliştirilebilirliği ve nokta bulutları üzerinde detay işlemlerin yapılmasına olanak sağlayan PDAL kütüphanesini desteklemesi nedeniyle QGIS ortamında eklenti (plugin) olarak geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda, başlangıçta MATLAB ile geliştirilen algoritma Python programlama diline aktarılmış ve gerekli algoritmik dönüşüm ve yeniden kodlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Entegrasyon sürecinde QGIS 4.0 (Nörköping) sürümü kullanılmıştır (**Şekil 10-11).**



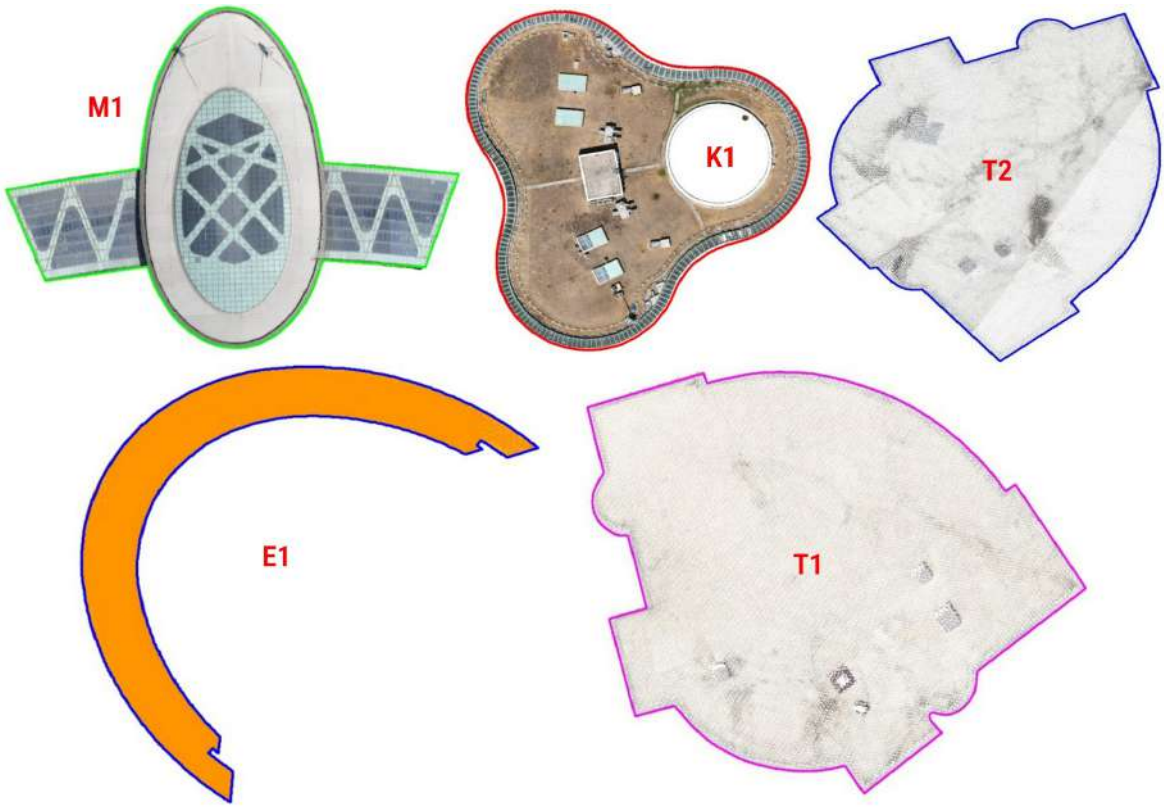
Şekil 10. G-ABORE arayüz entegrasyonu örnek-1.



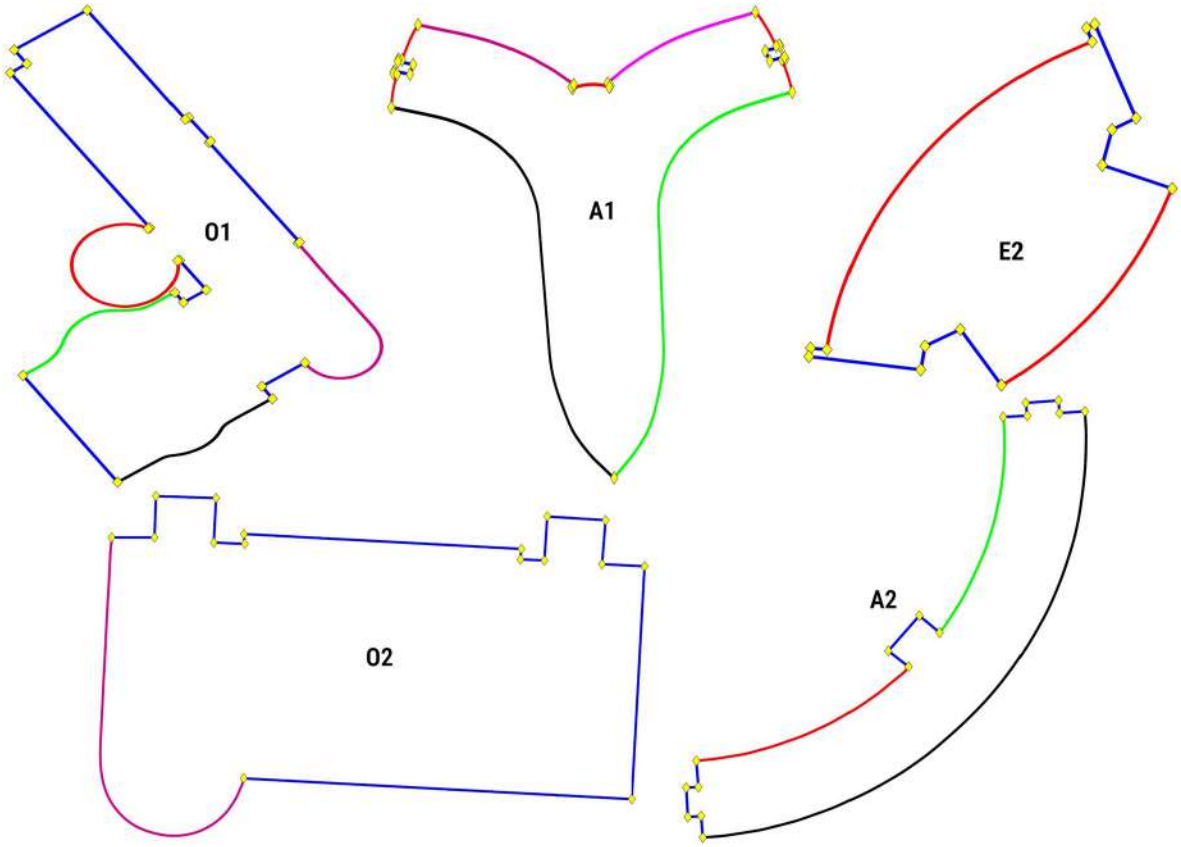
Şekil 11. G-ABORE arayüz entegrasyonu örnek-2.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında G-ABORE yöntemiyle elde edilen düzgünleştirilmiş bina sınırları **Şekil 12 ve 13**'te gösterilmektedir. Önerilen sınır düzgünleştirme performansına ilişkin nicel değerler ise **Çizelge 3 ve 4**'te detaylı bir biçimde paylaşılmaktadır. Görsel olarak incelendiğinde önerilen Bézier eğrisi destekli G-ABORE yönteminin olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 12. G-ABORE sınır düzgünleştirme sonuçları-1.



Şekil 12. G-ABORE sınır düzgünleştirme sonuçları-2.

Çizelge 3. Literatürdeki ölçütlerle bina sınır düzgünleştirme performansı.

Veri Seti			Piksel Bazlı Doğruluk Analizi				Geometrik Doğrulama	
Bina No	**Uçuş İrtifa (m)**	**Nokta Bulutu**	**Cp**	**Cr**	**IoU**	**F-skor**	**PoLiS (m)**	**RMSE (m)**
M1	115	LiDAR	0.999	0.995	0.997	0.994	0.1127	3.9360
M1	115	Fotogrametrik	0.994	0.992	0.993	0.986	0.2131	3.9103
K1	110	LiDAR	0.995	0.988	0.983	0.991	0.2461	0.4841
K1	110	Fotogrametrik	0.997	0.988	0.985	0.993	0.2160	0.4247
A1	90	LiDAR	0.998	0.998	0.997	0.998	0.0645	0.1758
A1	90	Fotogrametrik	0.999	0.996	0.995	0.997	0.0775	0.1765
A2	90	LiDAR	0.999	0.998	0.997	0.999	0.0437	0.1660
A2	90	Fotogrametrik	0.996	0.997	0.994	0.997	0.0568	0.1764
E1	100	LiDAR	0.997	0.975	0.972	0.986	0.2556	0.5449
E1	100	Fotogrametrik	0.995	0.975	0.97	0.985	0.2917	0.5889
E2	100	LiDAR	0.994	0.998	0.992	0.996	0.0334	0.0753
E2	100	Fotogrametrik	0.988	0.993	0.982	0.991	0.0612	0.1061
T1	100	LiDAR	0.999	0.991	0.995	0.99	0.0594	0.0783
T1	100	Fotogrametrik	0.998	0.983	0.99	0.981	0.0833	0.1173
T2	100	LiDAR	1	0.996	0.998	0.996	0.0208	0.0340
T2	100	Fotogrametrik	0.992	0.994	0.993	0.985	0.0528	0.0687
O1	80	LiDAR	0.999	0.997	0.996	0.998	0.1304	0.1339
O1	80	Fotogrametrik	0.999	0.996	0.995	0.998	0.1225	0.1486
O2	80	LiDAR	1	0.996	0.996	0.998	0.2807	0.1294
O2	80	Fotogrametrik	0.999	0.995	0.995	0.997	0.2057	0.1279
Ortalama			**0.997**	**0.992**	**0.991**	**0.993**	**0.1314**	**0.5802**

Literatürde kullanılan piksel tabanlı doğrulama ölçütleri dikkate alındığında, ele alınan 10 binaya ait fotogrametrik ve nokta bulutu verileri üzerinden gerçekleştirilen doğruluk değerlendirmelerde; Cp, Cr, IoU ve F-skor ölçütlerinde genel olarak %99'un üzerinde başarı elde edilmiştir. PoLiS mesafesi, geometrik doğrulama sonucunda yaklaşık 13 cm düzeyinde bir hata bulunduğunu göstermektedir. Nokta bulutu türleri açısından değerlendirildiğinde, genel olarak LiDAR nokta bulutu verilerinin daha düşük hata değerleri ve daha yüksek geometrik doğruluk sunduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. Nokta tabanlı bina sınır düzgünleştirme performansı.

Veri Seti			Nokta Tabanlı Doğrulama Ölçütleri	
Bina No	**Uçuş İrtifa (m)**	**Nokta Bulutu**	**Genel Oran**	**Genel RMSE (m)**
M1	115	LiDAR	99.64	0.071
M1	115	Fotogrametrik	98.84	0.217
K1	110	LiDAR	-	-
K1	110	Fotogrametrik	-	-
A1	90	LiDAR	97.45	0.046
A1	90	Fotogrametrik	96.5	0.092
A2	90	LiDAR	98.83	0.028
A2	90	Fotogrametrik	99.45	0.033
E1	100	LiDAR	93.35	0.381
E1	100	Fotogrametrik	95.4	0.348
E2	100	LiDAR	96.45	0.088
E2	100	Fotogrametrik	97.24	0.122
T1	100	LiDAR	98.35	0.043
T1	100	Fotogrametrik	97.73	0.064
T2	100	LiDAR	98.3	0.033
T2	100	Fotogrametrik	98.2	0.077
O1	80	LiDAR	98.13	0.107
O1	80	Fotogrametrik	95.9	0.072
O2	80	LiDAR	99.37	0.039
O2	80	Fotogrametrik	99.06	0.076
Ortalama			**97.68**	**0.108**

Çizelge 4 incelendiğinde, nokta tabanlı değerlendirme kapsamında geliştirilen sekiz koşulun birlikte ele alınması sonucunda genel başarı oranının %97,68 olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu oran, piksel tabanlı değerlendirmede elde edilen genel doğruluk değerine kıyasla yaklaşık %1,42 daha düşük bir sonuç ortaya koymaktadır. İki değerlendirme yaklaşımı arasındaki bu farklılığın, piksel tabanlı ölçütlerin sınır geometrisindeki küçük ölçekli konumsal sapmaları ve detaylı şekil farklılıklarını yeterli düzeyde yansıtamamasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Buna karşılık, nokta tabanlı değerlendirme koşulları, üretilen bina sınırlarının referans geometriye olan konumsal yakınlığını ve sınır boyunca meydana gelen geometrik sapmaları daha ayrıntılı biçimde incelemeye olanak sağlamaktadır. Nokta tabanlı değerlendirmeler sonucunda elde edilen 10,8 cm genel RMSE değeri, G-ABORE yöntemiyle üretilen bina sınırlarının referans veriye göre düşük düzeyde konumsal hata içerdiğini göstermektedir. Nokta tabanlı ölçütler arasında genel olarak en fazla hata açı kriterinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca yine benzer şekilde genel olarak LiDAR verisi fotogrametrik nokta bulutuna göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4'te yer alan K1 etiketli bina (Küçükçekmece Belediyesi), yalnızca eğrisel bina kenarlarından oluşması nedeniyle nokta tabanlı doğruluk analizine dâhil edilmemiştir. Bununla birlikte, ortogonal ve eğrisel kenarların bir arada bulunduğu, farklı mimari özelliklere sahip dokuz bina, düşük hata değerleri ve yüksek başarı oranlarıyla düzgünleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, G-ABORE yönteminin farklı geometrik özellikler sergileyen karma bina sınırlarının otomatik olarak düzgünleştirilmesindeki uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, bina kenar tiplerinin sınıflandırılması amacıyla önerilen üç farklı yaklaşımdan biri olan mesafe tabanlı kenar tipi belirleme yöntemi, başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Yöntem kapsamında eğrisel olarak sınıflandırılan kenarlar, Bézier eğrileri kullanılarak düzgünleştirilmiş ve referans verilerle yüksek düzeyde geometrik uyum sağlayan bina sınırları elde edilmiştir. Bézier eğrisinin, ABORE yöntemiyle belirlenen köşe noktalarını başlangıç ve bitiş noktaları olarak kullanması, kenar geometrisindeki sürekliliğin korunmasına katkı sağlamıştır. Böylece, eğrisel kenarların düzgünleştirilmesi sırasında bitişik kenarlarla olan geometrik bağlantıların korunması ve bina sınırının bütünlüğünün sürdürülmesi mümkün olmuştur.

Sonuç olarak, nokta bulutu verilerinden elde edilen bina çatı noktalarının oluşturduğu düzensiz başlangıç sınırlarının otomatik olarak düzgünleştirilmesi amacıyla Bézier eğrileri ile desteklenen G-ABORE yöntemi başarılı sonuç vermiştir. Geliştirilen yöntem, literatürde yaygın olarak kullanılan piksel ve geometrik doğruluk ölçütlerinin yanı sıra, bu çalışma kapsamında geliştirilen nokta tabanlı değerlendirme yaklaşımı ile kapsamlı biçimde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yöntemin farklı geometrik özelliklere sahip bina sınırlarının düzgünleştirilmesinde yüksek doğruluk ve düşük hata değerleri sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Geliştirilen algoritmanın kullanıcılar tarafından etkin biçimde uygulanabilmesi amacıyla, QGIS ortamına eklenti olarak entegre edilen yerli ve milli ilk kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Ayrıca geliştirilen arayüze tüm doğruluk değerlendirme yöntemleri entegre edilerek bütüncül bir yapı sağlanmıştır. Geliştirilen çözüm, haritacılık faaliyetlerinde bina sınırlarının hızlı, standart ve yüksek geometrik doğrulukla üretilmesine ve güncellenmesine katkı sağlayarak manuel sayısallaştırma gereksinimini azaltmakta ve detay seviyesi 0 (LoD0) bina verilerinin üretim süreçlerinin daha etkin yürütülmesine olanak tanımaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, bina sınırlarının çıkarılması sürecinin makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleriyle desteklenmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, yalnızca mevcut bina sınırlarının düzgünleştirilmesine odaklanmak yerine, bina sınırlarının nokta bulutu verilerinden otomatik olarak çıkarılması, geometrik özelliklerinin belirlenmesi ve düzgünleştirilmesi süreçlerini bütünleşik bir yapı içerisinde ele alan daha gelişmiş bir yaklaşımın geliştirilmesi planlanmaktadır. Böylece G-ABORE yönteminin otomasyon düzeyinin ve farklı yapı geometrilerine uygulanabilirliğinin artırılması amaçlanmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123Y349 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Albers, B., Kada, M., Wichmann, A. 2016. "Automatic Extraction and Regularization of Building Outlines from Airborne LiDAR Point Clouds". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, *XLI-B3*, 555-560.

Awrangjeb, M., Ravanbakhsh, M., Fraser, C. S. 2010. "Automatic Detection of Residential Buildings Using LiDAR Data and Multispectral Imagery". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, *65*(5), 457-467.

Awrangjeb, M. 2016. "Using Point Cloud Data to Identify, Trace, and Regularize The Outlines of Buildings". International Journal of Remote Sensing, *37*(3), 551-579.

Baydas, S., & Karakas, B. 2019. Defining a curve as a Bezier curve. *Journal of Taibah University for Science*, *13*(1), 522-528.

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A. 2015, Aralık 1. "Applications of 3D city models: State of the art review". ISPRS International Journal of Geo-Information. MDPI AG.

Chen, R., Li, X., Li, J. 2018. "Object-Based Features for House Detection from RGB High-Resolution Images". Remote Sensing, *10*(3), 451.

dos Santos, R. C., Galo, M., Habib, A. F. 2020. "Regularization of Building Roof Boundaries from Airborne LiDAR Data Using an Iterative CD-Spline". Remote Sensing, *12*(12), 1904.

dos Santos, R. C., Habib, A. F., Galo, M. 2022. "Weighted Iterative CD-Spline for Mitigating Occlusion Effects on Building Boundary Regularization Using Airborne LiDAR Data". Sensors, *22*(17), 6440.

dos Santos, R. C., Habib, A. F., & Galo, M. 2025. Improved iterative CD-spline approach for building boundary regularization using airborne lidar data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *18*, 15887-15899.

Douglas, D. H., Peucker, T. K. 1973. Algorithms for The Reduction of The Number of Points Required to Represent A Digitized Line or its Caricature. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, *10*(2), 112-122.

Ďuračiová, R., Ič, T., Kotleba, T., & Yakshin, N. 2026. "Extraction and regularization of building footprints from classified LiDAR data: Easily accessible tools for their implementation and evaluation". *Applied Geomatics*, 18, 85. https://doi.org/10.1007/s12518-026-00731-0.

Ester, M., Kriegel, H., Sander, J., & Xu, X. 1996. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". Knowledge Discovery and Data Mining, 226-231.

Feng, M., Zhang, T., Li, S., Jin, G., Xia, Y. 2020. "An improved minimum bounding rectangle algorithm for regularized building boundary extraction from aerial LiDAR point clouds with partial occlusions". International Journal of Remote Sensing, *41*(1), 300-319.

Hussain, M. Z., Hussain, M., Waseem, A. 2014. "Shape-Preserving Trigonometric Functions". Computational and Applied Mathematics, *33*(2), 411-431.

Jung, J., Jwa, Y., Sohn, G. 2017. "Implicit Regularization for Reconstructing 3D Building Rooftop Models Using Airborne LiDAR Data". Sensors, *17*(3), 621.

Karsli, B., Yilmazturk, F., Bahadir, M., Karsli, F., & Ozdemir, E. 2024. Automatic building footprint extraction from photogrammetric and LiDAR point clouds using a novel improved-Octree approach. *Journal of Building Engineering*, *82*, 108281.

Karsli, F., Ozdemir, E., & Bahadir, M. 2025. G-ABORE: regularizing complex geometry building boundaries from pre-processed building LiDAR points using Bézier curve. *Earth Science Informatics*, *18*(4), 513.

Lai, X., Yang, J., Li, Y., Wang, M. 2019. "A Building Extraction Approach Based on the Fusion of LiDAR Point Cloud and Elevation Map Texture Features". Remote Sensing, *11*(14), 1636.

Ozdemir, E., Karsli, F., Kavzoglu, T., Bahadir, M., Yagmahan, A. 2022. "A Novel Algorithm for Regularization of Building Footprints Using Raw LiDAR Point Clouds". Geocarto International, 37(25), 7358-7380.

Vosselman, G. 2002. "Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction". IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 85-88.

MALATYA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ KENT BİLGİ SİSTEMİ YENİDEN YAPILANDIRMA SÜRECİ

İnan DOĞAN [1], Halil İbrahim İNAN [2],

[1] Harita Yüksek Mühendisi, Malatya Büyükşehir Belediyesi, CBS Şube Müdürlüğü, 44070, Yeşilyurt, Malatya, dgninan@gmail.com
[2] Doç. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 29100, Bağlarbaşı, Gümüşhane, hibrahim77@hotmail.com

ÖZET

Belediyeler kentsel alanların yönetiminde kurum içi ve kurumlar arası idari işler, acil durum ve afet yönetimi, güvenlik, akıllı şehirler vb. ihtiyaçlar bağlamında gelişmiş CBS çözümlerine giderek daha fazla ihtiyaç duymakta ve başvurmaktadır. Ancak bu sistemlerin yaşatılması ve ulusal sistemlere (TUCBS, MAKS, TAKBİS, MEGSİS) bütünleşik olarak çalışabilmesi için belirli teknik ve idari standartlara uygun olarak geliştirilmesi ve işletilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ile Malatya Büyükşehir Belediyesi bünyesinde büyükşehir statüsü öncesinde Kent Bilgi Sistemi (KBS) ve sonrasında afet döneminde Bulut KBS (BKBS) tecrübelerinin de katkısıyla önemli bir girişim olarak başlanılan KBS yeniden yapılanma süreci ele alınmaktadır.

Sistem kurulum metodoloji altı aşamada yapılandırılmıştır: (1) kurumsal CBS/KBS mimarisinin ve modül geliştirme sürecinin belgelenmesi; (2) birim bazlı ihtiyaç analizi, ER diyagramı hazırlama ve ilişkisel veri tabanı tasarımı; (3) MAKS, TKGM ve TUCBS servislerinin değişenler servisi ile entegrasyon testleri; (4) birimlere ait mevcut verilerin format ve standart çeşitliliğinin analizi ile veri dönüşüm süreçlerinin belgelenmesi; (5) CBS Master Planı ve yönetmelik çerçevesinin tasarlanması; (6) kurumsal CBS verilerinin WMS/WFS aracılığıyla BKBS'ye aktarılmasına yönelik servis tabanlı entegrasyon modelinin geliştirilmesi. Bu çalışma kapsamında ilk dört bileşenin uygulanması esnasında elde edilen bulgular sunulmuş ve tartışılmıştır. Öneriler ise son iki aşamada planlanan süreçlere dayandırılmıştır.

Sistemin tüm bileşenlerinin aynı anda kurulup işletilmesi mümkün olamayacağından afet yönetiminin en temel bileşeni olarak Adres Bilgi Sistemi ve MAKS bütünleştirmesi üzerinde çalışılmış, eski ve afet sonrası durumu temsil eden sistem büyük ölçüde tamamlanmıştır. İmar Bilgi Sistemi ise yine afet yönetimi kapsamında ikinci öncelikli ana bileşen olarak tasarlanmış ve yaklaşık yarı oranında tamamlanmıştır. Merkezi CBS Yazılımı modülleri olarak bu iki temel modül dışında ihtiyaç analizi neticesinde önem sırasına göre Emlak ve İstimlak, Ulaşım, KUDEB, Tarımsal Hizmetler, Afet birimleri için modül geliştirme işlemleri tamamlanmıştır. Halen Park ve Bahçeler, Çevre Koruma ve Kontrol, Muhtarlık Hizmetleri, Yol Bakım Onarım (Altyapı), Mezarlık, Kentsel Dönüşüm birimleri için modül geliştirme süreçleri devam etmekte olup henüz çalışma takvimine bağlanmayan modüller söz konusudur. Modül geliştirme süreçlerinde mevcut verilerin veri dönüşümü ve sağlıklaştırma süreçleri en fazla emek ve zaman gerektiren husus olmaktadır. Bu nedenle, sistem metodolojisi beşinci aşaması kapsamında, sistemin güncellenerek yaşatılması ve konumsal veri sürdürülebilirliği açısından idari kuralların belirlenmesine özel önem verilmektedir. Bu kapsamda CBS Master Planı, ilgili yönetmelikler ve CBS Kurulu oluşturma konularında çalışmalar devam etmektedir. Tüm bileşenleri çalışır hale gelmesi ve idari kanalların işlerliğinin sağlanması sonrasında bu sistemin BKBS ile otomatik entegrasyon planı ise ülkemizde içerik açısından ilişikli sistemlerin ayrıklığı problemine çare olma potansiyeline sahiptir.

Anahtar Sözcükler: Bulut Kent Bilgi Sistemi (BKBS), CBS Master Planı, Konumsal Veri Sürdürülebilirliği, CBS Kurulu, Servis Tabanlı Entegrasyon.

ABSTRACT

MALATYA METROPOLITAN MUNICIPALITY URBAN INFORMATION SYSTEM RESTRUCTURING PROCESS

Municipalities increasingly require and implement advanced GIS solutions within the context of intra-institutional and inter-institutional administrative affairs, emergency and disaster management, security, and smart cities in the management of urban areas. However, for these systems to be sustained and to operate integratedly with national systems (TUCBS, MAKS, TAKBİS, MEGSİS), they must be developed and operated in compliance with specific technical and administrative standards. This study addresses the GIS restructuring process initiated within Malatya Metropolitan Municipality as a significant enterprise, built upon the experiences of the Urban Information System (UIS) prior to metropolitan status and subsequently the Cloud UIS (CUIS) during the disaster period.

The system installation methodology is structured into six phases: (1) documentation of the institutional GIS/UIS architecture and the module development process; (2) unit-based requirements analysis, ER diagram preparation, and relational database design; (3) integration tests of MAKS, TKGM, and TUCBS services with the changelog service; (4) analysis of the format and standard diversity of the units' existing data and documentation of data transformation processes; (5) designing the GIS Master Plan and regulatory framework; (6) development of a service-based integration model for transferring institutional GIS data to CUIS via WMS/WFS. Within the scope of this study, findings obtained during the implementation of the first four components are presented and discussed. Recommendations are based on the processes planned in the final two phases.

As it is not possible to install and operate all components of the system simultaneously, the Address Information System and MAKS integration have been studied as the most fundamental component of disaster management, and the system representing the former and post-disaster situation has been largely completed. The Zoning Information System was also designed as the second priority main component within the scope of disaster management and is approximately half completed. Apart from these two core modules, as Central GIS Software modules, module development processes have been completed for Real Estate and Expropriation, Transportation, KUDEB (Supervision of Cultural Assets), Agricultural Services, and Disaster units according to the order of importance resulting from the requirements analysis. Module development processes are currently ongoing for Parks and Gardens, Environmental Protection and Control, Headmen (Muhtar) Services, Road Maintenance and Repair (Infrastructure), Cemetery, and Urban Transformation units, whilst there are modules not yet scheduled in the work programme. In module development processes, data transformation and data scrubbing/cleansing processes of existing data constitute the issue that requires the most effort and time. Therefore, within the scope of the fifth phase of the system methodology, special importance is attached to determining administrative rules in terms of updating and sustaining the system and geospatial data sustainability. In this context, studies on the GIS Master Plan, relevant regulations, and the establishment of a GIS Board are continuing. The automatic integration plan of this system with CUIS, after all its components become operational and administrative channels are functional, has the potential to provide a solution to the problem of the segregation of related systems in terms of content in our country.

Keywords: : Cloud-based Urban Information System (CUIS), GIS Master Plan, Geospatial Data Sustainability, GIS Board, Service-Oriented Integration

1. GİRİŞ

Belediyeler kentsel alanların yönetiminde kurum içi ve kurumlar arası idari işler, acil durum ve afet yönetimi, güvenlik, akıllı şehirler vb. ihtiyaçlar bağlamında gelişmiş CBS/KBS çözümlerine giderek daha fazla ihtiyaç duymakta ve başvurmaktadır (Yomralıoğlu, 2009; Çabuk, 2015; Başar, 2016; Badem, 2017). Ancak bu süreç tek bir platform üzerinden değil; adres yönetimi, imar planlama, ulaşım ve altyapı gibi farklı alanlarda uzmanlaşmış birden çok yazılım bileşeninin eş zamanlı işletilmesi biçiminde şekillenmektedir. Bir başka değişle günümüzde kent yönetimi odaklı CBS yazılımları geniş bir yelpazede uzmanlaşmakta; kimi adres, kimi imar, kimi ulaşım, kimi altyapı odaklı çalışmaktadır. Bu çeşitlilik belediyeler için hem esneklik hem de koordinasyon güçlüğü anlamına gelmektedir (Kavas, 2025). Öte yandan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından geliştirilen Bulut Kent Bilgi Sistemi (BKBS), belediyelere Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) standartlarına uyumlu (ÇŞİDB, 2022) merkezi bir konumsal veri yönetim platformu sunmaktadır (Bayar vd., 2022; Kısa vd., 2025). Ancak yazılım ve donanım altyapısı açısından avantajlar sunmasına (Batur, 2026) karşın, özellikle veri yoğunluğu açısından büyük sayılabilecek kentlerde belediye sistemlerinden düzenli veri beslemesi sağlanamadığında BKBS'nin zamanla güncelliğini yitirerek yerel Kent Bilgi Sistemi (KBS) uygulamalarından farksız olarak pasif bir depoya dönüşme riski bulunmaktadır. Bu durum, veri güncelliği ve sürdürülebilirliği sorununu salt teknik bir mesele olmaktan çıkarıp kurumsal bir yönetim sorunu olarak öne çıkarmaktadır. Daha önce büyükşehir statüsü kazanmadan önce (2014 yılı öncesi) yerelde bu deneyimi kurulan KBS'nin yaşatılamayarak pasif hale gelmesi şeklinde yaşayan Malatya şehri, özellikle afet dönemi sonrasındaki kente özel verilerin yönetiminde BKBS altyapısının sağladığı harita altlığı, paylaşılan ortak veri servisleri ve yazılım altyapısı bağlamında da tecrübe etmiştir. Bu tecrübe kapsamında Malatya Büyükşehir Belediyesi BKBS özelleştirmeleriyle (dinamik formlar) güncel kentsel sorunları yönetmeyi denemiştir (Doğan, 2025). Ancak yerel yönetimlerde BKBS'nin diğer yerel sistemlerle tam manasıyla bütünleşik (interoperable) olmaksızın tek başına çözüm olamayacağı gerçeğinin (CBSGM, 2020; Bayraktar vd., 2022) bir sonucu olarak bu girişimin de tam anlamıyla bir çözüm olamayacağı anlaşılmıştır. Günümüzde KBS anlayışından akıllı kent yönetimine evrilme sürecinde olan bu sistemler için gelişmiş dinamik veri modeli, veri kalitesi yönetimi, güncelleme prosedürleri, kullanıcı yetkilendirmeleri ve yapay zekâ kullanımı başta olmak üzere birçok teknik ve yönetsel bileşenin birlikte çalışabilirlik ilkeleriyle bütünleşik olarak işletilmesi çok önemli hale gelmiştir (McKenna, 2025; Alashi ve Ertekin, 2026; Vasconcelos Filho, 2026; Zanker, 2026). Gelecek vaat eden sistemler geliştirme vizyonu gereği olarak hangi gelişmişlik düzeyinde olursa olsun KBS'lerin temel teknik ve idari ilkelere uyum sağlaması önemli hale gelmiştir.

Malatya Büyükşehir Belediyesi bu temel soruna teknik ve yönetsel boyutlarıyla birlikte çözüm üretmek amacıyla 2026 yılı itibariyle açık kaynak kodlu kurumsal CBS/KBS'yi merkeze alan, imar bilgi sistemi ve adres bilgi sistemi ile desteklenen çok bileşenli bir mimari kurmaktadır. Veri dönüşümü/sağlıklaştırma, veri güncelliğinin sağlanması ve sürdürülebilirliği açısından çalışmanın idari hedefi bir CBS/KBS Master Planı hazırlanması, tüm birimlerin (büyükşehir daire başkanlıkları) veri girişini zorunlu ve işlevsel kılan bir yönetmeliğin çıkarılması ve tüm ilçe belediyelerini de kapsayan bir CBS/KBS Kurulu oluşturulmasıdır.

Bu çalışma; Malatya Büyükşehir Belediyesi'nin bu amaçla kurmakta olduğu kurumsal CBS mimarisini, bu mimari içindeki veri dönüşüm güçlüklerini ve konumsal veri sürdürülebilirliğinin teknik ile yönetsel boyutlarıyla birlikte nasıl sağlanabileceğine ilişkin geliştirilen modeli ele almaktadır. Bu mimaride tüm belediye birimleri için tasarım aşamasında ER diyagramı temelli ilişkisel veri modeline dayanan modüller geliştirilmektedir. Bu tasarım bağımlı olunan dış kurum verileri ile bütünleşme açısından Mekânsal Adres Kayıt Sistemi (MAKS), Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Mekânsal Gayrimenkul Sistemi (MEGSİS) ve TUCBS servisleri üzerinden değişenler servisi ile

günlük olarak güncellenme esasına dayandırılmaktadır. Yerel veri yönetimi açısından, birimlerden ve ilçe belediyelerinden gelen verilerin farklı format ve standartlarda bulunması nedeniyle gerekli veri dönüşüm ve sağlıklaştırma süreçlerinin ciddi iş yüküne yol açması en büyük dar boğaz olarak görülmektedir. Bu kapsamda veri güncelliği ve sürdürülebilirliğinin kalıcı olarak sağlanabilmesi için teknik çözümlerin yanında yönetsel mekanizmaların da devreye alınması zorunlu hale gelmektedir.

Çalışma, Malatya Büyükşehir Belediyesi'nde yürütülen kurumsal CBS/KBS, modül geliştirme, servis entegrasyonu ve BKBS aktarım süreçlerine dayanmaktadır. Belediyenin konumsal veri ekosistemi; açık kaynak kodlu kurumsal CBS (merkez bileşen), özel geliştirilmiş imar bilgi sistemi ve adres bilgi sistemi olmak üzere üç ana yazılım bileşeninden oluşmaktadır. Çalışmanın nihai teknik hedefi ise, kurumsal KBS'de ISO 19115 Metaveri (ISO, 2014) ve ISO 19157 Veri Kalitesi (ISO, 2013) temel standartları çerçevesinde standartlaştırılan verilerin web servisleri aracılığıyla BKBS'ye aktarılarak her iki platformun güncel ve aktif kalmasını sağlayan bütünleşik bir veri yönetimi modeli ortaya koymaktır. Bu bakımdan ülke genelinde BKBS ve yerel KBS'lerin ilişkisiz uygulamalar olması biçimindeki yanlış pratik uygulamanın ortadan kaldırılmasına öncülük edilebilecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Malatya Büyükşehir Belediyesi, 2014 yılında büyükşehir statüsü kazanmıştır. Bu tarihten önce il belediyesi olduğu dönemde, günün teknik imkanları ve teknolojisine uygun nitelikli bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kurulmuş; sahadan veriler toplanarak düzenli bir numarataj altyapısı oluşturulmuştur. Ancak söz konusu yapı, zaman içinde veri girişi yapılamaması ve güncelliğini yitirmesi sebebiyle işlevselliğini kaybetmiştir. Yine de bu veriler tasarlanan yeni sistem için bir başlangıç noktası olmuştur.

Büyükşehir statüsüyle birlikte tüm il sınırlarının mücavir alan kapsamına girmesi, mekânsal veriye olan ihtiyacı yeniden artırmıştır. Ancak kent merkezi dışındaki alanlarda numarataj çalışması yapılamamıştır. İçişleri Bakanlığı tarafından yürütülen MAKS Projesi sayesinde, il genelinde sağlıklı bir numarataj altyapısına kavuşulmuştur. 6 Şubat depremlerinin ardından yürütülen hasar tespiti, hak sahipliği ve yapı teslimi gibi süreçlerde ise il genelinde yoğun bir numarataj çalışması gerçekleştirilmiştir.

Yeniden imar ve ihya çalışmalarının sürdüğü kentte, kurumsal ve kapsamlı bir CBS'nin kurulması kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak CBS'nin temelini oluşturan adres verisi MAKS entegrasyonu ile sağlıklı ve işler bir yapıya kavuşturulmuştur. Web servisleri aracılığıyla adres verisinin CBS yazılımını anlık olarak beslediği Adres Bilgi Sistemi kurulmuştur (Şekil 1).

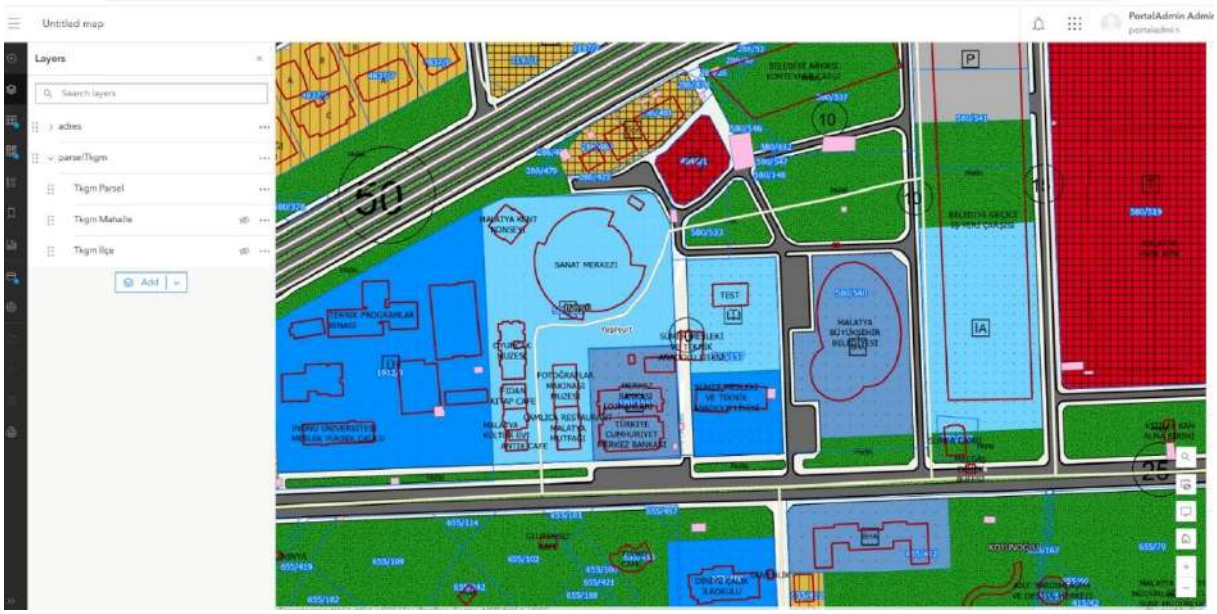
Bu sistem;

- Kurum içi işleyişi, resmi yazışmaları ve teknik çizim süreçlerini hızlandırmış,
- Vatandaşa açık rehber modülü sayesinde vatandaşların adres bilgilerine kolayca erişebildiği ekranlar sunmuştur.

Sürecin devamında MAKS ile entegre biçimde toplu yapı çizimi, otomatik adres formu üretimi ve matbu resmi yazışma süreçleri gibi geliştirmeler hayata geçirilmiştir. İl genelinde numarataj yetkisinin yalnızca Büyükşehir Belediyesinde olması nedeniyle, ilçe belediyelerinin online ortamda koordinatlı çizim yapabileceği ve numarataj talebi oluşturabileceği altyapı da faaliyete geçme aşamasına gelmiştir. Ayrıca sahadaki levhalama süreçlerini yöneten bir modül sisteme dâhil edilmiş; onaylanan verilerin anlık olarak MAKS'a işlenmesi sağlanmıştır. CBS'nin bir diğer temel bileşeni olan parsel verileri ise güncellenen web servisleri aracılığıyla günlük olarak sistemde yönetilmektedir.



Şekil 1. Battalgazi ilçesi, Yeni Hamam Mahallesi uydu görüntüsü altlığı üzerinde adres bilgi sistemi örneği (ilçe, mahalle, yol/sokak, parsel, yapı, kapı no)



Şekil 2. Yeşilyurt ilçesi, İnönü Mahallesi imar bilgi sistemi örneği

Diğer yandan kent yönetiminde en önemli unsur olan imar planlarının CBS'ye güncel olarak işlenmesi amacıyla yeni bir yazılım yatırımı yapılmıştır. Mevcut imar planlarının taranması ve çizimlerinin sisteme aktarılması süreci devam etmektedir. Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği kapsamında belirlenen sembolojilerin birçok yazılımda sağlanamaması nedeniyle tercih edilen bu İmar Bilgi Sistemi ile;

- Tüm planların en güncel halleri harita üzerinde görüntülenebilmekte (
-),
- Planlara ait meclis kararları, komisyon kararları ve yargı süreçleri gibi bilgi ve belgelere doğrudan erişilebilmektedir.

CBS'nin merkezine ise modüler yapıda tasarlanabilen, veri tabanı kurulumuna imkan tanıyan ve katman/semboloji yönetimini özelleştiren kurumsal bir CBS yazılımı yerleştirilmiştir. Bu sayede hazırlanan haritalar web ortamında kolayca yayınlanabilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Kurumsal CBS modülü arayüzünde taksi duraklarına ait kümeleme haritası

Çalışma metodolojisi, Malatya Büyükşehir Belediyesi bünyesinde yürütülen kurumsal CBS alım, modül geliştirme, servis entegrasyonu ve Bulut Kent Bilgi Sistemi (BKBS) aktarım süreçlerine dayanmaktadır. Belediyenin veri yönetimi ekosistemi; açık kaynak kodlu kurumsal CBS (merkez bileşen), özel geliştirilmiş imar bilgi sistemi ve adres bilgi sistemi olmak üzere üç ana yazılım bileşeninden oluşmaktadır. Çalışmanın metodolojik çerçevesi 6 ana aşamada kurgulanmış olup, her metodolojik adım doğrudan karşılık geldiği somut materyaller ve veri kaynakları üzerinden yürütülmüştür.

Metodolojide yer alan 6 ana aşama Şekil 4'de şematik olarak verilmiş ve bu aşamalarda doğrudan kullanılan materyaller şu şekilde eşleştirilmiştir:

- **Aşama 1: Kurumsal CBS Mimarisinin Mimarisi ve Modül Geliştirilmesi:**

Materyaller: PostgreSQL / PostGIS nesne-ilişkisel veri tabanı sunucusu, Geoserver WMS/WFS harita sunucusu, QGIS masaüstü CBS yazılımı, açık kaynak kodlu web CBS çekirdek yazılımı, ESRI ArcGIS Pro, özel geliştirilmiş İmar Bilgi Sistemi ve Adres Bilgi Sistemi web/mobil modülleri.

- **Aşama 2: Birim Bazlı İhtiyaç Analizi, ER Diyagramı ve Veri Tabanı Tasarımı:**

Materyaller: 12 Daire Başkanlığı ile yapılan toplantı ve diğer 15 daire başkanlığı ile yapılan resmi yazışmalar, 77 coğrafi katmana ait veri sözlükleri, veri tabanı yönetim arayüzü, ER diyagramı tasarım materyalleri.

- **Aşama 3: Dış Kurum Servis Entegrasyonları:**

Materyaller: NVİ MAKS (Mekânsal Adres Kayıt Sistemi) REST/SOAP web servisleri, TKGM MEGSİS/TAKBİS WFS ve Değişenler Servisi (Change-Detection API), ÇŞİDB TUCBS WFS/WMS coğrafi servisleri, diğer kuruluşlardan alınan web servisler (Türk Telekom ve MASKİ),

- **Aşama 4: Mevcut Veri Analizi, Dönüşümü ve Sağlıklaştırma:**

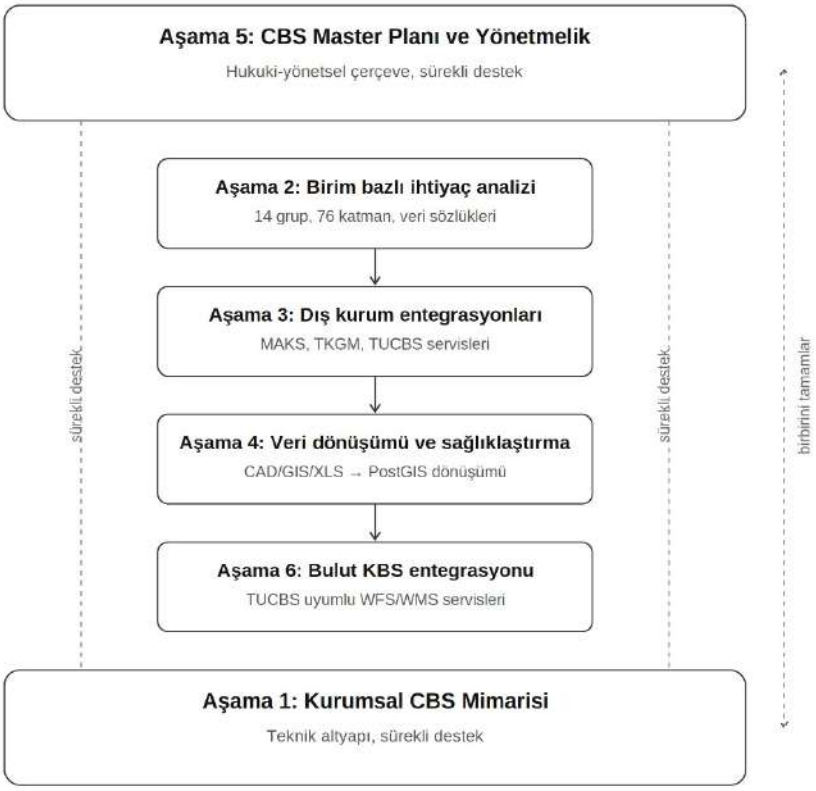
Materyaller: Birimlerden derlenen CAD (.dwg, .dxf, .ncz), Vektör/GIS (.shp, .kml, .geojson), Sözel/Tabüler (.xls, .xlsx, .csv) veriler ve taranmış pafta/belgeler (.pdf, .tiff), GDAL/OGR veri dönüşüm kütüphaneleri, TUREF/TM39 (EPSG:55257) koordinat sistemi.

- **Aşama 5: CBS Master Planı ve Yönetmelik Çerçevesinin Tasarlanması:**

Materyaller: 5393 Sayılı Belediye Kanunu, 5216 Sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu, 3194 Sayılı İmar Kanunu, 7269 Sayılı Afet Kanunu, 6306 Sayılı Afet Dönüşüm Kanunu, 49 Nolu CBS Kararnamesi, TUCBS Yönetmelikleri ve hazırlanan CBS Yönlendirme Kurulu Yönetmelik/Yönerge taslakları.

- **Aşama 6: BKBS Entegrasyon Modelinin Geliştirilmesi:**

Materyaller: ÇŞİDB Bulut KBS Web Servis Entegrasyon Dokümanları, REST/OGC WFS otomatik aktarım betikleri (Python/SQL) ve veri şema eşleme tablosu.



Şekil 4. Metodolojik İş Akış Diyagramı

Malatya Büyükşehir Belediyesi'nde benimsenen merkez-uydu mimarisi, açık kaynak kodlu kurumsal CBS'yi odak noktasına almıştır. Metodolojide belirtilen 1. Aşama kapsamında kurgulanan yazılım ve donanım etkileşim şeması Şekil 5'de sunulmuştur. CBS mimarisinde açık kaynak kodlu yazılım tercihinin temel gerekçesi; veritabanına doğrudan erişim imkânı ve herhangi bir firmaya bağlı kalmaksızın farklı birimlerden gelen taleplere göre özel modüller geliştirilebilmesidir. Yine de kurulum aşamasında açık kaynak kodlu altyapı ile geliştirilmiş ticari yazılımlar da kullanılmaktadır. Bazı uygulamalar kapsamında (İmar Bilgi Sitemi) diğer ticari yazılımlardan da (ESRI ürünleri) faydalanılmaktadır.



Şekil 5. Yazılım ve Donanım Etkileşim Şeması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Malatya Büyükşehir Belediyesi kent bilgi sisteminin yeniden yapılandırılması kapsamında belirlenen altı adet metodoloji bileşeninden ilk dördü olan Kurumsal CBS Mimarisi, Birim Bazlı İhtiyaç Analizi, Dış Kurum Entegrasyonları ve Veri Dönüşüm ve Sağlıklaştırma alanlarında çalışmalar devam etmekte olup elde edilen tecrübe ve geçici bulgular aşağıda alt başlıklar halinde paylaşılmıştır.

Somut sonuçların elde edilerek servis performanslarının değerlendirilmesi büyük ölçüde idari önlemlere bağlı olup beşinci aşama olan CBS master planı ve yönetmeliğinin yürürlüğe girip belirli süre test edilmesine bağlı olarak elde edilebilecektir.

3.1. Kurumsal CBS Mimarisi (Merkez-Uydu Modeli) Çalışma Durumu

Metodolojide hedeflenen kurumsal CBS kurulum adımları ve bu adımların mevcut uygulama durumları Çizelge 1'de detaylandırılmıştır. Merkez Kurumsal CBS kapsamında halihazırda Emlak ve İstimlak, Ulaşım, KUDEB, Tarımsal Hizmetler, Afet birimleri (daire başkanlıkları) için modül geliştirme işlemleri tamamlanmış olup, öngörülen iş yüküne oranla yaklaşık %35 ilerleme kaydedildiği tahmin edilmektedir. Modül geliştirme açısından acil ihtiyaçlar dikkate alınmak suretiyle öncelikler belirlenmektedir. Halen Park ve Bahçeler, Çevre Koruma ve Kontrol, Muhtarlık Hizmetleri, Yol Bakım Onarım (Altyapı), Mezarlık, Kentsel Dönüşüm birimleri için modül geliştirme işlemleri devam etmektedir. Diğer birimler için ihtiyaç analizi devam etmekte olup henüz kesin bir çalışma takvim belirlenmemiştir.

Ana bileşenlerden birisi olan İmar Bilgi Sistemi kapsamında nazım imar planları ve uygulama imar planlarının tarama ve georeferanslama işlemleri tamamlanmış olup, tüm katmanların akıllandırma (geometri ve öznitelik) işlemleri devam etmektedir. Şehrin maruz kaldığı afet ve veri kalitesi problemleri nedeniyle parsel bazlı manuel uyumlaştırma işlemleri yapılmaktadır. Bu nedenle ancak yaklaşık %60 tamamlanma oranına ulaşılabilmiştir.

Yine ana ve en önemli bileşenlerden birisi olan Adres Bilgi Sistemi hem eski ve hem de afet sonrası yeniden inşa kapsamındaki yapılanmayı kapsamaktadır. Bir başka değişle hem eski adresler ve hem de yeni adresler bu sistem kapsamında yönetilmektedir. MAKS entegrasyonu tümüyle tamamlanmış olmasına karşın yine de sürekli gelişime bağlı olarak sürekli güncellenen sistemde tamamlanma oranı yaklaşık %95 seviyesindedir. Adres bilgi sistemi olmadan diğer sistemlerin yaşaması mümkün olmayacağından en öncelikli sistem olduğu söylenebilir.

Dinamik veri entegrasyonu için WMS yanında WFS servisleri sunan TKGM ve MAKS servisleri ile entegrasyon tamamlanmıştır. Elektrik ve Doğalgaz altyapısı ile ilgili servisler ancak WMS olarak altlık oluşturacak şekilde temin edilebilmiştir. İhtiyaç duyulan dış kaynaklı servislerden doğrudan entegrasyon ile ihtiyacın karşılanması yaklaşık %45 seviyesindedir. WFS olarak temin edilemeyen verilerin sayısallaştırılması, harici kaynaklardan elde edilmesi ve akıllandırılması çalışmaları devam etmektedir.

Bulut KBS entegrasyonu ise sistemlerin tümüyle tamamlanıp işletme sürecine geçildiği aşama için planlanmaktadır. Bu kapsamda temel altlıkların WMS, etkileşim gerektiren verilerin ise WFS olarak sunulması planlanmaktadır.

Çizelge 1. Malatya Büyükşehir Belediyesi Kurumsal CBS Mimarisi Bileşenlerinin Mevcut Durum Analizi

Bileşen/İş Adımı	İşlev/Kapsam	Entegrasyon/ Veri Kaynağı	Durum/ Tamamlanma	Bulgular, Mevcut Aksaklıklar ve Gelecek Eylemler
Açık Kaynak Kurumsal CBS (Merkez)	Tüm birimlere modül geliştirme, yetkilendirme, veri görüntüleme	PostGIS, QGIS, Geoserver altyapısı	%35 Tamamlandı	Beş adet birim için modül geliştirme ve rollerin tanımlanması işlemleri tanımlanmıştır. Sınırsız esnek öznitelik için alanlar kurgulanmıştır. Diğer birimler için çalışmalar devam etmektedir.
İmar Bilgi Sistemi	İmar paftaları, mahkeme/komisyon/meclis kararları, imar durum belgesi	CAD çizimleri, Tarama (PDF), Sözel İmar verisi	%60 Tamamlandı	Eski paftaların raster georeferanslama işlemleri bitirilmiştir. Sayısallaştırma işlemleri devam etmektedir. Parsel bazlı imar hakkı sorgulamasında kadastro-imar kaymaları nedeniyle manuel düzeltme gerekmiştir.
Adres Bilgi Sistemi	Saha levha yönetimi, adres tespit, kapı no ve yol ortahat güncelleme	MAKS web servisi, TKGM parsel verisi	%95 Tamamlandı	MAKS ile çift yönlü veri eşitlenmesi tam duruma getirilmiştir.
Dış Kurum Servisleri	Güncel konumsal verinin otomatik çekilmesi	WMS/WFS, Değişenler Servisi	%45 Tamamlandı	TKGM, MAKS ve su kanalizasyon idaresinin servisleri sorunsuz çalışmaktadır. Ancak altyapı kurumlarının (elektrik, doğalgaz) WFS yerine statik CAD teslim etmesi entegrasyonu zorlaştırmaktadır. Bazı altyapı kuruluşları ise WMS veri vermektedir.
Bulut KBS (BKBS) Entegrasyonu	Merkezi konumsal veri paylaşımı, izleme ve bakanlık entegrasyonu	Kurumsal CBS'den WMS/WFS aktarımı	Planlanıyor	Veri modelleri TUCBS standartlarına dönüştürülerek. Geoserver üzerinden yayınlanan WFS servislerinin BKBS arayüzüne otomatik haritalanması planlanmaktadır.

3.2. Birim Bazlı İhtiyaç Analizi ve Kurumsal Veri Katmanları Envanteri

Kurumsal CBS dönüşüm sürecinde metodolojinin 2. ve 4. aşamaları kapsamında yürütülen saha analizleri ile tüm daire başkanlıklarının mevcut veri envanterleri çıkartılmış ve ihtiyaç analizleri gerçekleştirilmiştir. İhtiyaç analizi çalışmaları sonucunda Malatya Büyükşehir Belediyesi bünyesinde 14 Ana Grup altında toplanan 77 adet standart coğrafi veri katmanı tanımlanmıştır. Çizelge 2'de bu katmanlardan öne çıkan örnekler, geometrik yapıları, güncelleme prosedürleri ve ilgili yasal düzenlemeler sunulmuştur. Bazı veri katman sayıları verilerin mevcut yönetim tarzlarına göre tabloya yansıtılmış olup (örneğin halihazır haritalar), veri modelleme ve akıllandırma çalışmaları ile bu verilerin nitelikleri geliştirilmektedir. Ayrıca sistem geliştirme aşamalarına bağlı olarak ihtiyaç analizleri de sürdürülmektedir. Buna bağlı olarak katman sayıları her geçen gün artmaktadır.

Birim bazlı modül geliştirme süreci; ihtiyaç analizi, ER diyagramı hazırlanması, ilişkisel veri tabanı tasarımı ve yetkilendirme tanımlaması adımlarından oluşmaktadır. İlişkisel veri yapısının tercih edilmesindeki temel amaç mükerrer veri üretiminin önüne geçmek ve veri bütünlüğünü korumaktır.

Bir önceki bölümde tamamlanan 5 adet birime ait modüller ve halen çalışmaların devam etmekte olduğu 6 adet birime ait modüller belirtilmiştir. Afet sonrası kent yönetimi açısından acil ihtiyaçlar kapsamında veri üretimi ve modül geliştirme süreçlerine devam edilmektedir.

Çizelge 2. Kurumsal CBS birim bazlı detaylı veri katmanı envanteri, geometrileri ve güncelleme prosedürleri

Birim/ Grup Adı	Katman Adedi	Örnek Katmanlar	Mevcut Biçim	Geometri	Güncelleme Prosedürü ve Yasal Mevzuat Atıfları
Adres (MAKS)	7	Yapı, Mahalle, İlçe, Numarataj, Yol Ortahat	MAKS Servis, CAD	Point, Line, Polygon	Anlık MAKS Entegrasyonu. 5490 Sayılı Nüfus Hizmetleri Kanunu, Adres ve Numaralamaya İlişkin Yönetmelik.
Taşınmaz Takip	6	Mülkiyet, Taşınmaz Nokta/Alan, Tahsis Edilen	.shp, PDF, Tapu	Point, Polygon	Günlük Otomatik MEGSİS Servisi. 2644 Sayılı Tapu Kanunu, 5216 Sayılı Kanun
Rezerv Alanlar	1	Rezerv Alan Sınırları	CAD, SHP	Polygon	Plan Değişikliğinde Güncelleme. 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Kanunu.
Ulaşım	13	Yol Ağı, Trafik Levhaları, Kameralar, EDS, Fiber	CAD, KML	Point, Line	Proje Bazlı / Haftalık Güncelleme. 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu, 5216 Sayılı Kanun.
Mezarlık	5	Mezarlık Sınır, Ada, Parsel, Mezar Yeri, Donatı	DWG, SHP	Point, Line, Polygon	Anlık Defin İşlemleri Entegrasyonu. 1593 Sayılı Umumi Hıfzıssıhha Kanunu, Mezarlıkların Korunması Hakkında Yönetmelik.
Halihazır	13	1/1000 Halihazır Haritalar (13 İlçe)	DWG, NCZ	Polygon	Yıllık / İhale Bazlı Güncelleme. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHÜY).
KUDEB	3	Tescilli Yerler, Koruma Alanları, Sit Sınırları	SHP	Point, Polygon	Kurul Kararı Sonrası Güncelleme. 2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu.
Park Bahçeler	5	Parklar, Sulama Hattı, Yeşil Alan, Donatı	DWG, XLS	Point, Line, Polygon	Aylık Saha Kontrolleri. 5393 Sayılı Belediye Kanunu
AKOM / Afet	3	Toplanma Alanları, Çadır Alanı, Lojistik Depo	SHP, CAD	Point, Polygon	Altı Aylık AFAD Uyum Revizyonu. 7269 Sayılı Umumi Hayata Müessir Afetler Kanunu
Tarımsal Hizmetler	12	Proje, Su Kaynağı, İletim/Dağıtım Hatları, GES	CAD, XLS, KML	Point, Line, Polygon	Sezonluk / Proje Tamamlandıkça. 5403 Sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu.
Çevre Sağlığı	5	Yıkıntı Döküm Sahası, Atık Tesisleri, Çöp Sahası	KML	Point, Polygon	Haftalık / Anlık Döküm Takibi. 2872 Sayılı Çevre Kanunu, Sıfır Atık Yönetmeliği.
Sosyal Hizmetler	1	Hoşgeldin Bebek / Sosyal Yardım Konumları	XLS, Nokta	Point	KVKK Standartları
Kentsel Dönüşüm	2	Dönüşüm Alanı ve Yapı Katmanları	DWG, SHP	Polygon	Meclis Kararı Sonrası. 5393 Sayılı Kanun Madde 73, 6306 Sayılı Kanun.
İştirakler	1	Belediye İştiraklerine Ait Tesisler	XLS	Point	Aylık iştirak bazlı

3.3. Varlık-İlişki (ER) Diyagramları ve Veri Modeli Tasarımları

Sistem genelinde PostgreSQL/PostGIS veritabanı üzerinde 76 katmanın ilişkisel bütünlüğünü sağlayan genel veri tasarımı kurgulanmıştır. Veri tabanı tasarımlarında birincil anahtar (PK), yabancı anahtar (FK) kısıtları ve esnek veri tipi mimarisi uygulanmıştır. Aşağıda iki adet modüle ait ER diyagramlarının temel tasarım özellikleri verilmiştir.

1. Tarımsal Hizmetler CBS Veri Modeli: Tarımsal sulama ve altyapı envanterinin takibi amacıyla 12 Varlık ve 15 İlişkiden oluşan PostGIS veri modeli geliştirilmiştir. Modelde idari sınır tablosu IDARI_BIRIM (1) ── (N) PROJE ana ilişkisi üzerinden kurgulanmış; su kaynağı, iletim hattı, dağıtım ağı, depolama tesisi, pompaj ve GES altyapısı bu ana varlığa bağlanmıştır.

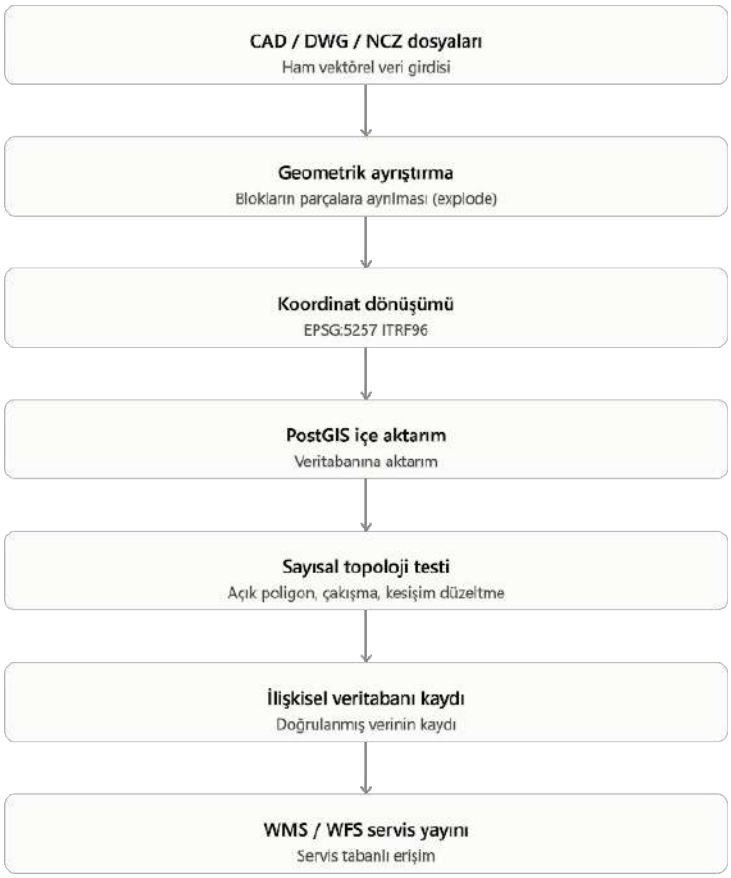
2. Afet Toplanma Alanları CBS Veri Modeli: Merkezdeki toplanma_alani (Polygon) katmanı; adres, kapasite_fiziksel, operasyonel_bilgi ve cbs_teknik tablolarına bağlanmıştır. Acil durum konumsal analizleri için en yakın hastane (ref_hastane), eczane (ref_eczane), karakol (ref_karakol) ve barınma alanlarına (ref_barinma_alani) FK bağlantıları kurgulanmıştır.

3.4. Veri Dönüşüm ve Sağlıklaştırma Süreci: Temel Operasyonel Güçlük

Kurumsal CBS'nin tüm birimlere yaygınlaştırılması sürecinde en büyük operasyonel yük, birimlerde mevcut olan verilerin farklı format ve standartlarda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Birimler; .xls tabloları, .dwg ve .dxf çizimleri, .ncz dosyaları, taranmış PDF belgeler ve koordinatsız listeler gibi birbirinden farklı ve çoğunlukla konumsal olmayan formatlarda veri tutmaktadır.

Her birim için veri tabanına geçiş sürecinde koordinatsız veya hatalı koordinatlı veriler, kapalı poligon yapısı oluşturmayan çizim dosyaları, farklı dönemlerde üretilmiş konumsal verilerle ilgili projeksiyon uyumsuzlukları, öznitelik alanlarındaki tutarsız kodlama ve boş değerler ile ISO 19115 kapsamındaki meta veri alanlarının tanımsız bırakılmış olması gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır. Tüm veriler topolojik düzeltmeler yapılarak ITRF96 / TM39 (EPSG:5257) ulusal koordinat sistemine dönüştürülmüş ve PostGIS ortamına aktarılmıştır.

Saha verilerinin dönüşümünde metodolojinin 4. aşaması doğrultusunda uygulanan konumsal veri işleme ve topoloji ayıklama adımları Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Veri Düzeltme ve Topoloji Ayıklama İş Akışı

Konumsal verilere ilişkin uygulamada karşılaşılan iki temel problem ve çözüm yöntemi aşağıda verilmiştir.

Koordinat ve Format Uyumsuzluğu: Birimlerde Ed50 ve ITRF96 sistemlerinde karışık bulunan CAD verileri `ST_Transform` ile TUREF 39 (EPSG:5257) projeksiyonuna dönüştürülmüştür. Orijinal koordinat sistemin tespiti birim kullanıcıları marifeti ve veri işleme sorumlusunun verileri temel altlıklarla karşılaştırma esasına dayanan tespit metodolojisi ile yapılmıştır.

Geometrik Hatalar ve Topoloji Kırılmaları: Kapanmayan alan geometrileri ve mükerrer çizgiler SQL fonksiyonları ve PostGIS topoloji kütüphaneleriyle ayıklanmıştır.

Veri setindeki geometrik hataların ve topoloji kırılmalarının giderilmesinde PostGIS fonksiyonları ve ilişkisel topoloji araçları kullanılmıştır. Kapanmayan veya geçersiz poligonlar ST_IsValid, ST_MakeValid ve ST_BuildArea fonksiyonları ile denetlenip onarılmış; hassasiyet kayıpları ST_SnapToGrid ile hizalanmıştır. Üst üste binen mükerrer çizgiler ve gereksiz nokta yoğunlukları ST_Equals ve ST_RemoveRepeatedPoints fonksiyonları ile ayıklanmıştır. Karmaşık topolojik kırılmalar ise postgis_topology eklentisi (ST_CreateTopoGeo) kullanılarak ilişkisel veri yapısına aktarılmış; tolerans dâhilinde kesişimler otomatik düğüm (node) atanıp çakışan kenarlar (edge) birleştirilerek temiz geometrilere dönüştürülmüştür.

Minibüs Güzergahları için mükerrer üst üste binen Çizgileri görüntülemek için;

SELECT a.ctid AS hat_1_satir, b.ctid AS hat_2_satir, a.the_geom FROM public.mbbcbs_minubusguzergahlari a JOIN public.mbbcbs_minubusguzergahlari b ON a.ctid < b.ctid AND ST_Equals(a.the_geom, b.the_geom) sorgusu,

aynı katman için Mükerrer Düğüm (vertex) İçeren Hataları Görüntülemek için de SELECT ctid, the_geom FROM public.mbbcbs_minubusguzergahlari WHERE ST_NPoints(the_geom) <> ST_NPoints(ST_RemoveRepeatedPoints(the_geom, 0.001)) sorgusu kullanılmıştır.

Veri sağlıklaştırma süreçleri veri tabanı uzmanları desteği ile yapılmakta, orijinal verilere ilişkin meta veriler ve temel aşamalarda üretilen versiyonlar için tüm meta veriler yönetilmekte. Geliştirme aşamasında kullanıcılara açılmayan bu özellikler zamanla kullanıcıların faydalanmasına sunulacaktır. Aksi halde verilerin teknik ve idari açıdan anlamsız kalma riski söz konusu olacaktır.

Adres Bilgi Sistemi ve İmar Bilgi Sistemi dışında şu ana dek işler hale getirilen beş adet birim modülü kapsamında veri tabanında kaydı tutulan dönüşüm işlemleri özeti Çizelge 3'de verilmiştir. Veri tabanı aktarımı aşamasında bu beş modül için iki milyona yakın nesne tüm geometrik, topolojik ve öznitelik bilgileriyle sisteme aktarılmıştır. Ancak bu işlemler yalnızca dönüşümün son sistem aktarımı aşamasını kapsamakta olup BKBS tecrübesi ile birlikte birçok manuel dönüşüm işlemi (format ve koordinat sistemi farklılıkları nedeniyle) yarı otomatik yöntemlerle ve operatör/uzman tecrübesine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için tam bir envanter tutulmamış olup sistem aktarımı esnasında metaveri bilgileri mümkün olduğunca (bilindiği kadarıyla) girilmektedir.

Çizelge 3. Format bazında veri dönüşüm özeti

Format	Kayıt Sayısı	Dosya Sayısı	Nesne Sayısı	Toplam Kayıt
KML	26	43	3182	25
Excel	5	5	23423	5
DXF	0	0	0	0
DWG	0	0	0	0
SHP	17	17	146349	17
NCZ	5	5	819	5
GeoJSON	0	0	0	0
TIFF	0	0	0	0
PDF	5	5	37	5
Diğer	11	11	1692107	11
TOPLAM	**69**	**86**	**1865917**	**68**
Bu sayfa 'Veri Kaydı' sayfasındaki verilerden otomatik hesaplanır; doğrudan düzenlemeyiniz.				

3.5. Servis Entegrasyonları ve Teknik Kısıtlar

Dış kurum verilerine erişimde servis tabanlı model benimsenmiştir. MAKS web servisleri üzerinden adres verileri anlık, TKGM'den parsel verileri ise günlük "değişenler servisi" ile otomatik çekilmektedir. Bu servisler PostGIS sunucusuna entegre edilerek adres ve kadastro verilerinin günlük senkronizasyonu sağlanmıştır. TUCBS aracılığıyla diğer kurumların sunduğu coğrafi servisler sorgulanmaktadır. Ancak bazı altyapı kurumlarının bilgi güvenliği politikaları gerekçesiyle vektör veri servisi (WFS) yerine yalnızca görüntü servisi (WMS) sunması, mekânsal analiz ve sorgulama yapılabilmesini engelleyen teknik bir kısıt olarak öne çıkmaktadır. Örneğin Türk Telekom WMS olarak tranşe (kazı) ve fiber hatlarla, direk yerlerini sunuyor. Belediye hizmetleri ve kent bilgi yönetiminde aktif rol alan

diğer kurumların ihtiyaçlarına göre servislerle doğrudan temin edilemeyen tüm verilerin alternatif yöntemlerle sayısallaştırılması ve akıllandırılması yoluna gidilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir.

3.6. Veri Güncelliği ve Sürdürülebilirlik: Teknik Çözümden Yönetsel Modele (CBS Master Planı ve Yönetmelik)

Konumsal veri güncelliği ve sürdürülebilirliği sorununun salt teknik araçlarla çözülmesi mümkün değildir. Değişenler servisi, WMS/WFS entegrasyonu ve modül bazlı veri girişi gibi teknik mekanizmalar; ancak birimlerin bu sistemi düzenli ve doğru biçimde kullanmasını zorunlu kılan yönetsel bir çerçeveyle desteklendiğinde kalıcı bir etki yaratabilmektedir. Gönüllülük esasına dayanan veri girişi, zamanla sistemin güncellenmemesine ve dolayısıyla hem kurumsal CBS'nin hem de BKBS'nin pasif kalmasına yol açmaktadır.

Bu çerçevede geliştirilen model üç temel yönetsel bileşenden oluşmaktadır:

- CBS Master Planı: Belediyenin konumsal veri yönetimine ilişkin orta ve uzun vadeli hedeflerini, öncelikli veri katmanlarını, güncelleme döngülerini, veri kalite kriterlerini ve birim sorumluluklarını tanımlayan kapsamlı bir planlama belgesidir. Master Plan; kurumsal CBS, imar bilgi sistemi, adres bilgi sistemi ve BKBS arasındaki veri akışını da belgelemektedir.
- Belediye Yönetmeliği / Yönergesi: CBS Master Planı'nın hukuki dayanağını oluşturan ve tüm belediye birimlerinin belirlenen standartlarda ve belirlenen dönemlerde veri girişini zorunlu kılan bir yönetmelik/yönerge çıkarılması planlanmıştır. Bu yönetmelik; veri formatı standartlarını, güncelleme sıklığını, sorumlu personel tanımlamalarını ve denetim mekanizmalarını kapsamaktadır. Yönetmelik olmaksızın teknik altyapının sürdürülebilirliği kurumsal bir güvenceye kavuşamamaktadır.
- CBS Kurulu (Yönlendirme ve Yürütme): Malatya Büyükşehir Belediyesi il sınırları içindeki tüm ilçe belediyelerini kapsayan ve konumsal veri yönetimini koordine eden bir CBS Kurulu oluşturulmaktadır. Büyükşehir statüsünün getirdiği mücavir alan ve il sınırı sorumluluğu göz önüne alındığında, yalnızca büyükşehir belediyesi birimlerini değil tüm ilçe belediyelerini de içine alan bu kurumsal yapı; veri güncelliğinin il genelinde sağlanması, çakışan verilerin önlenmesi ve BKBS'ye aktarılacak verilerin tutarlılığının korunması açısından kritik bir işlev üstlenmektedir.

Veri sürdürülebilirliğini sağlamak adına metodolojinin 5. aşamasında Malatya Büyükşehir Belediyesi CBS Yönlendirme Kurulu Yönetmeliği taslağı hazırlanmaktadır. Yönetmelikle her bir birime "CBS Veri Sorumlusu" tanımlanmış ve veri güncellemeleri idari zorunluluk haline getirilecektir. Bazı temel veri yönetimi ve idari kriterler dikkate alınarak kurumsal CBS ile BKBS veri sürdürülebilirliği açısından karşılaştırılmış ve bulgular Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Kurumsal CBS ile BKBS'nin Veri Sürdürülebilirliği Açısından Karşılaştırması.

Kriter	Kurumsal CBS (Açık Kaynak Model)	Bulut KBS (BKBS)
Veri Güncelliği	Değişenler servisi + zorunlu birim girişi (CBS Master Planı)	Kurumsal CBS'den WMS/WFS beslemesi ile sağlanacak
Yönetsel Dayanak	CBS Master Planı + Belediye Yönetmeliği / Yönergesi	Bakanlık genelgesi
Kurumsal Kapsam	Tüm belediye birimleri + ilçe belediyeleri (CBS Kurulu)	Belediye merkezi; ilçe entegrasyonu sınırlı
Veri Yapısı	ER diyagramı, ilişkisel model, mükerrer veri engeli	TUCBS şema uyumu;
Veri Dönüşüm Yükü	Birim verilerinin farklı format/standardı → yüksek iş yükü	Standart dışı veri girişinde benzer sorun
Entegrasyon	MAKS, TKGM, TUCBS, WMS/WFS aktif	OGC servisleri; WMS/WFS ile besleme planlanıyor

3.7. Kurumsal CBS'den BKBS'ye Servis Tabanlı Entegrasyon Modeli

Tüm birimlerde kurumsal CBS modüllerinin aktif hale getirilmesi ve yönetsel çerçevenin tamamlanmasının ardından nihai hedef, standartlaştırılmış verilerin web servisleri aracılığıyla BKBS'ye otomatik olarak aktarılmasıdır. Planlanan modelde kurumsal CBS WMS/WFS servislerini yayımlamakta, BKBS bu servisleri OGC standardı üzerinden tüketmektedir. Değişenler servisi mantığının BKBS besleme sürecine uyarlanması yalnızca güncellenen verilerin aktarılmasını sağlayarak sistem yükünü en aza indirecektir. Bu döngü; kurumsal CBS'yi birincil veri üretim ve

güncelleme ortamı, BKBS'yi ise bu üretimin merkezi bir paylaşım ve izleme platformu olarak konumlandırmaktadır. Kurumsal CBS'deki 77 katmanın TUCBS veri standartlarına dönüştürülerek WFS servisleri üzerinden BKBS'ye kesintisiz aktarımı hedeflenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Malatya Büyükşehir Belediyesi bünyesinde yürütülen bu çalışma, yerel yönetimlerde sürdürülebilir bir Kurumsal CBS kurulumunun teknik ve yönetsel mekanizmalarla birlikte yürütülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma; yerel yönetimlerde konumsal veri güncelliği ve sürdürülebilirliği sorununun yalnızca teknik araçlarla değil, yönetsel mekanizmalarla da desteklenmesi gerektiğini Malatya Büyükşehir Belediyesi deneyimi üzerinden somutlaştırmaktadır. Açık kaynak kurumsal CBS, değişenler servisi, WMS/WFS entegrasyonu ve ilişkisel veri modeli; teknik sürdürülebilirliğin temelini oluştururken, CBS Master Planı, belediye yönetmeliği ve CBS Kurulu bu temeli kurumsal bir güvenceye kavuşturmaktadır.

Büyükşehir belediyesi statüsünün getirdiği il geneli sorumluluk çerçevesinde CBS Kurulu modeli, konumsal verinin yalnızca büyükşehir merkezi için değil tüm ilçe belediyeleri düzeyinde güncel ve tutarlı tutulmasını mümkün kılacaktır. Bu model aynı zamanda BKBS'yi pasif bir depo olmaktan çıkararak belediye operasyonlarıyla organik bağı olan canlı bir platforma dönüştürecektir.

Konumsal veri sürdürülebilirliği için temel öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- CBS Master Planı'nın tüm veri katmanları, güncelleme döngüleri ve birim sorumlulukları dahil kapsamlı biçimde hazırlanması;
- Veri girişini zorunlu kılan belediye yönetmeliğinin / yönergesinin bir an önce yürürlüğe girmesi;
- CBS Kurulu'nun ilçe belediyeleriyle birlikte ivedilikle kurulması;
- Tüm modüllerde ER diyagramı aşamasından itibaren TUCBS uyumunun gözetilmesi;
- ISO 19115 meta veri alanlarının ve ISO 19157 veri kalitesi kriterlerinin modül tasarımına entegre edilmesi;
- Değişenler servisi mantığının BKBS besleme sürecine uyarlanması.

4. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde değerli katkı, destek ve veri paylaşımlarından dolayı Malatya Büyükşehir Belediyesi ilgili yönetim birimlerine, Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Şube Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alashi, A. T. ve Ertekin, Ö., 2026. City Information Modeling for Urban Planning: A Systematic Review of Workflows, Validation, and Maturity. *Buildings*, 16(13): 2573.

Badem, H., 2017. Türkiye'de kent bilgi sistemlerinin ulusal ölçekte yaygınlaştırılmasına yönelik çözüm önerileri. *Uzmanlık tezi*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Başar, T., 2016. Kent Bilgi Sistemi Türkiye ve Dünya'dan Örnekler. *Uzmanlık tezi*. İller Bankası AŞ, Ankara.

Batur, T., 2026. Yerel Yönetimlerde Bulut Bilişim Uygulaması. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 28(51): 1-25.

Bayar, D. Y., Koç, Y., Varol, C., Er, E. ve Acar, S. E., 2022. Bulut Kent Bilgi Sistemi. *VIII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2022)*, Ankara.

Bayraktar, H., Bayar, D. Y., Kara, B., Güven, H., Sengör, E. S. ve Eriş, Ö. F., 2022. Akıllı Şehirler Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri. *VIII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2022*), Ankara.

CBSGM, 2020. *Akıllı Şehirlerde Afet ve Acil Durum Yönetimi. Akıllı Şehirler Kapasite Geliştirme ve Rehberlik Projesi Eğitim Kitapçığı*, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü (CBSGM), Ankara.

Çabuk, S., 2015. CBS'nin yerel yönetimlerde kullanımı ve kent bilgi sistemleri. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3): 69-87.

ÇŞİDB, 2022. *Coğrafi Veri Erişim, Paylaşım ve Kullanımına İlişkin Usul ve Esaslar*. https://cbs.csb.gov.tr/usul-ve-esaslar-109438 [Erişim tarihi: 03.07.2026].

Doğan, İ., 2025. Bulut kent bilgi sistemi`nin yerel yönetim uygulamaları: Malatya Büyükşehir Belediyesi örneği (Tez No. 944020). *Yüksek lisans tezi*. Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.

ISO, 2013. *ISO 19157:2013 Geographic Information – Data Quality*. International Organization for Standardization.

ISO, 2014. *ISO 19115-1:2014 Geographic Information – Metadata.* International Organization for Standardization.

Kavas, A., 2025. *Kent Bilgi Sistemi Rehberi.* 1. basım, Kent Araştırmaları Enstitüsü, ADAMOR Ltd. Şti. & İdealkent Yayınları, Ankara.

Kısa, A., Bayar, D. Y. ve Koç, Y., 2025. Esnek ve Dinamik Kentsel Veri Yönetim Platformu: Bulut Kent Bilgi Sistemi. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, (8): 100-126.

McKenna, H. P., 2025. A Review of Data Models and Frameworks in Urban Environments in the Context of AI. *Urban Science*, 9(7): 239.

Vasconcelos Filho, J. E., Bezerra, M., Carvalho, C., Nunes, P. H. ve José, R., 2026. From Open Urban Data to Locative Services: Eligibility Criteria and a Faceted Typology for Urban Digital Locative Elements. *Smart Cities*, 9(8): 135.

Yomralıoğlu, T., 2009. *Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar*. 5. Baskı (2009), s.480, ISBN 975-97369-0-X, İstanbul.

Zanker, M., Docekalova, A. ve Urbanik, P., 2026. Applications of System Dynamics in Smart Cities: A Systematic Review. *Journal of Cases on Information Technology (JCIT)*, 28(1): 1-26.

ASKERÎ LOJİSTİKTE OTONOM KARA ARAÇLARI İÇİN SEMANTİK İTERATİF SKOR YAYILIM ALGORİTMASI (S-ISPA) TABANLI GÜZERGÂH OPTİMİZASYONU

Korcan ALPAN[1], Hüseyin PEHLİVAN[2]

[1]Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, KOCAELİ, k.alpan2022@gtu.edu.tr
[2]Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, KOCAELİ, hpehlivan@gtu.edu.tr

ÖZET

Askerî lojistik operasyonların başarısı, kritik araç ve ikmal malzemelerinin zorlu ve değişken arazi koşullarında güvenli ve zamanında taşınmasına bağlıdır. Riskli ve erişimi güç sahalarda görev yapabilen otonom kara araçları bu ihtiyacın karşılanmasında stratejik bir çözüm sunsa da engebeli topografya, dinamik olarak beliren engeller ve araçların farklılaşan fiziksel geçiş kabiliyetleri, güzergâh belirleme sürecini çok kriterli ve karmaşık bir karar problemine dönüştürmektedir. Bu problem çerçevesinde, farklı araç özelliklerini ve değişken arazi koşullarını birlikte dikkate alabilen bir güzergâh planlama yaklaşımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmada, İteratif Skor Yayılım Algoritması (ISPA); araca göre koşullandırılmış fiziksel uygunluk, alt açıklığa (yerden yüksekliğe) bağlı engel dışlama, sabitlenmiş (anchored) risk yayılımı ve olay tetiklemeli ardışık yeniden planlama mekanizmaları entegre edilerek Semantik ISPA (S-ISPA) adıyla yeniden formüle edilmiştir. Önerilen yöntem, İstanbul/Çatalca bölgesine ait ASTER GDEM v3 tabanlı 10.201 düğümlü üç boyutlu (3B) arazi çizgesi üzerinde, hafif askerî arazi aracını temsil eden Profil-L ve ağır askerî lojistik aracını temsil eden Profil-H olmak üzere iki kontrollü sentetik araç profili kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel doğrulama, birbirini tamamlayan üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, çözücüden bağımsız (solver-blind) 18 senaryoda her iki profil aynı kilitli engel alanında eşleştirilmiş; tüm senaryolarda eğim ve kesin engel ihlali sıfır gerçekleşirken Profil-H'nin Profil-L'ye göre medyan güzergâh uzunluğu farkı %10,895 (IQR: 10,849 yüzdelik puan) olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada gerçekleştirilen bağlayıcı-kısıt ablasyonunda (bileşen çıkarma analizi), Özgün-ISPA-Çekirdeği −2,22 m sert çekirdek açıklığıyla geçilemez bölgeyi ihlal ederken Tam S-ISPA +11,92 m güvenli açıklık sağlamıştır. Son aşamada ise temsilî MS16 senaryosunda üç yeni statik engelin ardışık olarak açığa çıkması durumunda kalan güzergâh her aşamada başarıyla yeniden planlanmış ve fiziksel kısıtlar eksiksiz korunmuştur. Elde edilen bulgular, S-ISPA'nın yayılmış risk skorunu soyut bir tampon yerine fiziksel olarak ölçülebilir araç kısıtlarına dayandırdığını; kesin/esnek risk ayrımı ve dinamik yeniden planlama disiplini sayesinde sahaya uyarlanabilir ve güvenli güzergâhlar üretebildiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Araç-koşullu geçilebilirlik, arazi dışı güzergâh planlama, arazi geçilebilirliği, askerî lojistik, Semantik İteratif Skor Yayılım Algoritması (S-ISPA)

ROUTE OPTIMIZATION FOR AUTONOMOUS GROUND VEHICLES IN MILITARY LOGISTICS BASED ON THE SEMANTIC ITERATIVE SCORE PROPAGATION ALGORITHM (S-ISPA)

ABSTRACT

The success of military logistics operations depends on the safe and timely transportation of critical vehicles and supply materials under challenging and variable terrain conditions. Although autonomous ground vehicles capable of operating in risky and hard-to-access areas offer a strategic solution to this need, rugged topography, dynamically emerging obstacles, and differing physical traversability capabilities of vehicles turn route determination into a multi-criteria and complex decision problem. Within this problem framework, the study aims to develop a route planning approach that can jointly account for varying vehicle characteristics and changing terrain conditions. In this context, the Iterative Score Propagation Algorithm (ISPA) was reformulated as Semantic ISPA (S-ISPA) by integrating vehicle-conditioned physical suitability, ground-clearance-based obstacle exclusion, anchored risk propagation, and event-triggered sequential replanning mechanisms. The proposed method was evaluated on a three-dimensional (3D) terrain graph consisting of 10,201 nodes derived from ASTER GDEM v3 data for the Istanbul/Çatalca region, using two controlled synthetic vehicle profiles: Profile-L, representing a light military off-road vehicle, and Profile-H, representing a heavy military logistics vehicle. Experimental validation was conducted in three complementary stages. In the first stage, both profiles were paired within the same locked obstacle field across 18 solver-blind scenarios. No slope or hard-obstacle violations occurred in any scenario, while the median route-length difference of Profile-H relative to Profile-L was determined as 10.895% (IQR: 10.849 percentage points). In the second stage, a binding-constraint ablation analysis showed that the Original-ISPA-Core violated the impassable region with a hard-core clearance of −2.22 m, whereas Full S-ISPA maintained a safe clearance of +11.92 m. In the final stage, under the representative MS16 scenario, the remaining route was successfully replanned at each stage as three new static obstacles were revealed sequentially, while all physical constraints were fully preserved. The findings demonstrate that S-ISPA grounds its propagated risk score in physically measurable vehicle constraints rather than an abstract buffer and, through the distinction between hard and soft risk together with a dynamic replanning discipline, is capable of generating safe and field-adaptable routes.

Keywords: Military logistics, off-road route planning, Semantic Iterative Score Propagation Algorithm (S-ISPA), terrain traversability, vehicle-conditioned traversability

1. GİRİŞ

Otonom kara araçları, insan müdahalesinin riskli, sınırlı veya imkânsız olduğu askerî lojistik, keşif-gözetleme, arama-kurtarma ve tehlikeli maddelerin taşınması gibi operasyonlarda her geçen gün daha kritik bir rol oynamaktadır. Bu otonom sistemlerin harekât alanındaki başarısı; başlangıç noktasından hedef noktaya güvenli, yakıt ve zaman açısından verimli, aynı zamanda aracın mekanik kapasitesiyle uyumlu bir güzergâh planlamasının yapılmasına doğrudan bağlıdır. Ancak yapılandırılmamış (off-road) arazi koşullarında güzergâh planlama problemi, yalnızca iki coğrafi nokta arasındaki en kısa geometrik yolun bulunmasıyla çözülemeyecek kadar karmaşıktır. Güzergâh tasarımı; çevresel koşullar, anlık beliren engeller, güvenlik, enerji ve zaman gereksinimleri ile aracın teknik kısıtlarının eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren çok kriterli bir optimizasyon problemidir (Reda vd., 2024; Venu ve Gurusamy, 2025).

Yapılandırılmış kentsel yol ortamlarında otonom navigasyon teknolojileri önemli bir olgunluğa erişmiş olsa da, şerit çizgilerinin, trafik işaretlerinin ve tanımlı yol geometrilerinin bulunmadığı off-road harekât alanlarında güvenli rota üretimi hâlen açık bir araştırma alanıdır (Min vd., 2026). Bu tür zorlu ortamlarda arazi geçilebilirliği ve hareket kabiliyeti kavramları öne çıkmaktadır. Geçilebilirlik; topografyanın eğim yapısı ve engellerin boyutları ile aracın motor gücü, lastik/palet yapısı, şasi geometrisi ve yerden yüksekliği arasındaki fiziksel etkileşime bağlı olarak değişir (Inotsume ve Kubota, 2022; Wang vd., 2024). Klasik güzergâh planlama yaklaşımları, engelleri genellikle ikili olarak modelleme eğilimindedir. Bu durum, otonom aracın dik bir uçurum kenarından veya tehlikeli bir engelin sınırından teğet geçmesi gibi ciddi operasyonel güvenlik açıklarına yol açmaktadır.

Klasik güzergâh planlama yaklaşımlarının bu tür sınırlılıklarını aşmak amacıyla, son yıllarda coğrafi veri katmanları ile araç hareket kabiliyeti tahminlerini birlikte değerlendiren hibrit yöntemler önerilmiştir. Bu kapsamda Pehlivan (2025) tarafından geliştirilen İteratif Skor Yayılım Algoritması (ISPA), graf düğümleri üzerinde deterministik komşuluk skor yayılımı, eğim-uygunluk filtrelemesi ve kümülatif en düşük maliyetli yol aramasını bir araya getiren graf sinir ağı (GNN)-esintili bir çerçevedir. Bu nedenle, bu çalışmada katı eğim uygunluğu Semantik İteratif Skor Yayılım Algoritmasına (S-ISPA) özgü yeni bir katkı olarak ele alınmamaktadır. S-ISPA'nın genişletmesi ise; uygunluğu araç profiline bağlı hâle getirmek, yerden açıklığa göre engel çekirdeği tanımlamak, katı fiziksel uygunluğu yumuşak operasyonel riskten ayırmak, başlangıç riskini her iterasyonda koruyan sabitlenmiş yayılım kullanmak ve güncel konumdan olay tetiklemeli yeniden planlama yapmaktır.

Bu çalışmada S-ISPA, arazi düğümlerine araç-koşullu operasyonel anlam atayan deterministik bir karar destek çerçevesi olarak ele alınmıştır. Buradaki "semantik" ifade; görsel semantik segmentasyon, arazi örtüsü veya zemin türü sınıflandırması anlamına gelmemekte, belirli bir araç profiline göre fiziksel olarak geçilemez, yükseltilmiş riskli veya daha düşük riskli geçilebilir durumların ayrımını ifade etmektedir. Çalışmanın hedefi, aynı arazi ve engel alanında farklı araç geçiş zarflarının uygulanmasıyla oluşan uygun durum uzayını ve S-ISPA'ya özgü yerden-açıklık mekanizmasını kontrollü olarak değerlendirmektir.

2. METODOLOJİ

Önerilen S-ISPA çerçevesi, arazi verisinin hesaplama düğümlerine dönüştürülmesinden başlayarak coğrafi grafın oluşturulması, araç-koşullu katı fiziksel uygunluk ve yumuşak risk bileşenlerinin tanımlanması, deterministik komşuluk mesaj yayılımının gerçekleştirilmesi, dinamik kenar maliyetleri üzerinden güzergâh arama işleminin yürütülmesi ve olay tetiklemeli yeniden planlama aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamaları bütüncül bir yapı içerisinde bir araya getiren önerilen karar destek sisteminin genel metodolojik iş akışı Şekil 1'de sunulmuştur.

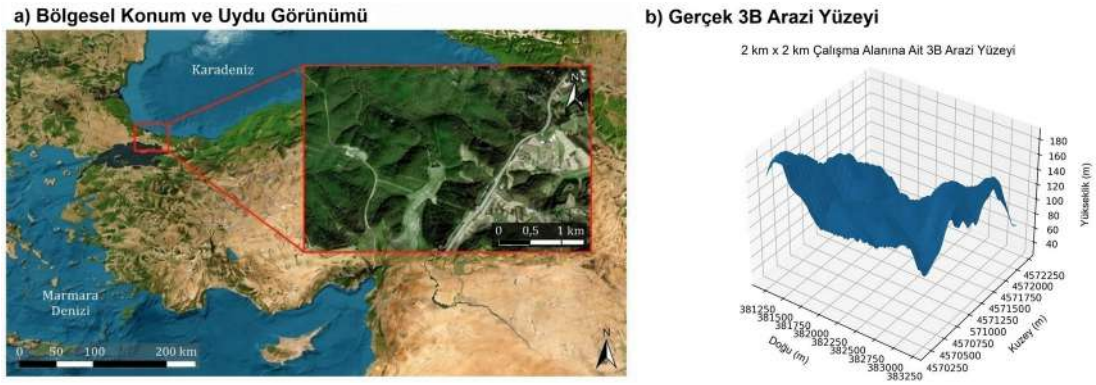


Şekil 1. Önerilen Karar Destek Sistemi S-ISPA'nın Genel Metodolojik İş Akışı

2.1 Çalışma Alanı, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Kaynağı ve Arazi Düğüm Yapısı

Çalışma alanı, İstanbul'un Çatalca ilçesi kırsalında yer alan 2 km × 2 km'lik (4,0 km²) bir arazi penceresidir ve Pehlivan (2025)'te kullanılan topografik veri setine dayanmaktadır. Yükseklik verisi olarak USGS/NASA Earthdata üzerinden temin edilen, 1 yay-saniyesi (~30 m) ızgara aralıklı ASTER GDEM v3 (ASTGTM.003) ürünü kullanılmıştır (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems ve U.S./Japan ASTER Science Team, 2019). Bu ürün 2000–2013 dönemine ait 1.880.306 adet Seviye-1A sahnesinden üretilmiş ve 2019'da yayımlanmıştır. Ön işleme adımları QGIS 3.16'da WGS84 / UTM Zone 35N koordinat sisteminde yürütülmüştür. Gesch vd. (2016) tarafından CONUS genelindeki >23.000 jeodezik nokta üzerinden belirlenen 8,52 m düşey RMSE değeri, sahaya özgü yerel bir ölçüm değil, ürün performansına ilişkin bölgesel bir dış doğrulama göstergesidir.

S-ISPA analizinde arazi, 20 m aralıklı $101 \times 101 = 10.201$ hesaplama düğümüyle temsil edilmektedir. 20 m ızgara aralığı kaynak DEM'in doğal çözünürlüğü olmayıp, hesaplama yükünü sınırlarken yerel topoğrafyayı yakalamayı amaçlayan bir ayrıklaştırma tercihidir; gerçek bir çözünürlük artışı veya yeni topografik bilgi üretildiği anlamına gelmez. Arşivlenen kodlar hazır XYZ düğüm dosyasını doğrudan yüklemekte olup ham ASTER verisinden 20 m kafese geçişteki özgün CBS yeniden örnekleme (resampling) kaydını içermediğinden, bu üst-akış (upstream) işlem geriye dönük olarak varsayılmamıştır. Düğüm eğimleri, yatay düzlemdeki en yakın beş komşu üzerinden $100 \cdot |\Delta Z| / D_{XY}$ bağıntısıyla hesaplanmış ve en yüksek değer o düğümün eğim metriği (Slope_Percent) olarak atanmıştır. Bu tanım, açık kaynak GitHub kodları ve Pehlivan (2025) ile tam uyumludur. Çalışma alanının konumu, uydu görüntüsü ve 101 × 101 XYZ düğümlerinden üretilen 3B topografik yüzeyi Şekil 2'de sunulmuştur. Yüzey görselleştirmesinde yararlanılan MATLAB doğal komşuluk enterpolasyonu (scatteredInterpolant(..., 'natural')), yalnızca görselleştirme amaçlıdır ve ham ASTER verisinden 20 m düğüm yapısına gerçekleştirilen kaynak dönüşümü olarak yorumlanmamalıdır.



Şekil 2. Çalışma Alanı: a) Bölgesel Konum ve Uydu Görünümü; b) Gerçek 101 × 101 XYZ Arazi Düğümlerinden Oluşturulan 3B Topografik Yüzey

2.2 Coğrafi Graf İnşası ve 3B Mesafe

Arazi, yönsüz bir coğrafi graf G=(V,E) ile temsil edilmektedir. Burada V arazi düğümleri kümesini, E ise kabul edilen yönsüz kenarlar kümesini göstermektedir. Her i ∈ V düğümü, konum ve yerel eğim bilgisini birlikte taşıyan bir durum vektörüyle tanımlanmakta olup söz konusu matematiksel gösterim Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$x_i = \left[X_i, Y_i, Z_i, \theta_i \right]^T, i \in V \tag{1}$$

Eşitlik (1)'de, x_i düğüm i'nin durum vektörüdür; X_i ve Y_i UTM düzlem koordinatlarını (m), Z_i yüksekliği (m) ve θ_i yerel yüzde eğimi (%) ifade eder. Komşuluk yatay düzlemde belirlenmekte; her düğüm için en fazla sekiz en yakın aday düğüm seçilerek d_{max}=65 m düzlemsel bağlantı kapısı uygulanmaktadır. Bu komşuluk ve bağlantı koşulunun matematiksel gösterimi Eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$N_i^{cand} = \left\{ j \in kNN_s(i) : d_{ij}^{2D} < d_{max} \right\}, d_{max} = 65\,m \tag{2}$$

Eşitlik (2)'de N_i^{cand}, düğüm i'nin aday komşuluk kümesini; $kNN_s(i)$, yatay düzlemdeki en yakın sekiz düğümü; d_{ij}^{2D}, i ve j arasındaki düzlemsel öklidyen mesafeyi gösterir. Kabul edilen aday ilişkilerin yönsüz birleşimi E'yi oluşturmakta olup bu nedenle nihai düğüm derecesi sekizi aşabilir. Gerçek veri kümesinde 10.201 düğüm ve 41.012 yönsüz kenar

vardır; derece medyanı 8, maksimum derece 13 ve kabul edilen en büyük düzlemsel aday mesafesi 56,569 m olarak gerçekleşmektedir. Dolayısıyla 65 m kapısı bu veri kümesinde bağlayıcı değildir. Kabul edilen bir kenarın geometrik uzunluğu ise yükseklik farkını da içeren 3B Öklidyen mesafe ile tanımlanmakta olup Eşitlik (3)'te verilmiştir.

$$d_{ij}^{3D} = \sqrt{\left(X_i - X_j\right)^2 + \left(Y_i - Y_j\right)^2 + \left(Z_i - Z_j\right)^2} \tag{3}$$

Eşitlik (3)'te d_{ij}^{3D}, i ve j düğümleri arasındaki 3B kenar uzunluğudur. Böylece graf topolojisi yerel yatay yakınlıkla kurulurken, rota optimizasyonunun geometrik maliyet tabanı üç boyutlu arazi mesafesine dayanır.

2.3 S-ISPA Formülasyonu, ISPA ile İlişkisi ve Terminoloji Kapsamı

S-ISPA, Pehlivan (2025) tarafından geliştirilen ISPA yönteminin araç-koşullu arazi dışı rota planlamaya yönelik genişletilmiş bir uzantısıdır. Komşuluk tabanlı iteratif yayılım, eğim filtreleme ilkesi ve en düşük kümülatif maliyetli çizge (graf) araması Özgün-ISPA'dan devralınırken; S-ISPA'nın özgün katkıları, (i) arazi uygunluğunun doğrudan araç profiline bağlanması, (ii) alt açıklığa (yerden yüksekliğe) dayalı geçilemez engel çekirdeği tanımlanması, (iii) kesin fiziksel maske ile esnek operasyonel riskin ayrıştırılması, (iv) başlangıç riskini koruyan sabitlenmiş (anchored) yayılım yapısı ve (v) olay tetiklemeli ardışık yeniden planlamadır. "Çizge Sinir Ağlarından esinlenen" (GNN-inspired) ifadesi yalnızca mesaj iletimi (message-passing) mekanizmasının yapısal analojisini temsil eder (Gilmer vd., 2017); her düğüm bir durum taşır ve komşu düğüm durumları permütasyondan bağımsız (permutation-invariant) bir aritmetik ortalamayla iteratif olarak güncellenir. Bununla birlikte S-ISPA'da öğrenilen ağırlıklar, eğitim veri seti, kayıp fonksiyonu, geri yayılım (backpropagation) veya yapay sinir ağı çıkarımı (neural inference) bulunmadığından yöntem tamamen deterministik kurallarla çalışmakta ve bu nedenle "GNN esintili deterministik komşuluk mesaj yayılımı" olarak adlandırılmaktadır. Benzer şekilde "semantik" kavramı da görsel bölütleme (semantic segmentation) ya da arazi/toprak sınıflandırmasını değil, çizge durumlarına araç kabiliyetlerine göre atanan operasyonel anlamı; başka bir ifadeyle geçilemez, yüksek riskli veya düşük riskli geçilebilir olma durumunu ifade eder. Bu doğrultuda sayısal durum değişkeni doğrudan "araca göre koşullandırılmış risk skoru" olarak tanımlanmıştır.

2.3.1 Araç Profilleri ve Katı Fiziksel Uygunluk

Bu çalışmada, hafif askerî arazi aracı (Profil-L) ve ağır askerî lojistik aracı (Profil-H) olmak üzere iki farklı araç profili tanımlanmıştır. Bu profillere ait parametre çiftleri, belirli bir ticari/askerî platformun üretici onaylı teknik özelliklerini veya saha-doğrulanmış performans sınırlarını değil, algoritmanın farklı geçiş zarflarına duyarlılığını kontrollü olarak sınamak amacıyla oluşturulan sentetik simülasyon profillerini temsil etmektedir. Profil-L, %40 maksimum kabul edilebilir eğim ve 0,80 m simüle alt-gövde açıklık eşiği ile daha yüksek hareket kabiliyetine sahip hafif profil; Profil-H ise %20 maksimum kabul edilebilir eğim ve 0,40 m simüle alt-gövde açıklık eşiği ile daha korumacı ağır-lojistik profil olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda, hem maksimum kabul edilebilir eğim değerleri hem de alt-gövde açıklık eşikleri gerçek araçlara ait doğrulanmış teknik sınırlar olmayıp, kontrollü karşılaştırma amacıyla belirlenen simüle parametrelerdir. Araç profiline özgü bu eğim ve alt-gövde açıklık eşikleri, S-ISPA içerisinde düğümlerin fiziksel geçilebilirliğinin belirlenmesinde doğrudan kullanılmakta; öncelikle eğim sınırını aşan düğümler katı fiziksel maske ile elenmekte, ardından engel yüksekliği ile araç açıklığı arasındaki ilişkiye göre geçilemez engel çekirdeği tanımlanmaktadır. Katı fiziksel uygunluk koşullarını sağlayan düğümler için ise eğim ve engel etkilerini birlikte yansıtan başlangıç risk skoru hesaplanmaktadır. Buna göre, düğüm i'nin yerel eğimi seçilen araç profili v'nin izin verilen maksimum eğim değerini aştığında düğüm fiziksel olarak kullanılamaz kabul edilmekte ve bu katı uygunluk koşulu Eşitlik (4)'te tanımlanmaktadır.

$$M_i^{\theta,(v)} = 1\left[\theta_i > \theta_{max}^{(v)}\right] \tag{4}$$

Eşitlik (4)'te $M_i^{\theta,(v)} \in \{0,1\}$ araç-koşullu eğim maskesidir. $M_i^{\theta,(v)}$=1, düğümün eğim nedeniyle yasaklandığını; 0 ise yalnızca eğim açısından izinli olduğunu gösterir. $1[\mathrm{cdot}]$gösterge fonksiyonu, koşul doğruysa 1, aksi halde 0 değerini alır. İkinci katı uygunluk koşulu, araç açıklığı ile engel geometrisinin etkileşimidir. Her o∈O engeli yatay merkez c_o=(X_o,Y_o), dış destek yarıçapı R_o ve merkez/tepe yüksekliği $H_{0,o}$ ile tanımlanır. Engel yüksekliği merkezden dış sınıra doğrusal olarak azalır. Araç profili v'nin açıklık eşiği C_v için geçilemez çekirdek yarıçapı hesabı Eşitlik (5)'te verilmiştir.

$$r_{imp,o}^{(v)} = \begin{cases} R_o\left(1 - \dfrac{C_v}{H_{0,o}}\right), & H_{0,o} > C_v, \\ 0, & H_{0,o} \le C_v, \end{cases} \tag{5}$$

Eşitlik (5)'te $r_{imp,o}^{(v)}$, engel o'nun araç v için geçilemez çekirdek yarıçapıdır. $H_{0,o} > C_v$ olduğunda çekirdek yarıçapı pozitif, $H_{0,o} \le C_v$ olduğunda sıfırdır. Böylece R_o yumuşak etki alanını, $r_{imp,o}^{(v)}$ ise araç-koşullu katı fiziksel dışlama bölgesini tanımlar. Eğim ve engel çekirdeği koşulları tek bir araç-koşullu katı fiziksel maske altında birleştirilmekte olup Eşitlik (6)'da verilmiştir.

$$M_i^{obs,(v)} = 1\left[\exists\, o \in O : d_{io}^{2D} \le r_{imp,o}^{(v)}\right], M_i^{(v)} = M_i^{\theta,(v)} \vee M_i^{obs,(v)} \tag{6}$$

Eşitlik (6)'da $M_i^{obs,(v)}$, düğüm i herhangi bir engelin araç-koşullu geçilemez çekirdeği içinde veya sınırında kaldığında 1 olur. $d_{io}^{2D} = \left|\left(X_i, Y_i\right) - c_o\right|_2$, düğüm ile engel merkezi arasındaki yatay mesafedir. Birleşik maske $M_i^{(v)} = M_i^{\theta,(v)} \vee M_i^{obs,(v)}$ olduğundan, $M_i^{(v)} = 1$ kesin fiziksel yasağı; $M_i^{(v)} = 0$ ise katı kısıtlar açısından aday geçilebilirliği ifade eder.

2.3.2 Araç-Koşullu Başlangıç Risk Skoru

Katı olarak yasaklanmayan düğümlerde, fiziksel sınırlara yaklaşma derecesini rota maliyetine yumuşak biçimde yansıtan başlangıç risk skoru tanımlanır. Engel o'nun düğüm i'deki doğrusal destek yüksekliği $h_{io} = H_{0,o}\, max\left(0, 1 - d_{io}^{2D} / R_o\right)$, birleşik yerel engel alanı ise $H_i = max_{o \in O} h_{io}$ olarak ifade edilmekte olup bu tanımlama Eşitlik (7)'de verilmiştir.

$$S_i^{(0,v)} = \omega_\theta \left[min\left(\frac{\theta_i}{\theta_{max}^{(v)}}, 1\right)\right]^2 + \omega_{obs}\left[min\left(\frac{H_i}{C_v}, 1\right)\right]^2, \omega_\theta + \omega_{obs} = 1 \tag{7}$$

Eşitlik (7)'de $S_i^{(0,v)} \in [0,1]$, düğüm i'nin araç v için başlangıç risk skorudur. Normalize edilmiş eğim ve engel-yüksekliği oranlarının karesi, fiziksel sınırlara yaklaşan değerlerin göreli cezasını artırır. ω_θ ve ω_{obs} sırasıyla eğim ve engel-risk ağırlıklarıdır ve toplamları 1'dir. Bu skor fiziksel geçilebilirlik kararı vermez; yalnızca $M_i^{(v)}$=0 olan düğümler arasındaki maliyet alanını şekillendirir. Temel deney ayarları ω_θ=0,50, ω_{obs}=0,50, λ=0,40, K=3 ve γ=0,25 olarak kilitlenmiştir. Bunlar evrensel fizik sabitleri değil çalışma ayarlarıdır. Duyarlılık denetiminde γ rota geometrisi üzerinde en güçlü etkiye sahip olmuş, K=3–5 aralığında temel rota kararlı kalmış ve katı kısıt ihlalleri tüm testlerde sıfır kalmıştır.

2.3.3 Sabitlenmiş Deterministik Komşuluk Mesaj Yayılımı

Başlangıç risk alanı, komşu düğümlerin durumunu hesaba katmak üzere deterministik olarak yayılır. S-ISPA, her iterasyonda $S_i^{(0,v)}$ başlangıç durumunu yeniden sabitleyerek yerel araç-arazi bilgisinin ardışık komşuluk ortalamaları içinde tamamen seyrelmesini önlemekte olup bu sabitlenmiş yayılım yapısı Eşitlik (8)'de verilmiştir.

$$S_i^{(k,v)} = \lambda\, S_i^{(0,v)} + (1 - \lambda)\frac{1}{|N_i|}\sum_{j \in N_i} S_j^{(k-1,v)}, k = 1, \ldots, K \tag{8}$$

Eşitlik (8)'de $S_i^{(k,v)}$, düğüm i'nin k'ncı iterasyondaki yayılmış risk skorunu; N_i, nihai coğrafi graftaki komşuluk kümesini; $|N_i|$, bu kümenin eleman sayısını gösterir. λ∈[0,1] yerel başlangıç riskinin korunma derecesini, 1-λ komşuluk ortalamasının katkısını ve K toplam iterasyon sayısını belirler. Yayılım tam coğrafi komşuluk grafında yürütülür; katı fiziksel dışlama, rota aramasında bağımsız olarak uygulanır. $S_i^{(K,v)}$ bir güvenlik sınıfı veya katı geçilebilirlik eşiği değil, K iterasyon sonunda elde edilen yumuşak operasyonel risk alanıdır. Fiziksel uygulanabilirlik Eşitlik (4)–(6)'daki Boolean maskelerle bağımsız olarak korunur.

2.3.4 Katı Maskeli Rota Arama ve Geçiş Maliyeti

Rota aramasında katı fiziksel maske önceliklidir. i ve j düğümlerinden herhangi biri araç v için fiziksel olarak yasaksa ilgili kenar rota aramasından dışlanmakta olup bu koşul Eşitlik (9)'da verilmiştir.

$$M_i^{(v)} = 1 \vee M_j^{(v)} = 1 \Longrightarrow W_{ij}^{(v)} = \infty \tag{9}$$

Eşitlik (9)'da $M_i^{(v)}$ ve $M_j^{(v)}$, kenarın uç düğümlerine ait birleşik fiziksel maskeler; $W_{ij}^{(v)}$ ise araç v için kenar maliyetidir. Uçlardan herhangi birinin maskesi 1 olduğunda sonsuz maliyet atanması, yumuşak riskten bağımsız olarak fiziksel olarak uygunsuz kenarın kullanımını engeller. Her iki uç düğüm geçilebilir olduğunda ise kenarın yumuşak risk düzeyi, son yayılım skorlarının aritmetik ortalamasıyla tanımlanmakta ve bu hesaplama Eşitlik (10)'da verilmektedir.

$$\acute{S}_{ij}^{(v)} = \frac{S_i^{(K,v)} + S_j^{(K,v)}}{2} \tag{10}$$

Eşitlik (10)'da $S\bar{\circ}_{ij}^{(v)}$, geçilebilir i–j kenarının ortalama yayılmış riskidir. Bu işlem düğüm-temelli risk alanını kenar-temelli maliyet terimine dönüştürür. Geçilebilir bir kenarın nihai S-ISPA maliyeti, 3B geometrik uzunluk ile yumuşak risk çarpanının birlikte dikkate alınmasıyla hesaplanmakta olup bu maliyet fonksiyonu Eşitlik (11)'de verilmiştir.

$$W_{ij}^{(v)} = d_{ij}^{3D}\left(1 + \gamma\, \acute{S}_{ij}^{(v)}\right), M_i^{(v)} = M_j^{(v)} = 0 \tag{11}$$

Eşitlik (11)'de $\gamma \geq 0$ boyutsuz risk-duyarlılık katsayısıdır. $\gamma=0$ olduğunda maliyet yalnızca 3B mesafeye indirgenir; γ arttıkça fiziksel olarak geçilebilir ancak daha yüksek riskli kenarlar daha fazla cezalandırılır. Böylece katı uygulanabilirlik $M_i^{(v)}$ ile korunurken, $S\bar{\circ}_{ij}^{(v)}$ yalnızca izinli kenarlar arasındaki tercih sırasını değiştirir. Dijkstra algoritması, Eşitlik (11)'de tanımlanan sonlu $W_{ij}^{(v)}$ ağırlıkları üzerinde başlangıç düğümü s'den hedef düğümü g'ye minimum kümülatif maliyetli yolu bulur. Eğim uygunluğu ve minimum-maliyetli graf araması Özgün-ISPA'dan devralınmıştır; S-ISPA'nın katkısı bu bileşenleri araç-koşullu katı uygunluk, açıklık-temelli engel çekirdeği ve sabitlenmiş risk alanıyla bütünleştirmesidir.

2.4 Olay Tetiklemeli Yeniden Planlama ve Kümülatif Yol

Olay tetiklemeli yeniden planlama sürecinde, araç daha önce fiziksel olarak kat ettiği güzergâh bölümünü korumakta ve yalnızca henüz tamamlanmamış güzergâh kesimini güncel çevresel koşullara göre yeniden hesaplamaktadır. Bu kapsamda, n'inci çevresel güncellemede güncel karar düğümü q_n yeni başlangıç kabul edilir ve yalnızca q_n'den sabit hedef g'ye kalan rota, güncellenen koşullar altında yeniden hesaplanır. Böylece, geçmişte tamamlanmış hareketler değişmeden korunurken yalnızca ileriye dönük güzergâh bölümü güncellenmektedir. Bu süreç sonunda elde edilen kümülatif güzergâhın matematiksel gösterimi Eşitlik (12)'de verilmiştir.

$$P^{(n)} = prefix\left(P^{(n-1)}, q_n\right) \oplus P_{new}^{(n)}\left(q_n \rightarrow g\right) \tag{12}$$

Eşitlik (12)'de $P^{(n)}$, n'inci güncelleme sonrasındaki kümülatif yolu; $prefix\left(P^{(n-1)}, q_n\right)$, önceki rotanın başlangıçtan q_n'ye kadar gerçekten kat edilmiş ve artık değiştirilmeyen önekini; $P_{new}^{(n)}\left(q_n \rightarrow g\right)$, güncel koşullarda yeniden hesaplanan kalan rotayı gösterir. $\oplus$ operatörü iki rota dizisini ortak q_n düğümünü yalnızca bir kez tutarak birleştirir.

Bu çalışmada yeniden planlamayı tetikleyen çevresel güncellemeler gerçek zamanlı sensör ölçümlerinden değil, kontrollü senaryo girdilerinden elde edilmiştir. Dolayısıyla Eşitlik (12) yalnızca planlama-katmanı güncellemesini tanımlar; LiDAR/radar algılama, sensör füzyonu, araç denetleyicisi ve direksiyon/gaz-fren eyleyicileri çalışma kapsamında değildir.

2.5 Kontrollü Çok Senaryolu Kıyaslama Tasarımı

Araç profilinin etkisini engel dağılımından yalıtmak ve tek bir başlangıç/hedef çiftine bağımlılığı azaltmak amacıyla ana karşılaştırma, çözücüden bağımsız (solver-blind) arazi ve geometri ölçütleriyle belirlenen 18 senaryoya

genişletilmiştir. Düşük (low), orta (medium) ve yüksek (high) zorluk seviyelerinde altışar senaryo tanımlanmış; seçim sürecinde S-ISPA güzergâh uzunluğu, amaç fonksiyonu, açıklık, Jaccard indeksi veya çalışma süresi gibi algoritmik çıktılar kullanılmamıştır. Her başlangıç/hedef çifti için araç profilinden ve risk yayılımından bağımsız, yalnızca 3B Öklid mesafesini minimize eden nötr bir referans güzergâh hesaplanmış; OA, OB ve OC engelleri bu hattın sırasıyla %35, %55 ve %75'lik konumlarına yerleştirilmiştir. Engel boyutları, güçlüden zayıfa sıralanan T1–T8 şiddet basamağı Çizelge 1 üzerinden yönetilmiştir ve her senaryoda Profil-L ve Profil-H için eğim maskeleri ve araca özgü geçilemez engel çekirdekleri uygulandıktan sonra, her iki profil için katı fiziksel bağlantısallığı (hard connectivity) koruyan en güçlü engel kademesi S-ISPA güzergâhı hesaplanmadan önce a priori (önsel olarak) kilitlenmiş ve aynı engel seti her iki profile uygulanmıştır. Bu kurgu, iki profilin genel arazi erişilebilirliğini değil, katı fiziksel uygulanabilirliği önceden doğrulanmış koşullu senaryo popülasyonundaki eşleştirilmiş güzergâh davranışını tarafsız biçimde karşılaştırmayı hedeflemektedir.

Çizelge 1. Rota Duyarlı Engel Gücü Kademelenmesi

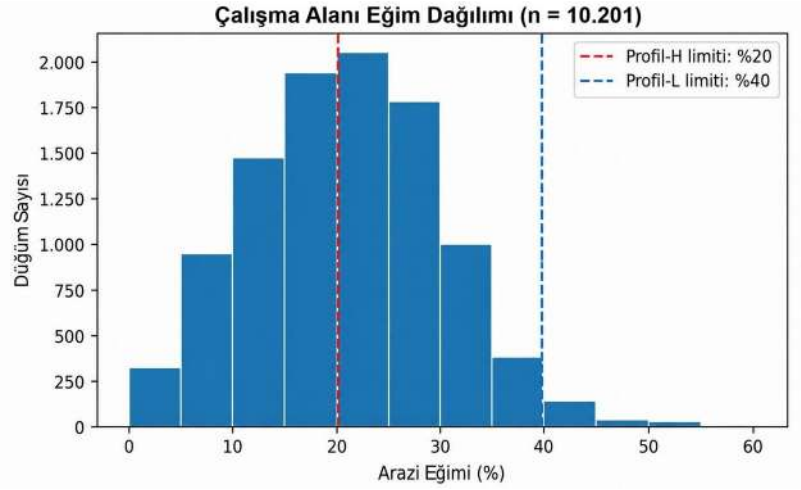
Engel Kademesi	R (m)	H_{OA} (m)	H_{OB} (m)	H_{OC} (m)
T1_STRONG	110	0,60	0,95	1,25
T2_HIGH	95	0,55	0,85	1,11
T3_MODERATE	80	0,50	0,75	0,95
T4_LIGHT	65	0,46	0,65	0,82
T5_MINIMAL	50	0,44	0,56	0,70
T6_GENTLE	40	0,42	0,50	0,65
T7_LOW	30	0,41	0,46	0,55
T8_TRACE	25	0,40	0,44	0,50

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

S-ISPA çerçevesinin başarımı; arazi topoğrafyası, araca özgü geçiş sınırları ve dinamik engel senaryolarını içeren kontrollü bir deneysel kurguyla değerlendirilmiştir. Bu bölümde elde edilen güzergâh sonuçları; yöntemin kısıt koruma performansı, hesaplama davranışı ve uygulama sınırlarıyla birlikte bütüncül olarak tartışılmaktadır.

3.1 Arazi Eğim Dağılımı

10.201 düğümün eğim dağılımı Şekil 3'te sunulmuş olup araç sınırlarının çalışma alanında gerçekten bağlayıcı olabildiğini göstermektedir. Düğümlerin 5.458'i (%53,50) %20'nin, 206'sı (%2,02) ise %40'ın üzerindedir; maksimum düğüm eğimi %59,945'tir. Dolayısıyla Profil-H ve Profil-L için tanımlanan eğim sınırlarının her ikisi de çalışma alanındaki mevcut eğim aralığı içerisinde aktif kısıtlar oluşturmaktadır.



Şekil 3. Çalışma Alanındaki 10.201 Düğüm İçin Eğim Histogramı ve Araç-Profili Eşiklerinin Arazi Dağılımındaki Yeri

Sunulan arazi karakterizasyonu, izleyen deneysel doğrulama zincirinin temelini oluşturmaktadır. Profil-H ve Profil-L eğim sınırlarının aynı topoğrafyada farklı fiziksel uygunluk uzayları tanımlaması nedeniyle değerlendirme üç

tamamlayıcı aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, araç profili etkisini senaryo ve engel geometrisi farklılıklarından yalıtmak amacıyla 18 eşleştirilmiş senaryoda ortak başlangıç/hedef çiftleri ve kilitlenmiş engel alanları altında araç-koşullu planlama davranışı incelenmiştir. İkinci aşamada, alt açıklığa bağlı kesin uygulanabilirlik (clearance-dependent hard-feasibility) mekanizmasının etkisi, aynı çizge ve Profil-H koşulları altında Özgün-ISPA-Çekirdeği ile Tam S-ISPA karşılaştırılarak test edilmiştir. Son aşamada ise statik planlama dinamik karar süreçlerine genişletilmiş; seyir sırasında yeni statik engeller belirdiğinde kalan güzergâhın güncellenmesi ve fiziksel kısıtların korunumu değerlendirilmiştir. Böylece deney dizisi, kontrollü profil karşılaştırması, mekanizma ablasyonu ve dinamik yeniden planlama düzeylerinde yöntemin başarımına ilişkin kademeli ve bütüncül kanıtlar sunmaktadır.

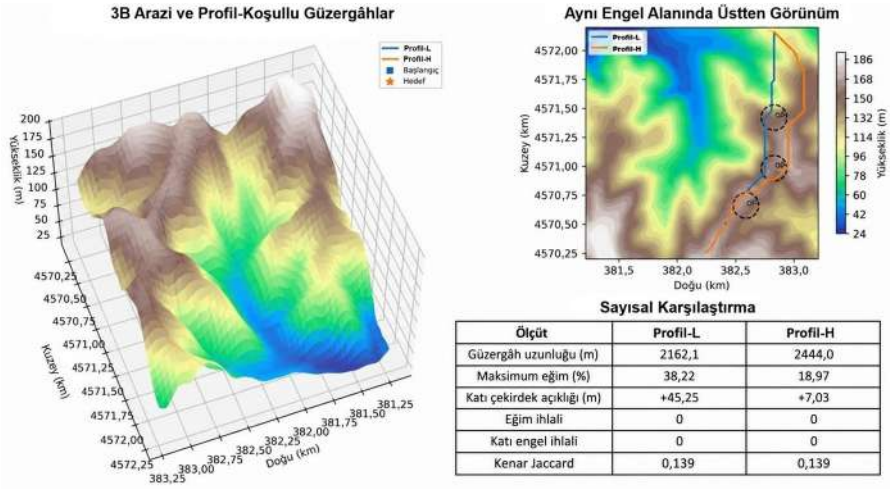
3.2 Çoklu Senaryo Profil-L / Profil-H Kontrollü Kıyaslama Testi

İlk deney, farklı araç-koşullu fiziksel uygunluk sınırlarının rota seçimine etkisini senaryo veya engel geometrisi farklılığından ayırarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle Profil-L ve Profil-H, 18 solver-blind başlangıç/hedef senaryosunun her birinde aynı arazi grafı ve aynı önceden kilitlenmiş engel alanı altında eşleştirilmiş olarak karşılaştırılmıştır. On sekiz kilitli senaryonun tamamı her iki profil için de çözülebilir kalmıştır. Tüm koşullarda eğim ihlali ve katı engel çekirdeği ihlali sıfırdır. Profil-H'nin Profil-L'ye göre medyan 3B rota-uzunluğu farkı %10,895, çeyrekler arası aralığı 10,849 yüzdelik puanıdır. Medyan edge-Jaccard değeri 0,119'dur; bu düşük örtüşme, aynı START/GOAL ve aynı senaryo-içi engel seti altında araç-koşullu fiziksel zarfların rota geometrisini anlamlı biçimde değiştirebildiğini göstermektedir. Medyan maksimum eğim Profil-L için %32,835, Profil-H için %19,809'dur. Profil-H böylece tüm karşılaştırma testinde %20 katı eğim sınırını korumuştur. On sekiz güzergâh-duyarlı kontrollü senaryoya ait eşleştirilmiş sonuçlar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. On Sekiz Güzergâh-Duyarlı Kontrollü Senaryonun Eşleştirilmiş Özeti

Grup	n	Medyan ΔL H-L (%)	IQR (yp)	Medyan Jaccard	Medyan Maksimum Eğim L/H (%)	Medyan Çekirdek Açıklığı L/H (m)
ALL	18	10,895	10,849	0,119	32,83 / 19,81	25,53 / 8,37
LOW	6	4,486	7,472	0,161	24,64 / 19,12	37,73 / 6,52
MEDIUM	6	8,180	5,658	0,142	28,94 / 19,95	15,66 / 8,54
HIGH	6	18,416	13,455	0,026	35,77 / 19,84	22,83 / 65,11

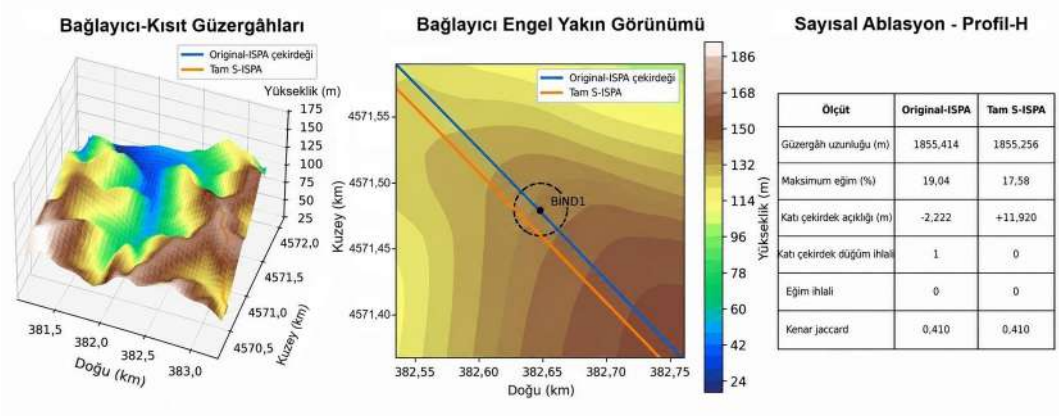
Çizelge 2'de sunulan çoklu-senaryo sonuçlarını temsil edecek örnek koşul, en büyük profil farkını veren senaryo üzerinden değil, çok değişkenli karşılaştırmalı değerlendirme medyanına en yakın senaryo esas alınarak belirlenmiştir. Bu seçim kuralına göre MS16 (Başlangıç NN 39559, Hedef NN 1311) temsilî senaryo olarak seçilmiştir. MS16'da T1_STRONG engel kademesi kullanılmıştır ($R = 110$ m; $H_0 = \{0,60; 0,95; 1,25\}$ m). Bu senaryoda Profil-L rotası 2162,118 m, Profil-H rotası ise 2444,002 m olarak hesaplanmış ve iki profil arasındaki göreli fark %13,037 olmuştur. Maksimum eğim değerleri sırasıyla %38,22 ve %18,97; minimum katı-çekirdek açıklıkları ise +45,253 m ve +7,026 m olarak belirlenmiştir. Her iki rota da herhangi bir fiziksel ihlal üretmemiştir. MS16 senaryosunda iki araç profiline ait rota geometrileri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. MS16 Senaryosunda Profil-L ve Profil-H Rotalarının Karşılaştırılması

3.3 Bağlayıcı-Kısıt Ablasyonu: Özgün-ISPA-Çekirdeği ve Tam S-ISPA

Kontrollü bağlayıcı-kısıt deneyi, genel bir performans karşılaştırması değil, mekanizma odaklı bir bileşen etki analizi (ablasyon) olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda "Özgün-ISPA-Çekirdeği", ortak revize graf ve Profil-H başlangıç koşullarında Özgün-ISPA'nın sabitlenmemiş komşuluk-yayılım çekirdeğini temsil eden kontrollü bir karşılaştırma varyantı olarak ele alınmış; Pehlivan (2025)'teki tüm WLC deneyinin birebir yeniden üretimi olarak sunulmamıştır. Her iki varyantta da aynı Profil-H yapılandırması, başlangıç/hedef çifti ve CB1–CB3 ile BIND1'den oluşan engel alanı kullanılmıştır. Fiziksel uygunluk için iki açıklık metriği ayrı ayrı raporlanmıştır: destek sınırı açıklığı, güzergâh ile engelin destek sınırı açıklığı yarıçapı R arasındaki geometrik farkı ifade etmekte ve negatif değerler yumuşak risk etki bölgesine girişi göstermekte; sert çekirdek açıklığı ise Eşitlik (5)'te tanımlanan araç-koşullu geçilemez çekirdeğe göre fiziksel uygunluğu ölçmektedir. Özgün-ISPA-Çekirdeği için minimum destek sınırı açıklığı −71,716 m ve sert çekirdek açıklığı −2,222 m olarak hesaplanmış ve bir katı-çekirdek ihlali oluşmuştur. Tam S-ISPA'da ise minimum destek sınırı açıklığı −85,858 m olmasına rağmen sert çekirdek açıklığı +11,920 m olarak belirlenmiş ve çekirdek ihlali gözlenmemiştir. Bu sonuç, negatif destek sınırı açıklığının tek başına fiziksel çarpışma anlamına gelmediğini, bağlayıcı güvenlik ölçütünün sert çekirdek açıklığı/ihlali olduğunu göstermektedir. Deney, açıklığa bağlı katı fiziksel uygunluk mekanizmasının etkinleştirilmesiyle seçilebilir durum uzayının değiştiğini izole biçimde ortaya koymakta, Tam S-ISPA'nın genel güzergâh uzunluğu açısından üstün olduğunu iddia etmemektedir. İki yaklaşım arasındaki fiziksel uygunluk farkı Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Profil-H İçin Özgün-ISPA ve S-ISPA'nın Fiziksel Uygunluk Karşılaştırması

3.4 Kontrollü Olay-Tetiklemeli Ardışık Yeniden Planlama

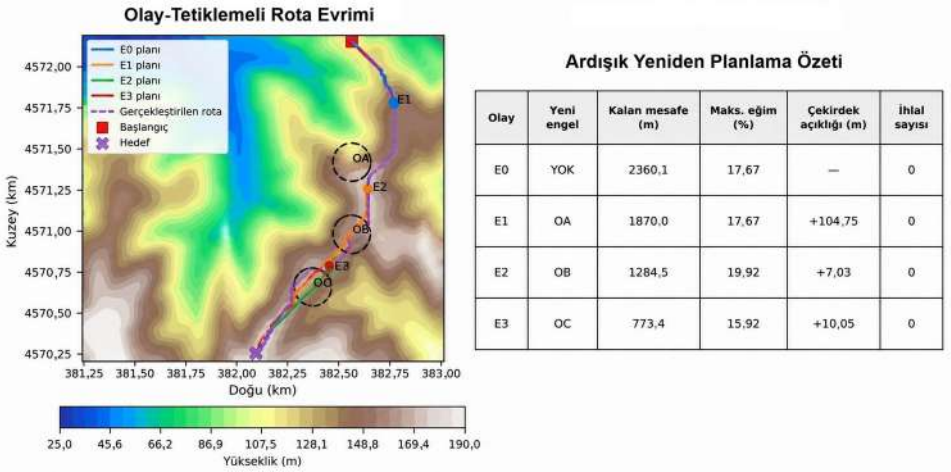
İlk iki deney, başlangıçta bütünüyle bilinen statik ortamda araç-koşullu rota davranışını ve hard-feasibility mekanizmasının izole edilmiş etkisini değerlendirmektedir. Üçüncü olarak gerçekleştirilen, olay tetiklemeli yeniden planlama deneyi ise aynı fiziksel uygunluk mantığının rota yürütümü sırasında yeni statik engeller açığa çıktığında ardışık yeniden planlama altında korunup korunmadığını sınamaktadır. Temsilî MS16 senaryosu Profil-H ile kullanılmıştır. İlk rota, hiçbir engel bilinmeden başlangıç NN 39559'dan Hedef NN 1311'e planlanmıştır. Daha sonra üç statik engel OA, OB ve OC, başlangıç rotasının yaklaşık %20, %45 ve %70 kümülatif ilerleme hedeflerinde ardışık olarak açığa çıkarılmıştır. Her olayda daha önce kat edilen güzergâh dondurulmuş ve yalnızca güncel düğümden sabit hedefe kalan rota Tam S-ISPA ile yeniden hesaplanmıştır. Tüm olaylarda eğim ihlali ve katı engel çekirdeği ihlali sıfır olarak gerçekleşmiştir. Kontrollü ardışık yeniden planlama deneyine ait sonuçlar Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. MS16/Profil-H Kontrollü Ardışık Yeniden Planlama Denetimi

Olay	Yeni Engel	Kümülatif İlerleme (m)	Kalan Rota (m)	Maksimum Eğim (%)	Çekirdek Açıklığı (m)	Jaccard
E0	Yok	0,000	2360,1	17,67	-	-
E1	OA	490,1	1870,0	17,67	+104,75	0,800
E2	OB	1077,0	1284,5	19,92	+7,03	0,135
E3	OC	1670,4	773,4	15,92	+10,05	0,093

Başlangıçtaki engel-bilinmeyen planın kalan 3B rota uzunluğu 2360,093 m ve maksimum eğimi %17,675'tir. E1'de OA açığa çıktığında kalan rota 1869,998 m; E2'de OB eklendiğinde 1284,465 m; E3'te OC eklendiğinde ise 773,398 m olmuştur. E2 ve E3'te önceki plana göre kenar-Jaccard benzerlik (rota kenar örtüşme oranı) değerlerinin sırasıyla

0,135 ve 0,093'e düşmesi, yeni engellerin devreye girmesiyle kalan rota geometrisinin belirgin biçimde yeniden kurulduğunu göstermektedir. Hiçbir olayda eğim veya katı engel ihlali oluşmamıştır. Bu sonuçlar, S-ISPA'nın yeni bir engel ortaya çıktığında önceki rotaya bağlı kalmak yerine kalan güzergâhın tamamını güncel koşullara göre yeniden optimize ettiğini göstermektedir. Nitekim eski ve yeni rota arasındaki örtüşme oranı E3 aşamasında %10'un altına (0,093) düşmüştür. Kontrollü ardışık yeniden planlama süreci Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu deney yalnızca yeni açığa çıkarılan statik engeller sonrasında gerçekleştirilen ayrık yeniden planlamayı kapsamaktadır; hareketli engel yörünge kestirimi, sürekli algılama, sensör füzyonu ve kapalı çevrim araç kontrolü çalışma kapsamında gerçekleştirilmemiştir.



Olay	Yeni engel	Kalan mesafe (m)	Maks. eğim (%)	Çekirdek açıklığı (m)	İhlal sayısı
E0	YOK	2360,1	17,67	—	0
E1	OA	1870,0	17,67	+104,75	0
E2	OB	1284,5	19,92	+7,03	0
E3	OC	773,4	15,92	+10,05	0

Şekil 6. MS16/Profil-H İçin Kontrollü Olay Tetiklemeli Ardışık Yeniden Planlama: Yeni Statik Engeller Açığa Çıktıkça Kalan Güzergâhın Yeniden Hesaplanması

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Özgün-ISPA'dan devralınan komşuluk yayılımı, eğim-uygunluk filtrelemesi ve kümülatif çizge arama mimarisini; araç-koşullu alt-gövde açıklığı uygunluğu, katı fiziksel ve yumuşak operasyonel risk ayrımı, sabitlenmiş deterministik yayılım ve olay tetiklemeli ardışık yeniden planlama mekanizmalarıyla genişleten S-ISPA'yı ortaya koymuştur. Böylece güzergâh planlama süreci, farklı araç profillerinin fiziksel geçiş sınırlarını ve değişen çevresel koşulları birlikte dikkate alan araç-koşullu bir karar destek çerçevesine dönüştürülmüştür.

Geliştirilen yöntem, çözücüden bağımsız olarak belirlenen 18 başlangıç/hedef senaryosu ve önceden kilitlenen güzergâh-duyarlı engel kademeleri üzerinde değerlendirilmiştir. Tüm senaryolarda her iki araç profili için eğim ve katı engel ihlalleri sıfır gerçekleşmiş; ağır askerî lojistik aracının (Profil-H), hafif askerî arazi aracına (Profil-L) göre medyan güzergâh uzunluğu farkı %10,895 olarak ölçülmüştür. Bağlayıcı-kısıt ablasyonunda Özgün-ISPA-Çekirdeği −2,22 m açıklıkla geçilemez bölgeyi ihlal ederken Tam S-ISPA +11,92 m sert çekirdek açıklığı sağlamış; MS16 ardışık yeniden planlama deneyinde ise kalan güzergâh her yeni engel sonrasında yeniden hesaplanarak fiziksel sınırlar korunmuştur. Bulgular, yöntemin katkısını fiziksel olarak ölçülebilir araç uygunluğu ve kontrollü dinamik yeniden planlama davranışı üzerinden ortaya koymaktadır. Bununla birlikte mevcut uygulama, araç-koşullu geometrik ve engel ilişkili geçilebilirliğe odaklanmakta; gerçek zamanlı algılama, sensör füzyonu ve kapalı çevrim araç kontrolünü kapsamamaktadır. Arazi örtüsü, hidrografya, zemin/malzeme, bitki örtüsü ve arazi kullanımı gibi çevresel katmanlar da modele dâhil edilmediğinden, uygun olarak sınıflanan güzergâhlar yalnızca modellenen eğim ve engel-açıklık kısıtları açısından fiziksel uygunluğu ifade etmekte; dere/gölet, orman, tarım alanı, çamur, kum ve benzeri arazi sınıfları bağımsız olarak değerlendirilmemektedir. Bu nedenle sonuçlar kontrollü simülasyon koşulları kapsamında yorumlanmalıdır.

Gelecek çalışmalarda yöntemin iki temel doğrultuda geliştirilmesi öngörülmektedir. İlk olarak, uzaktan algılama, CBS ve araç üstü algılayıcılardan elde edilen arazi örtüsü, hidrografya, zemin ve toprak taşıma kapasitesi gibi coğrafi veri katmanlarının araca özgü katı dışlama maskelerine ve sürekli geçilebilirlik maliyet yüzeylerine dönüştürülerek çevresel temsilin zenginleştirilmesi hedeflenmektedir. İkinci olarak, algılama–planlama–denetim zincirinin gerçek bir otonom kara aracı üzerinde uygulanması; LiDAR, radar ve derinlik kameralarından elde edilen çevrim içi verilerle graf yapısının dinamik olarak güncellenmesi ve sensör ediniminden eyleyici komutuna kadar geçen uçtan uca gecikme sürelerinin ölçülmesi, yöntemin gerçek operasyonel koşullardaki uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi açısından önemli bir sonraki adımı oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Danielson, J. J. ve Meyer, D., 2016. Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model Version 3 over the conterminous United States. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 143–148. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B4-143-2016

Gilmer, J., Schoenholz, S. S., Riley, P. F., Vinyals, O. ve Dahl, G. E., 2017. Neural message passing for quantum chemistry. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, PMLR 70: 1263–1272.

Inotsume, H. ve Kubota, T., 2022. Terrain traversability prediction for off-road vehicles based on multi-source transfer learning. *ROBOMECH Journal*, 9: Article 6. https://doi.org/10.1186/s40648-021-00215-3

Min, C., Si, S., Wang, X., Xue, H., Jiang, W., Chen, Z., Li, M., Mei, J., Shang, E., Xiao, Z., Dai, B., Zhu, Q., Fu, H., Zhao, D., Xiao, L., Nie, Y. ve Hu, Y., 2026. Autonomous driving in unstructured off-road environments: How far have we come? *Journal of Field Robotics*, 43(5): 3403–3439. https://doi.org/10.1002/rob.70154

NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems ve U.S./Japan ASTER Science Team, 2019. ASTER Global Digital Elevation Model V003 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003

Pehlivan, H., 2025. Iterative Score Propagation Algorithm (ISPA): A GNN-Inspired Framework for Multi-Criteria Route Design with Engineering Applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(12): 484. https://doi.org/10.3390/ijgi14120484

Reda, M., Onsy, A., Haikal, A. Y. ve Ghanbari, A., 2024. Path planning algorithms in the autonomous driving system: A comprehensive review. *Robotics and Autonomous Systems*, 174: 104630. https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104630

Venu, S. ve Gurusamy, M., 2025. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous navigation. *Results in Engineering*, 28: 107750. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107750

Wang, N., Li, X., Zhang, K., Wang, J. ve Xie, D., 2024. A survey on path planning for autonomous ground vehicles in unstructured environments. *Machines*, 12(1): 31. https://doi.org/10.3390/machines12010031

HARİTA HİÇ KAPANMASIN: AÇIK KAYNAKLI SİSTEMLERLE KESİNTİSİZ VE GERÇEK ZAMANLI MEKÂNSAL VERİ YÖNETİMİ

Deniz GÖKDUMAN[1]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, gokdumano@itu.edu.tr

ÖZET

Uydu tabanlı yer gözlemi (EO) verilerinin artan hacmi ve zamansal çözünürlüğü, bu verileri servis eden altyapıların kesintisiz ve ölçeklenebilir biçimde çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, tamamı açık kaynaklı bileşenlerden oluşan, yüksek erişilebilirlikli (HA) ve veri kaynağından bağımsız bir mekânsal veri servis mimarisi tasarlanmış; Proxmox ortamında 11 sanal makine ve 5 katmandan oluşan bir pilot uygulama olarak kurulmuş, kontrollü arıza enjeksiyonuyla deneysel olarak sınanmıştır. Yük dengeleme katmanında (HAProxy+Keepalived/VRRP) ani düğüm kaybında gerçek bir çift-sahiplik (split-brain) bulgusu tespit edilmiş ve systemd tabanlı bir önlemle (ExecStopPost) düzeltilmiş; düzeltme sonrası, öngörülebilir bir ~4 saniyelik failover süresi elde edilmiştir. HA/LB katmanının maliyeti nicelendirilmiş: üç veri tabanı düğümünün bağımsız kapasitesi doğrudan erişimde neredeyse doğrusal toplanırken (~3,5 kat), tek bir yük dengeleyici girişinden geçirildiğinde bu paralelliğin büyük bölümü (~%58'i) kaybolmakta; bu kayıp, doğrudan CPU ölçümüyle doğrulanan bir seri-darboğaz etkisidir. Nesne depolama katmanında üç aday motor (MinIO, RustFS, SeaweedFS) ağdan izole bir ortamda karşılaştırılmış; mimarinin gerçek erişim deseniyle (HTTP Range okuma) uyumlu bulgulara dayanarak RustFS seçilmiştir. Dağıtık koordinasyon katmanı (etcd/Raft), aynı senaryolar altında yük dengeleme katmanına göre hem daha hızlı (~1,4 saniye) hem de çift-sahipliğe yapısal olarak bağışıklığı bulunmuştur. Veri tabanı katmanında (Patroni) ayrıca sınanan bir failover deneyinde, tam düğüm kaybının (reboot) çift-sahipliğe yol açmadığı gösterilmiştir. Son olarak, PostGIS-indeksli bir ImageMosaic/COG mekanizması EUMETSAT/MSG HRSEVIRI kataloğundan gerçek veriyle (24 granül) uçtan uca sınanmış; WMS `GetMap` isteklerinde `TIME=` parametresiyle doğru granül seçimi piksel-düzeyinde doğrulanarak mekanizmanın kaynaktan bağımsız tasarımı kanıtlanmıştır. Bulgular, açık kaynaklı bileşenlerle kurulan bir HA mimarisinin, ölçülebilir mühendislik kararlarına dayandığında akademik/pilot ölçekte kesintisiz mekânsal veri servisi sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: açık kaynak, coğrafi bilgi sistemleri, uzaktan algılama, yüksek erişilebilirlik

ABSTRACT

THE MAP NEVER GOES DOWN: UNINTERRUPTED AND REAL-TIME SPATIAL DATA MANAGEMENT WITH OPEN-SOURCE SYSTEMS

The increasing volume and temporal resolution of satellite-based Earth Observation (EO) data necessitate that the infrastructures serving this data operate in an uninterrupted and scalable manner. In this study, a high-availability (HA) and data-source-agnostic spatial data service architecture—composed entirely of open-source components—was designed; it was deployed as a pilot application comprising 11 virtual machines and 5 layers within a Proxmox environment and experimentally tested via controlled fault injection. A "split-brain" scenario was detected in the load balancing layer (HAProxy+Keepalived/VRRP) during a sudden node failure and was rectified using a systemd-based measure (ExecStopPost); following this fix, a predictable failover time of approximately 4 seconds was achieved. The cost of the HA/LB layer was quantified: while the independent capacities of three database nodes aggregate almost linearly (~3.5x) under direct access, a significant portion of this parallelism (~58%) is lost when routed through a single load balancer entry point; this loss represents a serial bottleneck effect confirmed by direct CPU measurements. Three candidate engines (MinIO, RustFS, SeaweedFS) for the object storage layer were compared in a network-isolated environment; RustFS was selected based on findings aligned with the architecture's actual access pattern (HTTP Range reads). Under the same scenarios, the distributed coordination layer (etcd/Raft) was found to be both faster (~1.4 seconds) and structurally immune to split-brain conditions compared to the load balancing layer. In a failover test conducted at the database layer (Patroni), it was demonstrated that a complete node loss (reboot) did not result in dual ownership. Finally, an ImageMosaic/COG mechanism utilizing PostGIS indexing was tested end-to-end using real data (24 granules) from the EUMETSAT/MSG HRSEVIRI catalog; the mechanism's source-agnostic design was validated by verifying—at the pixel level—the correct granule selection via the `TIME=` parameter in WMS `GetMap` requests. The findings indicate that an HA architecture built with open-source components can provide uninterrupted spatial data services at an academic or pilot scale when grounded in quantifiable engineering decisions.

Keywords: open source, geographic information systems, remote sensing, high availability

1. GİRİŞ VE ANA BÖLÜMLER

Afet yönetimi, tarımsal izleme ve iklim değişikliği takibi gibi uygulamalar, uydu tabanlı yer gözlemi (EO) verisinin yalnızca doğru değil, aynı zamanda kesintisiz ve zamanında erişilebilir olmasını gerektirmektedir. Ancak akademik ve pilot ölçekli coğrafi bilgi sistemi (CBS) altyapıları çoğunlukla tek bir sunucu üzerinde çalışan, tek bir arızada tamamen durabilen (single point of failure) mimarilerle kurulmaktadır. Web/Veri tabanı dünyasında yaygın olan yüksek erişilebilirlik (HA) teknikleri (dağıtık koordinasyon, otomatik devir/geçiş, yük dengeleme) olgunlaşmış olsa da bunların uçtan uca bir CBS servis zincirine (nesne depolama → veri tabanı → harita sunucusu) uygulanıp gerçek

arıza enjeksiyonuyla ölçüldüğü çalışmalar sınırlıdır; çoğu çalışma mimariyi kavramsal düzeyde sunmakta, kesinti sürelerini ve maliyetlerini nicel olarak raporlamamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, tamamı açık kaynaklı bileşenlerden oluşan, veri kaynağından bağımsız bir mekânsal veri servis mimarisini gerçek bir sanallaştırma ortamında uçtan uca kurmak ve her katmanını kontrollü arıza enjeksiyonu ile deneysel olarak sınamaktır. Çalışmanın katkıları dört başlıkta özetlenebilir: (i) yük dengeleme, dağıtık koordinasyon, veri tabanı, harita servisi ve nesne depolama katmanlarından oluşan, yeniden üretilebilir bir açık kaynaklı HA mimarisi; (ii) her katmanda gerçek (simüle edilmemiş) arıza enjeksiyonu ile elde edilen, istatistiksel olarak raporlanmış kesinti süreleri; (iii) yük dengeleme katmanında keşfedilen gerçek bir çift-sahiplik (split-brain) hatasının tespiti, düzeltilmesi ve düzeltme öncesi/sonrası karşılaştırmalı olarak doğrulanması; (iv) PostGIS-indeksli, yalnızca uzamsal/zamansal (BBOX/TIME) sorgulara dayanan ve bu sayede kaynaktan bağımsız bir ImageMosaic/COG mekanizmasının tasarlanması, EUMETSAT/MSG HRSEVIRI kataloğundan gerçek veriyle uçtan uca (eumdac→ RustFS→PostgreSQL→GeoServer) beslenmesi ve zaman parametresiyle doğru granül seçiminin piksel-düzeyinde karşılaştırmayla doğrulanması.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: bu bölümün izleyen alt başlıklarında sırasıyla pilot mimari, arıza enjeksiyonu yöntemi, veri tabanı verim testleri, nesne depolama karşılaştırması ve veri kaynağından bağımsızlık mekanizması anlatılmakta; ardından yük dengeleme, dağıtık koordinasyon, depolama motoru seçimi ve vaka çalışmasına ait deneysel bulgular sunulmaktadır. Son olarak sonuçlar bölümünde bulgular tartışılıp çalışmanın sınırlamaları ve gelecek çalışma önerileriyle tamamlanmaktadır.

1.1 Mimari Genel Bakış

Çizelge 1. Pilot mimarinin katman, düğüm ve bileşen özeti.

Katman	Düğüm(ler)	Adet	Rol / Bileşenler
Yük Dengeleme (LB)	LB01–LB02-LB03	3	HAProxy + Keepalived (VRRP), VIP: 192.168.1.240
Koordinasyon (DCS)	DC01–DC02-DC03	3	etcd v3 (Raft) — Patroni için dağıtık yapılandırma deposu
Veri Tabanı (DB)	PG01–PG02-PG03	3	PostgreSQL 18 + PostGIS + Patroni + PgBouncer + kernel watchdog
Harita Servisi (GS)	GS01	1	GeoServer 2.28.x + cog-http-plugin (community)
Nesne Depolama (FS)	FS01	1	RustFS (S3 uyumlu), tek düğüm/tek disk

Pilot mimari, gerçek bir Proxmox iş istasyonu (6 çekirdek/12 mantıksal Xeon E5-1650, 64GB RAM, 1TB SSD + 1TB HDD) üzerinde, 11 sanal makine ve beş katmandan oluşacak şekilde kurulmuştur (Çizelge 1, Şekil 1). Veri tabanı katmanı Patroni (Zalando SE, t.y.) ile yönetilen bir PostgreSQL 18 kümesidir (1 Lider + 2 Replika); dağıtık koordinasyon (DCS) katmanı, Patroni'nin liderlik/yapılandırma bilgisini tuttuğu ayrı bir etcd/Raft (CNCF/etcd, t.y.) kümesidir — CPU/RAM ihtiyacı düşük ama fsync gecikmesine aşırı duyarlı olması nedeniyle veri tabanı düğümlerinden bilinçli olarak ayrılmıştır. Yük dengeleme katmanı, VIP (192.168.1.240) üzerinde iki ayrı HAProxy (HAProxy Technologies, t.y.) önyüzü açar: yalnızca Lider'e yönlendirilen bir yazma önyüzü (port 5000) ve Lider + Replikaların tamamına roundrobin dağıtım yapan bir okuma önyüzü (port 5001); her iki önyüz de arka planda düğümlerin kendi PgBouncer'ına (6432) bağlanır. Nesne depolama katmanı, COG (Cloud Optimized GeoTIFF) formatındaki raster verileri S3-uyumlu bir arayüzle RustFS (RustFS, t.y.) üzerinden sunar; harita servisi katmanı GeoServer (GeoServer, t.y.) ise bu COG'ları PostGIS'te tutulan bir granül indeksi üzerinden HTTP Range istekleriyle okur. Mimarinin 5 katmanlı yapısı ve düğümler arası veri/kontrol akışı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2. Sunucu IP Planı.

Katman / Düğüm	VM Adı	VM No	VM IP	Katman / Düğüm	VM Adı	VM No	VM IP
-	VIP	-	192.168.1.240	DCS	DC03	203	192.168.1.249
LB	LB01	101	192.168.1.244	DB	PG01	301	192.168.1.250
LB	LB02	102	192.168.1.245	DB	PG02	302	192.168.1.251
LB	LB03	103	192.168.1.246	DB	PG03	303	192.168.1.252
DCS	DC01	201	192.168.1.247	GS	GS01	401	192.168.1.253
DCS	DC02	202	192.168.1.248	FS	FS01	501	192.168.1.254



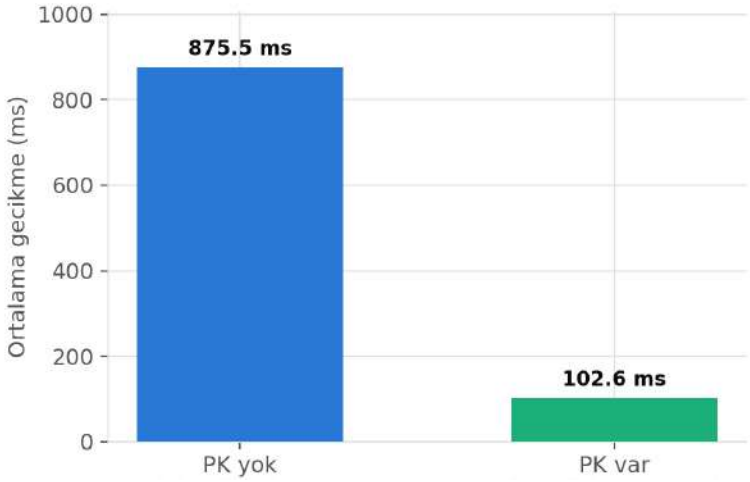
Şekil 1. Pilot mimarinin 5 katmanlı yapısı ve düğümler arası veri/kontrol akışı (11 sanal makine).

1.2 Arıza Enjeksiyonu Metodolojisi

Yük dengeleme ve dağıtık koordinasyon katmanlarının arıza toleransı, ortak bir tasarım ilkesiyle test edilmiştir: kümenin dışında konumlanan ayrı bir kontrol istemcisinden, arıza tetiklenmeden 3 saniye önce arka planda başlayan sürekli bir prob (VIP'e HTTP isteği veya etcd'nin tüm endpoint'lerine yazma denemesi), tetikleme anını ve sonrasını kesintisiz örnekler; her deneme başarı/başarısızlık durumu ve zaman damgasıyla kaydedilir. Kesinti süresi, tetikten sonraki ilk başarısız deneme ve sonraki ilk başarılı deneme arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Bu tasarım, ilk denemelerde arıza komutunun (SSH üzerinden systemctl/pkill) yürütme süresinin ölçüm penceresi dışında kalıp geçiş anının kaçırılmasını önlemek için özellikle geliştirilmiştir. Yük dengeleme katmanında graceful master stop, hard master kill (SIGKILL) ve cascading dual failure (iki düğümün art arda kaybı) senaryoları her biri 3 tekrarla; dağıtık koordinasyon katmanında lider graceful/hard-kill senaryoları 3 tekrarla, çoğunluk kaybı (quorum loss) senaryosu ise sonucu ikili/deterministik olduğu için tek koşumla test edilmiştir. Her koşumdan sonra kümenin tam sağlıklı duruma döndüğü, bir sonraki tekrara geçmeden önce ayrıca doğrulanmıştır.

1.3 Veri Tabanı Verim Testleri (pgbench)

Veri tabanı ve yük dengeleme katmanlarının verim özellikleri, PostgreSQL'in pgbench (PostgreSQL Global Development Group, t.y.) aracının salt-okunur (select-only) iş yükü kullanılarak dört kategoride ölçülmüştür: (1) tek bir düğümde indeksleme etkisinin (birincil anahtar var/yok) izole edilmesi; (2) yine tek düğümde doğrudan bağlantı ile PgBouncer'ın üç havuzlama modunun (session/transaction/statement) karşılaştırılması; (3) aynı karşılaştırmanın, Patroni/etcd/watchdog yığınının arka planda gerçekten çalıştığı üretim kümesine karşı tekrarlanması; (4) kümenin okuma kapasitesinin, düğümlere doğrudan erişim ile tek bir VIP/HAProxy girişi üzerinden erişim arasında karşılaştırılması — istemci tarafı süreç sayısı etkisini izole eden ayrı bir kontrol deneyi ve VIP'i taşıyan düğümde eşzamanlı CPU ölçümü (mpstat) ile desteklenmiştir. Tüm testlerde sabit süreli (-T) koşum kullanılmış, her istemci her işlemde yeniden bağlanmaya zorlanmıştır (-C/--connect) — bu, PgBouncer'ın temel faydası olan bağlantı kurma maliyetinin ortadan kaldırılmasını ölçülebilir kılmak için bilinçli bir tercihtir. İlk kategoride, birincil anahtar (PK) eklenmesi sorgu planını Seq Scan'den Index Scan'e değiştirmekte ve gerçek 1M satırlık veri setinde verimi ~8,5 kat artırmaktadır (Şekil 2); ikinci ve üçüncü kategorilerde PgBouncer'ın havuzlama modları doğrudan bağlantıya kıyasla 10,3–16,7 kat daha yüksek verim sağlamakta, gecikme ise eşzamanlılıkla Little Yasası'nın ($L=\lambda W$) öngördüğü biçimde neredeyse tam orantılı büyümektedir (Little, 1961).



Şekil 2. pgbench Kategori 1 sonucu: birincil anahtar (PK) varlığının sorgu planına ve verime etkisi (Seq Scan / Index Scan).

1.4 Nesne Depolama Karşılaştırması (warp)

Nesne depolama motoru seçimi için MinIO, RustFS ve SeaweedFS, minio/warp benchmark aracıyla iki ayrı turda karşılaştırılmıştır. Birinci turda üç motor, aynı donanım profiline sahip (8GB RAM, 500GB HDD) üç ayrı fiziksel dizüstü bilgisayarda, gerçek bir LAN üzerinden test edilmiştir. İkinci turda, host-seviyesi disk önbelleğinin sonuçları etkileyip etkilemediği sorusunu kapatmak amacıyla, üç motor birbirinden bağımsız üç geçici Proxmox sanal makinesinde, ağ tamamen devre dışı bırakılarak (localhost üzerinden) ve veri seti RAM'inin iki katına çıkarılarak N=3 tekrarla yeniden test edilmiştir; Proxmox'un ilgili disklerde varsayılan `cache=none` (host sayfa önbelleği devre dışı) modunu kullandığı (Proxmox Server Solutions GmbH, t.y.) ayrıca `qm config`/`free -h` çıktılarıyla doğrulanmıştır.

1.5 PostGIS İndeksli ImageMosaic ve Veri Kaynağından Bağımsızlık Yöntemi

Harita servisi katmanında, GeoServer'ın ImageMosaic mekanizması PostGIS-indeksli bir granül kataloğuna (fid, geometri, dosya konumu, alım zamanı) bağlanmış; `indexer.properties` dosyasında `Cog=true` bayrağı ile GeoServer'ın uzak COG dosyalarını HTTP Range istekleriyle okuması sağlanmıştır. Granül geometrisi (geom), `gdalinfo`'nun köşe-tabanlı `wgs84Extent` alanı yerine GDAL'in gdal_footprint (GDAL/OGR Contributors, t.y.) aracıyla çıkarılmaktadır; gdal_footprint, yalnızca geçerli piksellerin sınırını vektörleştirdiği için daha doğru sonuç vermektedir. Mekanizmanın veri kaynağından bağımsızlığı, granül kataloğunun yalnızca uzamsal/zamansal (BBOX/TIME) alanlara dayanması ve herhangi bir sensöre özgü alan içermemesiyle mimari düzeyde sağlanmıştır; bu, aynı `eo_mosaic` şemasının ileride başka uydu ürünlerine de değişiklik gerektirmeden genişletilebilir olmasını garanti eder. Pilot uygulamada mekanizma, tek bir gerçek veri kaynağı olan EUMETSAT/MSG SEVIRI (HRSEVIRI) kataloğu üzerinden uçtan uca sınanmıştır: eumdac (EUMETSAT, t.y.) ile indirme, GDAL ile COG dönüşümü, gdal_footprint ile metadata çıkarımı, RustFS'e yükleme ve PostgreSQL'e yazmayı tek bir zincirde birleştiren bir otomasyon kullanılarak, 12 Ağustos 2026 tarihinde ~15 dakikalık aralıklarla 24 gerçek HRSEVIRI granülü (14:00–19:45 aralığı) işlenip `eo_mosaic` tablosuna yazılmış ve GeoServer üzerinden ImageMosaic olarak servise alınmıştır; `TimeAttribute=ingestion` alanı sayesinde WMS `GetCapabilities` çıktısında 24 granülün 24 ayrı zaman damgası olarak listelendiği, ve iki farklı `TIME=` değeriyle gönderilen `GetMap` isteklerinin piksel düzeyinde farklı granülleri doğru şekilde döndürdüğü doğrulanarak, zamana dayalı (ingestion) granül seçiminin gerçek veri üzerinde çalıştığı gösterilmiştir.

1.6 Yük Dengeleme Katmanı: Çift-Sahiplik Keşfi ve Düzeltmesi

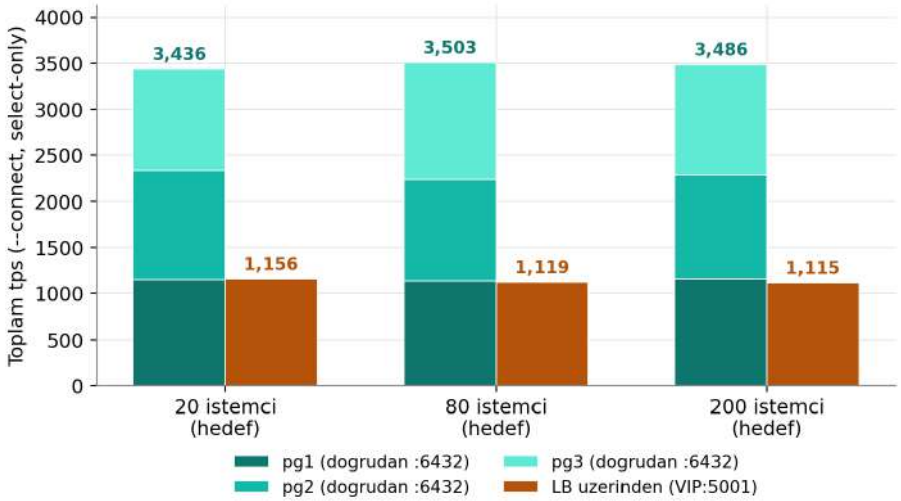
Öncelik tabanlı bir VRRP (Keepalived Project, t.y.) zincirinde (LB01 öncelik=150/MASTER, LB02=100/BACKUP, LB03=50/BACKUP) haberli (graceful) arıza senaryoları beklenen şekilde, saniyenin altında ölçülebilir kesintilerle sonuçlanmıştır (Çizelge 2). Ancak habersiz/ani çökme (SIGKILL) senaryosunda öncü ölçümler yanıltıcı bir sonuç vermiştir: üç tekrarın tamamında istemci tarafında sıfır başarısız istek gözlenmiştir. Düğüm bazlı doğrudan arayüz kontrolü ise bunun gerçek bir kesintisiz geçiş değil, bir çift-sahiplik durumu olduğunu ortaya koymuştur: SIGKILL yakalanamadığı için keepalived kendi VIP-temizleme rutinini çalıştıramamış, VIP ölen düğümün arayüzünde askıda kalırken eş zamanlı olarak yedek düğüm de bağımsız olarak MASTER'a yükselip aynı VIP'i kendi arayüzüne eklemiştir. Bu bulguya karşı her üç düğümün keepalived systemd birimine, servisin hangi sebeple durursa dursun VIP'i arayüzden zorla kaldıran bir `ExecStopPost` kuralı ve `Restart=on-failure` eklenmiştir. Düzeltme sonrası aynı senaryonun üç tekrarının hiçbirinde çift-sahiplik gözlenmemiş; bunun karşılığında, önceki yanıltıcı '0 ms'lik' sonucun aksine, VRRP'nin teorik habersiz-kayıp-tespiti formülüyle (master_down_interval = 3×advert_int + skew_time) tutarlı, öngörülebilir ~4031 ms'lik gerçek bir failover süresi ortaya çıkmıştır.

Çizelge 3. Hard Master Kill senaryosunda çift-sahiplik düzeltmesi öncesi/sonrası karşılaştırma.

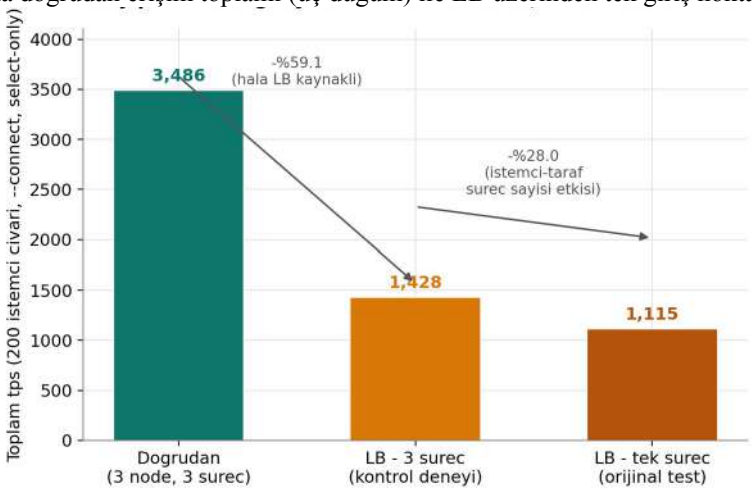
Senaryo	Tetikleme	Ort. Kesinti	Çift-Sahiplik
Graceful Master Stop	systemctl stop	~1204 ms	—
Cascading Dual Failure	2× systemctl stop	~2489 ms	—
Hard Master Kill — düzeltme ÖNCESİ	SIGKILL	0 ms (yanıltıcı)	Evet (3/3 tekrar)
Hard Master Kill — düzeltme SONRASI	SIGKILL	~4031 ms	Hayır (0/3 tekrar)

1.7 HA/LB Katmanının Maliyeti: Amdahl Yasası Çerçevesi

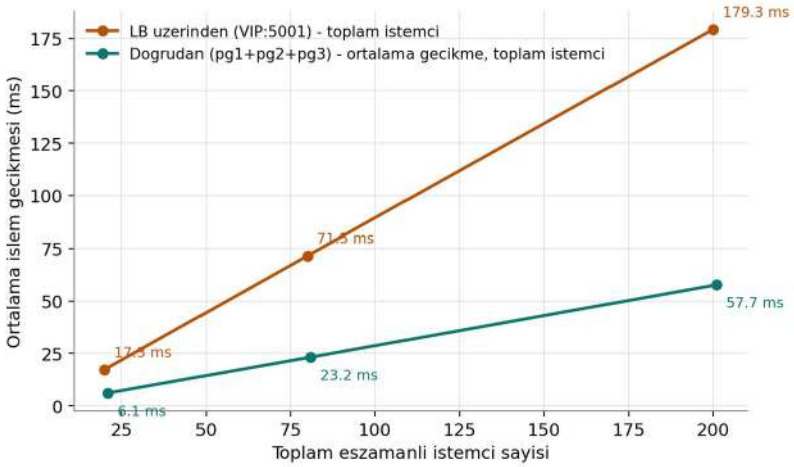
Üç veri tabanı düğümüne HAProxy'yi atlayarak doğrudan erişildiğinde toplam okuma kapasitesi neredeyse doğrusal olarak katlanmakta (~3450–3500 işlem/sn, tek düğüm performansının ~3 katı); ancak aynı trafik tek bir VIP/HAProxy girişinden geçirildiğinde toplam kapasite tek bir düğümün gösterdiği düzeye (~1100–1200 işlem/sn) gerilemektedir (Şekil 3). İstemci tarafı süreç sayısını sabitleyen bir kontrol deneyi (Şekil 4), bu kaybın yaklaşık %31'inin istemci tarafı paralellik sınırından, kalan ve baskın olan ~%58'inin ise LB/VIP katmanının kendisinden kaynaklandığını göstermiştir. Aynı VIP girişi arkasında eşzamanlılık arttıkça gecikmenin Little Yasası'nın (L=λW) öngördüğü biçimde neredeyse orantılı büyümesi (Şekil 5) (Little, 1961), darboğazın sabit bir hizmet kapasitesi üzerinde kuyruklanan bir seri kaynak olduğunu bağımsız biçimde doğrulamaktadır. Bu son bulgu, VIP'i taşıyan düğümde eşzamanlı ölçülen CPU kullanımıyla da doğrudan doğrulanmıştır: tek çekirdekli düğüm test boyunca ortalama %99 doygunluğa ulaşmakta, kullanım neredeyse tamamen çekirdek (%sys) ve softirq/ağ yığını (%soft) bileşenlerinden oluşmaktadır (Şekil 6) — bu, darboğazın HAProxy'nin uygulama mantığından değil, saniyede yüzlerce kısa ömürlü TCP bağlantısı kurma/sonlandırma yükünden kaynaklandığını göstermektedir. Bulgu, Amdahl Yasası'nın (Amdahl, 1967) öngördüğü seri darboğaz etkisiyle açıklanmaktadır: sistemin seri/paylaşılan kısmı (tek aktif VIP+HAProxy yolu) ne kadar küçük olursa olsun, arkasındaki paralel kaynakların (üç düğüm) sağlayabileceği toplam hızlanmayı sınırlamaktadır.



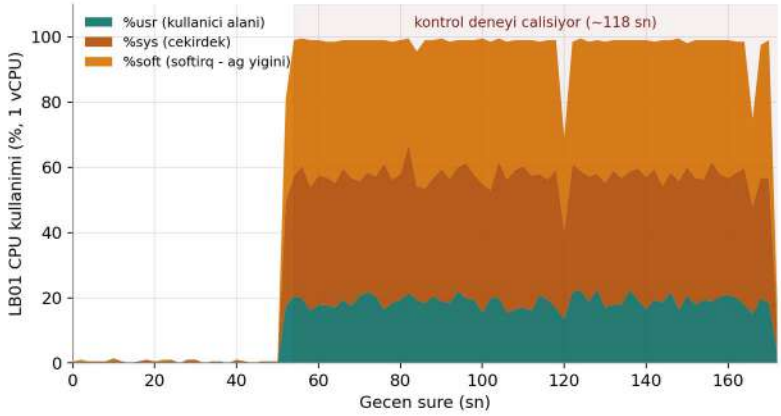
Şekil 3. Seviye başına doğrudan erişim toplamı (üç düğüm) ile LB üzerinden tek giriş noktasının karşılaştırması.



Şekil 4. İstemci tarafı süreç sayısını sabitleyen kontrol deneyinde kaybın istemci-taraf ve LB-katmanı bileşenlerine ayrıştırılması.



Şekil 5. VIP/HAProxy girişi arkasında eşzamanlılık arttıkça gecikmenin Little Yasası ile tutarlı büyümesi (log-log ölçek).



Şekil 6. Kontrol deneyi sırasında VIP'i taşıyan düğümün CPU kullanımı (usr/sys/soft/idle).

1.8 Dağıtık Koordinasyon Katmanı (etcd/Raft)

DCS katmanı aynı arıza senaryolarıyla test edilmiş ve yük dengeleme katmanıyla doğrudan karşılaştırılmıştır (Çizelge 3). Haberli liderlik devrinde ölçülebilir kesinti gözlenmemiş (N=3); ani lider kaybında ise üç tekrarda da neredeyse özdeş, düşük varyanslı bir toparlanma süresi (ortalama 1428,5 ms, std. sapma 1,5 ms) ölçülmüştür — bu, etcd'nin varsayılan seçim-aralığı ile (1000 ms + rastgele gecikme) niceliksel olarak uyumludur ve kalan iki düğümün, üçüncüsü hiç geri gelmese dahi kendi aralarında yeni bir çoğunluk kurup lider seçebildiğini, N=3 bir Raft kümesinin $\lfloor (N-1)/2 \rfloor = 1$ düğüm kaybına dayanıklılık formülünü ampirik olarak doğrulamaktadır. Çoğunluk (2/3 düğüm) kaybında küme, gerçek kesinti aralığında tam olarak %100 oranında yazamaz hale gelmiştir — Raft'ın çoğunluk gerektiren matematiğiyle birebir tutarlı bir sonuçtur. Önemli bir yapısal karşıtlık olarak, VRRP'nin (LB katmanı) sezgisel (heartbeat) tabanlı çalışmasının aksine, etcd'nin Raft protokolü lider seçimi için gerçek çoğunluk onayını matematiksel olarak zorunlu kıldığından, birden fazla düğümün eşzamanlı 'lider' davranışı sergilemesi yapısal olarak mümkün değildir; bu nedenle DCS katmanında LB katmanındakine benzer bir çift-sahiplik düzeltmesine hiç ihtiyaç duyulmamıştır.

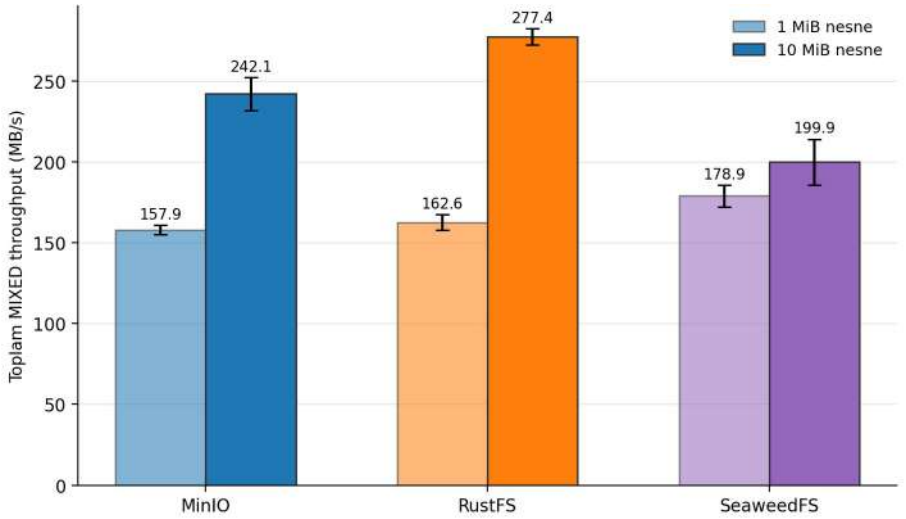
Çizelge 4. Yük dengeleme (VRRP) ve dağıtık koordinasyon (Raft) katmanlarının karşılaştırmalı özeti.

Ölçüt	LB (VRRP/Keepalived)	DCS (Raft/etcd)
Ani düğüm kaybında toparlanma	~4031 ms	~1428,5 ms
Çift-sahiplik riski	Gözlemlendi (SIGKILL), düzeltildi	Yapısal olarak yok
Azınlıkta iken davranış	Uygulanamaz (öncelik zinciri)	%100 kullanılamaz (Raft quorum)

1.9 Depolama Motoru Seçimi

Ağdan izole, N=3 tekrarlı ikinci tur ölçümlerinde (Çizelge 4, Şekil 7), üç motor arasındaki farklar birinci turdaki (ağ-sınırlı, N=1) neredeyse özdeş sonuçların aksine belirgin biçimde ortaya çıkmıştır — bu, ilk turdaki homojenliğin motorların eşdeğerliğinden değil, ağın tüm motorlar için ortak ve baskın bir tavan oluşturmasından kaynaklandığını göstermektedir. Mimarinin gerçek erişim deseni (COG dosyalarından HTTP Range ile çekilen, tipik olarak birkaç MB'lık parçalar) 10MiB nesne sınıfına daha yakın olduğundan, bu boyutta en yüksek ham verimi (throughput) ve en düşük p99 gecikme sapmasını veren RustFS tercih edilmiştir. Bu karara, MinIO Inc.'in Community Edition'ı 2025

boyunca kademeli olarak 'yalnızca bakım' moduna alması (uzun vadeli risk) ve SeaweedFS'in dağıtık mimariye geçilirse değerlendirilebilecek olması da eklenmiştir; RustFS'in dağıtık (MNMD) modunun hâlâ test aşamasında olması nedeniyle karar bilinçli olarak tek-düğüm RustFS ile sınırlı tutulmuştur.



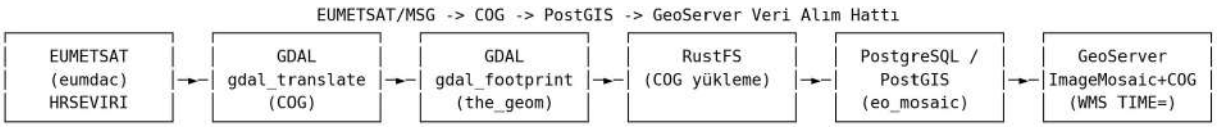
Şekil 7. Ağdan izole ortamda üç depolama motorunun 1 MiB ve 10 MiB nesne sınıflarında toplam throughput karşılaştırması (N=3, ±SS).

Çizelge 5. Ağdan izole ortamda üç depolama motorunun MIXED (GET/PUT/DELETE/STAT) toplam throughput karşılaştırması (N=3).

Motor	Obje Boyutu	Toplam Throughput (MB/s, N=3)	Hata
MinIO	1 MiB	157,9 ± 2,9	0/3
RustFS	1 MiB	162,6 ± 4,7	0/3
SeaweedFS	1 MiB	178,9 ± 6,6	0/3
MinIO	10 MiB	242,1 ± 10,2	0/3
RustFS	10 MiB	277,4 ± 5,0	0/3
SeaweedFS	10 MiB	199,9 ± 14,1	0/3

1.10 Veri Kaynağından Bağımsızlık: Vaka Çalışması

Mimarinin ana mekaniği, tek bir GeoTIFF'i doğrudan yayınlamak yerine, PostGIS'te tutulan bir granül kataloğundan uzamsal ve zamansal (BBOX/TIME) sorgularla doğru COG dosyasının otomatik olarak seçilip HTTP Range ile servis edilmesidir. Bu mekanizma, tek bir COG dosyasının uzaktan parçalı (Range) okunmasının kanıtlandığı ilk aşamanın ardından, çoklu granüllü bir ImageMosaic olarak kurulmuştur. Pilot uygulamada mekanizma, tek bir gerçek veri kaynağı olan EUMETSAT/MSG HRSEVIRI kataloğu üzerinden eumdac→GDAL(COG)→RustFS→PostgreSQL zinciriyle uçtan uca beslenerek sınanmıştır (Şekil 8): 12 Ağustos 2026 tarihinde, ~15 dakikalık zamansal arayla üretilmiş 24 gerçek HRSEVIRI granülü işlenip kataloğa yazılmış ve GeoServer üzerinden servise alınmıştır. GeoServer'ın yayınladığı WMS `GetCapabilities` çıktısında bu 24 granülün 24 ayrı zaman damgası olarak listelendiği doğrulanmış; iki farklı `TIME=` değeriyle gönderilen `GetMap` istekleri piksel düzeyinde (md5 özeti) karşılaştırılarak her ikisinin de farklı, gerçek granülleri doğru şekilde döndürdüğü kanıtlanmıştır. Granül kataloğunun yalnızca BBOX/TIME/dosya-konumu alanlarına dayanan kaynaktan bağımsız şeması, mekanizmanın mimari değişiklik gerektirmeden başka uydu ürünlerine de genişletilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. EUMETSAT/MSG verisinin COG'a dönüştürülüp PostGIS ve GeoServer üzerinden servise alındığı veri alım hattı.

1.11 Veri Tabanı Katmanının Failover Davranışı ve Vaka Çalışmasına Etkisi

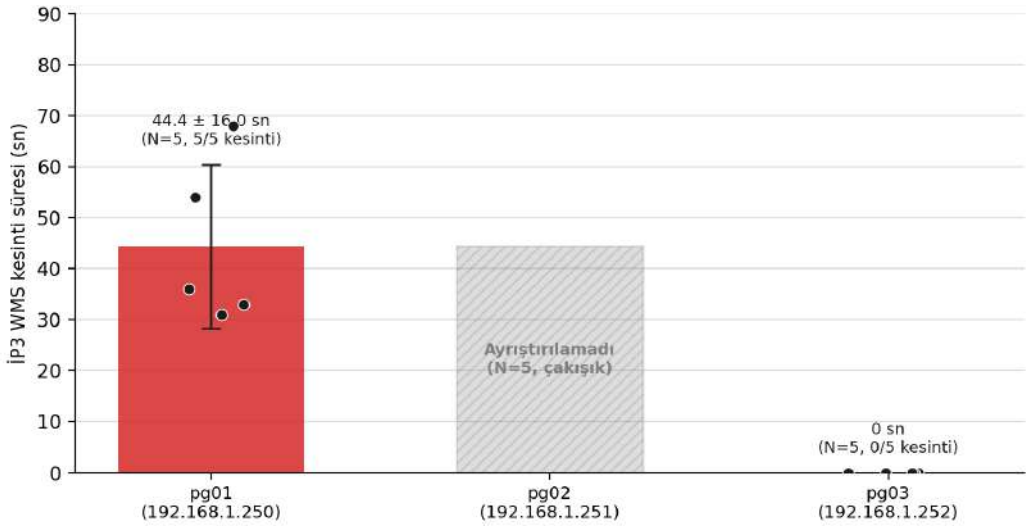
Veri tabanı katmanının (Patroni/PostgreSQL) arıza toleransı, ayrı bir deneyle sınanmıştır. İlk olarak, üç düğümde çalışan Patroni sürecine doğrudan SIGKILL gönderilmesi (`systemctl kill -s SIGKILL patroni` / `pkill -9 patroni`) denenmiş; bu senaryo, üç düğümün her birinde tekrarlanan denemelerin (toplam 8 deneme) hiçbirinde gerçek bir liderlik devrine yol açmamıştır. Kök neden, systemd'nin `Restart=on-failure` politikasıyla Patroni sürecini ~2-4 saniye içinde yeniden başlatması ve bu sürenin, etcd DCS üzerindeki liderlik devri (lease) süresinin dolmasından kısa

olmasıdır — süreç öldürülse dahi aynı düğüm liderliği korumaktadır. Bu bulgu, LB katmanındaki SIGKILL/çift-sahiplik deneyiyle doğrudan bir karşıtlık oluşturmaktadır: burada arızayı gerçek biçimde tetikleyen tek senaryo, düğümün tamamen kaybı (`reboot`) olmuştur.

Üç düğümün sırayla yeniden başlatılmasıyla (pg03→pg01→pg02→pg03 rotasyonu) liderlik döngüsel olarak her üç fiziksel düğüme de taşınmış; her geçiş, üç düğümün Patroni REST API'sinden (`/leader`) saniyelik olarak toplanan durum kayıtlarının zaman damgasıyla çakıştırılmasıyla incelenmiştir. Ölçülen liderlik devirlerinin tamamında geçiş süresi ~2-3 saniye olmuş, hiçbir anda birden fazla düğümün eşzamanlı olarak "Lider'lik" raporladığı (çift-sahiplik) gözlenmemiştir. Bu bulgunun harita servisi (WMS) üzerindeki etkisini istatistiksel olarak karakterize etmek amacıyla, GeoServer'ın PostGIS granül kataloğuna VIP okuma önyüzü (port 5001) üzerinden erişecek şekilde yapılandırılmasının ardından, üç düğüm sırasıyla (pg01→pg02→pg03) 5 tam rotasyon turu (toplam 15 reboot) boyunca yeniden başlatılmış ve WMS kullanılabilirliği saniyelik `GetMap` istekleriyle eşzamanlı izlenmiştir (Şekil 9, Çizelge 5). Sonuç, düğüme özgü, çarpıcı biçimde asimetrik bir örüntü ortaya koymuştur: pg01 (192.168.1.250) düğümünün yeniden başlatıldığı 5 olayın tamamında (5/5) gerçek ve ölçülebilir bir WMS kesintisi gözlenmiş (ortalama 44,4 sn, standart sapma 16,0 sn, aralık 31-68 sn); buna karşın pg03 (192.168.1.252) düğümünün, önceki/sonraki olaylarla zamansal çakışması olmayan, temiz biçimde izole edilebilen 5 reboot'unun tamamında (5/5) WMS'te ölçülebilir hiçbir kesinti gözlenmemiştir. pg02 (192.168.1.251) düğümünün 5 reboot'u ise, her defasında bir önceki pg01 kesintisinin toparlanma penceresiyle örtüştüğünden, bağımsız etkisi bu veri setinde ayrıştırılamamıştır. Bu asimetri, kesintinin DCS/Raft düzeyindeki liderlik seçiminden (liderlik rotasyon boyunca düzenli olarak tüm düğümler arasında dolaşmıştır) değil, GeoServer'ın JDBC bağlantı havuzunda pg01'e özgü kalıcı/tercih edilen bir bağlantının bulunmasından ve bu bağlantının düğüm yeniden başladığında geçersiz (stale) kaldığının geç tespit edilmesinden kaynaklandığını güçlü biçimde düşündürmektedir.

Çizelge 6. 5 tam rotasyon turunda (15 reboot), VIP-yönlendirmeli WMS kesinti istatistiklerinin düğüm başına özeti (yalnızca önceki/sonraki olaylarla zamansal çakışması olmayan 'temiz izole' olaylar ayrı sayılmıştır).

Düğüm	Reboot (N)	Temiz İzole Olay	WMS Kesintisi	Ort. Kesinti ± SS (sn)
pg01 (.250)	5	5/5	5/5 (%100)	44,4 ± 16,0
pg02 (.251)	5	0/5 (çakışık)	Ayrıştırılamadı	—
pg03 (.252)	5	5/5	0/5 (%0)	0



Şekil 9. 5 tam rotasyon turunda (N=15 reboot) düğüme göre WMS kesinti süresi: pg01 reboot'larının tamamı (5/5) ölçülebilir kesintiye yol açarken (ortalama 44,4±16,0 sn), pg03 reboot'larının tamamı (5/5) kesintisiz atlatılmıştır; pg02 çakışan zamanlama nedeniyle ayrıştırılamamıştır.

2. SONUÇLAR

Bu çalışma, tamamı açık kaynaklı bileşenlerden kurulan bir mekânsal veri servis mimarisinin, gerçek arıza enjeksiyonu ile ölçüldüğünde akademik/pilot ölçekte kesintisiz çalışabildiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular üç ana eksende özetlenebilir. İlk olarak, yük dengeleme katmanında keşfedilen çift-sahiplik hatası, 'kesintisiz' iddiasının yalnızca istemci-taraf başarı oranıyla değil, düğüm düzeyinde durum tutarlılığı kontrolleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ve tespit edilen bir dayanıklılık açığının basit, doğrulanabilir bir systemd-seviyesi önlemle kapatılabileceğini göstermiştir. İkinci olarak, HA/LB katmanının maliyeti — üç düğümün paralel kapasitesinin tek bir giriş noktasından geçirildiğinde büyük ölçüde kaybolması — Amdahl Yasası çerçevesinde anlamlandırılmış ve hem Little Yasası ile tutarlı gecikme örüntüsüyle hem de doğrudan CPU ölçümüyle mekanizması kanıtlanmıştır; bu, yüksek erişilebilirlik (HA) hedefi ile ham verim (throughput) hedefi arasındaki ödünleşimin somut, ölçülmüş bir örneğidir. Üçüncü olarak, dağıtık koordinasyon katmanının (Raft) hem daha hızlı toparlandığı hem de

çift-sahipliğe yapısal olarak bağışık olduğu gösterilmiş; bu, kritik koordinasyon işlevleri için VRRP yerine Raft tabanlı çözümlerin tercih edilmesine dair karşılaştırmalı, ampirik bir gerekçe sunmaktadır. Dördüncü olarak, veri tabanı katmanında (Patroni) yürütülen bir failover deneyi, sürece doğrudan `kill -9` gönderilmesinin — LB katmanının SIGKILL senaryosunun aksine — systemd'nin hızlı yeniden başlatması sayesinde gerçek bir liderlik devrini hiç tetiklemediğini, buna karşın tam düğüm kaybının (reboot) çift-sahipliğe yol açmayan, hızlı (~2-3 sn) bir liderlik devri ürettiğini göstermiştir; ancak 5 rotasyon turluk istatistiksel bir ölçüm, harita servisi (WMS) üzerindeki gerçek etkinin liderlik seçiminden değil, belirli bir fiziksel düğümdeki (pg01) kalıcı bir bağlantı-havuzu davranışından kaynaklandığını ortaya koymuştur (pg01'de 5/5 olayda ortalama ~44 sn kesinti, pg03'te ise 5/5 olayda hiç kesinti yok); bu bulgu, DCS-seviyesi liderlik seçim hızının tek başına uçtan uca hizmet sürekliliğini garanti etmediğini, istemci tarafı bağlantı yönetiminin ayrı ve düğüme özgü bir dayanıklılık ekseni olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın başlıca sınırlamaları şunlardır: arıza testleri tek bir fiziksel iş istasyonu ve tek bir ağ topolojisinde gerçekleştirilmiştir; tekrar sayıları (N=1–5) küçük ölçeklidir ve bazı ölçümler (depolama karşılaştırmasının birinci turu, pgbench'in bazı hücreleri) tek koşumla sınırlıdır. Veri tabanı (Patroni) katmanındaki WMS-etki testi 5 rotasyon turuyla (N=5/düğüm) tekrarlanmış olsa da LB/DCS katmanlarındaki gibi otomatik problu bir protokolle değil manuel tetiklenen (SSH/reboot) bir izlemeyle yürütülmüştür; ayrıca pg02 düğümünün bağımsız etkisi, rotasyon hızı nedeniyle her defasında bir önceki olayın toparlanma penceresiyle örtüştüğünden bu veri setinde ayrıştırılamamıştır. Harita servisi (GeoServer) ve nesne depolama (RustFS) katmanları da bu çalışmada tek düğüm olarak kurulmuş olup bu katmanların kendi failover davranışı ayrıca sınanmamıştır. Gelecek çalışma olarak, veri tabanı katmanı testinin LB/DCS katmanlarındaki gibi tam otomatik problu bir protokolle genişletilmesi, pg02'nin bağımsız etkisinin izole bir tek-reboot deneyiyle ayrıştırılması, GeoServer ve RustFS katmanlarının çoklu-düğüm/dayanıklılık testlerinin eklenmesi, EUMETSAT/MSG veri hattının üretim ortamında sürekli koşumu ve RustFS'in dağıtık (MNMD) modunun olgunlaşmasıyla depolama katmanının çok-düğümlü bir yapıya genişletilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Amdahl, G.M., 1967. Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large Scale Computing Capabilities. AFIPS Conference Proceedings, Atlantic City, ABD, 30, syf: 483-485.

CNCF/etcd, t.y. etcd Documentation. https://etcd.io/docs/ [Erişim tarihi: 11.09.2026].

EUMETSAT, t.y. EUMDAC — EUMETSAT Data Access Client. https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/eumetsat-data-access-client-eumdac-guide [Erişim tarihi: 13.09.2026].

GDAL/OGR Contributors, t.y. gdal_footprint. https://gdal.org/en/stable/programs/gdal_footprint.html [Erişim tarihi: 13.09.2026].

GeoServer, t.y. COG (Cloud Optimized GeoTIFF) Community Module. https://docs.geoserver.org/main/en/user/community/cog/cog.html [Erişim tarihi: 12.09.2026].

HAProxy Technologies, t.y. HAProxy Documentation. https://www.haproxy.org/ [Erişim tarihi: 09.09.2026].

Keepalived Project, t.y. Keepalived — VRRP Framework. https://www.keepalived.org/ [Erişim tarihi: 09.09.2026].

Little, J.D.C., 1961. A Proof for the Queuing Formula: L = λW. Operations Research, 9(3): 383-387.

PostgreSQL Global Development Group, t.y. pgbench. https://www.postgresql.org/docs/current/pgbench.html [Erişim tarihi: 10.09.2026].

Proxmox Server Solutions GmbH, t.y. Proxmox VE — Performance Tweaks. https://pve.proxmox.com/wiki/Performance_Tweaks [Erişim tarihi: 07.09.2026].

RustFS, t.y. RustFS Documentation. https://docs.rustfs.com/ [Erişim tarihi: 12.09.2026].

Zalando SE, t.y. Patroni — A Template for PostgreSQL HA. https://patroni.readthedocs.io/ [Erişim tarihi: 11.09.2026].

İKLİM KAYNAKLI AFET RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE CBS VE YAPAY ZEKA (GEOAI) TABANLI KENTSEL ISI ADASI ETKİSİ ANALİZİ

Zeynep VURAN[1], Rümeysa DOLUNAY[2], Zeynep Ceyda KARAKAYA[3], Muhammed Oğuzhan METE[4]

[1]Lisans Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, vuran22@itu.edu.tr
[2]Lisans Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, dolunay21@itu.edu.tr
[3]Arş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, karakayaz20@itu.edu.tr
[4]Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, metemu@itu.edu.tr

ÖZET

İklim değişikliğiyle birlikte artan sıcaklık baskısı, yoğun yapılaşma, geçirimsiz yüzeylerin artışı ve bitki örtüsü kaybı nedeniyle kentsel alanlarda belirginleşmekte ve kentsel ısı adası etkisini önemli bir iklim riski hâline getirmektedir. Bu çalışmada İstanbul'da kentsel ısı adası kaynaklı yüzey sıcaklığı dinamiklerinin 2016–2025 yaz dönemleri için çok kaynaklı mekânsal veriler ve açıklanabilir yapay zekâ yöntemleriyle incelenmesi amaçlanmaktadır. Ana makro analiz ölçeği 500 m × 500 m grid olarak belirlenmiş; 1 km grid ölçek duyarlılık analizi, seçilecek sıcak alanlarda ise 100 m grid mikro analiz için tanımlanmıştır. HLS S30 verilerinden NDVI, NDBI, NDWI ve albedo; Landsat 8/9 Collection 2 Level-2 ürünlerinden arazi yüzey sıcaklığı (LST) üretilmektedir. 2025 pilot uygulamasında kalite kontrolü, yaz medyan kompozitleri ve grid tabanlı veri bütünleştirmesi gerçekleştirilmiş; eksiksiz veriye sahip 20.743 grid hücresinde Random Forest ve XGBoost modelleri 5 km mekânsal bloklara dayalı beş katlı çapraz doğrulama ile test edilmiştir. Random Forest için R^2=0.856, RMSE=2.02 °C ve MAE=1.48 °C; XGBoost için R^2=0.859, RMSE=1.99 °C ve MAE=1.46 °C elde edilmiştir. Random Forest SHAP analizinde NDBI en etkili değişken olarak belirlenmiş, bunu NDVI, albedo ve NDWI izlemiştir. Tam analizde nüfus, meteoroloji, yükselti ve suya uzaklık değişkenlerinin de eklenmesiyle 2016–2025 dönemi için çok ölçekli bir CBS ve GeoAI tabanlı karar destek yaklaşımının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Sözcükler: arazi yüzey sıcaklığı, CBS, GeoAI, kentsel ısı adası, uzaktan algılama

ABSTRACT

GIS- AND GEOAI-BASED ANALYSIS OF URBAN HEAT ISLAND EFFECTS FOR CLIMATE-RELATED DISASTER RISK ASSESSMENT

Increasing thermal pressure associated with climate change becomes more pronounced in urban areas due to dense development, impervious surfaces and vegetation loss, making the urban heat island effect an important component of climate-related risk. This study aims to investigate land surface temperature dynamics in Istanbul for the summer periods of 2016–2025 by integrating multi-source geospatial data with explainable artificial intelligence. A 500 m × 500 m grid is defined as the primary macro-scale analytical unit, while a 1 km grid is used for scale-sensitivity assessment and a 100 m grid will be employed for micro-scale analysis in selected thermal hotspots. NDVI, NDBI, NDWI and surface albedo are derived from HLS S30 data, whereas land surface temperature (LST) is obtained from Landsat 8/9 Collection 2 Level-2 products. In the 2025 pilot, quality control, summer median composites and grid-based data integration were completed. Random Forest and XGBoost were evaluated on 20,743 complete grid cells using five-fold cross-validation based on 5 km spatial blocks. Random Forest achieved R^2=0.856, RMSE=2.02 °C and MAE=1.48 °C, while XGBoost achieved R^2=0.859, RMSE=1.99 °C and MAE=1.46 °C. Random Forest SHAP analysis identified NDBI as the most influential pilot predictor, followed by NDVI, albedo and NDWI. The full analysis will incorporate population, meteorological, elevation and distance-to-water variables across 2016–2025 to develop a multi-scale GIS- and GeoAI-based spatial decision-support approach for urban heat-related climate risk in Istanbul.

Keywords: GeoAI, GIS, land surface temperature, remote sensing, urban heat island

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ve hızlı kentleşme, kentlerin termal yapısını önemli ölçüde değiştirmektedir. Yapı yoğunluğunun artması, geçirimsiz yüzeylerin genişlemesi, bitki örtüsünün azalması ve doğal yüzeylerin yapay malzemelerle yer değiştirmesi yüzey enerji dengesini değiştirerek kentsel alanların çevrelerine kıyasla daha yüksek sıcaklık değerleri göstermesine neden olmaktadır. Kentsel ısı adası olarak tanımlanan bu olgu; enerji tüketiminin artması, hava kalitesinin bozulması, ekosistem hizmetlerinin zayıflaması ve sıcaklığa bağlı sağlık risklerinin yükselmesi gibi çevresel ve toplumsal sonuçlarla ilişkilendirilmektedir.

Termal uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanlarda arazi yüzey sıcaklığının (Land Surface Temperature, LST) düzenli ve karşılaştırılabilir biçimde izlenebilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda optik uydu görüntülerinden türetilen spektral göstergeler, bitki örtüsü, yapılaşma ve yüzey suyu gibi kentsel sıcaklığın oluşumunda etkili temel yüzey özelliklerinin nicel olarak temsil edilmesine olanak vermektedir.

Tran vd. (2017), arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimi ile LST arasındaki ilişkileri bitki örtüsü ve yapılaşma indeksleriyle incelemiş ve Getis-Ord Gi* sıcak nokta analizini kentsel termal örüntülerin belirlenmesinde kullanmıştır. Türkiye bağlamında Cetin vd. (2024) tarafından Kayseri için gerçekleştirilen çalışmada Landsat 8/9 verilerinden LST, NDVI ve NDBI türetilmiş; bitki örtüsü, yapılaşma ve kentsel ısı adası ilişkileri karşılaştırılmıştır.

Bununla birlikte kentsel termal çevrenin oluşumu tek bir değişkenle açıklanabilecek doğrusal bir süreç değildir. Yapılaşma, bitki örtüsü, su yüzeyleri, topoğrafya, nüfus ve meteorolojik koşullar birbirleriyle etkileşim içinde LST üzerinde farklı yönlerde ve farklı eşiklerde etkili olabilmektedir. Li vd. (2026), XGBoost ve SHAP yöntemleriyle kentsel form göstergelerinin LST üzerindeki etkilerinin ölçeğe bağlı ve doğrusal olmayan davranışlar gösterebildiğini ortaya koymuştur. Ren vd. (2025) ise 780 Avrupa kentinde 500 m grid yaklaşımıyla Random Forest ve SHAP kullanarak ekolojik, yapısal ve coğrafi değişkenlerin LST üzerindeki birleşik etkilerini değerlendirmiştir.

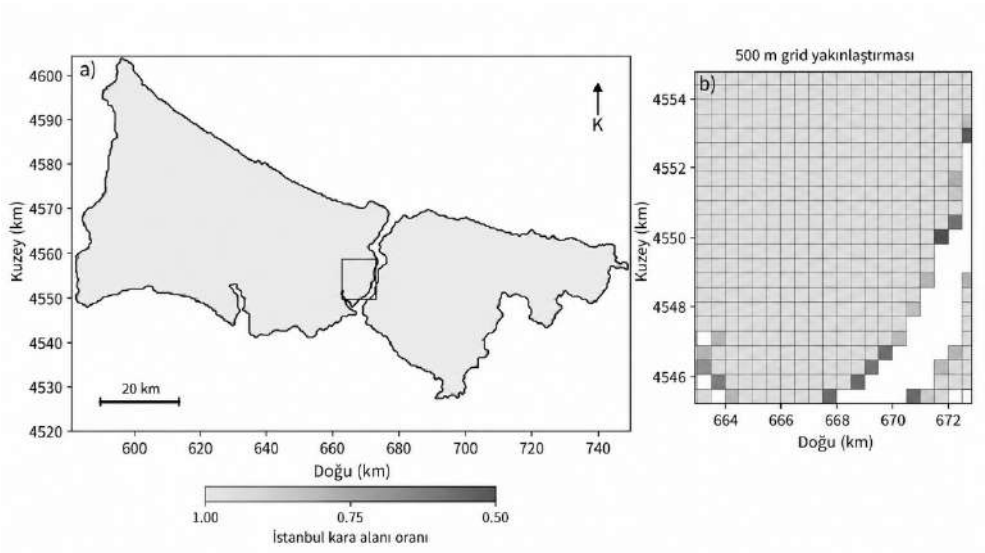
İstanbul; Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki konumu, kuzeyindeki yoğun orman alanları, güneyindeki yüksek yapılaşma baskısı ve topoğrafik heterojenliği nedeniyle kentsel ısı adası araştırmaları açısından uygun bir çalışma alanıdır. Bu çalışmanın amacı, İstanbul'da 2016–2025 yaz dönemlerinde LST'nin mekânsal ve zamansal değişimini belirlemek; LST üzerinde etkili çevresel, kentsel, meteorolojik ve demografik faktörleri açıklanabilir makine öğrenmesi yöntemleriyle değerlendirmek ve sıcaklık baskısının yüksek olduğu alanları çok ölçekli olarak ortaya koymaktır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

2.1. Çalışma Alanı ve Zaman Aralığı

Çalışma alanı İstanbul ili idari sınırlarını kapsamaktadır. Analiz dönemi, birbirleriyle karşılaştırılabilir on tam yaz dönemini içerecek şekilde 2016–2025 olarak belirlenmiştir. Her yıl için 1 Haziran–31 Ağustos tarihleri arasındaki dönem kullanılarak Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarını kapsayan yaz kompozitleri oluşturulacaktır.

Mekânsal analizlerin metre biriminde tutarlı biçimde gerçekleştirilebilmesi için WGS 84 / UTM Zone 35N (EPSG:32635) koordinat referans sistemi kullanılmaktadır. Ana makro analiz birimi 500 m × 500 m grid olup, kıyı hücrelerinde İstanbul kara alanı oranı en az %50 olan hücreler analize dâhil edilmektedir. Çalışma alanı, %50 kara alanı eşiğini sağlayan 500 m ana makro grid hücrelerinin genel dağılımı ve grid yapısının örnek yakınlaştırması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İstanbul çalışma alanı ve 500 m ana makro grid: a) %50 kara alanı eşiğini sağlayan hücrelerin genel görünümü, b) 500 m grid yapısının örnek yakınlaştırması. Gri tonlar hücrelerdeki İstanbul kara alanı oranını göstermektedir.

2.2. Kullanılan Değişkenler

Çalışmada toplam 15 araştırma değişkeni kullanılmaktadır. Bunların bir bölümü doğrudan uydu, meteoroloji veya demografik veri kaynaklarından elde edilirken ΔNDVI, ΔNDBI ve ΔLST değişkenleri yıllık grid değerlerinden türetilecektir. Çizelge 1'de değişkenler, temel veri kaynakları ve analizdeki rolleri özetlenmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan değişkenler, veri kaynakları, temel çözünürlükleri ve analizdeki rolleri.

Değişken	Veri kaynağı	Temel çözünürlük	Rol
NDVI	NASA HLS S30	30 m	Açıklayıcı
NDBI	NASA HLS S30	30 m	Açıklayıcı
LST	Landsat 8/9 Collection 2 Level-2	Termal kaynak 100 m; ürün gridinde 30 m	Hedef
Nüfus yoğunluğu	WorldPop	≈100 m	Açıklayıcı / maruziyet
2 m hava sıcaklığı	ERA5-Land	≈11 km	Meteorolojik kontrol
Rüzgâr hızı	ERA5-Land	≈11 km	Meteorolojik kontrol
Yağış	ERA5-Land	≈11 km	Meteorolojik kontrol
ΔNDVI	NDVI yıllık serisinden	Grid	Zamansal değişim
ΔNDBI	NDBI yıllık serisinden	Grid	Zamansal değişim
ΔLST	LST yıllık serisinden	Grid	Zamansal sonuç
NDWI	NASA HLS S30	30 m	Açıklayıcı
Albedo	HLS bantlarından türetim	30 m	Açıklayıcı
Yükseklik	Copernicus DEM GLO-30	30 m	Açıklayıcı
Suya/denize uzaklık	Kıyı ve yüzey suyu verileri	Metrik uzaklık	Açıklayıcı
Bağıl nem	ERA5-Land	≈11 km	Meteorolojik kontrol

LST modelin temel hedef değişkenidir. ΔLST on yıllık değişimi temsil eden sonuç göstergesi olarak ayrıca değerlendirilecektir. Bu nedenle 15 değişkenin tamamı aynı anda bağımsız değişken olarak modele verilmeyecek; ana modelde LST'yi açıklamak üzere çevresel, kentsel, topoğrafik, demografik ve meteorolojik değişkenlerden oluşan predictor seti kullanılacaktır.

3. YÖNTEM

3.1. Çok Ölçekli Grid Tasarımı

Çalışmada idari birimler yerine düzenli grid hücreleri kullanılmaktadır. İstanbul genelindeki ana analiz 500 m × 500 m grid hücreleri üzerinde gerçekleştirilecek; sonuçların grid boyutuna duyarlılığını değerlendirmek amacıyla 1 km × 1 km grid kullanılacaktır. Makro analiz sonucunda belirlenen öncelikli sıcak alanlardan biri ise 100 m × 100 m gridlere ayrılarak mikro ölçekte incelenecektir. Her hücreye benzersiz GRID_ID atanmakta, merkez koordinatları kaydedilmekte ve kıyı hücrelerinde İstanbul kara alanı oranı hesaplanmaktadır.

3.2. HLS Verilerinin Ön İşlenmesi

Bitki örtüsü, yapılaşma, yüzey suyu ve albedo göstergelerinin oluşturulmasında NASA Harmonized Landsat Sentinel-2 veri setinin Sentinel-2 bileşeni olan HLSS30 v2 kullanılmaktadır. Her yıl için 1 Haziran–31 Ağustos tarihleri arasındaki görüntüler seçilmekte; CLOUD_COVERAGE < %60 ölçütüyle sahne düzeyinde ön filtreleme, HLS Fmask bandıyla ise piksel düzeyinde bulut, buluta komşu piksel, bulut gölgesi ve kar/buz maskelemesi uygulanmaktadır. Su pikselleri NDWI ve mavi alan etkisinin incelenebilmesi amacıyla korunmaktadır.

Geçerli yüzey yansıtımı piksellerinden NDVI, NDBI ve NDWI Eşitlik (1)–(3) ile hesaplanmaktadır.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (3)$$

İndeks hesaplamalarında negatif veya fiziksel olarak geçersiz yüzey yansıtımı değerleri ile sıfıra çok yakın paydalar dışlanmaktadır. Ardından her yılın yaz dönemi için geçerli gözlemler piksel bazında birleştirilerek medyan JJA kompoziti oluşturulmaktadır.

3.3. Yüzey Albedosunun Hesaplanması

Albedo, yüzey enerji dengesi açısından önemli bir değişken olarak analize dâhil edilmiştir. Sentinel-2 yüzey yansıtımı kullanılarak geniş bant albedo üretiminde Li vd. (2018) tarafından sunulan narrow-to-broadband dönüşüm yaklaşımından yararlanılmıştır. Pilot uygulamada kullanılan dönüşüm Eşitlik (4)'te verilmiştir.

$$\alpha = 0.2688\ B2 + 0.0362\ B3 + 0.1501\ B4 + 0.3045\ B8A + 0.1644\ B11 + 0.0356\ B12 - 0.0049 \quad (4)$$

Üretilen albedo piksellerine fiziksel geçerlilik kontrolü uygulanmış, 0–1 aralığının dışındaki değerler maskelenmiş ve yıllık yaz medyan albedo kompoziti oluşturulmuştur.

3.4. Arazi Yüzey Sıcaklığının Üretilmesi

LST üretiminde Landsat 8 ve Landsat 9 Collection 2 Tier 1 Level-2 ürünleri birlikte kullanılmaktadır. Surface Temperature içeren L2SP sahneleri seçilmekte; QA_PIXEL bandıyla fill, dilated cloud, cirrus, bulut, bulut gölgesi ve kar/buz pikselleri, QA_RADSAT bandıyla radyometrik doygun pikseller dışlanmaktadır. Su pikselleri korunmaktadır.

Collection 2 Level-2 Surface Temperature bandı ST_B10, Eşitlik (5a) ile Kelvin'e, ardından Eşitlik (5b) ile Celsius'a dönüştürülmektedir.

$$LST\_K = (ST\_B10 \times 0.00341802) + 149 \quad (5a)$$

$$LST\_C = LST\_K - 273.15 \quad (5b)$$

Landsat 8/9 termal verisinin özgün termal örnekleme çözünürlüğü ile Level-2 ürününün servis edildiği 30 m grid birbirinden ayrılmaktadır. Bu nedenle HLS tabanlı 30 m optik göstergeler ile Landsat sıcaklık verileri piksel düzeyinde aynı fiziksel çözünürlükte kabul edilmemekte; değişkenler ortak 500 m analiz gridlerinde zonal istatistiklerle özetlenmektedir.

Surface Temperature kalite bilgisini değerlendirmek amacıyla ST_QA belirsizlik bandı kullanılmış ve 2025 pilotunda ST_QA ≤ 3 K kalite ölçütü uygulanmıştır. ST_CDIST ≥ 1 km koşulu ayrıca test edilmiş; ST_QA filtresine kıyasla geçerli gözlem sayısında ek değişiklik oluşturmadığından ana filtreye dâhil edilmemiştir.

3.5. Ortak Grid Veri Tabanının Oluşturulması

Farklı veri kaynakları doğrudan birbirlerinin mekânsal çözünürlüğüne yeniden örneklenerek eşitlenmemektedir. Her veri katmanı kendi fiziksel ve sensör özellikleri dikkate alınarak işlendikten sonra ortak 500 m grid hücrelerinde özetlenmektedir. Temel gözlem birimi GRID_ID × YEAR olup her satır bir grid hücresinin belirli bir yaz dönemindeki durumunu temsil edecektir. Yükseklik ve suya uzaklık gibi statik değişkenler grid başına tek kez; uydu, nüfus ve meteorolojik değişkenler ise yıllık olarak üretilecektir.

3.6. Meteorolojik Değişkenlerin Kontrol Edilmesi

Yıllar arasındaki LST farklılıkları yalnızca arazi örtüsü veya kentleşmedeki değişimlerden kaynaklanmayabilir. Bu nedenle ERA5-Land verilerinden 2 m hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, yağış ve bağıl nem meteorolojik kontrol değişkenleri olarak kullanılacaktır. Rüzgâr hızı zonal ve meridyonal rüzgâr bileşenlerinden, bağıl nem ise 2 m hava sıcaklığı ve çiy noktası sıcaklığından türetilecektir.

3.7. Zamansal ve Mekânsal Değişim Analizi

2016–2025 yılları için yıllık grid değerleri oluşturulduktan sonra her GRID_ID için NDVI, NDBI ve LST zaman serileri karşılaştırılarak ΔNDVI, ΔNDBI ve ΔLST hesaplanacaktır. Mekânsal sıcaklık kümelerinin belirlenmesinde Getis-Ord Gi* sıcak nokta istatistiğinden yararlanılması planlanmaktadır (Tran vd., 2017).

3.8. Random Forest ve Mekânsal Doğrulama

LST ile açıklayıcı değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olmak zorunda olmaması nedeniyle ana tahmin modeli olarak Random Forest Regression kullanılmaktadır (Breiman 2001). Nihai 2016–2025 modelinde LST hedef değişken; NDVI, NDBI, NDWI, albedo, nüfus yoğunluğu, 2 m hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, yağış, bağıl nem, yükselti ve suya uzaklık temel açıklayıcı/kontrol değişkenleri olacaktır. 2025 pilot modelinde ise henüz ortak grid tabanında tamamlanmış olan NDVI, NDBI, NDWI ve albedo açıklayıcı değişkenleri kullanılmıştır.

Konumsal olarak yakın grid hücrelerinin bağımsız olmaması nedeniyle model doğrulamasında mekânsal bloklu çapraz doğrulama kullanılmıştır. 2025 pilotunda grid merkezleri 5 km × 5 km bloklara atanmış ve aynı bloktaki hücrelerin eğitim ve test kümeleri arasında karışmasını önlemek amacıyla beş katlı grup tabanlı çapraz doğrulama uygulanmıştır.

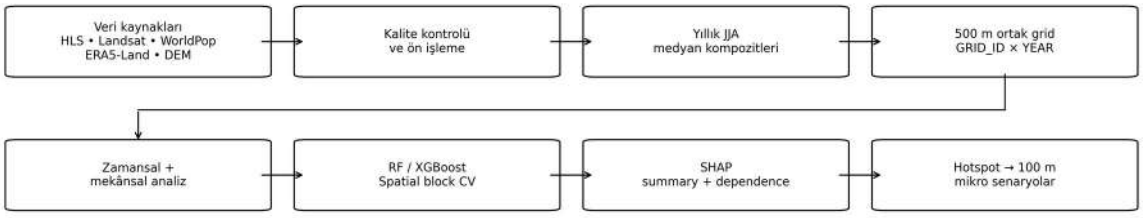
Model performansı R^2, RMSE ve MAE ölçütleriyle değerlendirilmiş; Random Forest ana model, XGBoost ise karşılaştırma modeli olarak çalıştırılmıştır. Bu yaklaşım, konumsal verilerde rastgele train-test ayrımına göre daha gerçekçi bir genellenebilirlik değerlendirmesi sağlamayı amaçlamaktadır (Roberts vd., 2017).

3.9. SHAP ile Model Açıklanabilirliği

Model tahminlerinin açıklanabilirliği için SHapley Additive exPlanations (SHAP) yöntemi kullanılmaktadır (Lundberg ve Lee, 2017). 2025 pilotunda ana model olarak ele alınan Random Forest için ortalama mutlak SHAP değerleriyle global değişken önemi hesaplanmış ve en etkili değişken için dependence analizi gerçekleştirilmiştir. Tam modelde SHAP summary ve dependence çıktıları, değişkenlerin önem sırasının yanı sıra LST tahminini artırıcı/azaltıcı yönlerini ve doğrusal olmayan olası eşik davranışlarını değerlendirmek amacıyla kullanılacaktır.

3.10. Makrodan Mikro Ölçeğe Geçiş

Makro analiz sonucunda yüksek LST değerlerinin süreklilik gösterdiği ve olumsuz çevresel/maruziyet göstergelerinin birlikte yoğunlaştığı alanlar belirlenecektir. Seçilen alanda 100 m × 100 m mikro grid kullanılarak yeşil alan, yapılaşma, yüzey suyu ve LST ilişkileri ayrıntılı olarak incelenecek; yeşil alan artırımı veya yapılaşma baskısının azaltılması gibi müdahale senaryoları kontrollü model girdileriyle karşılaştırılacaktır. Çalışmanın genel metodolojik akışı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın metodolojik akışı.

4. 2025 PİLOT UYGULAMA SONUÇLARI

On yıllık veri serisinin tamamı oluşturulmadan önce veri üretim ve kalite kontrol zinciri 2025 yaz dönemi için pilot olarak uygulanmıştır. HLS ve Landsat işlemlerine ilişkin temel kalite kontrol sonuçları Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. 2025 pilot uygulamasına ilişkin veri ve kalite kontrol özeti.

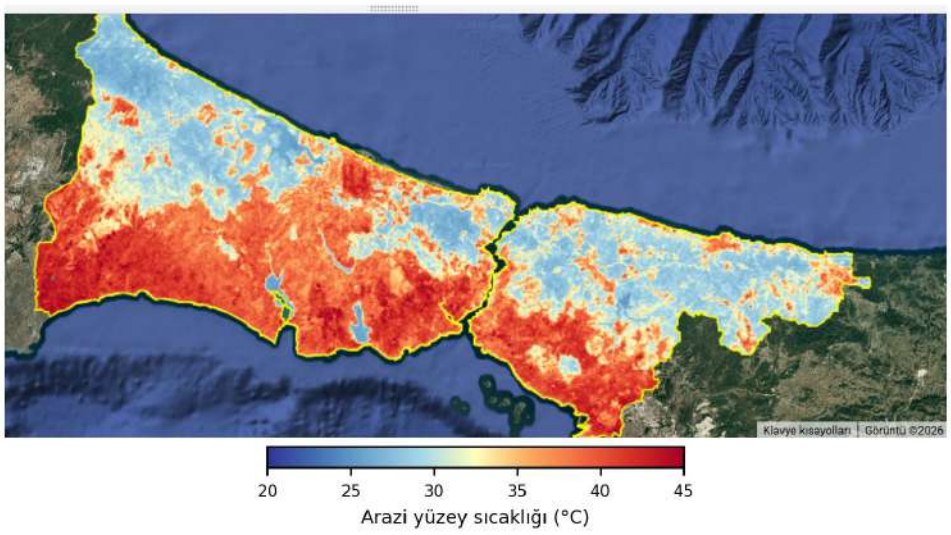
Gösterge	2025 pilot sonucu	Açıklama
HLS S30 sahne sayısı	243 → 212	Sahne düzeyi bulut ön filtresi sonrası
NDVI	−0.387 – 0.917	4,992 geçerli örnek
NDBI	−0.515 – 0.320	4,992 geçerli örnek
NDWI	−0.848 – 0.538	4,992 geçerli örnek
Albedo	0.009 – 0.460; ort. 0.158	4,992 geçerli örnek
Landsat L2SP sahne sayısı	34 L8 + 33 L9 = 67	JJA 2025
LST	25.20 – 46.75 °C; ort. 34.73 °C	4,999 geçerli örnek
LST gözlem sayısı	4–41; ort. 18.82	Ek ST_QA filtresi öncesi
ST_QA ≤ 3 K sonrası	1–34; ort. 10.89	Geçerli gözlem sayısı
ST_CDIST ek etkisi	0	ST_QA'ya göre ek gözlem kaybı yok

4.1. HLS ve Albedo Bulguları

HLS kalite kontrolü sonrasında indeks değerlerinin teorik aralıklarda kaldığı görülmüştür. Mekânsal görsel kontrolde İstanbul'un kuzeyindeki yoğun orman alanlarında yüksek NDVI, güneydeki yoğun yapılaşmış kesimlerde daha düşük NDVI ve su yüzeylerinde belirgin NDWI tepkileri gözlenmiştir. Albedo değerlerinin 0–1 fiziksel aralığında kalması, oluşturulan yüzey yansıtımı tabanlı albedo katmanının grid tabanlı analizlerde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

4.2. Landsat LST Bulguları

2025 yaz medyan LST kompozitinde örneklenen sıcaklıklar 25.20–46.75 °C arasında değişmiş ve ortalama 34.73 °C olarak hesaplanmıştır. Mekânsal dağılımda İstanbul'un kuzeyindeki yoğun orman alanlarının genel olarak daha düşük, Marmara kıyısındaki yoğun yapılaşmış güney kesimlerin ise daha yüksek LST değerleri gösterdiği görülmüştür. 2025 JJA medyan LST kompoziti Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu bulgu yalnızca 2025 pilot yaz dönemine aittir ve uzun dönemli eğilim olarak yorumlanmamaktadır.



Şekil 3. 2025 JJA medyan arazi yüzey sıcaklığı (LST) kompoziti (ST_QA ≤ 3 K kalite filtresi).

ST_QA ≤ 3 K filtresi, geçerli yaz gözlem sayısını ortalama 18.82'den 10.89'a düşürmüştür. ST_CDIST ≥ 1 km koşulunun eklenmesi ise gözlem sayısında ilave değişiklik yaratmamıştır. Böylece 2025 pilotunda ek bulut uzaklığı eşiğinin veri seçimine katkı sağlamadığı görülmüştür.

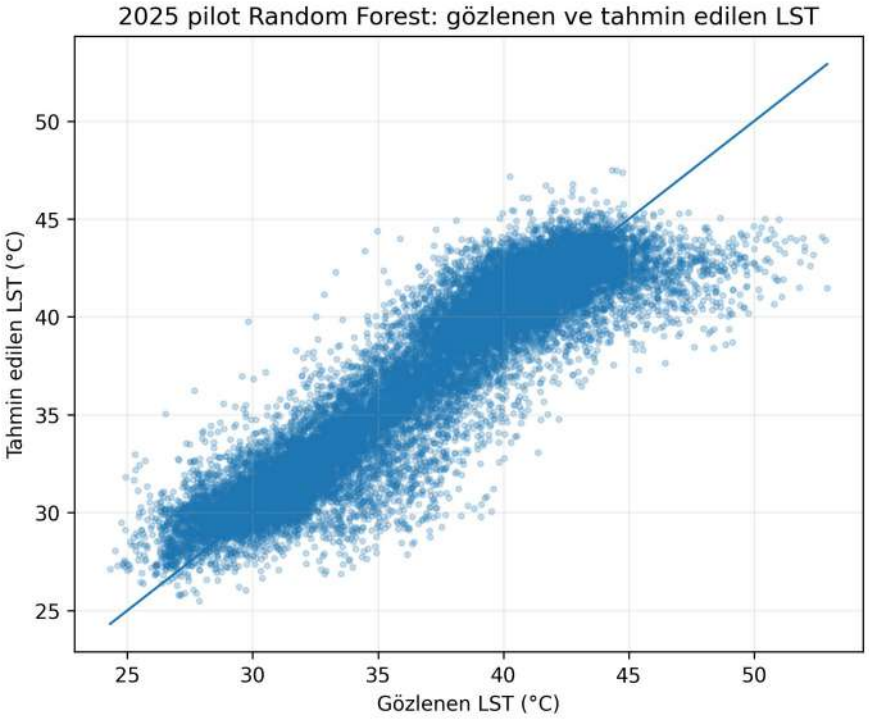
4.3. 2025 Pilot Makine Öğrenmesi Sonuçları

HLS ve LST grid tablolarının GRID_ID ve YEAR alanları üzerinden birleştirilmesi sonucunda 20.743 adet 500 m grid hücresinde NDVI, NDBI, NDWI, albedo ve LST değişkenleri eksiksiz olarak elde edilmiştir. Pilot modellemede LST hedef değişken; dört HLS-tabanlı gösterge açıklayıcı değişken olarak kullanılmıştır. Beş katlı 5 km mekânsal blok çapraz doğrulamasına göre elde edilen model performansları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 2025 pilot Random Forest ve XGBoost model performansları.

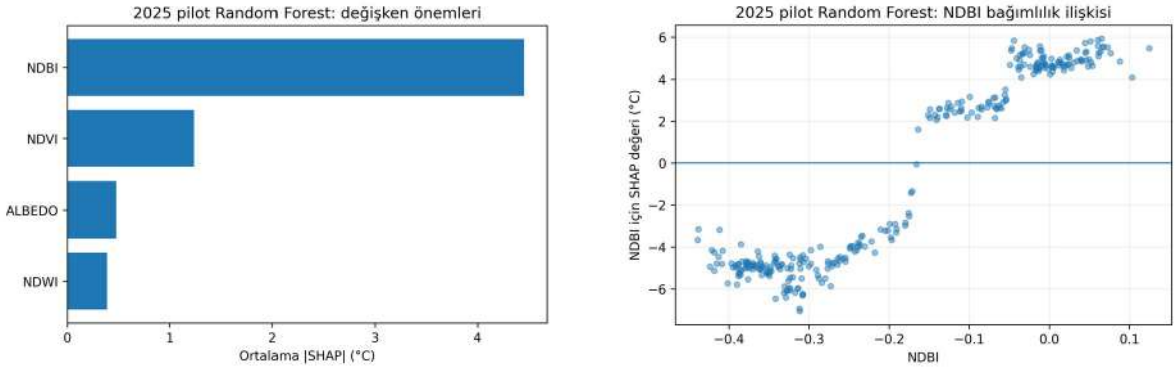
Model	R^2	RMSE (°C)	MAE (°C)	Geçerli grid
Random Forest	0.856	2.02	1.48	20.743
XGBoost	0.859	1.99	1.46	20.743

İki model birbirine yakın performans göstermiştir. Random Forest mekânsal çapraz doğrulamada R^2=0.856, RMSE=2.02 °C ve MAE=1.48 °C; XGBoost ise R^2=0.859, RMSE=1.99 °C ve MAE=1.46 °C değerlerine ulaşmıştır. XGBoost hata ölçütlerinde sınırlı bir iyileşme göstermesine karşın, model yorumlanabilirliği ve çalışma tasarımındaki ana model rolü nedeniyle Random Forest pilot açıklanabilirlik analizinde korunmuştur. Random Forest için gözlenen ve çapraz doğrulama ile tahmin edilen LST değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 2025 pilot Random Forest modelinde gözlenen ve mekânsal çapraz doğrulama ile tahmin edilen LST değerleri.

Random Forest için ortalama mutlak SHAP değerleri, 2025 pilot predictor setinde en yüksek katkının NDBI'den geldiğini göstermiştir. NDBI için ortalama |SHAP| değeri 4.46 °C, NDVI için 1.24 °C, albedo için 0.48 °C ve NDWI için 0.39 °C olarak hesaplanmıştır. NDBI dependence analizi, düşük NDBI değerlerinin LST tahminine negatif, daha yüksek NDBI değerlerinin ise pozitif katkı verme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Global SHAP önemleri ve NDBI bağımlılık ilişkisi Şekil 5'te sunulmuştur.



a) Global SHAP değişken önemi b) NDBI bağımlılık ilişkisi

Şekil 5. 2025 pilot Random Forest SHAP sonuçları: a) ortalama mutlak SHAP değerlerine göre değişken önemi, b) NDBI değerleri ile NDBI SHAP katkısı arasındaki ilişki.

4.4. Pilot Uygulamanın Değerlendirilmesi

Pilot uygulama, HLS tabanlı NDVI, NDBI, NDWI ve albedo ile Landsat 8/9 tabanlı LST'nin ayrı kalite kontrol süreçlerinden geçirilerek ortak 500 m grid yapısında bütünleştirilebildiğini ve aynı grid tabanında makine öğrenmesi modelinin kurulabildiğini göstermiştir. 2025 pilotunda yaklaşık %86 açıklanan varyans ve yaklaşık 2 °C RMSE düzeyi, veri-model zincirinin çalışabilirliğine ilişkin güçlü bir ön bulgu sunmuştur. Bununla birlikte pilot model yalnızca tek yıla ve dört HLS-tabanlı açıklayıcı değişkene dayandığından nihai 2016–2025 modelinin yerine geçmemekte; genişletilmiş veri seti öncesinde yöntem doğrulaması niteliği taşımaktadır.

5. TARTIŞMA

2025 pilotunda gözlenen kuzey-güney sıcaklık karşıtlığı, İstanbul'un doğal ve yapılı yüzeylerindeki belirgin mekânsal farklılıklarla uyumludur. Kuzeydeki orman alanlarının yüksek NDVI ve düşük LST, yoğun yapılaşmış güney kesimlerin ise daha düşük NDVI ve daha yüksek LST göstermesi literatürde bildirilen temel ilişkilerle kavramsal olarak örtüşmektedir (Cetin vd., 2024; Tran vd., 2017).

Pilot makine öğrenmesi sonuçlarında Random Forest ve XGBoost'un benzer performans göstermesi, HLS-tabanlı yüzey göstergelerinin 2025 LST örüntüsünün önemli bir bölümünü açıklayabildiğini göstermektedir. SHAP sonuçlarında NDBI'nin baskın değişken olması ve NDBI yükseldikçe sıcaklık tahminine katkının pozitifleşmesi, yapılaşmış yüzeylerin termal davranışıyla uyumludur. NDVI'nın ikinci sırada yer alması ise bitki örtüsünün kentsel termal çevredeki rolünü desteklemektedir. Bu bulgular Cetin vd. (2024) ile Tran vd. (2017) tarafından raporlanan NDVI/NDBI-LST ilişkileriyle kavramsal olarak örtüşmektedir. Bununla birlikte İstanbul'un kıyı etkileri, topoğrafik farklılıkları, meteorolojik değişkenliği ve nüfus baskısı nedeniyle pilot modelin dört spektral/yüzey göstergesiyle sınırlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmanın mevcut aşamasındaki temel sınırlılık, model sonuçlarının yalnızca 2025 pilot yılına ve HLS-tabanlı dört açıklayıcı değişkene dayanmasıdır. Bu nedenle elde edilen SHAP önem sırası İstanbul için uzun dönemli veya nedensel bir sonuç olarak yorumlanmamaktadır. 2016–2025 zaman serisinin tamamlanması; nüfus, ERA5-Land meteoroloji, yükselti ve suya uzaklık değişkenlerinin ortak grid veri tabanına eklenmesi; 1 km ölçek duyarlılık analizi ve 100 m mikro analiz ile sonuçların sınanması gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada İstanbul'daki kentsel ısı adası etkisinin 2016–2025 yaz dönemleri için çok kaynaklı uzaktan algılama, meteorolojik, topoğrafik ve demografik verilerle değerlendirilmesine yönelik çok ölçekli bir CBS ve GeoAI yaklaşımı oluşturulmuştur. Ana makro analiz ölçeği 500 m × 500 m olarak belirlenmiş; 1 km grid ölçek duyarlılığı, 100 m grid ise mikro analiz için tanımlanmıştır.

2025 pilot uygulamasında HLS S30 verilerinden NDVI, NDBI, NDWI ve albedo; Landsat 8/9 Collection 2 Level-2 ürünlerinden LST üretilmiş, kalite kontrol adımları doğrulanmış ve veri katmanları ortak 500 m gridlerde birleştirilmiştir. Eksiksiz veriye sahip 20.743 grid üzerinde gerçekleştirilen mekânsal çapraz doğrulamada Random Forest R^2=0.856, RMSE=2.02 °C ve MAE=1.48 °C; XGBoost ise R^2=0.859, RMSE=1.99 °C ve MAE=1.46 °C performans göstermiştir. Random Forest SHAP analizinde NDBI en yüksek katkıya sahip değişken olarak belirlenmiş, bunu NDVI, albedo ve NDWI izlemiştir.

Bir sonraki aşamada aynı veri üretim yaklaşımı 2016–2025 arasındaki on yaz dönemine uygulanacak; yıllık uydu verileri nüfus, meteoroloji, yükselti ve suya uzaklık göstergeleriyle GRID_ID × YEAR veri tabanında bütünleştirilecektir. Nihai Random Forest/XGBoost modelleri aynı mekânsal doğrulama yaklaşımıyla değerlendirilecek; SHAP summary ve dependence analizleri, sıcak nokta analizi ve 100 m mikro ölçekli senaryolarla birlikte kullanılarak İstanbul'da iklim uyum müdahalelerinin mekânsal önceliklendirilmesine yönelik açıklanabilir bir karar destek çerçevesi geliştirilecektir.

KAYNAKLAR

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning,* **45(1)**: 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Cetin, M., Ozenen Kavlak, M., Senyel Kurkcuoglu, M.A., Ozturk, G.B., Cabuk, S.N. ve Cabuk, A., 2024. Determination of land surface temperature and urban heat island effects with remote sensing capabilities: the case of Kayseri, Türkiye. *Natural Hazards*, **120(6): 5509–5536**. DOI: 10.1007/s11069-024-06431-5.

Li, H., Yang, J., Xin, J., Yu, W., Ren, J., Yu, H., Xiao, X. ve Xia, J., 2026. Investigating the effect of urban form on land surface temperature at block and grid scales based on XGBoost-SHAP. *Environmental Modelling & Software*, **195: 106738**. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106738.

Li, Z., Erb, A., Sun, Q., Liu, Y., Shuai, Y., Wang, Z., Boucher, P. ve Schaaf, C., 2018. Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from Sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sensing of Environment*, **217: 352–365**. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.025.

Lundberg, S.M. ve Lee, S.I., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA, **syf: 4765–4774**.

Ren, Y., Feng, F., Elia, M., Giannico, V., Sanesi, G. ve Lafortezza, R., 2025. Understanding the coupling effect of multiple urban features on land surface temperature in Europe. *Urban Forestry & Urban Greening*, **105: 128723**. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128723.

Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M.S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., Hauenstein, S., Lahoz-Monfort, J.J., Schröder, B., Thuiller, W., Warton, D.I., Wintle, B.A., Hartig, F. ve Dormann, C.F., 2017. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, **40(8): 913–929.** DOI: 10.1111/ecog.02881.

Tran, D.X., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Myint, S.W., Caetano, M. ve Kieu, H.V., 2017. Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **124: 119–132**. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.001.

UZAY ARAZİSİ YÖNETİMİNDE 4B-COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TABANLI UZAY KADASTROSU YAKLAŞIMI

Nihal YÜKSEL[1], Tahsin YOMRALIOĞLU[2]

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, yukselni20@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, tahsin@itu.edu.tr

ÖZET

"Yeni Uzay" (New Space) paradigmasıyla birlikte alçak yörüngedeki mega-uydu takımları ve asteroit madenciliği gibi ticari faaliyetler, uzaydaki insan yapımı nesnelerin sayısını hızla artırmaktadır. Mevcut uluslararası tescil mekanizmaları uzay nesnelerini konumsal-zamansal ilişkilerden bağımsız, statik envanterler olarak kaydetmekte; 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması (OST) gibi hukuki çerçeveler ise özel sektör katılımını, mülkiyet haklarını ve yeni teknolojilerin gerektirdiği esnekliği yeterince kapsayamamaktadır. Yeryüzündeki statik mülkiyet sınırlarına dayanan geleneksel kadastro sistemlerinin uzaya doğrudan uyarlanması hukuken mümkün değildir; geleneksel CBS yapıları da sürekli hareket eden nesnelerin mekânsal değişimini modellemekte yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, yeryüzündeki parsel ve hak yönetimi ilkelerini uzay boyutuna taşıyan, Dört Boyutlu Coğrafi Bilgi Sistemleri (4B-CBS) tabanlı bir "Uzay Kadastrosu Modeli" önerilmektedir. Yaklaşım, zamanı (t) mekânsal koordinat sisteminin (x, y, z) doğrudan bir bileşeni olarak konumlandırmakta; uydu ve uzay atıklarının konumları, göksel ve yere merkezli referans sistemleri (GCRS, ITRS/ITRF, WGS84) arasındaki dönüşümlerle tek bir veri modelinde bütünleştirilmektedir. Uzay jeodezisi teknikleri (GNSS, VLBI, SLR) esas alınarak uzay nesneleri, statik nokta yerine yüksek hızlı hareketin etki alanını temsil eden bir "yörünge-tüpü" (orbital-tube) hacmiyle modellenmekte; ISO 19152 LADM standardının ötesine geçilerek yörünge koridorları, zamanın dördüncü boyut olarak eklendiği dinamik etki alanları biçiminde tanımlanmaktadır. Model, LEO/MEO/GSO'daki dinamik nesneleri ve Ay ile Mars yüzeyindeki statik nesneleri kapsamaktadır. Önerilen altyapı, konum-zaman sorgulamaları ve tampon bölge analizleriyle çarpışma risklerinin önceden belirlenmesine imkân tanımaktadır; NASA verilerine göre yörüngedeki nesnelerin yaklaşık %75'ini oluşturan enkazın açık kaynaklı veri tabanlarına (PostgreSQL/PostGIS) entegrasyonu, Kessler Sendromu riskinin tespitini ve makine öğrenmesi destekli risk tahminini mümkün kılabilir. Uzay mülkiyeti yasaklarına sadık kalınarak "kullanım hakları", "tahsisli yörünge alanları" ve "faydalı ömür" kavramları için teknik-hukuki bir tescil altyapısı kurgulanmış, Artemis Anlaşmaları'nın öngördüğü dinamik "güvenlik bölgeleri" mantığı da modele dâhil edilmiştir. Veriler, WebGL/CesiumJS ile dijital ikiz mantığında görselleştirilebilir. Kavramsal düzeyde kalan ve henüz sayısal bir uygulamayla sınanmamış model, uzay yönetimini statik bir sicilden dinamik bir karar destek sistemine dönüştürmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Sözcükler: 4B-CBS, mekân-zaman veri modeli, uzay arazisi, uzay kadastrosu, yörünge-tüpü yaklaşımı.

ABSTRACT

4D-GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BASED SPACE CADASTRE APPROACH IN SPACE LAND MANAGEMENT

Under the "New Space" paradigm, commercial activities such as low-orbit mega-satellite constellations and asteroid mining are rapidly increasing the number of man-made objects in orbit. Existing international registration mechanisms record space objects as static inventories independent of their spatio-temporal relations, while legal frameworks such as the 1967 Outer Space Treaty (OST) inadequately accommodate private-sector participation, property rights and the flexibility new technologies require. Traditional cadastral systems based on static terrestrial boundaries cannot be transferred to space directly, and conventional GIS cannot model continuously moving objects. This study proposes a Four-Dimensional GIS (4D-GIS) based "Space Cadastre Model" extending terrestrial parcel and rights-management principles into the space dimension. The approach treats time (t) as a direct component of the spatial coordinate system (x, y, z), integrating satellite and debris positions into a single data model through transformations between celestial and terrestrial reference systems (GCRS, ITRS/ITRF, WGS84). Building on space geodesy techniques (GNSS, VLBI, SLR), objects are modeled not as static points but through an "orbital-tube" approach representing the domain of influence of high-speed motion; extending ISO 19152 LADM, orbital corridors become dynamic domains carrying time as a fourth dimension. It covers dynamic objects in LEO/MEO/GSO and static objects on lunar and Martian surfaces. The infrastructure enables early identification of collision risks through spatio-temporal queries and buffer-zone analyses; integrating debris, about 75% of tracked orbital objects (NASA), into open-source databases (PostgreSQL/PostGIS) supports Kessler Syndrome risk detection and machine-learning-based prediction. Within the prohibition on space property ownership, a technical-legal registration infrastructure is built around "usage rights", "allocated orbital areas" and "useful life", incorporating the Artemis Accords' dynamic "safety zones" logic. The outputs also suit digital-twin visualization via WebGL/CesiumJS. Conceptual and not yet validated on numerical data, the model aims to transform space management from a static registry into a transparent, dynamic decision-support system.

Keywords: 4D-GIS, orbital-tube approach, space cadastre, space land, spatio-temporal data model.

1. GİRİŞ

Uzay faaliyetlerinin devlet tekelinden çıkarak özel sektörün baskın aktör hâline geldiği "Yeni Uzay" (New Space) dönemi, yörüngedeki insan yapımı nesne sayısını geometrik bir hızla artırmaktadır (İnan Şimşek ve Atvur, 2021; Yomralıoğlu 2025a). Alçak Dünya Yörüngesi'ndeki mega-uydu takımları, yörüngesel lojistik servisler, uzay turizmi ve asteroit madenciliği bu ivmenin somut görünümleridir. NASA verilerine göre yörüngede takip edilebilen yapay nesnelerin yaklaşık %75'ini işlevini yitirmiş uzay araçları, roket gövdeleri ve parçalanma enkazı oluşturmaktadır (NASA 2024); her çarpışmanın nesne sayısını azaltmak yerine çoğalttığı "Kessler Sendromu" riski, uzay ekosisteminin uzun vadeli sürdürülebilirliğini doğrudan tehdit etmektedir (Erol 2025).

Bu yoğunlaşma karşısında mevcut tescil mekanizmaları yetersiz kalmaktadır. Birleşmiş Milletler Uzay Nesnelerinin Tescili Sözleşmesi (Registration Convention) kapsamındaki sicil kayıtları; nesnelerin anlık dinamiklerini, yörünge manevralarını ve topolojik ilişkilerini yansıtmayan, statik ve metin tabanlı idari envanterler biçimindedir ve bu hâliyle modern Uzay Trafik Yönetimi (Space Traffic Management - STM) gereksinimlerini karşılamaktan uzaktır (Masson-Zwaan vd., 2024; UNOOSA 2025). Hukuki düzlemde ise 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması (Outer Space Treaty - OST) ulusal egemenlik ve mülkiyet iddialarını kesin biçimde yasaklarken (UNOOSA 2025), uzay madenciliği ve yörünge tahsislerinde milyar dolarlık yatırım yapan özel şirketler "mülkiyet güvencesi" ve "kullanım hakkı" talep etmektedir (Demirer 2023; Putro vd., 2022). Bu yapısal uyuşmazlık, uluslararası uzay hukukunda ciddi boşluk ve belirsizliklere yol açmaktadır (Pop 2009).

Bu çok disiplinli ihtiyaçlar karşısında çalışmanın amacı; yeryüzündeki parsel ve hak yönetimi ilkelerini uzay boyutuna taşıyarak uzay nesnelerinin tescilini sağlayacak, Dört Boyutlu Coğrafi Bilgi Sistemleri (4B-CBS) tabanlı bir "Uzay Kadastrosu" modeli önermektir. Modelde zaman (t) parametresi, mekânsal koordinatların (x, y, z) dördüncü ve ayrılmaz bir bileşeni olarak sisteme entegre edilmekte; uzay nesneleri durağan noktalar yerine, matematiksel olarak tanımlanan güvenlik toleransları barındıran dinamik bir "yörünge-tüpü" (orbital-tube) hacmi olarak kurgulanmaktadır (Yomralıoğlu 2025b). ISO 19152 Arazi İdaresi Alan Modeli (Land Administration Domain Model - LADM) uzaya genişletilerek, uzay yönetiminin salt statik bir idari sicilden çıkarılıp yörünge çakışmalarını ve hak ihlallerini önceden tespit edebilen sürdürülebilir bir mekânsal karar destek sistemine dönüştürülmesi hedeflenmektedir (Lemmen vd., 2015).

1.1. Yeni Uzay Paradigması ve Yörünge Yoğunluğu Sorunsalı

Aktör sayısındaki çoğalma yalnızca aktörlerin çeşitlenmesi değil (İnan Şimşek ve Atvur, 2021), sınırlı bir fiziksel kaynağın —yörünge hacminin— eşi görülmemiş bir hızla paylaşılması anlamına gelmektedir. Paylaşım baskısı, Alçak Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit - LEO) kadar Jeostasyoner Yörünge (Geostationary Orbit - GSO) için de geçerlidir: GSO'daki konum dilimleri "ilk gelen alır" ilkesiyle tahsis edilen, fiziksel olarak sabit ve sayıca sınırlı bir kaynaktır; bu dilimlere yönelik yatırımların 2021'de yaklaşık 92 milyar USD'ye ulaştığı, önümüzdeki on yılda 1 trilyon USD'yi aşabileceği öngörülmektedir (Putro vd., 2022). Sorun LEO'da fiziksel çarpışma riski, GSO'da idari erişim eşitsizliği biçiminde tezahür etse de ortak payda aynıdır: mevcut mekanizmalar yörüngeyi durağan bir liste olarak ele almakta, dinamik ve üç boyutlu bir hacim olarak kavrayacak çerçeveden yoksundur.

Fiziksel yoğunluğun bir başka boyutu, yörüngedeki enkaz nüfusunun kendi kendini besleyen doğasıdır. Kritik unsur, her çarpışmanın mevcut nesne sayısını azaltmak yerine çoğaltması ve gelecekteki çarpışma olasılığını yükseltmesidir (NASA 2024); literatürde "Kessler Sendromu" olarak adlandırılan bu kademeli döngü, yörünge kapasitesinin geri döndürülemez biçimde daralmasına yol açabilir (Erol 2025). Sürecin kümülatif karakteri, önlemin statik bir envanterden değil, sürekli güncellenen bir izleme modelinden geçmesi gerektiğini göstermektedir.

Yürürlükteki tescil uygulamaları ise nesnenin yörüngeye yerleştirildiği andaki parametreleri kayıt altına alan statik bir mimariye dayanmakta; sonraki manevralar, konum değişiklikleri ve parçalanma olayları bu kayıtlara sistematik biçimde yansıtılmamaktadır (Masson-Zwaan vd., 2024; UNOOSA 2025). Oysa bir uzay aracının konumu sabit bir referans noktası değil, zamanın fonksiyonu olarak sürekli değişen bir konum vektörüdür. Yörüngenin dinamik doğası ile tescil sistemlerinin durağan mimarisi arasındaki bu yapısal uyumsuzluk, önerilen modelin çıkış noktasını oluşturmaktadır.

1.2. Uzay Hukuku ve Kadastro İlişkisi

Uluslararası uzay hukukunun temelini oluşturan OST'nin ikinci maddesi uyarınca, Ay ve diğer gök cisimleri dâhil olmak üzere dış uzay, egemenlik iddiasıyla veya işgal yoluyla hiçbir şekilde ulusal mülk edinmeye konu olamaz (UNOOSA 2025). Ancak uzayın hızla ticarileşmesi ve özel sektörün uzay madenciliği gibi alanlardaki faaliyetleri, bu yasağın etrafında ciddi hukuki boşluklar ve ticari beklentiler yaratmaktadır (Demirer 2023; Smith 2020). Ulusal sahiplenmeyi engelleyen yapı ile özel sektörün kullanım güvencesi talepleri arasındaki uyuşmazlık, uzay objelerinin ve arazilerinin şeffaf bir zemin üzerinde nasıl yönetileceği sorununu doğurmaktadır.

Dış uzay kavramının kendisi de uluslararası hukukta bağlayıcı bir tanıma kavuşturulabilmiş değildir; hava sahası ile dış uzay arasındaki ayrım BM Dış Uzayın Barışçıl Kullanımı Komitesi'nin gündeminde onlarca yıldır çözümsüz kalmakta, sıklıkla referans alınan Kármán çizgisi (83-110 km) üye devletler arasında ortak bir uzlaşıya dönüşmemektedir (UNOOSA 2022). Bu belirsizlik, uzay trafiği yönetimi sistemlerinin kapsamını doğrudan etkilemektedir. Önerilen model bu tartışmaya doğrudan çözüm getirmemekle birlikte, tanım belirsizliğinin en az tartışmalı olduğu LEO ve üzeri yörüngesel nesnelere odaklanmaktadır.

Mülkiyet yasağı ile ticari beklentiler arasındaki gerilimi yumuşatacak kavramsal çıkış noktası, kadastro literatürünün Sahiplik, Sınırlamalar ve Sorumluluklar (Rights, Restrictions and Responsibilities - RRR) üçlü yapısında bulunabilir. ISO 19152 LADM standardı bu yapıyı, mekânsal birim üzerindeki hukuki ilişkiyi tek bir mutlak mülkiyet hakkına indirgemeden; kullanım hakkı (right), kaçınma yükümlülüğü (restriction) ve sorumluluk (responsibility) bileşenleriyle çok katmanlı biçimde tanımlar (Lemmen vd., 2015). Kullanım imtiyazı, geçici tahsis ya da kısıtlı erişim gibi esnek biçimleri barındırabilmesi, RRR üçlüsünü mülkiyetin yasaklandığı uzay ortamına taşınabilecek bir aday hâline getirmektedir; Yomralıoğlu (2025b) bu yapının yörünge ve gök cismi alanlarına genişletilebileceğini öne sürmektedir.

RRR temelli bir uyarlamanın hukuki dayanağı OST'nin kendi metninde saklıdır. OST'nin 2. maddesi yalnızca ülkesel egemenlik (territorial sovereignty) iddialarını yasaklarken, 8. maddesi sicile kayıtlı bir uzay aracı üzerinde kayıt yapan devletin yetki ve denetim (jurisdiction and control) hakkını korumaktadır (UNOOSA 2025). Bu ayrım, devletlerin uzayda ülkesel değil, kayıtlı nesneler ve faaliyetler üzerinde sınırlı bir "işlevsel egemenlik" (functional sovereignty) icra edebileceği biçiminde yorumlanmıştır (Shri 2021). Buradan hareketle, bir gök cismi üzerinde mutlak mülkiyet kurulması mümkün olmasa da belirli bir yörünge diliminin, zaman penceresinin veya faaliyet alanının kullanım hakkının —buna bağlı sınırlama ve sorumluluklarla birlikte— tescil edilmesi, mevcut hukuki çerçeveyle bağdaşabilir niteliktedir.

Yörünge kaynaklarının tanımlı bir kullanım hakkı olmaksızın serbestçe ve bedelsiz işgal edilmesi, sınırlı kapasitenin sürdürülebilir yönetimini güçleştirmekte; kullanımın maliyetsiz olması dilimlerin aşırı ve dengesiz kullanımını teşvik ederek tıkanıklık riskini derinleştirmektedir (Scheraga 1987). Bu mekanizma, iktisatta "ortak mal sorunu" (tragedy of the commons) olarak bilinen açık-erişim kaynak tüketimi dinamiğiyle örtüşmektedir. Artemis Anlaşmalarında önerilen "güvenlik bölgeleri" (safety zones) uygulaması ise RRR yaklaşımına yakın güncel bir örnek sunmaktadır (NASA 2020). Çalışmada önerilen 4B-CBS tabanlı Uzay Kadastrosu modeli de bu noktadan hareketle kurgulanmıştır: RRR bileşenleri yörünge dilimi, zaman penceresi ve faaliyet türüne bağlı olarak dinamik biçimde tanımlanacak ve mekânsal veri tabanı ortamında izlenebilir kılınacaktır. Amaç, mülkiyet hakkı tesis etmek değil; kullanım haklarını, sınırlamaları ve sorumlulukları şeffaf, güncellenebilir ve uluslararası düzeyde denetlenebilir bir kayıt sistemi içinde tanımlamaktır.

1.3. Literatürde Uzay Kadastrosu ve Çalışmanın Amacı

Henssen'in (1995) klasik tanımına göre kadastro, sınır ölçümüne dayanan ve mülkiyete ilişkin verilerin yöntemli biçimde düzenlendiği kamusal bir envanterdir. Bu tanım kavramı başından beri kara parseliyle sınırlamamıştır: Binns vd. (2004), deniz sınırlarının ve bunlara bağlı hak, sınırlama ve sorumlulukların tanımlanmasını amaçlayan bir "deniz kadastrosu" (marine cadastre) önerisiyle kavramın kara parseli dışına çıkabileceğini göstermiştir. ISO 19152 LADM standardının ikinci sürümünde ayrı bir "deniz düzenlemesi" (marine georegulation) bileşenine yer verilmesi, bu genişlemenin kurumsallaşmış bir uygulamaya dönüştüğüne işaret etmektedir (Van Oosterom vd., 2025).

Kadastronun üçüncü boyuta taşınması ise disiplinin kendi içinde çok daha köklü bir tartışma konusudur. Yeryüzü kadastrosu tarihsel olarak fiziksel sınırları net biçimde tanımlanmış, iki boyutlu (2B) sabit parsellere dayanan bir sistem olarak kurgulanmış; üç boyutlu (3B) uygulamalara geçiş ancak son dönemde gündeme gelmiştir (Yomralıoğlu ve McLaughlin, 2017). Geleneksel Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yaklaşımları da zamandan bağımsız, durağan mekânsal nesneleri modellemeye odaklandığından sürekli değişen dinamik yapıları kavramakta yetersiz kalmaktadır (Langran 1992). Stoter (2004), bir parsel üzerindeki mülkiyet hakkının hukuki açıdan hiçbir zaman yalnızca iki boyutlu bir yüzeyle sınırlı olmadığını, hakkın belirli bir hacme karşılık geldiğini; ancak mevcut tescil pratiğinin bu hacmi açıkça temsil edemediğini ortaya koymuş; kentsel yoğunlaşma ile 3B CBS alanındaki teknolojik olgunlaşmanın üç boyutlu kadastroyu hem zorunlu hem uygulanabilir kıldığını belirtmiştir. Döner'in (2021) 2001-2019 yılları arasında 59 ülkeden 441 yayını tarayan sistematik derlemesi, araştırmaların teknik konulara yoğunlaştığını, hukuki ve kurumsal boyutlarda uluslararası bir uzlaşıya ulaşılamadığını ortaya koymakta; gelecekte öncelikli başlıklar arasında LADM'nin revizyonunu ve özellikle zamanın bir boyut olarak eklendiği dört boyutlu (4B) kadastro fikrinin araştırılmasını saymaktadır. LADM'nin arazi tescili bileşenine ait anket modelinin hâlâ geliştirilmekte olması (Kalogianni vd., 2024), uzay ortamına taşınacak herhangi bir yaklaşımın Dünya üzerinde bile tam anlamıyla oturmamış bir teknik-hukuki zemin üzerine inşa edilmek durumunda olduğuna işaret etmektedir.

Uzay ortamına özgü "kadastro" girişimlerine bakıldığında ise literatür çok daha parçalı bir görünüm sunmaktadır. Gheorghe ve Yuchnovicz (2015) tarafından önerilen "Uzay Altyapısı Kırılganlık Kadastrosu" (Space Infrastructure Vulnerability Cadastre), yörüngedeki enkaz birikiminin kritik uydu yörüngeleri üzerindeki yükünü sistematik biçimde izlemeyi amaçlayan ve terimi uzay bağlamında kullanan ilk çalışmalardan biridir; ancak bu çerçeve hak kaydından çok bir risk izleme aracı olarak tasarlanmış olup RRR ilişkisine değinmemektedir. Benzer bir sınırlılık, gezegen bilimi topluluğunun veri erişimi ihtiyaçlarına yönelik "Gezegensel Mekânsal Veri Altyapısı" (Planetary Spatial Data Infrastructure) önerisinde de gözlemlenmektedir (Laura vd., 2017, 2018); asıl vurgu bilimsel verinin keşfedilebilirliği

ve birlikte çalışabilirliği üzerindedir. Dolayısıyla uzay odaklı öneriler şimdiye kadar ya risk yönetimine ya da bilimsel veri erişimine hizmet etmiş, RRR temelli bütüncül bir kayıt modeline henüz dönüşmemiştir.

Çalışmanın doğrudan dayandığı kavramsal çerçeve, Yomralıoğlu'nun (2024, 2025a, 2025b) "uzay kadastrosu" önerisidir. Bu çalışmalarda uzay kadastrosu, coğrafi bilgi bilimini, hukuku ve bilişim teknolojilerini bir araya getiren çok boyutlu (4B) bir paradigma olarak tanımlanmakta ve uzaydaki mekânsal RRR olgularının sistematik biçimde kayıt altına alınabileceği ileri sürülmektedir. Ancak bu yönelim paradigma düzeyinde kalmakta; hakların hangi geometrik birim üzerinden, hangi zamansal sınırlarla tescil edileceğine ilişkin somut bir işleyiş henüz tanımlanmamıştır. Mevcut çalışma, kadastral genişleme geleneğini ve 3B kadastronun biriken teknik deneyimini bu paradigmayla bir araya getirerek, RRR bileşenlerini somut bir geometrik-zamansal birim üzerinden tanımlayabilen bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2. YÖRÜNGE-TÜPÜ MODELLEMESİ VE ZAMANSAL-MEKÂNSAL VERİ ALTYAPISI

RRR bileşenlerinin üzerine oturacağı somut bir geometrik-zamansal birimin tanımlanması, önceki bölümde ortaya konan boşluğun doğal bir gereğidir. İzleyen alt başlıklar dört aşamalı bir çerçeve sunmaktadır: nesnelerin nokta yerine hacimsel bir yörünge-tüpü olarak sınırlandırılması, tampon bölgelerin çarpışma analizine temel oluşturması, konumun referans sistemleriyle CBS altyapısına taşınması ve zaman parametresinin eklenmesiyle oluşan dört boyutlu (x, y, z, t) veri modelinin mimarisi.

2.1. Dinamik Sınır Tanımlama ve Yörünge-Tüpü Yaklaşımı

Mevcut tescil uygulamalarında bir uzay nesnesi genellikle sabit bir nokta olarak kayıt altına alınmaktadır. Oysa yörüngedeki bir nesne saniyeler mertebesinde konum değiştirmekte; nokta temelli temsil, nesnenin zaman içinde taradığı hacmi ve komşu nesnelerle olası etkileşim alanını yansıtmamaktadır. Önerilen modelde bu sınırlılık, nesnenin belirli bir zaman aralığı boyunca izlediği rota çevresinde tanımlanan hacimsel bir koridor —yörünge-tüpü— üzerinden aşılmaya çalışılmaktadır. Koridor, nominal yörünge parametreleri etrafında konumlandırılan katı ya da yüzey geometrisiyle sınırlandırılmakta; bu sınırın kalınlığı konum belirsizliği ve manevra toleransı gibi etkenlere bağlı olarak değişebilmektedir.

Line 2	
Column	**Description**
01	Line Number of Element Data
03-07	Satellite Number
09-16	Inclination [Degrees]
18-25	Right Ascension of the Ascending Node [Degrees]
27-33	Eccentricity (Leading decimal point assumed)
35-42	Argument of Perigee [Degrees]
44-51	Mean Anomaly [Degrees]
53-63	Mean Motion [Revs per day]
64-68	Revolution number at epoch [Revs]
69	Checksum (Modulo 10)

Şekil 1. İki Satırlı Yörünge Elemanları (TLE) biçiminin ikinci satırına (Line 2) ait alan tanımları (CelesTrak t.y.a).

International Designator	NORAD Catalog Number	Name	Source	Launch Date	Launch Site	Decay Date	Object Type	Ops Status	Latest Data
2021-001A	47306	TURKSAT 5A	TURK	2021-01-08	AFETR		PAY+	+	

Notes:
- Link to additional information
- Link to custom search query for related news, information, and images
- Link to raw GP data
- and in the International Designator column are for all objects associated with that launch
- Link to plot of apogee, perigee, and eccentricity for actual or potential decays (apogee < 300 km)
- Link to plot of longitude of the ascending node (LAN) and mean semi-major axis (SMA) for GEO altitude ± 250 km
- Link to plot of orbit data: right ascension of the ascending node (RAAN), mean semi-major axis (SMA) altitude, eccentricity, inclination, and argument of perigee.

Şekil 2. CelesTrak Uydu Kataloğu (SATCAT) veritabanında TURKSAT 5A uydusuna (NORAD Katalog No. 47306) ait örnek kayıt (CelesTrak t.y.b).

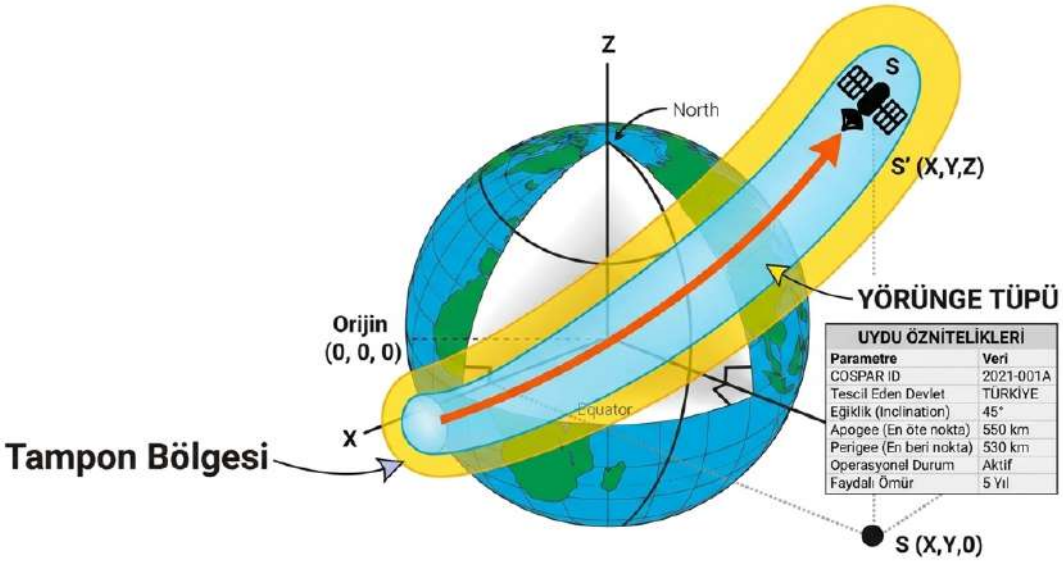
Yörünge-tüpünün tanımlanabilmesi için öncelikle nesnenin statik mi yoksa dinamik mi olduğu ayrımının yapılması gerekmektedir; LEO, Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit - MEO) ve GSO'da konuşlanan uydular dinamik nesne sınıfına girerken, Ay ya da Mars yüzeyindeki sabit bir kullanım alanı statik nesne olarak ele alınabilmektedir. Dinamik nesneler için yörünge-tüpü geometrisi, uluslararası uydu kataloglama sistemlerinde kullanılan COSPAR tanımlayıcısı, fırlatma tarih ve saati ile başlangıç yörünge parametrelerinden türetilmekte ve zaman içindeki konum bilgisiyle sürekli güncellenmektedir. Güncel konumun elde edilmesinde, bir referans anına (epoch) ait ortalama yörünge elemanlarını sabit bir metin biçiminde kodlayan ve kamuya açık yayımlanan İki Satırlı Element (Two-Line Element - TLE) verilerinin, analitik SGP4 (Simplified General Perturbations 4) modeliyle ileriye doğru yayılması (propagation) standart yöntem olarak öne çıkmaktadır (Vallado ve Crawford, 2008). Yöntemin doğruluğu atmosferik sürüklenme ve pertürbasyon etkileri nedeniyle epoch'tan uzaklaştıkça azaldığından, konum bilgisinin düzenli aralıklarla yenilenen TLE setleriyle beslenmesi gerekmekte; bu bağımlılık, veri modelinde zaman boyutunun zorunlu

bir bileşen olarak yer almasını gerektirmektedir. TLE'nin ikinci satırında yer alan ve yörünge-tüpü geometrisinin türetilmesinde doğrudan kullanılan eğiklik, yükselen düğümün sağ açıklığı, dış merkezlik, perigee argümanı ve ortalama hareket alanları Şekil 1'de; bu elemanların bağlandığı kataloglama kaydına ilişkin örnek ise TURKSAT 5A uydusu üzerinden Şekil 2'de gösterilmektedir.

Statik nesneler için yörünge-tüpü kavramının doğrudan uygulanması gerekmemekte; sabit bir mekânsal sınırın (dairesel ya da çokgen bir kullanım alanının) tanımlanması yeterli görünmektedir. Çalışmanın odağı dinamik sınır problemi olduğundan izleyen alt başlıklarda dinamik yörünge-tüpü geometrisi üzerinde durulmaktadır.

2.2. CBS Tabanlı Tampon Bölge Oluşumu

Komşu nesnelerle olası etkileşimin değerlendirilebilmesi, yörünge-tüpünün kendisinden ayrı, onu çevreleyen ikinci bir hacmin —tampon bölge— tanımlanmasını gerektirmektedir. Yörünge-tüpü nesnenin kendi konum belirsizliğini temsil ederken, tampon bölge iki ayrı yörünge-tüpü arasındaki güvenlik payını ifade etmekte ve çarpışma riski değerlendirmesinin temel birimini oluşturmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Temsilî yörünge-tüpü ve tampon bölge gösterimi (uydu öznitelikleri: CelesTrak t.y.c).

Tampon bölgenin sabit bir genişlikle tanımlanması, önerilen modelin dayandığı veri kaynağının doğasıyla bağdaşmamaktadır. Yörünge verisi doğrudan bir ölçüm değil, geçmiş gözlemlerden istatistiksel olarak kestirilen bir modeldir; konum belirsizliği, verinin geçerli olduğu referans zamanından (epoch) uzaklaştıkça birikimli biçimde artmakta, bu artış atmosferik sürüklemenin baskın olduğu LEO'da daha hızlı, jeosenkron yörüngede ise görece yavaş seyretmektedir. Bu nedenle tampon bölge genişliği sabit değil, epoch'tan geçen süreye ve yörünge yüksekliğine bağlı değişken bir fonksiyon olarak kurgulanmaktadır; böylece güncel bir kayıttan türetilen dar tampon ile haftalar önce güncellenmiş bir kayıttan türetilen geniş tampon arasındaki fark modelde yansıtılabilmektedir.

Tampon bölge genişliğinin bu biçimde değişken tanımlanması, güvenlik payının her nesne için ayrı ayrı üretilmesini gerektirmektedir. İki nesnenin yörünge-tüpü eksenleri arasındaki en küçük uzaklık, ilgili tampon genişliklerinin toplamından küçük kaldığı zaman aralıklarında potansiyel yakınlık işaretlenmektedir. Tampon genişliğini belirleyen parametrelerin sayısal kalibrasyonu gerçek veri üzerinde bir pilot uygulama gerektirmektedir.

Genişliği belirleyen bir diğer etken nesnenin faaliyet türüdür: aktif biçimde yönetilen bir uydu, yörünge tutma (station-keeping) manevralarıyla konumunu belirli toleranslar içinde tutabilirken, pasif bir enkaz parçası zaman içinde giderek büyüyen bir belirsizlik taşımaktadır. Tampon bölgenin faaliyet türüne göre parametrize edilmesi, farklı nesne kategorilerinin aynı çerçeve içinde ayırt edilebilmesini sağlamaktadır. Bu çerçevede üretilen koridorların kesişme riski değerlendirmesi, mevcut aşamada olasılıksal bir kestirimden çok, iki tampon bölgenin kesişip kesişmediğine dayanan basitleştirilmiş bir yakınlık sınamasıdır; kovaryans tabanlı tam bir çakışma (conjunction) analizi, modelin ileride geliştirilebilecek bir uzantısı olarak değerlendirilmektedir. Bu sınamanın anlamlı sonuç üretebilmesi, yörünge-tüpü ve tampon bölgenin ortak bir referans sisteminde ifade edilmesini gerektirmektedir.

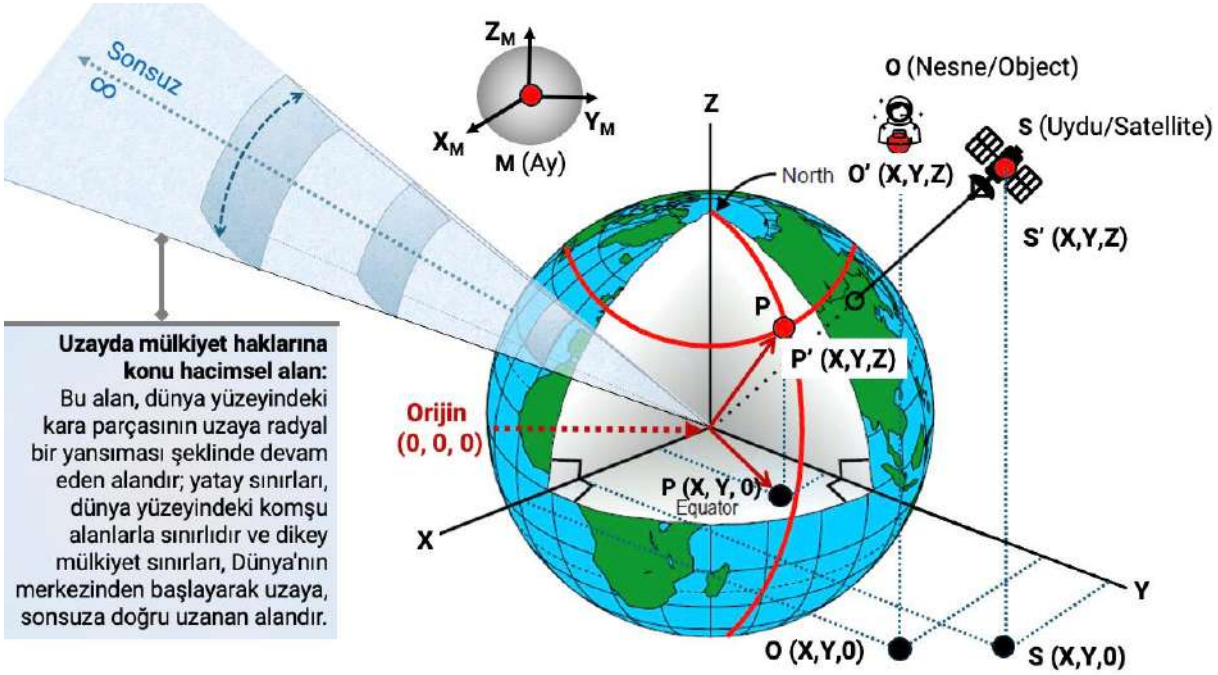
2.3. Referans Sistemlerinin Entegrasyonu

Yörünge-tüpü ve tampon bölgenin ortak bir çerçevede karşılaştırılabilmesi, bu geometrilerin hangi aşamalardan geçerek üretildiğinin ayırt edilmesine bağlıdır. SGP4 modelinin ham çıktısı, yörünge düzleminin kendi içinde kurulmuş yörüngesel (perifokal) sistemde tanımlıdır ve bu hâliyle Dünya yüzeyiyle doğrudan ilişkilendirilebilir değildir; coğrafi anlamda kullanılabilir bir konuma ulaşmak, birbirini izleyen bir dizi referans sistemi geçişini gerektirmektedir (Kurt 2021). İlk geçiş, yörüngesel düzlemdeki konumun üç ardışık döndürme işlemiyle Dünya merkezli ancak Dünya ile birlikte dönmeyen göksel referans sistemine taşınmasıdır. SGP4'ün ham çıktısı tarihsel olarak TEME sisteminde tanımlı olsa da daha yüksek hassasiyetli Yer Merkezli Göksel Referans Sistemi'ne (Geocentric Celestial Reference System - GCRS) dönüştürülerek kullanılması önerilen modelde uygun görülmektedir.

Konumun Dünya yüzeyiyle ilişkilendirilebilmesi için ikinci bir dönüşüm gerekmektedir: göksel sistemden, Dünya ile birlikte dönen Uluslararası Yersel Referans Sistemi'ne (International Terrestrial Reference System - ITRS) geçiş. İki sistem arasındaki fark esasen Dünya'nın anlık açısal konumundan ibaret olmakla birlikte, dönüşün düzensizliği nedeniyle kutup hareketi, eksen salınımları ve evrensel zaman farkı düzeltmelerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

ITRS'in kendisi soyut bir tanımdır; somut ve kullanılabilir bir çerçeveye ancak Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems - GNSS), Çok Uzun Bazlı Enterferometri (Very Long Baseline Interferometry - VLBI) ve Uydu Lazer Ölçümü (Satellite Laser Ranging - SLR) gibi uzay jeodezisi tekniklerinden elde edilen gözlemlerin ortak çözümüyle kavuşmaktadır; bu çözümün ürünü olan somut gerçekleştirim, Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi (International Terrestrial Reference Frame - ITRF) olarak adlandırılmaktadır (Kurt 2021).

Elde edilen üç boyutlu kartezyen çerçeve, yalnızca hareketli nesnelerin değil, yeryüzü kadastrosunun uzaya yansıtılması durumunda ortaya çıkacak hacimsel alanların da aynı sistemde ifade edilmesine imkân vermektedir. Kara kadastrosunun klasik mantığı bir parselin sınırlarını düşey doğrultuda uzatmaya dayandığından, bu mantığın uzaya taşınması hâlinde her parsel; Dünya merkezinden başlayan, yeryüzündeki sınırlarından geçerek uzaya doğru genişleyen ve komşu parsellerin karşılık geldiği hacimlerle yanal olarak sınırlanan bir hacme karşılık gelmektedir (Şekil 4). Söz konusu gösterim, uzayda mülkiyete konu olabilecek alanların geometrik olarak nasıl tanımlanabileceğini ortaya koymakla birlikte, OST'nin ulusal sahiplenme yasağı karşısında doğrudan bir mülkiyet rejimine dayanak oluşturmamaktadır. Bu çalışmada söz konusu hacimsel temsil, mülkiyet iddiasının değil, kullanım hakkının mekânsal karşılığını tanımlayan bir çerçeve olarak ele alınmakta; hak, sınırlama ve sorumluluk bileşenleri bu hacimler üzerinde değil, izleyen bölümde tanımlanan geometrik-zamansal dilimler üzerinde tescil edilmektedir.



Şekil 4. Uzayda mülkiyet hakkına konu alanların ve uzay objelerinin Kartezyen koordinat değerleri ile temsili (Yomralıoğlu 2025a).

Yersel sistemdeki kartezyen koordinatların enlem, boylam ve yüksekliğe dönüştürülmesi bir referans elipsoit gerektirmekte; bu amaçla Dünya Jeodezik Sistemi 1984'ün (World Geodetic System 1984 - WGS84) kullanılması önerilen modelde uygun görülmektedir. Türkiye'nin resmî yersel referans çerçevesi TUREF olmakla birlikte, iki datum arasındaki fark santimetre mertebesinde kalırken yörünge verisinin propagasyon belirsizliği epoch'a yakın zamanlarda dahi yüzlerce metreye ulaştığından, WGS84'ün doğrudan kullanılması ölçülebilir bir doğruluk kaybına yol açmaksızın işlem zincirini sadeleştirmektedir. Bu dönüşüm zincirinin sonunda elde edilen coğrafi koordinatlar, yörünge-tüpü ve tampon bölge geometrilerinin bir CBS ortamında saklanabilir, sorgulanabilir ve zaman boyutuyla ilişkilendirilebilir hâle gelmesini sağlamaktadır.

2.4. 4B-CBS Veri Modeli Tasarımı

Her iki geometri de zamana bağlı olarak değiştiğinden, veri modelinin üç boyutlu koordinatların yanı sıra zaman parametresini (t) de dördüncü ve ayrılmaz bir bileşen olarak barındırması gerekmektedir. Önerilen veri modelinde her nesne kaydı; sabit tanımlayıcı bilgilerin (kayıt kimliği, fırlatma tarihi vb.) yanı sıra belirli bir epoch'a bağlı yörünge elemanlarını, bunlardan türetilen göksel ve yersel konum bilgilerini ve söz konusu konumun geçerli olduğu zaman aralığını birlikte taşımaktadır. Mekânsal veri tabanı altyapısı olarak, çok boyutlu geometri türlerini ve zamana bağlı sorgulamayı destekleyen açık kaynaklı PostgreSQL/PostGIS öngörülmektedir.

Sistemin genel işleyişi beş ardışık aşamada özetlenebilir: (i) veri toplama ve entegrasyon, (ii) veri depolama ve yönetimi, (iii) konumsal analiz ve işleme, (iv) görselleştirme ve haritalama, (v) yasal-idari yapının bu çıktılarla ilişkilendirilmesi. İlk aşama, önceki alt başlıklarda tanımlanan yörünge-tüpü ve tampon bölge üretim sürecinin kendisidir; son aşama ise izleyen bölümde ele alınacak tescil mekanizmasının veri tabanı düzeyindeki karşılığını oluşturmaktadır.

3. TEKNİK VE HUKUKİ TESCİL MEKANİZMASI

Yörünge-tüpü, tampon bölge ve bunları zaman boyutuyla ilişkilendiren 4B-CBS veri modeli, RRR bileşenlerinin tescil edilebileceği somut bir teknik zemin sunmaktadır. İzleyen alt başlıklardan ilki kullanım haklarının zaman penceresiyle sınırlandırılmış tescil senaryolarını, ikincisi nesnenin faydalı ömrü boyunca tescilin nasıl güncel tutulacağını ele almaktadır.

3.1. Uzay Kullanım Hakları ve Zaman Pencerelerinin Tescili

OST'nin mülkiyet yasağı, hak sahipliğinin bir arazi parçası üzerinde değil, belirli bir faaliyetin yürütülmesi üzerinde kurgulanmasını zorunlu kılmaktadır. Önerilen modelde RRR kaydının konusu, sabit bir geometri değil; belirli bir yörünge-tüpü ve ona karşılık gelen tampon bölge geometrisinin, sınırları epoch'larla ifade edilen bir zaman aralığıyla birlikte oluşturduğu geometrik-zamansal dilimdir. Bu dilimle ilişkilendirilen hak, mülkiyet niteliği taşımayan, geçici ve faaliyete bağlı bir kullanım hakkı olarak kurgulanmaktadır; nitekim Artemis Anlaşmalarının öngördüğü güvenlik bölgeleri de mülkiyet iddiası taşımaksızın, bildirim ve koordinasyon yükümlülüğüne dayalı geçici bir kullanım önceliği tanımaktadır (NASA 2020).

Kısıtlama bileşeni, tampon bölgenin sınırları içine giren diğer aktörlere yüklenen çarpışmadan kaçınma ve bildirim yükümlülüğü biçiminde işlemekte; sorumluluk bileşeni ise kaydın kendisini güncel tutma yükümlülüğüyle ilişkilidir. Yörünge elemanları epoch'tan uzaklaştıkça güncelliğini kaybettiğinden, tescil kaydının statik bir belge değil, düzenli TLE güncellemeleriyle beslenen dinamik bir kayıt olarak tasarlanması ve bu yükümlülüğün kayıt sahibine ait olması önerilmektedir.

Somut bir senaryo üzerinden ifade etmek gerekirse: bir işletme, fırlattığı bir haberleşme uydusu için, aktif görev süresini kapsayan bir zaman penceresinde belirli bir yörünge-tüpü ve tampon bölge dilimini kendi adına tescil ettirebilir. Buradaki dilim, sabit bir üç boyutlu blok değil; uydunun yörüngedeki hareketiyle zamanla kayan bir geometri ile bu geometrinin geçerli sayıldığı sabit bir başlangıç-bitiş aralığının birleşimidir. Bu süre boyunca yükümlülük, elemanların güncel tutulması ve komşu tescillerle olası kesişimlerin bildirilmesidir.

3.2. Faydalı Ömür ve Varlık İzleme Yönetimi

Bir uzay nesnesinin yörüngedeki varlığı, yakıtın ve fonksiyonelliğin sürdüğü aktif görev evresi ile bunun sona ermesiyle başlayan görev sonu evresinden oluşmaktadır. Bu ayrım, tescil kaydının da farklı bir yükümlülük rejimine geçmesine karşılık gelmektedir.

Uluslararası uydu işleticilerini bir araya getiren GSOA'nın (Global Satellite Operators Association) yayımladığı davranış kuralına göre, görevini tamamlamış bir nesnenin mümkün olan en kısa sürede ya atmosfere yeniden girişle ya da bir atık-depolama (graveyard) yörüngesine aktarılarak bertaraf edilmesi ve bu ana kadar izlenebilir kalması önerilmektedir (GSOA 2023). NASA'nın (2024) sürdürülebilirlik stratejisi de yörünge ortamındaki nesne ve enkaz dağılımının zaman içindeki seyrini, büyük ölçüde nesnelerin hizmetten çıkarılma ve bertaraf edilme hızlarına bağlı bir değişken olarak tanımlamaktadır.

Bu geçişin izlenebilmesi, kayıt durumunun sabit değil, zamana bağlı bir öznitelik olarak tutulmasını gerektirmektedir. Veri modelinde her nesne kaydına eklenecek bir durum alanı —etkin, hizmet dışı, bertaraf edilmiş— ilgili zaman damgasıyla güncellenebilmekte; nesne atık-depolama yörüngesine aktarıldığında yörünge-tüpü ve tampon bölge geometrileri de yeni yörünge için yeniden hesaplanarak kayda yansıtılabilmektedir. Böylece tescil, yalnızca aktif görev süresince değil, nesnenin faydalı ömrünün tamamı boyunca güncel kalabilmektedir.

4. MODELİN ÖNGÖRÜLEN ÇIKTILARI VE TARTIŞMA

Zamana bağlı bir tescil kaydı yalnızca hukuki bir belge işlevi görmemekte; karar destek süreçlerine ve uluslararası veri paylaşımına da katkı sağlayabilecek bir teknik altyapı oluşturmaktadır. Bu bölümde modelin iki çıktı boyutu ele alınmaktadır: Uzay Trafik Yönetimi ve enkaz izlemeye sunabileceği karar destek imkânları ile uluslararası veri paylaşımı standartlarına entegrasyonu.

4.1. 4B-CBS Tabanlı Karar Destek Çıktıları

Mevcut Uzay Durumsal Farkındalığı (Space Situational Awareness - SSA) uygulamaları; sınırlı sensör kapsamı, düşük sıklıkta güncellenen efemeris verileri ve zaman zaman yüz metreyi aşabilen konum hataları nedeniyle, özellikle sürekli manevra yapan aktif uyduların takibinde eleştirilmektedir (DalBello 2024). Önerilen modelin sürekli güncellenen, zaman damgalı yapısı bu sınırlılıklara kısmen bir yanıt oluşturabilir: yörünge-tüpü ve tampon bölge geometrileri TLE güncellemeleriyle düzenli olarak yenilendiğinden, iki nesnenin geometrik-zamansal dilimlerinin belirli bir aralıkta kesişip kesişmediği doğrudan sorgulanabilmekte; planlanan bir manevranın komşu tescillerle olası çakışması önceden taranabilmektedir.

Enkaz izleme açısından da benzer bir simülasyon zemini söz konusudur: hizmet dışı kalan ve atık-depolama yörüngesine aktarılan nesnelerin geometrileri sistemde kayıtlı kaldığından, belirli bir yörünge kuşağındaki nesne yoğunluğunun zaman içindeki değişimi haritalanabilmektedir. Bu haritalama, enkazın kendi kendini besleyen çarpışma zincirine dönüşme riskinin (Kessler Sendromu) izlenmesine katkı sağlayabilir; biriken yoğunluk ve konum verileri, gelecekteki yörünge doluluğunu öngörmeye yönelik makine öğrenmesi tabanlı modellerin eğitiminde girdi kaynağı olarak da değerlendirilebilir. Üretilen zaman damgalı veriler, WebGL tabanlı görselleştirme kütüphaneleri (CesiumJS gibi) aracılığıyla dijital ikiz (digital twin) mantığında sunulmaya uygundur; bu da karar vericilerin yörünge yoğunluğunu ve olası çakışma noktalarını görsel olarak izlemesini kolaylaştırabilir.

4.2. Uluslararası Otoriteler İçin Veri Paylaşım Standartları

Uzay Nesnelerinin Tescili Sözleşmesi çerçevesinde BM nezdinde tutulan kayıtlar, esasen fırlatma bilgisi ve genel yörünge parametreleriyle sınırlı, düşük çözünürlüklü bir envanter niteliğindedir (UNOOSA 2025). Önerilen modelin ürettiği zaman damgalı, geometrik olarak zengin kayıtlar bu envanteri ikame etmese de onu tamamlayıcı bir veri katmanı olarak besleyebilir. Yörünge tahsislerinin uluslararası koordinasyonundan sorumlu Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union - ITU) ise jeostasyoner kuşakta sınırlı sayıdaki yörünge-frekans kombinasyonlarını "ilk gelen alır" ilkesine dayalı bir başvuru sistemiyle tahsis etmektedir (Putro vd., 2022); sürekli güncellenen geometrik-zamansal kayıtlar bu sürece, başvuru anındaki statik bilgiden daha zengin bir veri girdisi sağlayabilir.

Modelin PostgreSQL/PostGIS tabanlı, zamana duyarlı mimarisi; farklı kurumların ürettiği mekânsal verinin ortak standartlarla birlikte çalışabilir kılınmasını amaçlayan Gezegensel Mekânsal Veri Altyapısı (Planetary Spatial Data Infrastructure) kavramıyla da örtüşmektedir (Laura vd., 2017, 2018). Aynı mantığın yörüngesel ortama uyarlanması, önerilen modelin bir "Uzay-Mekânsal Veri Altyapısı" (Space-SDI) olarak kurgulanabileceğini düşündürmektedir. Bu entegrasyonların hiçbiri somut bir uygulamayla sınanmamış olup, yapının işlevselliğinin gerçek veri üzerinde gösterilmesi sonraki çalışmaların konusudur. Bununla birlikte, nesne kimliğini uluslararası kataloglama tanımlayıcılarına, RRR bileşenlerini ise yerleşik kadastral veri modellerine dayandıran kavramsal çerçevenin, kurumlar arası birlikte çalışabilirliğe elverişli bir zemin sunması beklenmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uzay nesnelerinin geleneksel tescil uygulamalarında nokta temelli ve zamandan bağımsız biçimde ele alınması, artan yörünge yoğunluğu ve çarpışma riski karşısında giderek belirginleşen bir yetersizliktir. Bu çalışmada, uzay nesnelerinin hareket rotaları boyunca taradıkları hacimsel bir koridoru (yörünge-tüpü), bunu çevreleyen bir güvenlik payını (tampon bölge) ve ikisini ortak bir coğrafi referans çerçevesinde zamanla ilişkilendiren dört boyutlu bir veri modelini birleştiren bütüncül bir model önerisi geliştirilmiştir.

Önerilen modelin özgün katkısı yalnızca geometrik bir yenilikte değil, bu geometrik-zamansal birimin RRR bileşenleriyle ilişkilendirilme biçiminde aranmalıdır: kullanım hakkı, kısıtlama ve güncelleme sorumluluğu, nesnenin fırlatılmasından faydalı ömrünün sonuna kadar aynı kayıt yapısı içinde zamana bağlı olarak takip edilebilmektedir. Modelin açık kaynaklı bileşenler üzerine kurgulanmış olması, uygulanabilirliğini gelişmiş uzay altyapısına sahip aktörlerle sınırlı tutmamaktadır.

Modelin ileriye dönük geliştirilmesi açısından iki yön öne çıkmaktadır: konumsal güncellemenin periyodik TLE yayınlarına bağlı kalmak yerine daha sık beslenen yarı gerçek zamanlı veri kaynaklarıyla desteklenmesi ve tampon bölge kesişimine dayanan basitleştirilmiş yakınlık sınamasının kovaryans tabanlı olasılıksal çakışma analizine dönüştürülmesi.

Sunulan model, sayısal bir uygulamayla sınanmamış kavramsal bir öneridir; tartışılan potansiyellerin gerçek veri kümeleri üzerinde pilot bir uygulamayla sınanması gelecekteki çalışmaların öncelikli hedefidir. Bununla birlikte, uzay nesnelerinin dinamik doğasını coğrafi bilgi sistemleri çerçevesinde tutarlı biçimde ele alan bu model önerisinin uzay kadastrosu tartışmalarına yöntemsel bir katkı sunması beklenmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından desteklenen, 125Y182 numaralı “Uzay İçin 4-Boyutlu Coğrafi Bilgi Sistemine Dayalı Bir Uzay Kadastro Modelinin Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, sağladığı destek için TÜBİTAK’a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Binns, A., Rajabifard, A., Collier, P.A. ve Williamson, I.P., 2004. Developing the Concept of a Marine Cadastre: An Australian Case Study. Trans-Tasman Surveyor, 6: 19-27.

CelesTrak, t.y.a. NORAD Two-Line Element Set Format. https://celestrak.org/NORAD/documentation/tle-fmt.php [Erişim tarihi: 08.09.2026].

CelesTrak, t.y.b. Satellite Catalog (SATCAT): TURKSAT 5A. https://celestrak.org/satcat/table-satcat.php?CATNR=47306&PAYLOAD=1&MAX=500 [Erişim tarihi: 08.09.2026].

CelesTrak, t.y.c. Satellite Catalog (SATCAT): STARLINK-1007. https://celestrak.org/satcat/table-satcat.php?CATNR=44713 [Erişim tarihi: 08.09.2026].

DalBello, R., 2024. Space Traffic Coordination for Safety & Sustainability [Sunum]. IAF Uzay Trafik Yönetimi Komitesi, IAC 2024, Milano, İtalya.

Demirer, E., 2023. What is Space Mining and Space Resources. https://www.researchgate.net/publication/372907391 [Erişim tarihi: 05.09.2026].

Döner, F., 2021. Analysis of Literature on 3D Cadastre. International Journal of Engineering and Geosciences, 6(2): 90-97.

Erol, M., 2025. Reviewing the Activities of the Commonwealth of Independent States in the Context of the Peaceful Exploration and Use of Outer Space, from the Perspective of Sustainable Access to Space for All, in the 25th Year of the 3rd Millennium. 1. Uluslararası Uzay Hukuku ve Teknolojileri Sempozyumu, Düzce, Türkiye, syf: 28-37.

Gheorghe, A.V. ve Yuchnovicz, D.E., 2015. The Space Infrastructure Vulnerability Cadastre: Orbital Debris Critical Loads. International Journal of Disaster Risk Science, 6(4): 359-371.

GSOA, 2023. Code of Conduct on Space Sustainability. Global Satellite Operators Association. 5 sayfa.

Henssen, J., 1995. Basic Principles of the Main Cadastral Systems in the World. Modern Cadastres and Cadastral Innovations Semineri (FIG Komisyon 7 / UN-ECE), Delft, Hollanda. syf: 5-12.

İnan Şimşek, A. ve Atvur, S., 2021. 21. Yüzyılda Uluslararası Uzay Rejiminin İnsanlığın Ortak Mirası Temelinde Yeniden İnşası. Alternatif Politika, 13(3): 593-628.

Kalogianni, E., Dimopoulou, E., Gruler, H.-C., Stubkjær, E., Morales, J., Lemmen, C. ve Van Oosterom, P., 2024. Refining the Survey Model of the LADM ISO 19152-2: Land Registration. Land Use Policy, 141: 107125.

Kurt, O., 2021. An Overview of Space Geodesy. https://www.researchgate.net/publication/367511642 [Erişim tarihi: 05.09.2026].
Langran, G., 1992. Time in Geographic Information Systems. 1. basım, Taylor & Francis, Londra, İngiltere. 189 sayfa.
Laura, J., Hare, T.M., Gaddis, L.R., Fergason, R.L., Skinner, J.A., Hagerty, J.J. ve Archinal, B.A., 2017. Towards a Planetary Spatial Data Infrastructure. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(6): 181.
Laura, J.R., Bland, M.T., Fergason, R.L., Hare, T.M. ve Archinal, B.A., 2018. Framework for the Development of Planetary Spatial Data Infrastructures: A Europa Case Study. Earth and Space Science, 5(9): 486-502.
Lemmen, C., van Oosterom, P. ve Bennett, R., 2015. The Land Administration Domain Model. Land Use Policy, 49: 535-545.
Masson-Zwaan, T., Martinez, P., Letizia, F., Melograna, C., Reynders, M., Rovetto, R., Skinner, M.A., Stanciu-Manolescu, M., Strah, M., Volynskaya, O. ve Wang, G., 2024. The Need to Improve Registration Practices in the Context of Space Traffic Management. Acta Astronautica, 223: 242-248.
NASA, 2020. The Artemis Accords: Principles for Cooperation in the Civil Exploration and Use of the Moon, Mars, Comets, and Asteroids for Peaceful Purposes. National Aeronautics and Space Administration, ABD. 18 sayfa.
NASA, 2024. NASA's Space Sustainability Strategy (Cilt 1: Dünya Yörüngesi). National Aeronautics and Space Administration, ABD. 35 sayfa.
Pop, V., 2009. Who Owns the Moon? Extraterrestrial Aspects of Land and Mineral Resources Ownership. 1. basım, Springer, Dordrecht, Hollanda. 175 sayfa.
Putro, Y.M., Nugraha, R.A. ve Nugraha, T.R., 2022. Geostationary Orbit Slot Reconceptualization in Accommodating the South. Indonesian Journal of International Law, 19(3): Madde 2.
Scheraga, J., 1987. Establishing Property Rights in Outer Space. Cato Journal, 6(3): 889-903.
Shri, A., 2021. Property Rights in Outer Space. https://ssrn.com/abstract=4024327 [Erişim tarihi: 05.09.2026].
Smith, M.T., 2020. One Small Plot for a Man, or One Giant Easement for Mankind?: A New Approach to the Outer Space Treaty's Property for Mankind Principle. University of Illinois Law Review, 2020(4): 1362-1391.
Stoter, J.E., 2004. 3D Cadastre. Doktora tezi. Delft Teknik Üniversitesi, Delft, Hollanda. 327 sayfa.
UNOOSA, 2022. Definition and Delimitation of Outer Space: Additional Contributions Received from States Members of the Committee. Birleşmiş Milletler Dış Uzayın Barışçıl Kullanımı Komitesi Hukuk Alt Komitesi, Viyana, Avusturya. 10 sayfa.
UNOOSA, 2025. Space Law Treaties and Principles. Birleşmiş Milletler Dış Uzay İşleri Ofisi, Viyana, Avusturya. 138 sayfa.
Vallado, D.A. ve Crawford, P., 2008. SGP4 Orbit Determination. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Honolulu, ABD, AIAA 2008-6770.
Van Oosterom, P., Kara, A. ve Lemmen, C., 2025. The First Five Parts of LADM Edition II Have Been Published as ISO Standards Now. FIG Ortak Arazi İdaresi Konferansı (3DLA2025, UN-Habitat STDM, FIG Komisyonları 7+8), Florianópolis, Brezilya, syf: 34.
Yomralıoğlu, T. ve McLaughlin, J.D. (Ed.), 2017. Cadastre: Geo-Information Innovations in Land Administration. 1. basım, Springer, Cham, İsviçre. 335 sayfa.
Yomralıoğlu, T., 2024. Space Cadastre: A New Paradigm for the Future of Space. 75. Uluslararası Astronotik Kongresi (IAC), Milano, İtalya, IAC-24-88916.
Yomralıoğlu, T., 2025a. Uzay Kadastrosu: Uzayın Geleceği İçin Yeni Bir Paradigma. Geomatik, 10(3): 331-350.
Yomralıoğlu, T., 2025b. Toward a Space Cadastre: A GIS-Integrated Model for Managing Extraterrestrial Land. GIM International, 39(3): 44.

FREKANS ORANI YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN HEYELAN DUYARLILIK HARİTASI KULLANILARAK ORMAN YOLU AĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ: TRABZON ÖRNEĞİ

Taha Yasin HATAY[2]

[1]Arş. Gör. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, tyhatay@ktu.edu.tr

ÖZET

Doğu Karadeniz Bölgesi, dik topografyası, yüksek yağış rejimi ve karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle Türkiye'nin heyelana en duyarlı bölgelerinden biridir. Bölgede orman kaynaklarının işletilmesi için Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından tesis edilen yoğun orman yolu ağının büyük bölümü, bu heyelan riskiyle doğrudan etkileşim hâlindeki dik ve morfolojik olarak duyarlı arazilerde yer almaktadır. Bu çalışmada, Trabzon ili sınırları içindeki OGM orman yolu ağı, veriye dayalı ve sübjektif ağırlıklandırma gerektirmeyen Frekans Oranı (FR) yöntemiyle üretilen bir heyelan duyarlılık haritası temelinde değerlendirilmiştir. Beş koşullayıcı faktör (eğim, bakı, faya uzaklık, litoloji, toprak tipi) için hesaplanan FR değerleri toplanarak bir Heyelan Duyarlılık İndeksi (LSI) üretilmiş, kantil yöntemiyle beş sınıfa ayrılmış ve MTA heyelan envanteriyle (283 poligon, 118,7 km²) doğrulanmıştır. Doğrulama, heyelanların %61,8'inin çalışma alanının yalnızca %20,1'ini oluşturan "çok yüksek" sınıfta toplandığını göstermiştir. Duyarlılık haritası orman yolu ağıyla (3027,8 km) çakıştırıldığında, ağın %56,2'sinin yüksek/çok yüksek duyarlılık sınıflarından geçtiği; bu oranın mevcut yollarda %62,7'ye, planlanan yollarda ise %34,7'ye karşılık geldiği belirlenmiştir. Bulgular, Doğu Karadeniz'de daha önce tekil havza ölçeğinde ve çoğunlukla uzman görüşüne dayalı yöntemlerle üretilmiş benzer çalışmalarla uyumlu olup, bu çalışmayı bölgede il ölçekli, veriye dayalı bir heyelan duyarlılık haritasının orman yolu ağıyla doğrudan çakıştırıldığı ilk uygulama konumuna taşımaktadır. Üretilen harita, OGM'nin orman yolu bakım önceliklendirmesi ve güzergah planlaması süreçlerinde bir karar destek aracı olarak önerilmektedir.

Anahtar Sözcükler: coğrafi bilgi sistemleri, frekans oranı, heyelan duyarlılığı, orman yolu, Trabzon

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE FOREST ROAD NETWORK USING A FREQUENCY RATIO-BASED LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP: A CASE STUDY OF TRABZON, TÜRKİYE

The Eastern Black Sea Region is among the most landslide-prone regions of Türkiye owing to its steep topography, high precipitation regime, and complex geological structure. Much of the dense forest road network established by the General Directorate of Forestry (OGM) for the utilization of forest resources lies on steep, morphologically sensitive terrain that interacts directly with this landslide hazard. In this study, the OGM forest road network within Trabzon Province was evaluated on the basis of a landslide susceptibility map produced with the data-driven Frequency Ratio (FR) method, which requires no subjective weighting. Frequency ratios computed for five conditioning factors (slope, aspect, distance to fault, lithology, and soil type) were summed to generate a Landslide Susceptibility Index (LSI), classified into five classes using quantiles, and validated against the MTA landslide inventory (283 polygons, 118.7 km²). Validation showed that 61.8% of landslides are concentrated in the "very high" class, which constitutes only 20.1% of the study area. Overlaying the susceptibility map with the forest road network (3027.8 km) revealed that 56.2% of the network passes through high/very-high susceptibility zones, corresponding to 62.7% for existing roads and 34.7% for planned roads. These findings are consistent with prior watershed-scale studies conducted predominantly with expert-judgment-based methods in the Eastern Black Sea Region, positioning this study as the first application to overlay a provincial-scale, data-driven landslide susceptibility map directly with the forest road network in the region. The resulting map is proposed as a decision-support tool for OGM's forest road maintenance prioritization and route planning processes.

Keywords: forest road, frequency ratio, geographic information systems, landslide susceptibility, Trabzon

1. GİRİŞ

Heyelanlar, dünya genelinde her yıl önemli can ve mal kayıplarına yol açan, dağlık ve tepelik arazilerde en yaygın görülen doğal afetlerden biridir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler, heyelan duyarlılığının mekânsal olarak modellenmesini mümkün kılmış ve bu alan 2000'li yılların başından bu yana hızla büyüyen bir araştırma konusu hâline gelmiştir; Huang vd. (2022) tarafından yapılan bibliyometrik analiz, 2001-2020 döneminde CBS tabanlı heyelan duyarlılık araştırmalarının sayısında belirgin bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu artışın önemli bir kısmı, heyelan duyarlılık haritalamasında istatistiksel, olasılıksal ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin karşılaştırılmasına odaklanmıştır.

Frekans Oranı (Frequency Ratio, FR) yöntemi, heyelan envanteri ile koşullayıcı faktörler arasındaki gözlenen ilişkiye dayanan, iki değişkenli (bivariate) bir istatistiksel yaklaşımdır (Lee ve Pradhan, 2007). Yöntem, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi çok kriterli karar verme yaklaşımlarının aksine uzman görüşüne dayalı sübjektif ağırlıklandırma gerektirmez; her faktör sınıfının ağırlığı doğrudan heyelan envanterinden hesaplanır. Bu özelliği, yöntemi tekrarlanabilir ve nispeten basit bir uygulama sunan güçlü bir araç hâline getirmektedir. Park vd. (2013), Güney Kore'de FR, AHP, lojistik regresyon (LR) ve yapay sinir ağı (YSA) yöntemlerini karşılaştırmış ve alıcı işletim karakteristiği eğrisi altında kalan alan (ROC-AUC) değerlerini sırasıyla 0,794, 0,789, 0,794 ve 0,806 olarak bulmuştur; bu sonuç, FR yönteminin çok daha karmaşık modellere kıyasla benzer bir doğruluk sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Yılmaz (2009), Tokat'ın Kat ilçesinde FR, LR ve YSA yöntemlerini karşılaştırmış; Demir vd. (2015) ise Tokat'ın Niksar-Reşadiye bölgesinde FR ile LR yöntemlerini kıyaslamıştır; Akgün (2012) ise İzmir'de LR, çok kriterli karar verme ve olabilirlik oranı yöntemlerini kıyaslamıştır. Bu karşılaştırmalı çalışmaların ortak bulgusu, FR yönteminin sadeliğine rağmen daha karmaşık yöntemlerle kıyaslanabilir performans sergilemesidir.

Türkiye'de heyelan duyarlılık haritalaması çalışmaları büyük ölçüde Karadeniz kıyı kuşağında yoğunlaşmıştır; bu durum tesadüfi değildir. Doğu Karadeniz Bölgesi, kısa mesafede 2000 metreyi aşan yükselti farkları, yılda 2000 mm'ye ulaşabilen yağış rejimi ve tektonik olarak karmaşık, ayrışmaya duyarlı jeolojik birimleriyle Türkiye'nin heyelan yoğunluğu en yüksek bölgelerinden biridir (Okalp ve Akgün, 2025). Bölgedeki her il için birden fazla heyelan duyarlılık çalışması yürütülmüştür. Trabzon ili için, il geneline yönelik iki çalışma (Yalçın vd., 2011, FR/AHP/bivariate istatistik/lojistik regresyon; Kavzoğlu vd., 2012, regresyon ağaçları) ile birlikte ilçe/havza ölçekli birçok güncel çalışma bulunmaktadır: Akgün ve Bulut (2007, Arsin-Yomra), Öz ve Günek (2021, Solaklı Havzası) ve Dalkeş ve Korkmaz (2023, Akçaabat-Düzköy). Rize için Yalçın (2008, Ardeşen), Yalçın ve Bulut (2007, Ardeşen), Reis vd. (2012, il geneli), Yavuz Özalp vd. (2023, Ardeşen-Fındıklı) ve Ersayın ve Uzun (2025, İyidere Havzası); Giresun için Yılmaz ve Keskin (2009, Şebinkarahisar); Gümüşhane için Akgün ve Erkan (2016, Kurtun Barajı); Ordu için Karakas vd. (2020); Artvin için ise Akıncı vd. (2022, Şavşat) ve Usta vd. (2024, Murgul) çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu FR, AHP veya makine öğrenmesi tabanlı yöntemleri kullanmış ve genel bir heyelan duyarlılık haritası üretmekle sınırlı kalmıştır; il geneline yönelik iki Trabzon çalışması dahil olmak üzere hiçbiri üretilen haritayı doğrudan bir orman yolu ağıyla çakıştırmamıştır.

Orman yolu ağları, orman kaynaklarının işletilmesi, bakımı, yangınla mücadele ve koruma faaliyetlerinin sürdürülebilmesi için vazgeçilmez bir altyapı unsurudur; ancak yol açımı sırasında yapılan kazı-dolgu işlemleri şev dengesini bozarak heyelan riskini artırabilmekte, aynı zamanda mevcut yollar da heyelana duyarlı arazi koşullarından geçtikleri için bu riske maruz kalabilmektedir. Bu çift yönlü etkileşim, orman yolu planlamasında heyelan duyarlılığının dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Uluslararası literatürde bu konuya en yakın örnekler İran'dan gelmektedir: Jaafari vd. (2015), kuzey İran ormanlarında heyelan duyarlılığına dayalı olarak alternatif yol ağı güzergahları tasarlamış; Zare vd. (2021) ise Hyrcan Ormanları'nda FR yöntemini adaptif sinir-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile karşılaştırmalı olarak doğrudan orman yolu ağı boyunca heyelan duyarlılığını değerlendirmek için kullanmıştır. Genel orman yolu planlaması literatüründe de eğim, litoloji, akarsuya ve faya uzaklık ile heyelan duyarlılığı, güzergah seçiminde göz önünde bulundurulması gereken temel kriterler arasında sayılmaktadır (Hayati vd., 2013); orman yollarının kendisi de toprak erozyonu ve sediment üretiminin önemli bir kaynağı olarak tanımlanmaktadır (Yu vd., 2024).

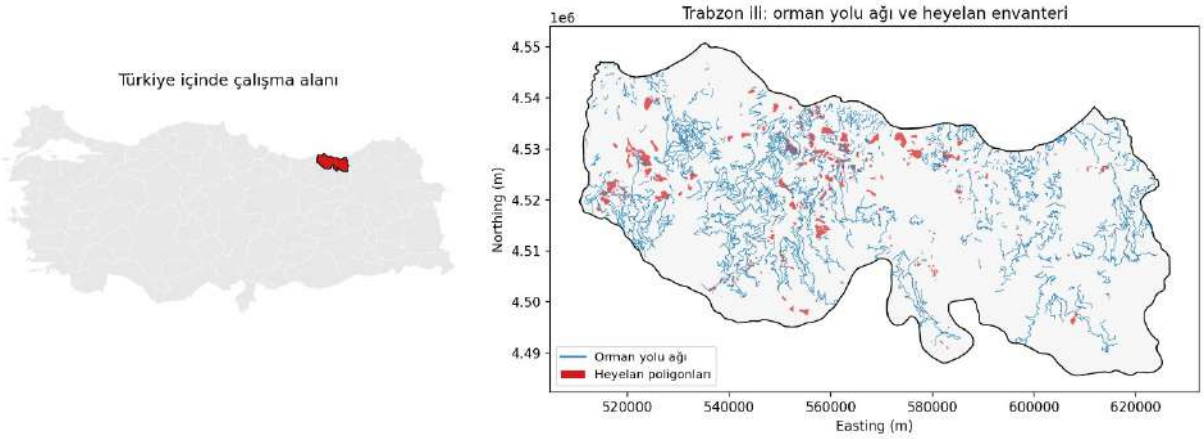
Türkiye'de bu ilişkiyi doğrudan ele alan çalışmalar Trabzon ilinin ilçe ölçekli örneklerinde yoğunlaşmıştır. Kadı vd. (2019), Maçka ilçesinde üretilen heyelan duyarlılık haritasını kullanarak optimum orman yolu güzergahı önermiş; Kadı ve Yılmaz (2024), Tonya ilçesinde alternatif güzergahlar belirlemiş; Küçüker (2025), Of Orman İşletme Şefliği sınırları içinde AHP tabanlı bir duyarlılık haritasıyla mevcut yol ağını değerlendirmiş; Buğday ve Akay (2019) ise İhsangazi havzasında çok kriterli karar verme yaklaşımlarıyla benzer bir analiz gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaların ortak özelliği, tekil bir havza veya orman planlama birimi ölçeğinde yürütülmüş olması ve büyük ölçüde uzman görüşüne dayalı AHP/çok kriterli karar verme (MCDA) yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Bu literatür birlikte değerlendirildiğinde üç boşluk öne çıkmaktadır. Birincisi, Doğu Karadeniz'deki orman yolu-heyelan çalışmalarının tamamı tekil havza veya planlama birimi ölçeğinde kalmış, il ölçeğinde kapsamlı bir değerlendirme yapılmamıştır. İkincisi, Trabzon ili için il geneline yönelik iki çalışma bulunmakla birlikte (Yalçın vd., 2011; Kavzoğlu vd., 2012), bunlardan hiçbiri OGM orman yolu ağıyla çakıştırma içermemektedir; il ölçeğindeki güncel havza/ilçe çalışmaları (Öz ve Günek, 2021; Dalkeş ve Korkmaz, 2023) da aynı şekilde yol ağını kapsam dışı bırakmıştır. Üçüncüsü, mevcut çalışmaların çoğu bir duyarlılık haritası üretmekle veya alternatif güzergah önermekle sınırlı kalmış, yol durumuna (mevcut, planlanan, stabilize, bakım gerektiren) göre kırılımlı, doğrudan uygulanabilir bir karar destek çıktısı sunmamıştır. Bu çalışmanın amacı, Trabzon ili sınırları içindeki OGM orman yolu ağının tamamını, veriye dayalı FR yöntemiyle üretilmiş güncel bir heyelan duyarlılık haritası temelinde il ölçeğinde değerlendirmek ve mevcut/planlanan yol güzergahlarını risk düzeyine göre sınıflandırmaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz kıyı kuşağında yer alan Trabzon ili (yaklaşık 4630 km²) olarak belirlenmiştir (Şekil 1). İl, Karadeniz kıyısından güneye doğru kısa mesafede 2000 metreyi aşan yükselti farkı gösteren dik bir topografyaya, yüksek yıllık yağışa ve başta volkanik ve sedimanter kayaçlar olmak üzere karmaşık jeolojik birimlere sahiptir. Bu fiziki coğrafya özellikleri, ilin Türkiye'nin en yoğun heyelan görülen bölgelerinden birini oluşturmasında belirleyici rol oynamaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, OGM orman yolu ağı ilin tamamına yayılmış durumda olup heyelan poligonları özellikle ilin orta ve batı kesimlerinde yoğunlaşmaktadır.



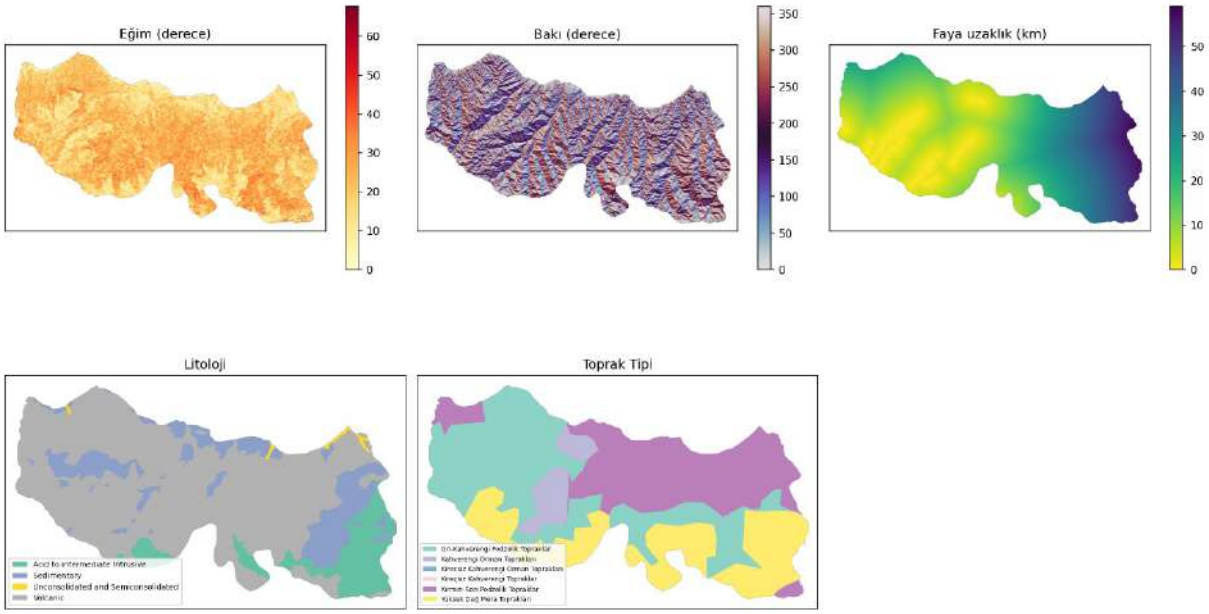
Şekil 1. Türkiye içinde çalışma alanının konumu ve Trabzon ili orman yolu ağı/heyelan envanteri genel görünümü

2.2 Veri Seti

Çalışmada kullanılan veriler OGM, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve Tarım ve Orman Bakanlığı veri tabanlarından temin edilmiş, tamamı EPSG:32637 (UTM Zon 37N) izdüşümünde ortak bir 30 m çözünürlüklü ızgaraya (raster) dönüştürülmüştür. Kullanılan veri katmanlarının kaynağı ve çözünürlüğü/ölçeği Çizelge 1'de özetlenmiştir. Orman yolu ağı OGM'nin orman yolu envanterinden alınmış olup il sınırı içinde 3027,8 km uzunluğa sahiptir ve ham (2332,1 km), planlanan (661,4 km), stabilize (20,4 km) ile büyük onarım gerektiren (13,5 km) olmak üzere dört durum kategorisi içermektedir. Heyelan envanteri MTA kayıtlarından temin edilen 283 poligondan oluşmakta ve il alanının yaklaşık %2,56'sına karşılık gelen 118,7 km²'lik bir alanı kaplamaktadır. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), eğim ve bakı katmanlarının türetildiği FABDEM tabanlı bir kaynaktan elde edilmiştir. Fay hattı verisi MTA'dan temin edilmiş ve proximity analiziyle faya uzaklık katmanı hesaplanmıştır; burada kullanılan veri diri (aktif/sismik) fayları değil genel haritalanmış fay hatlarının tamamını kapsamaktadır, dolayısıyla bu faktör deprem/sismik riskten ziyade fay zonlarına özgü kayaç kırıklılığı, ayrışma ve artmış yeraltı suyu geçirgenliği gibi yapısal-jeoteknik zayıflığı temsil etmektedir. Litoloji katmanı MTA'nın 1/500.000 ölçekli jeoloji haritasından elde edilen dört birimden (sedimanter, volkanik, asidik-orta intrüzif, konsolide olmamış/yarı konsolide) oluşmaktadır. Toprak katmanı, Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen ve dört seriden (Gri-Kahverengi Podzolik, Kahverengi Orman, Kırmızı-Sarı Podzolik, Yüksek Dağ Mera Toprakları) oluşan toprak haritasından türetilmiştir. Beş koşullayıcı faktörün çalışma alanındaki mekânsal dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri katmanları

Veri	Kaynak	Çözünürlük / Ölçek
Orman yolu ağı	OGM	Vektör (çizgi)
Heyelan envanteri	MTA	Vektör (poligon)
Sayısal Yükseklik Modeli	FABDEM	30 m
Fay hattı	MTA	Vektör (çizgi)
Jeoloji (litoloji)	MTA	1/500.000
Toprak	Tarım ve Orman Bakanlığı	Vektör (poligon)



Şekil 2. Beş koşullayıcı faktörün mekânsal dağılımı: eğim, bakı, faya uzaklık, litoloji, toprak tipi

2.3 Frekans Oranı Yöntemi

FR, Lee ve Pradhan (2007) tarafından tanımlanan ve o tarihten bu yana heyelan duyarlılık haritalamasında en yaygın kullanılan bivariate istatistiksel yöntemlerden biri hâline gelen bir yaklaşımdır. Yöntemin temel varsayımı, geçmişte heyelan oluşumuyla belirli bir faktör sınıfı arasında gözlenen istatistiksel ilişkinin, aynı faktör sınıfının gelecekteki heyelan davranışı için de geçerli bir gösterge olduğudur; bu varsayım, yöntemi Türkiye'de (Yalçın, 2008; Yalçın vd., 2011; Akgün, 2012; Reis vd., 2012) ve uluslararası düzeyde (Park vd., 2013; Zare vd., 2021) çok çeşitli coğrafi ve jeolojik koşullarda tekrar tekrar doğrulanmış bir yöntem hâline getirmiştir. Her faktör sınıfı için FR değeri Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır:

$$FR = (Ni / N) / (Si / S) \quad (1)$$

Burada Ni, ilgili sınıf içinde kalan heyelan alanını; N, çalışma alanındaki toplam heyelan alanını; Si, ilgili sınıfın çalışma alanındaki toplam alanını; S ise çalışma alanının toplam alanını ifade etmektedir. FR>1 olması ilgili sınıfın heyelan oluşumuyla pozitif ilişkili olduğunu, FR<1 olması ise negatif ilişkili olduğunu göstermektedir (Lee ve Pradhan, 2007). Yöntemin literatürde yerleşik uygulamasında (Yalçın vd., 2011; Park vd., 2013; Demir vd., 2015), her faktörün heyelan oluşumuna bağımsız ve toplanabilir bir katkı yaptığı kabul edilir; bu kabul altında, beş faktöre (eğim, bakı, faya uzaklık, litoloji, toprak tipi) ait FR değerleri piksel bazında toplanarak Heyelan Duyarlılık İndeksi (LSI) üretilmiştir (Eşitlik 2):

$$LSI = FR(\text{eğim}) + FR(\text{bakı}) + FR(\text{faya uzaklık}) + FR(\text{litoloji}) + FR(\text{toprak}) \quad (2)$$

Burada FR(eğim), FR(bakı), FR(faya uzaklık), FR(litoloji) ve FR(toprak), ilgili pikselin düştüğü sınıfa ait, Eşitlik (1) ile hesaplanmış frekans oranı değerlerini ifade etmektedir.

Üretilen LSI değerleri, kantil (quantile) sınıflandırma yöntemiyle her biri çalışma alanının yaklaşık %20'sini kapsayan beş sınıfa (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) ayrılmıştır. Heyelan duyarlılık haritalarının çok düşük-çok yüksek arasında beş sınıfa ayrılması, literatürde FR tabanlı çalışmalarda yaygın olarak benimsenen bir sunum biçimidir; sınıflandırma yöntemi olarak burada kantilin tercih edilme nedeni, veri dağılımına dayalı, göreceli ve tekrarlanabilir bir sınıflandırma sunmasıdır.

2.4 Model Doğrulaması

Üretilen LSI sınıflarının geçerliliği, MTA heyelan envanteriyle çapraz karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, heyelan duyarlılık modellemesinde yaygın kullanılan başarı oranı (success-rate) yaklaşımına dayanmaktadır (Chung ve Fabbri, 2003): kantil yöntemiyle üretilen beş duyarlılık sınıfının (çok düşük-çok yüksek) her biri için, sınıfın kapladığı alan yüzdesi ile aynı sınıf içinde kalan heyelan alanı yüzdesi karşılaştırılmıştır. Bir sınıfın kapladığı alan yüzdesine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bir heyelan yüzdesi taşıması, o sınıfın modelin ayrım gücüne olumlu katkı sağladığını; tersine, düşük alan yüzdesine rağmen düşük heyelan yüzdesi taşıyan sınıfların da modelin heyelan olasılığı az olan alanları doğru tanımladığını göstermektedir. Bu karşılaştırmada kullanılan heyelan envanteri, aynı zamanda faktör sınıflarının FR değerlerinin hesaplanmasında da kullanılmıştır; dolayısıyla burada uygulanan doğrulama bir resubstitüsyon (resubstitution) yaklaşımıdır ve bağımsız bir eğitim-test ayrımına

veya tam bir Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) eğrisi analizine dayanmamaktadır. Bu husus Tartışma bölümünde bir sınırlılık olarak ayrıca ele alınmıştır.

2.5 Orman Yolu Ağı Çakıştırma Analizi

Duyarlılık haritası ile orman yolu ağı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla, tampon (buffer) tabanlı bölgesel istatistik yöntemleri yerine yoğun nokta örneklemesine dayalı bir çakıştırma yaklaşımı tercih edilmiştir; bu tercih, yol hatlarının kenar etkilerinden ve tampon örtüşmesinden kaynaklanabilecek çift sayım hatalarından kaçınmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda yol hatları önce yaklaşık 15 m aralıklarla (piksel boyutunun yarısı) yoğunlaştırılmış (segmentize edilmiş), ardından her ardışık nokta çifti arasındaki orta noktada LSI sınıf değeri raster katmanından örneklenmiş ve ilgili segment uzunluğu bu sınıfa atanarak toplanmıştır. Örnekleme aralığının piksel boyutunun yarısı olarak belirlenmesi, yol boyunca hiçbir hücrenin atlanmamasını sağlamak içindir. Analiz, yalnızca il sınırı içinde kalan (LSI rasterinin geçerli değer taşıdığı) yol segmentleriyle sınırlı tutulmuş; orman yolu ağının OGM veri tabanından il sınırına 3 km tampon ile kırpılmış hâli (2.2 bölümünde belirtilen 3027,8 km'den bir miktar daha uzun olan ham veri) bu adımda daraltılarak, raporlanan ağ uzunluğu ile risk yüzdelerinin hesaplandığı taban tutarlı hâle getirilmiştir. Bu işlem, hem tüm ağ için hem de yol durumu (ham, planlanan, stabilize, büyük onarım) kategorileri için ayrı ayrı tekrarlanarak her kategorinin risk sınıflarına göre uzunluk dağılımı elde edilmiştir.

3. BULGULAR

3.1 Koşullayıcı Faktörlerin Frekans Oranı Analizi

Beş koşullayıcı faktöre ait sınıf bazında FR değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Eğim faktöründe en yüksek FR değeri (2,396) alanın yalnızca %12,0'ını oluşturan 0-10° sınıfında gözlenmiş, FR değeri eğim arttıkça düzenli biçimde azalmıştır; bu bulgu, çalışma alanındaki heyelanların büyük kısmının dik yamaçlardan ziyade orta-düşük eğimli, genellikle yamaç eteklerinde biriken kolüvyal/deluvial malzemeden oluşan alanlarda yoğunlaştığına işaret etmektedir. Bakı faktöründe Batı ve Kuzeybatı yönleri (FR=1,212 ve 1,128) en yüksek değerleri almış, bu durum bölgedeki hâkim rüzgâr ve yağış yönüyle ilişkilendirilebilir. Faya uzaklık faktöründe en yüksek FR değerleri (1,429 ve 1,787) faya 0-9263 m mesafedeki iki sınıfta gözlenmiş, 18769 m'nin ötesinde FR değeri hızla düşmüştür. Litoloji faktöründe sedimanter birimler (FR=1,693) volkanik (FR=0,992) ve intrüzif (FR=0,184) birimlere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek heyelan ilişkisi göstermiştir. Toprak faktöründe ise Kahverengi Orman Toprakları sınıfı, alanın yalnızca %5,8'ini kaplamasına karşın en yüksek FR değerini (3,041) almıştır.

Çizelge 2. Koşullayıcı faktörlerin sınıf bazında Frekans Oranı (FR) değerleri

Faktör	Sınıf	Alan (%)	Heyelan (%)	FR
Eğim	0° (düz)	0,23	0,00	0,000
Eğim	0-10°	12,01	28,78	2,396
Eğim	10-20°	33,13	46,06	1,390
Eğim	20-30°	39,37	20,61	0,524
Eğim	30-40°	14,33	4,27	0,298
Eğim	>40°	0,93	0,28	0,302
Bakı	Düz	0,25	0,01	0,043
Bakı	Kuzey	17,93	17,14	0,956
Bakı	Kuzeydoğu	14,22	13,71	0,964
Bakı	Doğu	11,10	10,05	0,906
Bakı	Güneydoğu	11,07	9,14	0,826
Bakı	Güney	9,32	8,20	0,881
Bakı	Güneybatı	10,29	11,68	1,135
Bakı	Batı	10,97	13,30	1,212
Bakı	Kuzeybatı	14,86	16,77	1,128
Faya uzaklık	0-4331 m	20,00	28,58	1,429
Faya uzaklık	4331-9263 m	20,00	35,74	1,787
Faya uzaklık	9263-18769 m	20,00	27,05	1,353
Faya uzaklık	18769-36373 m	20,00	6,22	0,311
Faya uzaklık	>36373 m	20,00	2,42	0,121
Litoloji	Asidik-orta intrüzif	11,55	2,13	0,184
Litoloji	Sedimanter	15,98	27,05	1,693
Litoloji	Konsolide olmamış/yarı konsolide	0,53	0,00	0,000
Litoloji	Volkanik	71,40	70,83	0,992
Toprak	Gri-Kahverengi Podzolik	36,84	42,21	1,146

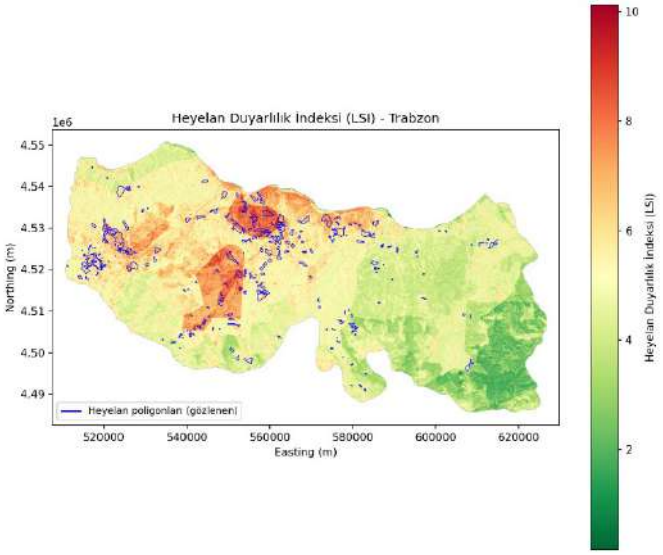
Faktör	Sınıf	Alan (%)	Heyelan (%)	FR
Toprak	Kahverengi Orman	5,82	17,71	3,041
Toprak	Kırmızı-Sarı Podzolik	31,60	35,99	1,139
Toprak	Yüksek Dağ Mera	25,58	4,09	0,160

3.2 Heyelan Duyarlılık Haritası

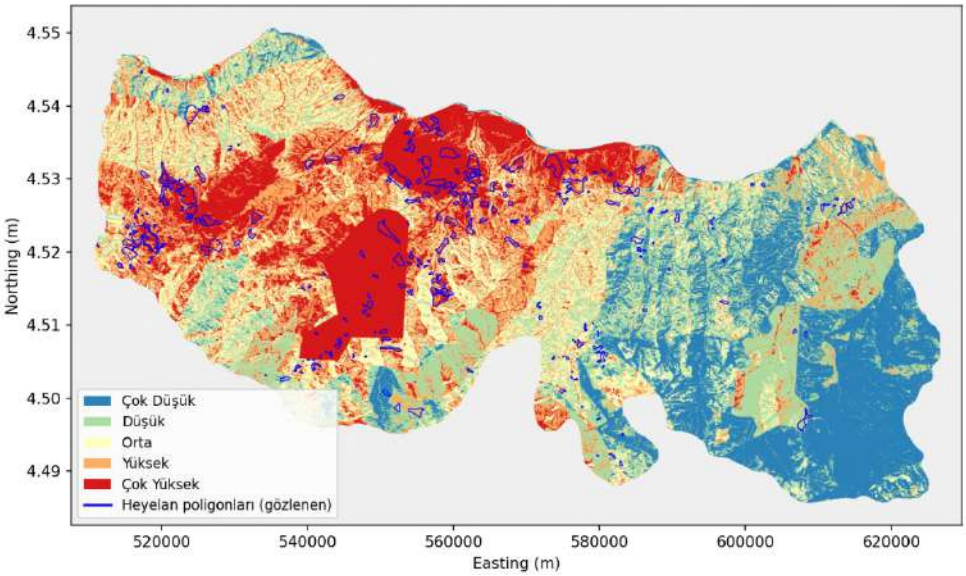
Beş faktörün FR değerlerinin toplanmasıyla üretilen LSI, 0,16 ile 10,13 arasında değerler almış; kantil sınıflandırmayla beş sınıfa ayrılan duyarlılık haritası Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Duyarlılık sınıflarının alan ve heyelan alanı yüzdeleri Çizelge 3'te sunulmuştur: "çok yüksek" sınıf, çalışma alanının yalnızca %20,1'ini oluştururken heyelanların %61,8'ini barındırmakta; "çok düşük" ve "düşük" sınıflar ise alanın toplam %39,9'unu oluştururken heyelanların yalnızca %6,1'ini barındırmaktadır.

Çizelge 3. Heyelan Duyarlılık İndeksi (LSI) sınıflarının alan ve heyelan dağılımı

Duyarlılık Sınıfı	Alan (%)	Heyelan (%)
Çok Düşük	19,9	1,1
Düşük	20,0	5,0
Orta	19,9	9,2
Yüksek	20,2	22,8
Çok Yüksek	20,1	61,8



Şekil 3. Heyelan Duyarlılık İndeksi (LSI) sürekli değer haritası ve heyelan poligonlarıyla görsel doğrulama



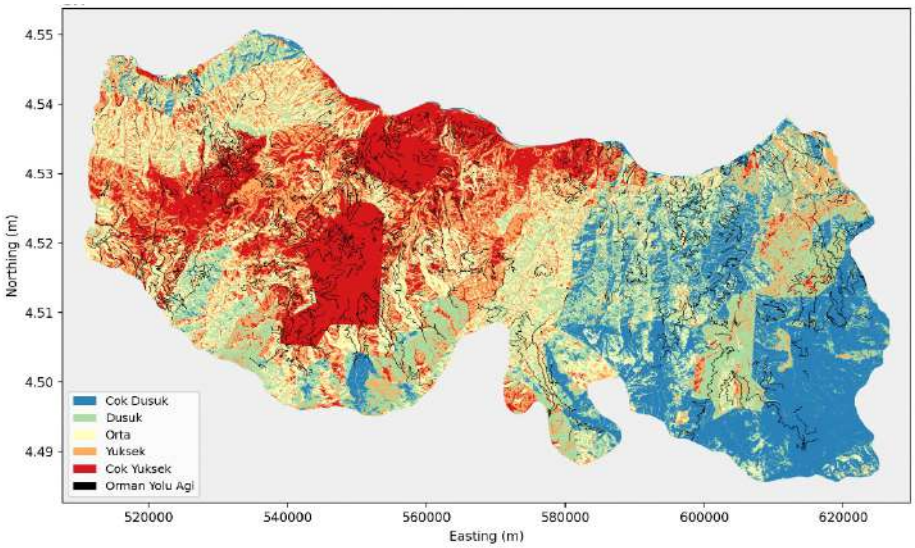
Şekil 4. Heyelan duyarlılık sınıfları haritası ve heyelan poligonlarıyla görsel doğrulama

3.3 Orman Yolu Ağının Duyarlılık Sınıflarına Göre Dağılımı

Duyarlılık haritası ile orman yolu ağının çakıştırılması sonucunda, ağın %56,2'sinin (yüksek ve çok yüksek sınıfların toplamı) heyelan duyarlılığı yüksek alanlardan geçtiği belirlenmiştir. Yol durumuna göre incelendiğinde belirgin farklılıklar gözlenmiştir (Çizelge 4, Şekil 5): mevcut (ham) yolların (2332,1 km) %62,7'si, büyük onarım gerektiren yolların (13,5 km) %74,7'si yüksek/çok yüksek riskli alanlarda kalırken, planlanan yolların (661,4 km) bu oranı %34,7'ye, stabilize yolların (20,4 km) ise yalnızca %6,7'ye gerilemektedir.

Çizelge 4. Orman yolu ağının yol durumuna göre duyarlılık sınıfı dağılımı

Yol Durumu	Uzunluk (km)	Yüksek + Çok Yüksek (%)
Ham Yol (mevcut)	2332,1	62,7
Planlanan Yol	661,4	34,7
Büyük Onarım	13,5	74,7
Stabilize Yol	20,4	6,7
Genel	**3027,8**	**56,2**



Şekil 4. Orman yolu ağı ile heyelan duyarlılık sınıflarının çakıştırılması

Büyük onarım gerektiren yolların risk sınıflamasıyla yüksek oranda örtüşmesi dikkat çekicidir ve bu yolların onarım ihtiyacının, en azından bir bölümüyle, heyelan veya zemin hareketinden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir. Planlanan yolların mevcut ağa kıyasla belirgin şekilde daha düşük oranda yüksek riskli alandan geçmesi, güzergah seçiminde topografik kısıtların kısmen dikkate alındığını göstermekle birlikte, planlanan ağın yaklaşık 119 km'lik bölümünün (toplamın %18'i) hâlâ "çok yüksek" duyarlılık sınıfında kalması, bu güzergahların bir kısmının yeniden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

4. TARTIŞMA

Bulgular bölümünde sunulan doğrulama sonucu (heyelanların %61,8'i, alanın yalnızca %20,1'ini oluşturan "çok yüksek" sınıfta toplanırken; "çok düşük" ve "düşük" sınıflar, alanın %39,9'unu oluşturmasına karşın heyelanların yalnızca %6,1'ini barındırmaktadır), üretilen modelin heyelanlı ve heyelansız alanları ayırt etme gücünün yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bu sonuç, FR yönteminin Doğu Karadeniz koşullarındaki performansına ilişkin literatürle de uyumludur. Yalçın vd. (2011), aynı ilde (Trabzon) FR'yi AHP, bivariate istatistik ve lojistik regresyon modelleriyle karşılaştıran bir çalışma yürütmüştür; bu çalışma, on beş yıl sonra güncel veri kaynaklarıyla (30 m çözünürlüklü SYM, güncel jeoloji ve toprak haritaları, MTA'nın genişletilmiş heyelan envanteri) üretilen bir duyarlılık haritasının da güçlü bir ayrım gücü sağladığını göstermektedir. Park vd. (2013) tarafından Kore'de raporlanan ROC-AUC değerleri de (FR için 0,794, ANN için 0,806) FR yönteminin daha karmaşık yöntemlerle rekabet edebilir bir doğruluk sunduğunu göstermekte, bu çalışmadaki bulgularla birlikte FR'nin il ölçekli, çok sayıda faktör ve geniş bir alanı kapsayan uygulamalar için pratik bir tercih olduğunu desteklemektedir.

Faktör bazında bulgularımız, genel heyelan literatürüyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Eğim faktöründe düşük-orta eğim sınıflarında (0-20°) gözlenen yüksek FR değerleri, ilk bakışta "dik eğimde daha fazla heyelan" beklentisiyle çelişiyor görünse de, olası bir açıklama şu şekilde önerilebilir: çok dik yamaçlarda (>30°) kütlesel hareket için gerekli gevşek/kolüvyal malzeme birikimi sınırlı kalabilirken, orta eğimli ve yamaç eteklerine yakın alanlarda bu tür

malzemenin birikmesi ve zemin doygunluğunun artması heyelan oluşumunu kolaylaştırabilir. Bu yorum çalışma alanına özgü bir gözleme dayanmaktadır ve genellenebilirliği ancak saha bazlı jeoteknik incelemelerle doğrulanabilir; bu nedenle ileride bu ilişkinin arazi çalışmalarıyla test edilmesi önerilmektedir. Litoloji bulgumuz da (sedimanter birimlerde FR=1,693) genel jeoteknik beklentiyle uyumludur: sedimanter kayaçlar, volkanik ve intrüzif kayaçlara kıyasla genellikle daha düşük kayma direncine ve daha yüksek ayrışma duyarlılığına sahiptir, bu da heyelan oluşumunu kolaylaştırabilir. Litolojinin heyelan duyarlılığındaki rolü bölgede daha önce Yalçın (2008) ve Yalçın vd. (2011) tarafından da FR/AHP tabanlı çalışmalarda temel koşullayıcı faktörlerden biri olarak ele alınmıştır; ancak bu çalışmalar farklı litolojik sınıflandırma şemaları kullandığından, spesifik sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkısı, ölçek ve uygulama boyutundadır. Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki orman yolu-heyelan çalışmalarının tamamı (Kadı vd., 2019; Buğday ve Akay, 2019; Kadı ve Yılmaz, 2024; Küçüker, 2025; Yüksel, 2025) tekil havza veya orman planlama birimi ölçeğinde yürütülmüş ve büyük ölçüde AHP/MCDA gibi uzman görüşüne dayalı yöntemleri kullanmıştır. Uluslararası literatürde metodolojik olarak en yakın örnek olan Zare vd. (2021) de çalışmasını tek bir orman bölgesiyle sınırlı tutmuştur. Bu çalışma, aynı yaklaşımı bir il genelindeki tüm OGM orman yolu ağına, tamamen veriye dayalı FR yöntemiyle uygulayarak literatürdeki ölçek boşluğunu doldurmaktadır. Ayrıca, çoğu çalışmanın yalnızca genel bir duyarlılık haritası üretmesinin ya da alternatif güzergah önermesinin ötesine geçilerek, yol durumu kategorilerine (mevcut, planlanan, stabilize, büyük onarım) göre kırılımlı bir risk analizi sunulmuş; bu da OGM'nin farklı yol kategorileri için farklı önceliklendirme stratejileri geliştirmesine imkân tanıyan somut bir çıktı oluşturmuştur. Burada seçilen il ölçeğinin, OGM'nin fiili planlama biriminden (orman işletme şefliği) daha geniş bir idari sınır olduğu belirtilmelidir; Küçüker (2025) gibi şeflik ölçekli çalışmalar OGM'nin günlük karar alma sürecine daha doğrudan girdi sağlayabilir. Bu çalışmanın il ölçekli haritası, öncelikle hangi şefliklerin/bölgelerin daha ayrıntılı, şeflik ölçekli analiz için öncelikli olduğunu belirlemede bir ön tarama/yönlendirme aracı olarak düşünülmelidir.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları belirtilmelidir. İlk olarak, model doğrulaması bir resubstitüsyon yaklaşımıyla yapılmıştır; aynı heyelan envanteri hem FR değerlerinin hesaplanmasında hem doğrulamada kullanıldığından, elde edilen başarı oranı modelin görülmemiş verilere genelleme performansını değil, veri setine uyum performansını yansıtmaktadır — bu, FR tabanlı çalışmalarda (bu çalışmada karşılaştırma yapılan çoğu kaynak dahil) yaygın bir pratik olsa da, gelecekte eğitim-test ayrımı veya k-kat çapraz doğrulama ile bağımsız bir doğrulama yapılması önerilir. İkinci olarak, kullanılan 30 m çözünürlüklü faktör katmanları ve kantil sınıflandırma, veri dağılımına bağlı göreceli seçimlerdir; Wubalem (2022), daha kaba çözünürlüklerin bazı durumlarda daha iyi tahmin performansı sağlayabildiğini göstermiştir ve farklı sınıflandırma yöntemleri (doğal kırılımlar, eşit aralık) farklı sınıf sınırları üretebilir. Üçüncü olarak, heyelan envanterinin üretim yöntemi ve zamansal kapsamı bu çalışma kapsamında incelenmemiştir; erişimi kolay alanlarda raporlamanın daha tam olması, eğim gibi faktörlerde gözlenen örüntüleri kısmen etkilemiş olabilir. Son olarak, FR değerlerinin toplanması (Eşitlik 2) faktörlerin birbirinden bağımsız katkı yaptığını varsaymaktadır ve bu çalışmada yağış, akarsuya uzaklık, arazi örtüsü gibi ek faktörler kullanılmamıştır; gelecek çalışmalarda faktörler arası ilişkilerin test edilmesi, ek faktörlerin eklenmesi ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle karşılaştırma yapılması önerilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Trabzon ili sınırları içindeki OGM orman yolu ağı, Frekans Oranı yöntemiyle üretilen bir heyelan duyarlılık haritası temelinde il ölçeğinde değerlendirilmiştir. Beş koşullayıcı faktörle (eğim, bakı, faya uzaklık, litoloji, toprak tipi) üretilen duyarlılık modeli, heyelanların %61,8'inin alanın yalnızca %20,1'ini oluşturan çok yüksek sınıfta toplanmasıyla güçlü bir ayrım gücü göstermiştir (doğrulama yaklaşımının kapsamı için bkz. Bölüm 4, Sınırlılıklar). Orman yolu ağının %56,2'sinin yüksek/çok yüksek duyarlılık sınıflarından geçtiği; bu oranın mevcut (ham) yollarda %62,7'ye, büyük onarım gerektiren yollarda %74,7'ye, planlanan yollarda ise %34,7'ye karşılık geldiği belirlenmiştir.

Bulgular, OGM'nin mevcut orman yolu ağının önemli bir bölümünün heyelana duyarlı alanlarda yer aldığını; güzergah planlamasının kısmen topografik kısıtları dikkate almakla birlikte planlanan ağın da önemli bir kısmının hâlâ yüksek riskli alanlardan geçtiğini göstermektedir. Bu bulgulardan hareketle üç somut öneri sunulabilir. Birincisi, büyük onarım gerektiren yolların risk sınıflamasıyla yüksek oranda örtüşmesi göz önüne alındığında, bu yol kategorisi heyelan/zemin hareketi açısından öncelikli saha incelemesine tabi tutulmalıdır. İkincisi, planlanan yol ağının "çok yüksek" duyarlılık sınıfında kalan yaklaşık 119 km'lik bölümü, güzergah revizyonu değerlendirmesi için önceliklendirilmelidir; bu çalışma alternatif güzergah üretmemektedir, ancak Kadı vd. (2019) ve Kadı ve Yılmaz (2024) tarafından uygulanan optimum/alternatif güzergah belirleme yöntemlerinin bu 119 km'lik kesime uygulanması gelecek çalışmalar için somut bir adım olarak önerilmektedir. Üçüncüsü, üretilen LSI katmanının OGM'nin coğrafi bilgi sistemi altyapısına, yeni orman yolu projelerinin planlama ve onay sürecinde bir ön tarama (screening) katmanı olarak entegre edilmesi, benzer maliyetli hataların önüne geçilmesine katkı sağlayabilir.

Çalışma, benzer topografik ve jeolojik özelliklere sahip Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki diğer iller için de tekrarlanabilir, veri güdümlü ve il ölçeğinde uygulanabilir bir metodolojik çerçeve sunmaktadır. Nacar vd. (2024),

Doğu Karadeniz Havzası için yaptıkları iklim projeksiyonlarında, gelecek dönemlerde bölgede sıcaklık artışının yanı sıra ekstrem yağış olaylarında da artış öngörmüştür; bu beklenti göz önüne alındığında, bu tür risk-bilgili orman yolu planlama yaklaşımlarının önümüzdeki dönemde daha da önem kazanması muhtemeldir. Gelecek çalışmalarda, Trabzon ili için üretilmiş diğer duyarlılık modelleriyle (Kavzoğlu vd., 2012; Dalkeş ve Korkmaz, 2023) doğrudan bir karşılaştırma yapılması; yağış, akarsuya uzaklık ve arazi örtüsü gibi ek koşullayıcı faktörlerin dahil edilmesi; eğitim-test ayrımına dayalı bağımsız bir doğrulama gerçekleştirilmesi ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılması önerilmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan orman yolu verileri Orman Genel Müdürlüğü'nden, heyelan envanteri, jeoloji ve fay verileri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nden, toprak verileri ise Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilmiştir.

KAYNAKLAR

Akgün, A., 2012. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. Landslides, 9(1), 93-106.

Akgün, A., & Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. Environmental Geology, 51, 1377-1387.

Akgün, A., & Erkan, O., 2016. Landslide susceptibility mapping by geographical information system-based multivariate statistical and deterministic models: in an artificial reservoir area at Northern Turkey. Arabian Journal of Geosciences, 9, 165.

Akıncı, H., Zeybek, M., & Doğan, S., 2022. Evaluation of landslide susceptibility of Şavşat district of Artvin province (Turkey) using machine learning techniques. İçinde Y. Zhang & Q. Cheng (Ed.), Landslides. IntechOpen.

Buğday, E., & Akay, A. E., 2019. Evaluation of forest road network planning in landslide sensitive areas by GIS-based multi-criteria decision making approaches in Ihsangazi watershed, Northern Turkey. *Šumarski list*, 143(7-8), 325-336.

Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472.

Dalkeş, M., & Korkmaz, M. S., 2023. Analitik Hiyerarşi Süreci ve Frekans Oranı Yöntemlerinin Heyelan Duyarlılık Analizinde Karşılaştırılması: Trabzon İli Akçaabat ve Düzköy İlçeleri Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1), 16-38.

Demir, G., Aytekin, M., & Akgün, A., 2015. Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar-Reşadiye (Tokat, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 1801-1812.

Ersayın, K., & Uzun, A., 2025. A comprehensive analysis of landslide susceptibility in Iyidere Basin (NE, Turkey) using machine learning techniques and statistical bivariate methods. *Natural Hazards*, 121(12), 14283-14319.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Sessions, J., & Makhdoum, M., 2013. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 1767-1776.

Huang, J., Wu, X., Ling, S., vd., 2022. A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 86954-86993.

Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A., & Ghajar, I., 2015. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran. *Land Use Policy*, 47, 198-208.

Kadı, F., Yıldırım, F., & Saralıoğlu, E., 2019. Risk analysis of forest roads using landslide susceptibility maps and generation of the optimum forest road route: a case study in Macka, Turkey. *Geocarto International*, 36(14), 1612-1629.

Kadı, F., & Yılmaz, O. S., 2024. Determination of alternative forest road routes using produced landslide susceptibility maps: A case study of Tonya (Trabzon), Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2), 147-164.

Karakas, G., Can, R., Kocaman, S., Nefeslioglu, H. A., & Gokceoglu, C., 2020. Landslide susceptibility mapping with random forest model for Ordu, Turkey. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 1229-1236.

Kavzoğlu, T., Şahin, E. K., & Çölkesen, İ., 2012. Heyelan duyarlılığının incelenmesinde regresyon ağaçlarının kullanımı: Trabzon örneği. *Harita Dergisi*, 147, 21-33.

Küçüker, D. M., 2025. Analyzing landslide susceptibility of forest roads by analytical hierarchy process (AHP) in Of forest planning unit of Turkiye. *Natural Hazards*, 121, 2323-2345.

Lee, S., & Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33-41.

Nacar, S., Şan, M., Kankal, M., & Okkan, U. 2024. Trends and amount changes of temperature and precipitation under future projections in high-low groups and intra-period for the Eastern Black Sea, the Wettest Basin in Türkiye. *Natural Hazards*, 120(11), 9833-9866.

Öz, T., & Günek, H., 2021. Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi. *International Journal of Geography and Geography Education*, 44, 396-412.

Okalp, K., & Akgün, H., 2025. Assessing landslide susceptibility of Türkiye at drainage basin scale: a semi-quantitative approach. *Natural Hazards*, 121, 20099-20127.

Park, S., Choi, C., Kim, B., & Kim, J., 2013. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, *Korea. Environmental Earth Sciences*, 68, 1443-1464.

Reis, S., Yalçın, A., Atasoy, M., Nişancı, R., Bayrak, T., Erduran, M., Sancar, C., & Ekercin, S., 2012. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 66, 2063-2073.

Usta, Z., Akıncı, H., & Akın, A. T., 2024. Comparison of tree-based ensemble learning algorithms for landslide susceptibility mapping in Murgul Artvin), *Turkey. Earth Science Informatics*, 17, 1459-1481.

Wubalem, A., 2022. The impact of DEM resolution on landslide susceptibility modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 967.

Yalçın, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardeşen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72(1), 1-12.

Yalçın, A., & Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardeşen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41, 201-226.

Yalçın, A., Reis, S., Aydınoğlu, A. C., & Yomralıoğlu, T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85, 274-287.

Yavuz Özalp, A., Akıncı, H., & Zeybek, M., 2023. Comparative analysis of tree-based ensemble learning algorithms for landslide susceptibility mapping: A case study in Rize, Turkey. *Water*, 15(14), 2661.

Yılmaz, I., 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138.

Yılmaz, I., & Keskin, I., 2009. GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(4), 459-471.

Yu, J., Zhao, Q., Yu, Z., Liu, Y., & Ding, S., 2024. A review of the sediment production and transport processes of forest road erosion. *Forests*, 15, 454.

Yüksel, K., 2025. Assessment of GIS-based landslide susceptibility mapping in forest road planning: The Tanır Stream Watershed case study. *Turkish Journal of Forest Science*, 9(2), 253-264.

Zare, N., Hosseini, S. A. O., Hafizi, M. K., Najafi, A., Majnounian, B., & Geertsema, M., 2021. A comparison of an adaptive neuro-fuzzy and frequency ratio model to landslide-susceptibility mapping along forest road networks. *Forests*, 12, 1087.

GÖKTÜRK-1 DESTEKLİ TRANSFER ÖĞRENME İLE SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNİN SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜĞÜNÜN ARTIRILMASI

Hilal ADIYAMAN VARUL[1], Yunus Emre VARUL[2], Hasan GÜNER[3], Berna DAŞTAN[4], Mustafa Emre AKÇAL[5], Tolga BAKIRMAN[6], Nebiye MUSAOĞLU[7], Bülent BAYRAM[8]

[1] Yüksek Mühendis, ITÜ-UHUZAM 34469, Maslak, İstanbul, hadiyaman@yildiz.edu.tr
[2] Mühendis, Ayvos Bilgi Teknolojileri, YTÜ Teknopark, 34220, Esenler, İstanbul, yemre.varul@ayvos.com
[3] Mühendis, Harita Genel Müdürlüğü Fotogrametri Dairesi Başkanlığı 06590 Cebeci, Ankara, hasngner@gmail.com
[4] Mühendis, Harita Genel Müdürlüğü Fotogrametri Dairesi Başkanlığı 06590 Cebeci, Ankara, bernadastan404@gmail.com
[5] Mühendis, Harita Genel Müdürlüğü Fotogrametri Dairesi Başkanlığı 06590 Cebeci, Ankara, mustafaemreakcal@gmail.com
[6] Doç.Dr. Tolga Bakırman, Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, bakirman@yildiz.edu.tr
[7] Prof.Dr. Nebiye Musaoğlu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34467, Sarıyer, İstanbul, musaoglune@itu.edu.tr
[8] Prof.Dr. Bülent Bayram, Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, bayram@yildiz.edu.tr

ÖZET

Sentinel-2 uyduları, çok bantlı yapısı ve sık tekrarlama periyodu ile geniş alanlarda ücretsiz ve düzenli gözlem imkânı sunmaktadır; ancak sağladığı en yüksek 10 m mekansal çözünürlük, kentsel doku, tarımsal parsel ve küçük ölçekli değişim analizleri gibi yüksek detay gerektiren uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Çok yüksek çözünürlüklü ticari uydu görüntülerine erişimin maliyetli olması, derin öğrenme tabanlı Tek Görüntü Süper Çözünürlük (Single Image Super-Resolution, SISR) yöntemlerini Sentinel-2 görüntülerinin çözünürlüğünü artırmak amacıyla öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada, BSRGAN ve StarSRGAN modelleri transfer öğrenme yaklaşımıyla, Göktürk-1 ile süper çözünürlüklü Sentinel-2 üretilmiştir. Test veri seti üzerinde StarSRGAN 58,16 dB PSNR ve 0,9953 SSIM, BSRGAN ise 57,96 dB PSNR ve 0,9959 SSIM değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, sınırlı sayıda Göktürk-1 –Sentinel-2 görüntü çiftiyle dahi, önceden eğitilmiş GAN tabanlı SISR modellerinin transfer öğrenme yoluyla yüksek doğrulukla uyarlanabildiğini ve Göktürk-1'in Sentinel-2 süper çözünürlük uygulamaları için maliyet etkin bir referans veri kaynağı olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Derin Öğrenme, Göktürk-1, Sentinel-2, Süper Çözünürlük, Transfer Öğrenme

ABSTRACT

IMPROVING SUPER-RESOLUTION OF SENTINEL-2 IMAGES WITH GÖKTÜRK-1 ASSISTED TRANSFER LEARNING

Sentinel-2 satellites provide open access and regular observations over large areas thanks to their multispectral capability. However, their maximum spatial resolution of 10 m is insufficient for applications requiring fine spatial details, such as urban, agricultural, and small-scale change detection based studies. Since access to very high-resolution commercial satellite imagery is often expensive, deep learning-based Single Image Super-Resolution (SISR) methods have emerged as a promising solution for enhancing the spatial resolution of Sentinel-2 imagery. In this study, the BSRGAN and StarSRGAN models were adapted through transfer learning using Göktürk-1 imagery to generate super-resolution Sentinel-2 images. On the test dataset, StarSRGAN achieved a PSNR of 58.16 dB and an SSIM of 0.9953, while BSRGAN achieved a PSNR of 57.96 dB and an SSIM of 0.9959. The results demonstrate that, even with a limited number of Göktürk-1–Sentinel-2 image pairs, pretrained GAN-based SISR models can be effectively adapted through transfer learning, indicating that Göktürk-1 imagery can serve as a cost-effective reference dataset for Sentinel-2 super-resolution applications.

Keywords: Deep learning, Göktürk-1, Sentinel-2, Super-resolution, Transfer learning

1. GİRİŞ

Uydu görüntüleri, çevresel değişimlerin izlenmesi, kentsel gelişim analizi, doğal kaynak yönetimi ve afet yönetimi gibi birçok alanda temel veri kaynağıdır. Ancak açık kaynaklı Sentinel-2 verileri 10 m çözünürlüğü nedeniyle bazı uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, süper çözünürlükte uydu görüntülerinin üretilmesinde önemli ilerlemeler sağlamıştır. Süper Çözünürlük (SR) yöntemleri, düşük çözünürlüklü görüntülerden daha yüksek çözünürlüklü görüntüler üreterek önemli avantaj sağlamaktadır (Wang, vd., 2023). CNN tabanlı modeller (örneğin, SRCNN, EDSR, FSRCNN, LapSRN), klasik yöntemlere kıyasla PSNR ve SSIM'de önemli iyileştirmeler sunarak süper çözünürlük (SR) alanının omurgasını oluşturmuştur (Berezovsky, vd. 2024). CNN tabanlı modeller, görsel açıdan daha bulanık ve ince detayları zayıf görüntüler üretme eğilimindedir. Bu nedenle, derin öğrenme (DL) tabanlı süper çözünürlük çalışmalarında Üretici Çekişmeli Ağlar (Generative Adversarial Networks, GAN) tabanlı modeller yaygın olarak kullanılmaktadır (Ren, vd., 2020).

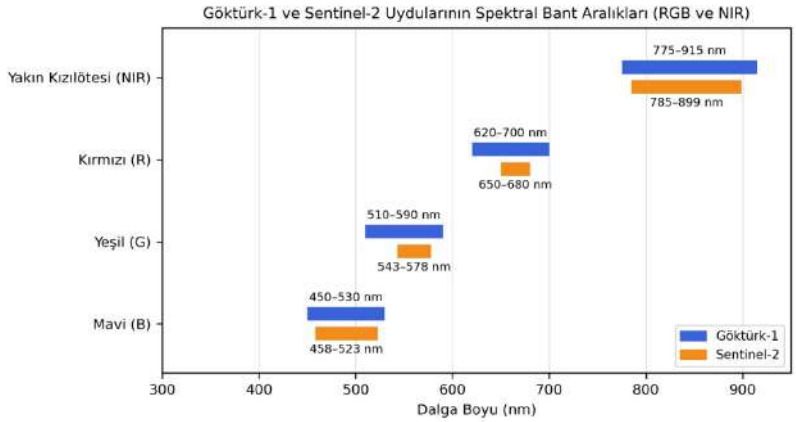
Bu çalışmanın temelini oluşturan önceki bir araştırmada, İstanbul, İzmir ve Bursa'yı kapsayan Sentinel-2 (LR) ve pan-sharpened SPOT-6/7 (HR) görüntü çiftlerinden oluşan, 7286 adet HR-LR çifti içeren özgün bir çoklu sensör veri seti (YTU-UHUZAM-SR) oluşturulmuştur (Adıyaman, 2025). Bu veri seti üzerinde Generative Adversarial Network (GAN) tabanlı BSRGAN ve StarSRGAN modelleri sıfırdan 300 epok boyunca eğitilmiş; BSRGAN (Zhang, vd., 2021) ve StarSRGAN (Vo ve Bui, 2023) sırasıyla 288. ve 289. epoklarda en iyi doğrulama performansına ulaşmıştır. Söz konusu çalışma, GAN tabanlı SISR modellerinin uydu görüntülerinin çözünürlüğünü artırmada yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, daha önce SPOT-6/7–Sentinel-2 görüntü çiftleri üzerinde eğitilmiş GAN tabanlı süper çözünürlük modellerinin, farklı bir yüksek çözünürlüklü referans sensör olan Göktürk-1'e ait görüntüler kullanılarak Sentinel-2 verilerine uyarlanabilirliğini araştırmaktır. Bu kapsamda, önceki çalışmada optimize edilen BSRGAN ve StarSRGAN model ağırlıkları başlangıç noktası olarak kullanılmış ve sınırlı sayıdaki Göktürk-1–Sentinel-2 görüntü çifti ile transfer öğrenme gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışmada, yeni bir model mimarisi geliştirmek yerine, mevcut bir SISR modelinin farklı bir sensör çiftine düşük miktarda veri ve kısa bir ince ayar süreciyle aktarılabilirliği incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Veri Seti Hazırlığı

Sentinel-2 ve Göktürk-1'in ortak R, G, B ve NIR bantları benzer spektral bölgeleri temsil etmekle birlikte, bu bantların spektral aralıkları ve spektral yanıt fonksiyonları sensörler arasında farklılık göstermektedir. Şekil-1'de Sentinel-2 MSI ve Göktürk-1 HiRI bant aralıkları karşılaştırılmıştır. Dört bantta da Sentinel-2 aralığı Göktürk-1 aralığı içinde yer almakta, ancak Göktürk-1 bantları özellikle yeşil ve kırmızıda daha geniş bir spektral aralığı kapsamaktadır. Radyometrik açıdan Sentinel-2 görüntüleri atmosferik düzeltmesi yapılmış yüzey yansıtımı (L2A, BOA) olarak, Göktürk-1 görüntüleri ise 12 bit olarak kaydedilip 16 bit formatında teslim edilen sayısal değerler (DN) olarak kullanılmıştır. Sensörler arası bu spektral ve radyometrik farklılıklar ayrı bir dönüşümle giderilmek yerine, önceki çalışmada olduğu gibi (Adıyaman, 2025) modelin öğrenme sürecine bırakılmıştır. Bu amaçla sensörler arasında histogram eşleme veya görüntü/bant bazlı normalizasyon uygulanmamış, her iki veri de yalnızca ortak ve sabit bir ölçek katsayısıyla ($2^{16}-1$) [0, 1] aralığına ölçeklenerek bantlar arası göreli radyometrik ilişkileri korunmuştur. Aynı tarihli HR–LR görüntü çiftleriyle eğitilen modeller, Sentinel-2 görüntülerinin mekansal çözünürlüğünü artırırken spektral ve radyometrik özelliklerini de Göktürk-1 referansına yaklaştıracak şekilde öğrenmektedir.



Şekil 1. Sentinel-2 ve Göktürk-1 uydularının spektral bant aralıkları

Uşak ve Antalya (Döşemealtı) bölgeleri için yüksek çözünürlüklü (HR) veri olarak Göktürk-1, düşük çözünürlüklü (LR) veri olarak ise aynı tarihe ait ve bulutsuz Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Her iki uyduya ait görüntüler dört bantlıdır (R, G, B, NIR). Görüntüler QGIS üzerinden üst üste bindirilerek ilgi alanlarına (ROI) göre kesilmiş ve orijinal 16-bit radyometrik çözünürlük korunmuştur. Sentinel-2 görüntülerinden 4× süper çözünürlük ile 2,5 m mekânsal çözünürlüğe ulaşılması hedeflenmiştir. Göktürk-1'in çalışmada kullanılan R, G, B ve NIR çok bantlı görüntüleri 2 m native mekânsal çözünürlüğe sahip olup, 0,5 m çözünürlük pankromatik banda aittir. Bu nedenle dört bantlı Göktürk-1 görüntüleri, hedeflenen 2,5 m çözünürlüğündeki yüksek çözünürlüklü (HR) referans görüntüleri oluşturmak üzere bikübik yöntemle 2,5 m çözünürlüğe yeniden örneklenmiştir. Görüntüler, coğrafi referansları GDAL kütüphanesi ile korunarak Sentinel-2 için 100×100 piksel, Göktürk-1 için 400×400 piksel boyutlarında parçalara ayrılmıştır. Dönüklükten kaynaklanan verisiz (no-data) alanlar içeren görüntü çiftleri veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlemler sonucunda 414 adet HR-LR görüntü çifti (yaklaşık 414 km² kapsama alanı) elde edilmiş; veri seti %96,62'lik oranla 400 görüntülük eğitim, %1,69'luk oranla 7'şer görüntülük test ve doğrulama kümelerine ayrılmıştır. Bu dağılım, sınırlı sayıdaki eşleşmiş Göktürk-1–Sentinel-2 görüntüleri içerisinde, özellikle GAN tabanlı modellerin eğitiminde veri miktarının önem taşıması nedeniyle, eğitim için mümkün olan en yüksek sayıda görüntü çiftinin kullanılmasını sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

2.2 Transfer Öğrenme ve Model Eğitimi

Bu aşamada sıfırdan eğitim yerine, önceki çalışmada YTU-UHUZAM-SR veri seti ile optimize edilmiş ve genelleme yeteneği yüksek olan model ağırlıkları (pre-trained weights) başlangıç noktası olarak kullanılmıştır. BSRGAN için 288. epok, StarSRGAN için ise 289. Epok a ait ağırlıklar transfer öğrenmenin başlangıcı olarak alınmıştır. Eğitim sürecinde önceki çalışmadaki hiperparametre ayarlarına (optimizasyon algoritması olarak Adam, öğrenme oranı, küme boyutu ve kayıp fonksiyonları) tamamen sadık kalınmış, yalnızca epok sayısı 30 olarak belirlenmiştir. Modellerin eğitiminde Ubuntu 24.04 işletim sistemi, 13. Nesil Intel Core i5-13600K işlemci, NVIDIA RTX 4060 Ti ekran kartı, 32 GB RAM ve 8 GB VRAM özelliklerine sahip bir donanım kullanılmıştır.

2.3 Doğruluk Metrikleri

Modellerin performansı, Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) ve Yapısal Benzerlik İndeksi (Structural Similarity Index Measure, SSIM) metrikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiştir. Daha yüksek PSNR değeri üretilen görüntünün orijinaline daha yakın olduğunu, 1'e yaklaşan SSIM değeri ise yapısal benzerliğin arttığını göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Transfer öğrenme uygulanan BSRGAN ve StarSRGAN modelleri, doğrulama veri setinde sırasıyla 26. ve 30. epoklarda en iyi performansa ulaşmıştır. Tablo 1'de modellerin test veri seti üzerindeki bant bazlı ortalama PSNR ve SSIM değerleri; Tablo 2'de ise dört bant üzerinden alınan genel ortalama sonuçlar sunulmaktadır.

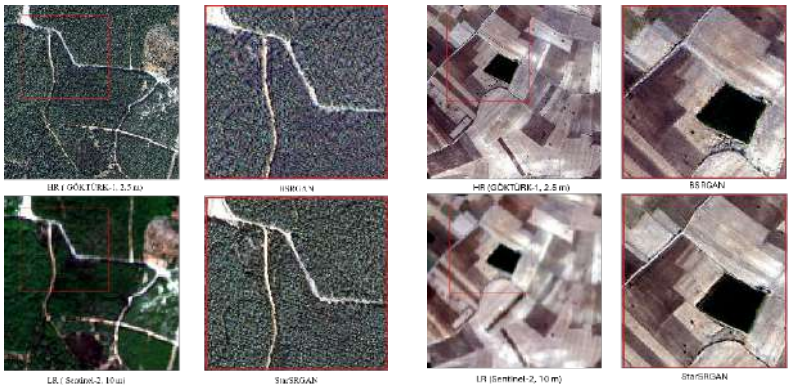
Tablo 1. Modellerin bant bazlı ortalama metrik sonuçları

Bant	PSNR BSRGAN	PSNR StarSRGAN	SSIM BSRGAN	SSIM StarSRGAN
R	57,6595	57,4885	0,9965	0,9946
G	59,4321	59,6159	0,9976	0,9971
B	61,0155	61,7683	0,9985	0,9979
NIR	53,7138	53,7725	0,9911	0,9916

Tablo 2. Modellerin genel ortalama metrik sonuçları

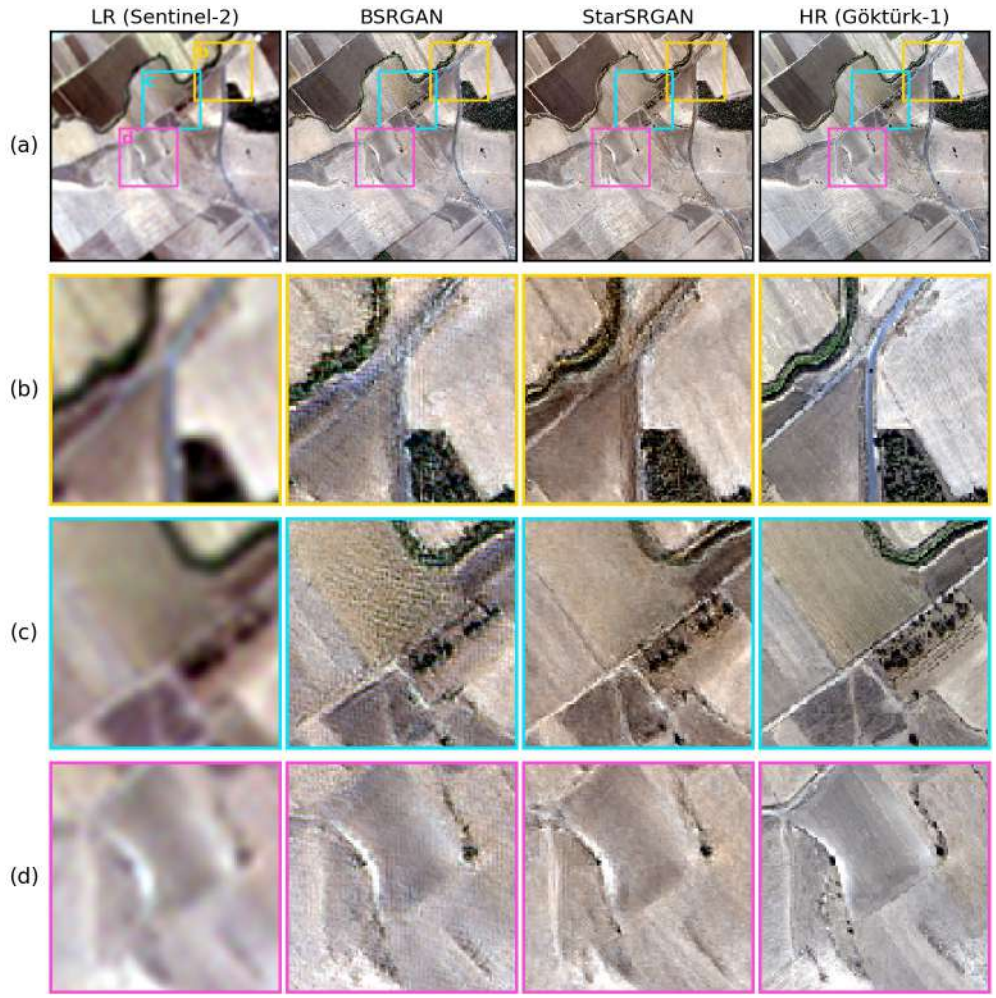
Model	PSNR (↑)	SSIM (↑)
BSRGAN	57,9552	0,9959
StarSRGAN	58,1613	0,9953

Elde edilen sonuçlar, her iki modelin de yalnızca 30 epokluk kısa bir transfer öğrenme süreciyle, sınırlı sayıdaki Göktürk-1–Sentinel-2 görüntü çiftinden yüksek doğrulukta öğrenme gerçekleştirebildiğini göstermektedir. PSNR değerleri incelendiğinde, StarSRGAN'ın özellikle yeşil ve mavi bantlarda BSRGAN'a kıyasla daha yüksek sinyal kalitesi sağladığı görülmektedir. Buna karşılık BSRGAN, tüm bantlarda ve genel ortalamada daha yüksek SSIM değerleri üreterek yapısal bütünlüğü korumada bir miktar daha kararlı bir davranış sergilemiştir. NIR bandında her iki model için diğer bantlara kıyasla daha düşük metrik değerleri elde edilmiştir; bu durum, yakın kızılötesi bölgedeki spektral yansıma farklılıklarının süper çözünürlük üretimini görünür bantlara göre daha zorlu hâle getirdiğine işaret etmektedir. Genel olarak, önceki çalışmada 300 epok boyunca sıfırdan eğitilen modellerin ürettiği sonuçlara (BSRGAN: 57,9552 dB / 0,9959; StarSRGAN benzer düzeyde) yakın performansların, bu çalışmada yalnızca 30 epokluk transfer öğrenme ile ve çok daha küçük bir veri setiyle (414 çift) elde edilmiş olması, transfer öğrenme yaklaşımının veri ve hesaplama maliyeti açısından sağladığı avantajı ortaya koymaktadır. Elde edilen örnek sonuçlar Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Orman ve tarla alanı için elde edilen sonuç

Modellerin 10 m mekansal çözünürlükte tam olarak ayırt edilemeyen detayları nasıl ürettiğini değerlendirmek amacıyla, yol, tarla sınırı ve küçük nesneler içeren örnek bir test görüntüsü HR referansla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 3). LR görüntüde bulanık birer geçiş olarak görülen asfalt yol, tarla sınırları ve ağaçlık alan kenarları her iki modelde de doğru konumda ve belirgin biçimde yeniden oluşturulmuştur (Şekil 3b ve 3c). Özellikle StarSRGAN'ın, LR görüntüde neredeyse seçilemeyen ince tarla bölme çizgilerini ve toprak yolları HR referansla uyumlu şekilde ortaya çıkardığı görülmektedir (Şekil 3c ve 3d). Benzer şekilde LR görüntüde yalnızca koyu bir leke olarak izlenen tekil ağaçlar, SR görüntülerinde referansla aynı konumda ve daha keskin sınırlarla üretilmiştir (Şekil 3d). Buna karşın Sentinel-2'nin çözünürlük sınırının altında kalan bazı ayrıntılar tam olarak geri kazanılamamıştır. HR görüntüde tek tek ayırt edilebilen sıra ağaçlar SR görüntülerinde birleşik kümeler hâlinde temsil edilmiş (Şekil 3c), ağaçlık alanlarda ise görsel olarak gerçekçi ancak referanstaki tekil ağaç tepeleriyle birebir örtüşmeyen bir doku üretilmiştir (Şekil 3b). Ayrıca BSRGAN'ın bazı homojen tarım alanlarında referansta bulunmayan hafif periyodik dokular oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 3c). Bu bulgular, modellerin LR görüntüde var olan yapısal bilgiyi başarıyla restore ettiğini, çok ince ölçekli dokularda ise öğrenilmiş görüntü istatistiklerinden yararlandığını göstermektedir. Bu yönüyle StarSRGAN, gerçek detay restorasyonu açısından BSRGAN'a göre daha tutarlı sonuçlar üretmiştir.



Şekil 3. LR (Sentinel-2), BSRGAN, StarSRGAN ve HR (Göktürk-1) görüntülerinde kenar ve küçük nesne detaylarının karşılaştırılması: (a) test görüntüsünün tamamı ve incelenen alanlar, (b) asfalt yol ve ağaçlık alan, (c) ağaç sırası ve tarla sınırları, (d) tekil ağaçlar ve toprak yollar

4. SONUÇ

Bu çalışmada, önceden Sentinel-2 ve SPOT-6/7 görüntü çiftleriyle eğitilmiş BSRGAN ve StarSRGAN modellerinin, Türkiye'nin ulusal yer gözlem uydusu Göktürk-1'den elde edilen sınırlı sayıda görüntü çiftiyle transfer öğrenme yoluyla farklı coğrafyalara uyarlanabilirliği araştırılmıştır. Uşak ve Antalya bölgelerini kapsayan 414 adet Göktürk-1–Sentinel-2 görüntü çifti üzerinde yalnızca 30 epok boyunca gerçekleştirilen ince ayar (fine-tuning) sonucunda, StarSRGAN 58,16 dB PSNR ve 0,9953 SSIM, BSRGAN ise 57,96 dB PSNR ve 0,9959 SSIM değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, GAN tabanlı SISR modellerinin transfer öğrenme ile hem daha az veri hem de daha kısa eğitim süresiyle yüksek doğrulukta çalışabildiğini ve Göktürk-1'in Sentinel-2 süper çözünürlük uygulamaları için maliyet etkin, ulusal bir referans veri kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, Göktürk-1–Sentinel-2 veri

setinin farklı arazi örtüleri ve daha geniş coğrafyaları kapsayacak şekilde genişletilmesi ile farklı derin öğrenme mimarilerinin (Transformer tabanlı modeller vb.) transfer öğrenme performansının karşılaştırılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Sunulan çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi bünyesinde yürütülen FBG-2026-7810 GÖKTÜRKSR Milli Uydu Görüntüleri için Derin Öğrenme Tabanlı Süper Çözünürlük Teknolojilerinin Geliştirilmesi başlıklı proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Adıyaman, H., 2025. Sentinel-2 Uydu Görüntülerinde Derin Öğrenme ile Süper Çözünürlük. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Berezovsky, V., Kamenev, A., Sharshov, I., Shoshina, K., Vasendina, I., Aleshko, R., & Desyatova, T. (2025). Enhancing satellite image resolution using super resolution techniques. In Applied Intelligence: Second International Conference, ICAI 2024, Zhengzhou, China, November 22–25, 2024, Proceedings, Part II (Communications in Computer and Information Science, pp. 61–72). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1904-7_6.

Ren, H., Kheradmand, A., El-Khamy, M., Wang, S., Bai, D., & Lee, J. (2020). Real-world super-resolution using generative adversarial networks. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPR Workshops) (pp. 436–437). https://doi.org/10.1109/CVPRW50498.2020.00226.

Türksat A.Ş., 2025. Göktürk-1 Uydusu Teknik Özellikleri. https://www.turksatkablo.com.tr (Erişim tarihi: Temmuz 2026).

Vo, K. D., Bui, L. T., 2023. StarSRGAN: Improving real-world blind super-resolution. arXiv:2307.16169. doi: 10.48550/arXiv.2307.16169.

Wang, X., Sun, L., Chehri, A., & Song, Y. (2023). A review of GAN-based super-resolution reconstruction for optical remote sensing images. Remote Sensing, 15(20), 5062. https://doi.org/10.3390/rs15205062.

Zhang, K., Liang, J., Van Gool, L., Timofte, R., 2021. Designing a practical degradation model for deep blind image super-resolution. IEEE/CVF Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), 4791–4800. doi: 10.48550/arXiv.2103.14006.

ÇOK ZAMANLI UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİ KULLANILARAK KAR DERİNLİĞİ TAHMİNİ

Abbas Han TANIŞ[1], Filiz SUNAR[2]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, tanis21@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, fsunar@itu.edu.tr

ÖZET

Kar örtüsü, tatlı su kaynaklarının beslenmesinde ve yeryüzü enerji dengesinde önemli bir rol oynayan kriyosferin temel bileşenlerinden biridir. Doğu Anadolu gibi dağlık bölgelerde kar erimesi tarım, hidroelektrik üretimi ve taşkın yönetimi açısından önem taşıdığından, kar derinliğinin (SD) düzenli ve güvenilir biçimde izlenmesi gereklidir. Geleneksel yersel ölçümler, meteoroloji istasyonlarının mekânsal dağılımıyla sınırlı kalırken, optik uydu verilerinin kullanımı bulutluluk koşullarından etkilenmektedir. Bu çalışmada, bulutluluk koşullarından etkilenmeden, gündüz ve gece veri sağlayabilen Sentinel-1 C-bandı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verisinin, Doğu Anadolu'da Erzurum, Erzincan, Bayburt, Kars ve Ağrı illerinde bulunan dokuz meteoroloji istasyonunda kar derinliği tahmini için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Lievens vd. (2019, 2022) tarafından önerilen çapraz polarizasyon oranı (σ^o_VH/σ^o_VV) yaklaşımı temel alınarak Google Earth Engine üzerinde Python tabanlı otomatik bir işlem akışı geliştirilmiştir. Uydu görüntüleri, geometrik tutarlılığı sağlamak amacıyla yörünge ve geçiş yönüne göre filtrelenmiş; geri saçılım değerleri doğrusal ölçekte ortalanmış ve MGM sıcaklık verileri kullanılarak ıslak kar koşulları maskelenmiştir. Referans dönemindeki bitki örtüsü etkisini incelemek amacıyla üç farklı kar derinliği tahmin yaklaşımı (sabit kar öncesi referans, kaydırmalı zamansal referans ve mevsimsel birikime dayalı Kar İndeksi) karşılaştırılmıştır. Model performansı istasyonlar arası bağımsızlığı korumak için Birini Dışarıda Bırak Çapraz Doğrulama (LOOCV) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, test edilen yöntemlerin ve mekânsal ölçeklerin hiçbirinde (tekil piksel/1 km² tampon bölge) çapraz polarizasyon oranı ile ölçülen kar derinliği arasında güçlü bir ilişki elde edilemediğini göstermiştir. Belirtme katsayısı en fazla $R^2 \approx 0{,}19$ düzeyinde kalırken, regresyon eğimleri istasyonlar arasında önemli farklılıklar göstermiş ve birçok durumda beklenen pozitif ilişkinin aksine negatif değerler almıştır. Ham geri saçılım zaman serilerinde, Ağrı Dağı ve Alpler'deki dış referans noktalarında daha belirgin mevsimsel değişimler gözlenirken, karşılaştırılan Palandöken ve Aziziye/Ilıca istasyonlarında daha düzensiz zaman serileri elde edilmiştir. Bu farklılıkların, istasyon konumu ile yerel arazi ve yüzey koşullarının geri saçılım davranışı üzerindeki olası etkilerine işaret ettiği değerlendirilmiştir. Bulgular, Lievens vd. tarafından önerilen yaklaşımın Doğu Anadolu'daki mevcut istasyon konumları ve yerel arazi koşullarında doğrudan uygulanmasının sınırlı olduğunu göstermektedir. Çalışma, Sentinel-1 tabanlı kar derinliği tahmininde başarının yalnızca kullanılan tahmin yaklaşımına değil, istasyon konumu ve yüzey koşullarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Çapraz polarizasyon oranı, Doğu Anadolu, Google Earth Engine, kar derinliği, Sentinel-1

ABSTRACT

SNOW DEPTH ESTIMATION USING MULTITEMPORAL REMOTE SENSING DATA

Snow cover is one of the key components of the cryosphere, playing an important role in freshwater resources and the Earth's surface energy balance. In mountainous regions such as Eastern Anatolia, Türkiye, snowmelt is important for agriculture, hydropower production and flood management, making regular and reliable monitoring of snow depth (SD) necessary. While conventional ground measurements are limited by the spatial distribution of meteorological stations, the use of optical satellite data is affected by cloud cover. This study examines whether Sentinel-1 C-band Synthetic Aperture Radar (SAR) data, which can be acquired day or night without being affected by cloud cover, can be used to estimate snow depth at nine meteorological stations in the provinces of Erzurum, Erzincan, Bayburt, Kars and Ağrı in Eastern Anatolia. Building on the cross-polarization ratio (σ^o_VH/σ^o_VV) approach proposed by Lievens et al. (2019, 2022), an automated Python-based workflow was developed in Google Earth Engine. Satellite images were filtered by orbit track and pass direction to ensure geometric consistency, backscatter values were averaged in the linear domain, and wet-snow conditions were masked using MGM temperature records. To examine the influence of vegetation during the reference period, three snow depth estimation approaches (a fixed pre-snow reference, a sliding temporal reference, and a cumulative seasonal Snow Index) were compared. Model performance was evaluated with a Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) scheme to preserve station-level independence. The results showed that none of the tested methods or spatial scales (single pixel/1 km² buffer) produced a strong relationship between the cross-polarization ratio and observed snow depth. The coefficient of determination reached a maximum of approximately $R^2 \approx 0.19$, while regression slopes varied considerably among stations and, in many cases, were negative rather than showing the expected positive relationship. The raw backscatter time series showed more distinct seasonal variations at the external reference points in Mount Ağrı and the Alps, whereas more irregular time series were observed at the Palandöken and Aziziye/Ilıca stations included in the comparison. These differences may indicate the effects of station location and local terrain and surface conditions on backscatter behavior. The findings indicate that the approach proposed by Lievens et al. has limited direct applicability under the existing station locations and local terrain conditions of Eastern Anatolia. The study demonstrates that the performance of Sentinel-1-based snow depth estimation depends not only on the estimation approach but also on station location and surface conditions.

Keywords: Cross-polarization ratio, Eastern Anatolia, Google Earth Engine, snow depth, Sentinel-1

1. GİRİŞ

Kar örtüsü, kriyosferin önemli bir bileşeni olup aşağı havzalardaki tatlı su kaynaklarını beslemekte ve yüksek albedosu sayesinde yeryüzü enerji dengesinde önemli bir rol oynamaktadır. Doğu Anadolu gibi dağlık bölgelerde kar erimesinden kaynaklanan akış, tarım, hidroelektrik üretimi ve taşkın yönetimi açısından önem taşıdığından, kar derinliği (SD) başta olmak üzere kar parametrelerinin doğru ve sürekli izlenmesi gereklidir.

Kar izleme çalışmalarında MODIS ve Sentinel-2 gibi optik uydu verileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar karın alansal yayılımının haritalanmasında etkili olsa da bulut örtüsünden etkilenmeleri ve kar derinliği hakkında doğrudan bilgi sağlamamaları kullanımlarını sınırlamaktadır. Bu sınırlamalar, kar özelliklerinin izlenmesinde mikrodalga uzaktan algılama verilerinin kullanımını önemli hale getirmiştir. Sentinel-1 gibi C-bandı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri, gündüz ve gece görüntüleme yapabilmelerinin yanı sıra, radar geri saçılımının karın fiziksel özelliklerine ve sıvı su içeriğine duyarlı olması nedeniyle kar örtüsünün izlenmesinde önemli bir veri kaynağıdır.

Uydu uzaktan algılaması ile kar parametrelerinin tahmini literatürde geniş biçimde araştırılmıştır. Nagler ve Rott (2000), C-bandı SAR sinyallerinin kar tabakasındaki sıvı su içeriğine yüksek duyarlılık gösterdiğini, dolayısıyla ıslak kar haritalamasında etkili olduğunu, buna karşın kuru kar derinliğinin tahmininin sinyalin kar katmanına nüfuz etmesi nedeniyle daha zor olduğunu ortaya koymuştur. Kar derinliğinin SAR verilerinden tahminine yönelik önemli çalışmalardan biri Lievens vd. (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Sentinel-1'in çapraz-polarize (VH) sinyalinin, kar örtüsündeki hacimsel saçılıma bağlı olarak kar derinliğine duyarlı olduğu ve kar derinliği ile çapraz/eş-polarize geri saçılım oranı (σ^o_VH/σ^o_VV) arasında pozitif bir ilişki bulunduğu gösterilmiştir. Bu bulgular, Sentinel-1 verilerinin ıslak kar haritalamasının yanı sıra kar derinliği tahmininde de kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Sonraki çalışmalar bu yaklaşımı farklı çevresel koşullarda geliştirmiş ve değerlendirmiştir. Lievens vd. (2022), algoritmayı Avrupa Alpleri'nde bitki örtüsü ve topografik düzeltmeler ekleyerek iyileştirmiş ve alt-kilometre çözünürlüklerde uygulanabilirliği artırmak amacıyla zamansal bir indeks yaklaşımı geliştirmiştir. Lemos vd. (2025), yöntemin uyarlanmış bir versiyonunu Kuzey Finlandiya'da uygulamış, belirli mevsimlerde 0,81'e ulaşan korelasyon değerleri elde ederek yöntemin istikrarlı kar koşullarında başarılı sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Bulovic vd. (2024) ise And Dağları'nda Sentinel-1 tabanlı kar derinliği tahminlerini değerlendirmiş; karmaşık iklim rejimleri ile hızlı kar erimesi koşullarına bağlı önemli sınırlamalar bildirerek yöntemin performansının bölgeler arasında değişebildiğini vurgulamıştır.

Türkiye'de kar izleme çalışmaları büyük ölçüde SAR tabanlı yaklaşımlardan ziyade optik uzaktan algılama ve yeniden analiz verilerine dayanmaktadır. Akyürek ve Şorman (2002), Doğu Türkiye'deki kar örtülü alanları NOAA-AVHRR verisiyle izlemiş, yükseklik ve bakı gibi topografik etkenlerin rolünü vurgulamıştır. Tekeli ve Şensoy (2006), Karasu Havzası'nda MODIS tabanlı kar albedosu ürünlerini yersel gözlemlerle doğrulamış; Akyürek vd. (2023) ise ERA5-Land verisiyle 1970-2022 döneminde kar süresinde iklim değişikliğine bağlı bir azalma tespit etmiştir. Sentinel-1 tabanlı kar derinliği tahmini farklı coğrafi bölgelerde incelenmiş olmakla birlikte, Türkiye'de bu konudaki çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışmada, Lievens vd. (2019) tarafından önerilen çapraz polarizasyon oranına dayalı yaklaşımın Doğu Anadolu koşullarında kar derinliği tahmini için kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma, Erzurum, Erzincan, Bayburt, Kars ve Ağrı illerindeki dokuz meteoroloji istasyonunu kapsamaktadır. Sentinel-1 VH ve VV geri saçılım sinyallerinin kar derinliği değişimlerine duyarlılığı incelenmiş; referans döneminin belirlenmesinde sabit kar öncesi referans, kaydırmalı zamansal referans ve mevsimsel birikime dayalı Kar İndeksi olmak üzere üç yaklaşım karşılaştırılmıştır. Islak kar koşullarının etkisini azaltmak amacıyla yersel sıcaklık verileri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar MGM kar derinliği ölçümleriyle LOOCV yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Böylece yöntemin Doğu Anadolu'nun farklı arazi ve yüzey koşullarındaki uygulanabilirliği ve sınırlılıklarının ortaya konulması hedeflenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma, Doğu Anadolu'da bulunan ve yükseklikleri 1818-2615 m arasında değişen dokuz meteoroloji istasyonunu kapsamaktadır (Şekil 2). Çalışma alanı, sarp dağlar, dik yamaçlar ve değişken bakı koşullarıyla karakterize edilmektedir. Karasal iklimin egemen olduğu bölgede kışlar uzun ve soğuk geçmekte, Kasım-Nisan ayları arasında belirgin kar birikimi gözlenmektedir. İstasyonların farklı yükseklik ve arazi koşullarında bulunması, Sentinel-1 geri saçılımının kar derinliğine duyarlılığının farklı yüzey koşullarında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 2. Doğu Anadolu'da yer alan dokuz meteoroloji istasyonunun konumu (Google Earth).

Çizelge 2. Meteoroloji istasyonlarının konum bilgileri.

İstasyon #	İstasyon Adı	İl	Yükseklik (m)	Enlem (K)	Boylam (D)
17777	Palandöken	Erzurum	2615	39,844	41,290
17691	Aşkale/Kop	Erzurum	2415	40,027	40,538
17983	Ergan	Erzincan	2347	39,607	39,493
19255	Kuzgun	Erzurum	2186	40,179	41,071
18196	Sarıkamış	Kars	2160	40,318	42,617
19250	Yayladüzü	Ağrı	2149	39,929	42,303
17687	Aziziye/Ilıca	Erzurum	2094	39,888	41,077
19236	Bayburt/Kop	Bayburt	2045	40,051	40,457
18194	Eleşkirt	Ağrı	1818	39,791	42,682

2.2 Kullanılan Veriler

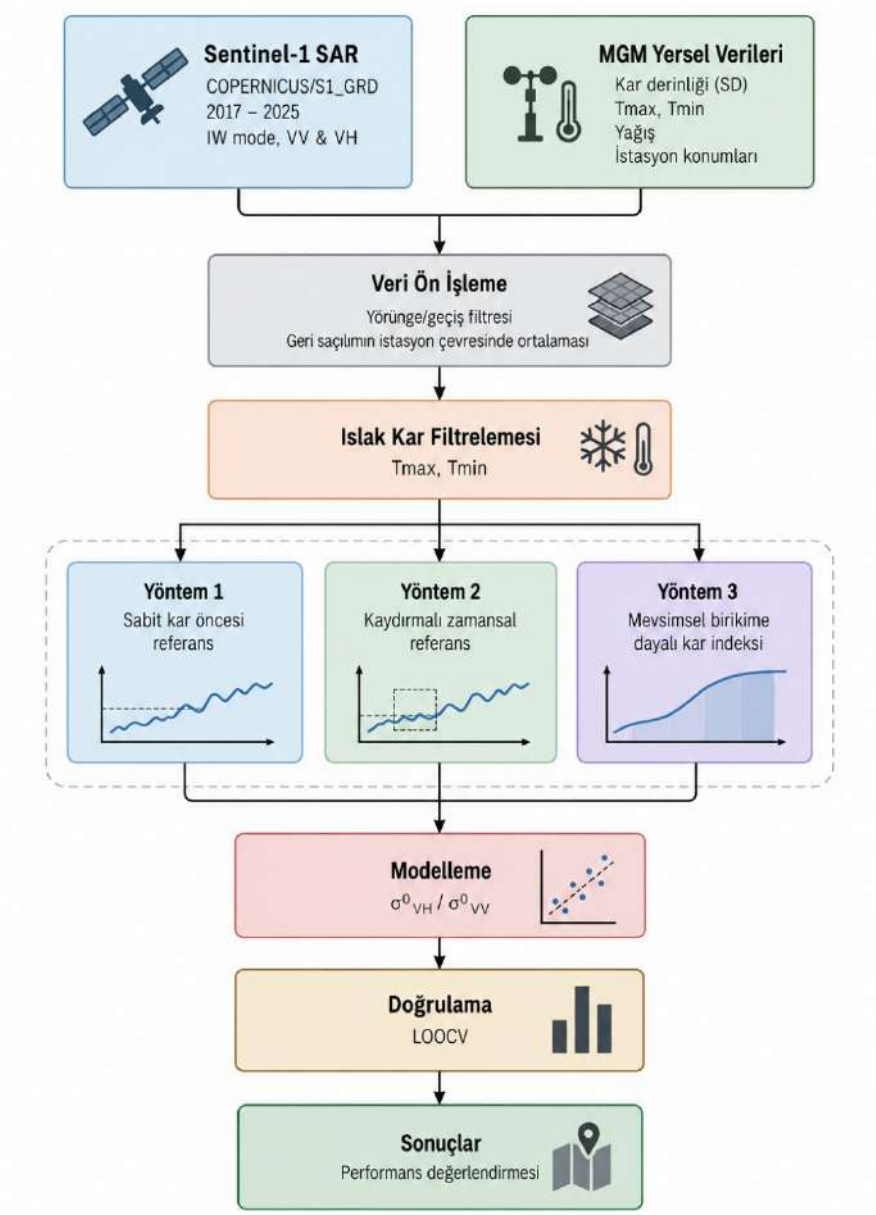
Çalışmada, kar derinliği tahmini amacıyla 2017-2025 dönemine ait çok zamanlı radar verileri ile yersel meteorolojik gözlemler birlikte kullanılmıştır.

Ana uzaktan algılama veri kaynağı, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından Copernicus programı kapsamında geliştirilen Sentinel-1 Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) misyonudur. Verilere, Google Earth Engine (GEE) platformundaki COPERNICUS/S1_GRD koleksiyonundan erişilmiş ve veriler aynı platformda işlenmiştir. Çalışmada Interferometric Wide Swath (IW) görüntüleme modundaki veriler kullanılmıştır. IW modu yaklaşık 250 km tarama genişliğine ve 5 m x 20 m nominal mekânsal çözünürlüğe sahiptir. VV (Vertical-Vertical) ve VH (Vertical-Horizontal) polarizasyonlarına ait geri saçılım verileri değerlendirilmiştir. Bu iki polarizasyonun yüzey ve hacimsel saçılmaya farklı duyarlılık göstermesi, kar örtüsündeki değişimlerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Geometrik tutarlılığı sağlamak amacıyla her istasyon için görüntüler aynı yörünge numarası ve geçiş yönüne göre filtrelenmiştir.

Kar derinliği tahmini, ıslak kar koşullarının belirlenmesi ve sonuçların doğrulanmasında kullanılan yersel gözlemler Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilmiştir. Bu kapsamda günlük kar derinliği (cm), günlük maksimum ve minimum hava sıcaklığı (Tmax, Tmin) ve günlük yağış (mm) verileri kullanılmıştır. Kar derinliği ölçümleri uydu tabanlı tahminlerin değerlendirilmesinde referans veri olarak kullanılırken, sıcaklık kayıtlarından ıslak kar koşullarının belirlenmesinde yararlanılmıştır. Yağış verileri ise kar öncesi referans döneminin belirlenmesinde, aday referans tarihlerinden önceki 72 saat içerisinde yağış olup olmadığının kontrol edilmesi amacıyla kullanılmıştır. İstasyonların enlem, boylam ve yükseklik bilgileri SAR verilerinin istasyon konumlarıyla mekânsal olarak eşleştirilmesinde kullanılmıştır. İstasyon çevresindeki mekânsal değişkenliği değerlendirmek amacıyla ayrıca 1 km²'lik tampon bölgeler tanımlanmıştır.

3. YÖNTEM

Çalışmanın yöntemi, Sentinel-1 SAR verisini MGM meteorolojik kayıtlarıyla birlikte işlemek ve değerlendirmek amacıyla Google Earth Engine (GEE) API'si kullanılarak Python tabanlı bir işlem akışı biçiminde geliştirilmiştir. İşlem akışı; uydu verisinin geometrik filtrelenmesini, ıslak kar koşullarının belirlenmesini, çapraz polarizasyon oranına dayalı üç farklı kar derinliği tahmin yaklaşımının uygulanmasını ve Birini Dışarıda Bırak Çapraz Doğrulama (LOOCV) ile performans değerlendirmesini içermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Sentinel-1 ve MGM yersel verisinden kar derinliği tahminine ilişkin yöntem akış şeması.

3.1 Ön İşleme ve Ölçek Dönüşümü

Dağlık alanlarda SAR geri saçılım katsayıları (σ^o) görüntüleme geometrisi ve geliş açısındaki değişimlere duyarlıdır. Farklı yörünge geometrilerinden elde edilen görüntülerin birlikte kullanılması, geri saçılım zaman serilerinde kar örtüsü dışındaki geometrik etkilerden kaynaklanan değişkenliği artırabilmektedir. Bu etkileri azaltmak amacıyla Sentinel-1 görüntüleri yörünge numarası ve geçiş yönüne göre filtrelenmiştir. Her istasyon için 2017–2025 dönemindeki mevcut görüntüler incelenmiş ve en fazla görüntü sayısını sağlayan yörünge ve geçiş yönü seçilmiştir. Analizlerde yalnızca bu yörünge ve geçiş yönüne ait görüntüler kullanılmıştır.

MGM kayıtlarının incelenmesi, Ekim ayının istasyonların %90'ından fazlasında kar derinliğinin 0 cm olarak kaydedildiği karsız koşulları büyük ölçüde temsil ettiğini göstermiştir. Bu nedenle sabit bir yaz dönemi varsaymak yerine, kar öncesi referans yalnızca yersel ölçümlerde 0 cm kar derinliği bildirilen tarihlerden (esas olarak Ekim ayı) oluşturulmuştur. Kuru ve durağan zemin koşullarını belirlemek amacıyla her aday referans tarihi için önceki 72 saat

içerisindeki toplam yağış miktarı hesaplanmış ve bu süre içinde yağış kaydedilen tarihler referans veri setinden çıkarılmıştır.

Sentinel-1 SAR ürünleri GEE'de desibel (dB) ölçeğinde sunulmaktadır. Ancak geri saçılım değerlerinin doğrudan dB cinsinden ortalanması, doğrusal ölçekteki geri saçılımın aritmetik ortalamasına karşılık gelmemektedir. Bu nedenle SAR gözlemleri, mekânsal veya zamansal ortalama alınmadan önce dB ölçeğinden doğrusal ölçeğe dönüştürülmüştür:

$$linear = 10^{(dB/10)} \quad (1)$$

Bu dönüşümün ardından mekânsal ve zamansal ortalamalar doğrusal ölçekte hesaplanmıştır. Çapraz polarizasyon oranı (CR), VH ve VV kanallarının doğrusal ölçekteki ortalama değerlerinden hesaplanmış ve dB cinsinden ifade edilmiştir:

$$CR_{db} = 10 \cdot \log_{10}(VH_{linear} / VV_{linear}) \quad (2)$$

Radar benek (speckle) gürültüsü ve mekânsal heterojenliğin sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla SAR verisi iki farklı mekânsal örnekleme yaklaşımıyla elde edilmiştir: tekil piksel (Point) ve 1 km² tampon bölge (Buffer). Tampon bölge yaklaşımında, her istasyon çevresinde 1 km²'lik dairesel bir bölge oluşturulmuştur. Bu alan için tampon yarıçapı (r), dairenin alan formülü kullanılarak hesaplanmıştır:

$$r = \sqrt{(A/\pi)} = \sqrt{(1\ km^2/\pi)} \approx 564{,}19\ m \quad (3)$$

Bu hesaplamaya göre her istasyon çevresinde yaklaşık 564 m yarıçaplı dairesel bir tampon bölge oluşturulmuştur. Tekil piksel yaklaşımında istasyon koordinatına karşılık gelen tek bir Sentinel-1 pikselinin geri saçılım değeri kullanılırken, tampon bölge yaklaşımında 1 km²'lik bölge içerisindeki geri saçılım değerlerinin doğrusal ölçekte ortalaması alınmıştır. Böylece tekil piksel ve mekânsal ortalama yaklaşımlarının kar derinliği tahminleri üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.

3.2 Kar Derinliği Tahmin Yöntemleri

Bitki örtüsünden kaynaklanan referans sapmasını azaltmak amacıyla üç farklı kar derinliği tahmin yaklaşımı uygulanmış ve karşılaştırılmıştır.

Yöntem A, kış dönemindeki geri saçılımı kar öncesi bir referansla karşılaştıran değişim tespiti yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan temel değer, çapraz-polarizasyon farkı (ΔCR) olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$\Delta CR = CR_{kış} - CR_{referans} \quad (4)$$

Yöntem A kapsamında referans değerinin belirlenmesi için iki farklı strateji değerlendirilmiştir. MGM ile doğrulanan kar öncesi referans yaklaşımında, 0 cm kar derinliği ölçülen sonbahar tarihlerine (esas olarak Ekim ayı) ait Sentinel-1 gözlemleri birden fazla yıl için ortalanarak çok yıllı kar öncesi referans değeri ($CR_{referans}$) elde edilmiştir. Dinamik kar öncesi referans yaklaşımında ise her kış mevsimi için ayrı bir referans değeri belirlenmiştir. Kar mevsiminin başlangıcı, kar derinliğinin 0 cm'nin üzerine çıktığı ve sonraki 15 günün en az %80'inde bu eşiğin üzerinde kaldığı tarih olarak tanımlanmış, bu tarihten önceki Sentinel-1 gözlemlerinden mevsimsel bir referans değeri hesaplanmıştır.

Yöntem B'de, mevsimsel referans kullanılmadan ardışık Sentinel-1 görüntüleri arasındaki değişimler doğrudan hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, uzun dönemli referans seçiminden kaynaklanabilecek yüzey ve bitki örtüsü farklılıklarının etkisini azaltmayı amaçlamaktadır:

$$\Delta CR = CR_{(t)} - CR_{(t-1)} \quad (5)$$

Ardışık görüntüler arasındaki kısa zaman aralığı nedeniyle, görece yavaş değişen yüzey özelliklerinin ΔCR üzerindeki etkisinin azalacağı varsayılmış ve kısa dönemli geri saçılım değişimlerine odaklanılmıştır. Bu yaklaşım iki farklı zamansal eşleştirme biçimiyle uygulanmıştır. Ardışık yaklaşımda, hedef alım tarihinden geriye doğru en fazla 12 günlük süre içinde mevcut olan bir önceki Sentinel-1 görüntüsü kullanılmıştır. Lievens yaklaşımında ise Lievens vd. (2022) esas alınarak, hedef görüntü için 6, 12, 18 veya 24 gün önceki uygun Sentinel-1 görüntüleri referans olarak değerlendirilmiştir.

Yöntem C, Yöntem B'deki kısa dönemli değişimleri kış mevsimi boyunca biriktirerek mevsimsel bir Kar İndeksi (SI) oluşturmaktadır:

$$SI_{(t)} = SI_{(t-1)} + \Delta CR_{(t)} \quad (6)$$

İndeks, her kış mevsiminin başında dinamik kar öncesi referans kullanılarak SI = 0'dan başlatılmış ve yeni Sentinel-1 görüntülerinden hesaplanan ΔCR değerleri zaman içinde biriktirilmiştir. İki farklı birikim stratejisi uygulanmıştır: Pozitif Birikim yaklaşımında yalnızca pozitif çapraz-polarizasyon değişimleri indekse eklenmekte (SI += max(0, ΔCR)) ve pozitif değişimlerin kar birikimiyle ilişkili olduğu varsayılmıştır. Net Birikim yaklaşımında ise hem pozitif hem negatif değişimler indekse eklenmiş (SI += ΔCR); kar sıkışması veya erimeyle ilişkili olabilecek negatif değişimlerin de indekse yansımasına izin verilmiştir. İndeksin negatif değer almasını önlemek amacıyla alt sınır sıfır olarak belirlenmiştir ([SI = max(SI,0)]).

Kar örtüsünün kaybolduğu veya zaman serisinin kesintiye uğradığı durumlarda indeksin birikmeye devam etmesini önlemek amacıyla iki sıfırlama ölçütü uygulanmıştır. MGM kayıtlarında üst üste en az iki gün 0 cm kar derinliği

ölçüldüğünde SI sıfırlanmıştır. Ayrıca iki Sentinel-1 görüntüsü arasında 30 günden uzun veri boşluğu oluşması durumunda birikim yeniden SI = 0'dan başlatılmıştır.

3.3 Doğrulama Stratejisi: LOOCV

Model performansının istasyonlar arasında bağımsız olarak değerlendirilmesi amacıyla, istasyon bazında Birini Dışarıda Bırak Çapraz Doğrulama (LOOCV) yaklaşımı uygulanmıştır. Aynı istasyona ait gözlemlerin rastgele biçimde eğitim ve test kümelerine ayrılması, aynı konuma ait verilerin iki kümede de yer almasına ve model performansının iyimser tahmin edilmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle N meteoroloji istasyonu için N ayrı doğrulama adımı gerçekleştirilmiş; her adımda bir istasyon kalibrasyon dışında bırakılarak test istasyonu olarak kullanılmıştır. Doğrusal regresyonda bağımsız değişken olarak Yöntem A ve Yöntem B için ΔCR, Yöntem C için ise Kar İndeksi (SI) kullanılmıştır. Doğrusal regresyon katsayıları (eğim a ve kesişim b), kalan N−1 istasyondan elde edilen gözlemler kullanılarak tahmin edilmiştir:

$$SD_{tahmin} = a \cdot X + b \tag{7}$$

burada X, Yöntem A ve Yöntem B için ΔCR'yi, Yöntem C için ise SI değerini ifade etmektedir.

Elde edilen regresyon modeli, kalibrasyon dışında bırakılan istasyondaki kar derinliği değerlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kar derinliği negatif değer alamayacağından, negatif tahminler sıfıra eşitlenmiştir:

$$SD_{nihai} = max(a \cdot X + b,\ 0) \tag{8}$$

Tüm doğrulama adımlarından elde edilen gözlenen kar derinliği değerleri ($y_{gerçek}$) ve tahmin edilen değerler (y_{tahmin}) birleştirilerek modelin genel performansı değerlendirilmiştir. Kullanılan performans ölçütleri; Belirtme Katsayısı (R^2), Ortalama Karekök Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) olarak belirlenmiştir.

4. BULGULAR

Doğu Anadolu'daki dokuz meteoroloji istasyonunda Sentinel-1 verilerinden elde edilen kar derinliği tahminleri LOOCV yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Sabit kar öncesi referansa dayalı Yöntem A, kaydırmalı zamansal referansa dayalı Yöntem B ve mevsimsel birikim/Kar İndeksine dayalı Yöntem C'nin performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımlarının tahmin sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.1 Yöntem A: Sabit Kar Öncesi Referans

Yöntem A, kış dönemindeki çapraz polarizasyon oranını (CR), çok yıllı sabit bir kar öncesi referans değeriyle karşılaştırmaktadır. Referans değer, MGM kar derinliği kayıtlarında 0 cm olarak belirlenen kar öncesi tarihlere ait Sentinel-1 gözlemlerinden elde edilmiştir.

1 km² tampon bölge yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,190, RMSE ±39,6 cm ve MAE 28,7 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir. Tüm istasyonlara ait verilerin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen regresyon eğiminin negatif olması ise Lievens vd. (2019) tarafından bildirilen pozitif ilişkinin bu veri setinde gözlenmediğini göstermektedir. Doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = -1{,}36 \cdot \Delta CR + 43{,}91 \tag{9}$$

İstasyon düzeyindeki çapraz doğrulama sonuçları, dokuz istasyon arasında performans farklılıkları olduğunu göstermiştir. Regresyon eğimlerinin büyüklüğü ve işareti istasyonlara göre değişmiş ve ΔCR ile kar derinliği arasında istasyonlar genelinde tutarlı bir ilişki elde edilememiştir. Bazı istasyonlarda daha düşük RMSE değerleri elde edilmiştir. Örneğin, İstasyon 19255'te RMSE = ±18,8 cm (n = 93), İstasyon 19236'da ise RMSE = ±27,4 cm (n = 60) olarak hesaplanmıştır. Bu istasyonlardaki kar derinliği değerlerinin görece düşük ve değişim aralığının sınırlı olması, RMSE değerlerinin yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Buna karşılık, kar derinliği değişim aralığının daha geniş olduğu İstasyon 17777 ve İstasyon 17983'te RMSE değerleri sırasıyla ±54,1 cm (n = 70) ve ±51,1 cm (n = 80) olarak elde edilmiştir.

Yöntem A'nın tekil piksel yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,191, RMSE ±38,0 cm ve MAE 27,5 cm olarak hesaplanmıştır. Tüm istasyonlara ait tekil piksel verilerinin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = -0{,}20 \cdot \Delta CR + 44{,}04 \tag{10}$$

Tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımlarından elde edilen R^2, RMSE ve MAE değerlerinin birbirine yakın olması, mekânsal örnekleme yaklaşımındaki değişimin Yöntem A'nın genel tahmin performansında belirgin bir farklılık oluşturmadığını göstermektedir.

4.2 Yöntem B: Kaydırmalı Zamansal Referans

Yöntem B sabit bir mevsimsel referans yerine, kısa vadeli değişimleri belirlemek amacıyla ardışık veya zamansal olarak yakın Sentinel-1 görüntüleri arasındaki geri saçılım farkını kullanmaktadır.

Lievens yaklaşımındaki 6, 12, 18 veya 24 günlük kaydırmalı zaman aralıkları uygulandığında, tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımları arasında özellikle R^2 açısından farklılıklar gözlenmiş, ancak her iki yaklaşımda da R^2 düşük kalmıştır. Tampon bölge yaklaşımında genel R^2 değeri 0,186 olarak elde edilmiş; RMSE ±37,9 cm ve MAE 27,4 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir. Karşılık gelen regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = -1{,}34 \cdot \Delta CR + 43{,}82 \quad (11)$$

Tekil piksel yaklaşımında R^2 değeri 0,035'e düşerken, RMSE ±37,7 cm ile tampon bölge yaklaşımına oldukça yakın kalmıştır. R^2 değerindeki bu farklılık, kaydırmalı referans yaklaşımında mekânsal örnekleme biçiminin tahmin performansını etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, iki yaklaşımın RMSE değerlerinin birbirine yakın olması, tahmin hatası açısından belirgin bir farklılığa işaret etmemektedir.

Hedef görüntüden geriye doğru en fazla 12 günlük süre içerisinde mevcut olan bir önceki Sentinel-1 görüntüsünü kullanan Ardışık yaklaşım da Lievens yaklaşımına benzer sonuçlar vermiştir. Tampon bölge yaklaşımında R^2 0,185, RMSE ±38,0 cm ve MAE 27,5 cm olarak hesaplanmıştır. Karşılık gelen regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = -1{,}35 \cdot \Delta CR + 43{,}87 \quad (12)$$

Tekil piksel yaklaşımında ise R^2 0,032 ve RMSE ±37,8 cm olarak elde edilmiştir. Genel olarak Lievens ve Ardışık kaydırmalı referans yaklaşımları birbirine oldukça yakın performans göstermiştir. Her iki uygulamada da tampon bölge yaklaşımı tekil piksele göre daha yüksek R^2 değerleri vermiş, buna karşılık RMSE değerleri mekânsal örnekleme yaklaşımları arasında çok az değişmiştir.

4.3 Yöntem C: Mevsimsel Birikim/Kar İndeksi

Yöntem C, karın kış mevsimi boyunca kademeli olarak biriktiği varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle çapraz-polarizasyon oranındaki ardışık değişimler (ΔCR) zaman içinde biriktirilerek mevsimsel bir Kar İndeksi (SI) oluşturulmuştur. Kar öncesi dönemde SI değeri sıfır olarak kabul edilmiş ve her yeni Sentinel-1 görüntüsünden hesaplanan ΔCR değeri indekse eklenerek SI güncellenmiştir. Elde edilen SI değerleri daha sonra kar derinliği tahmininde kullanılmıştır. Kar örtüsünün kaybolduğu veya Sentinel-1 gözlemleri arasında uzun bir veri boşluğu oluştuğu durumlarda indeks, Bölüm 3.2'de tanımlanan kurallara göre sıfırlanmıştır.

Net Birikim stratejisinde pozitif ve negatif ΔCR değerleri Kar İndeksine dahil edilmiştir. 1 km² tampon bölge yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,185, RMSE ±35,4 cm ve MAE 26,4 cm olarak hesaplanmıştır. Bu RMSE değeri, Yöntem A ve Yöntem B'nin tampon bölge sonuçlarından daha düşüktür. Tüm istasyonlara ait verilerin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = -0{,}65 \cdot SI + 37{,}18 \quad (13)$$

Tekil piksel yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,143, RMSE ±35,5 cm ve MAE 26,3 cm olarak elde edilmiştir. Tüm istasyonlara ait tekil piksel verilerinin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen regresyon eğiminin pozitif olmasına karşın, LOOCV R^2 değerinin düşük kalması tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir. Doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = 0{,}23 \cdot SI + 35{,}65 \quad (14)$$

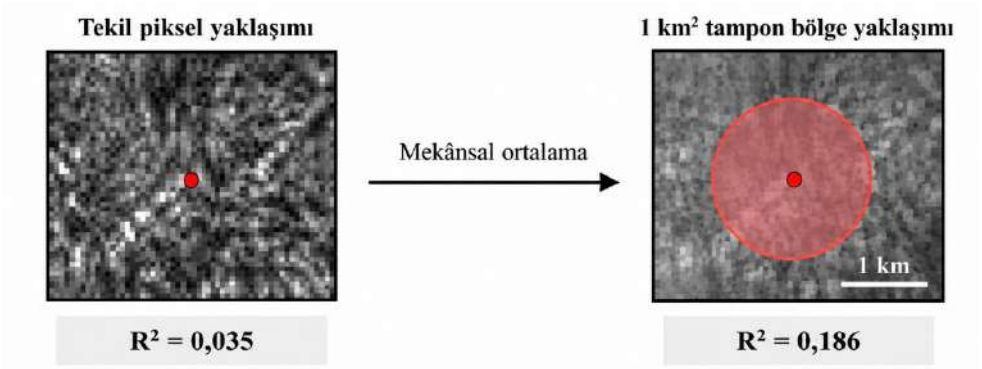
Pozitif Birikim stratejisinde, yalnızca pozitif ΔCR değerleri Kar İndeksine eklenmiş, negatif değişimler birikime dahil edilmemiştir. 1 km² tampon bölge yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,167, RMSE ±35,4 cm ve MAE 26,3 cm olarak hesaplanmıştır. Tüm istasyonlara ait verilerin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$SD = 0{,}24 \cdot SI + 36{,}33 \quad (15)$$

Tekil piksel yaklaşımında LOOCV sonucunda R^2 0,002, RMSE ±35,2 cm ve MAE 25,7 cm olarak elde edilmiştir. R^2 değerinin sıfıra çok yakın olması, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasında doğrusal bir ilişki elde edilemediğini göstermektedir. Net ve Pozitif Birikim stratejilerinin hata ölçütleri birbirine yakın olmakla birlikte, özellikle tekil piksel yaklaşımında R^2 değerleri arasında belirgin bir farklılık görülmüştür.

4.4 Mekânsal Örnekleme Yaklaşımlarının Karşılaştırması

Tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımlarının model performansı üzerindeki etkisi yöntemlere göre farklılık göstermiştir. Şekil 4, Yöntem B için iki mekânsal örnekleme yaklaşımından elde edilen sonuçları karşılaştırmaktadır. Kaydırmalı referans yaklaşımında belirtme katsayısı, tekil piksel yaklaşımında $R^2 = 0{,}035$ iken, 1 km² tampon bölge yaklaşımında $R^2 = 0{,}186$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Yöntem B'de tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımlarının R² değerleri açısından karşılaştırılması. Tampon bölge yaklaşımında daha yüksek R² elde edilmesi, mekânsal ortalamanın geri saçılım değerlerindeki yerel değişkenliği ve radar benek gürültüsünün etkisini azaltmasıyla ilişkili olabilir. Tekil piksel yaklaşımında geri saçılım değeri yalnızca istasyon koordinatına karşılık gelen bir pikselden elde edilirken, tampon bölge yaklaşımında 1 km²'lik alan içerisindeki doğrusal ölçekli geri saçılım değerleri ortalanmaktadır. Bu mekânsal ortalama, daha kararlı bir geri saçılım değerinin elde edilmesine katkı sağlamış olabilir.

Ancak bu etki tüm yöntemlerde aynı biçimde gözlenmemiştir. Yöntem A'da tekil piksel ve tampon bölge yaklaşımları birbirine oldukça yakın R² değerleri vermiştir (sırasıyla R² = 0,191 ve 0,190). Yöntem C'de ise mekânsal örnekleme yaklaşımının etkisi kullanılan birikim stratejisine göre değişmiştir. Net Birikim stratejisinde R² tekil piksel için 0,143, tampon bölge için 0,185 olarak elde edilirken, Pozitif Birikim stratejisinde bu değerler sırasıyla 0,002 ve 0,167 olmuştur.

Sonuç olarak, 1 km² tampon bölge yaklaşımı özellikle Yöntem B ve Yöntem C'nin Pozitif Birikim uygulamasında daha yüksek R² değerleri sağlamıştır. Bununla birlikte, tampon bölge yaklaşımında elde edilen en yüksek R² değerinin yaklaşık 0,19 düzeyinde kalması, LOOCV ile tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği değerleri arasındaki ilişkinin genel olarak zayıf olduğunu göstermektedir. Bu nedenle mekânsal ortalamanın bazı uygulamalarda R² değerini artırmasına karşın, kar derinliği tahmin performansında yeterli bir iyileşme sağlamadığı görülmüştür.

4.5 Regresyon Eğimlerinin Yorumlanması

Yöntem A ve Yöntem B'nin 1 km² tampon bölge uygulamalarından elde edilen regresyon eğimleri birbirine oldukça yakın değerler göstermiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Yöntem A ve Yöntem B'nin 1 km² tampon bölge uygulamalarından elde edilen regresyon eğimleri.

Yöntem	Mekânsal yaklaşım	Eğim
Yöntem A	1 km² tampon bölge	−1,36
Yöntem B – Lievens	1 km² tampon bölge	−1,34
Yöntem B – Ardışık	1 km² tampon bölge	−1,35

Bu yakın değerlere karşın, üç regresyon eğiminin de negatif olması dikkat çekicidir. Lievens vd. (2019) çapraz polarizasyon oranı ile kar derinliği arasında pozitif bir ilişki bildirmiştir. Bu çalışmada ise Yöntem A ve Yöntem B'nin tampon bölge uygulamalarında ilişkinin yönü negatif olarak elde edilmiştir.

Farklı referans yaklaşımlarında benzer negatif eğimlerin elde edilmesi, çalışma alanındaki radar geri saçılımının yalnızca kar derinliği değişimleriyle açıklanamadığını düşündürmektedir. Ayrıca bu uygulamalara ait LOOCV R² değerlerinin yaklaşık 0,19 düzeyinde kalması, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, çalışma alanında Sentinel-1 geri saçılımını kar derinliği dışında yüzey ve arazi özellikleri gibi diğer etkenlerin de etkilemiş olabileceğine işaret etmektedir.

4.6 Genel Performans Özeti

Çizelge 4'te test edilen yöntem ve mekânsal örnekleme yaklaşımlarına ait LOOCV performans ölçütleri ile tüm istasyon verilerinin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilen regresyon denklemleri birlikte verilmiştir.

Çizelge 4. Test edilen yöntemlere ait LOOCV performans ölçütleri ve regresyon denklemleri.

Model	Mekânsal yaklaşım	R^2	RMSE (cm)	MAE (cm)	Regresyon denklemi
Yöntem A - Sabit Referans	1 km² tampon bölge	0,190	±39,6	28,7	SD= −1,36·ΔCR+43,91
Yöntem A - Sabit Referans	Tekil piksel	0,191	±38,0	27,5	SD= −0,20·ΔCR+44,04
Yöntem B - Lievens Kaydırmalı	1 km² tampon bölge	0,186	±37,9	27,4	SD= −1,34·ΔCR+43,82
Yöntem B - Lievens Kaydırmalı	Tekil piksel	0,035	±37,7	27,2	SD= −0,70·ΔCR+43,86
Yöntem B - Ardışık Kaydırmalı	1 km² tampon bölge	0,185	±38,0	27,5	SD= −1,35·ΔCR+43,87
Yöntem B - Ardışık Kaydırmalı	Tekil piksel	0,032	±37,8	27,3	SD= −0,72·ΔCR+43,91
Yöntem C - Net Birikim	1 km² tampon bölge	0,185	±35,4	26,4	SD= −0,65·SI+37,18
Yöntem C - Net Birikim	Tekil piksel	0,143	±35,5	26,3	SD= 0,23· SI +35,65
Yöntem C - Pozitif Birikim	1 km² tampon bölge	0,167	±35,4	26,3	SD= 0,24· SI +36,33
Yöntem C - Pozitif Birikim	Tekil piksel	0,002	±35,2	25,7	SD= 0,53· SI +30,42

Not: R^2, RMSE ve MAE değerleri istasyon bazlı LOOCV sonucunda elde edilen tahminler ile gözlenen kar derinliği değerlerinden hesaplanmıştır. Regresyon denklemleri ise tüm istasyonlara ait verilerin bir araya getirilerek fit edilmesiyle elde edilmiştir.

Genel olarak, tüm uygulamalarda LOOCV R^2 değerlerinin 0,19'un altında kalması, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir. Yöntem C, Yöntem A ve Yöntem B'ye göre daha düşük RMSE ve MAE değerleri vermiş, ancak hata ölçütlerindeki bu azalmaya R^2 değerlerinde belirgin bir artış eşlik etmemiştir. Mekânsal örnekleme yaklaşımının etkisi yöntemlere göre değişmiştir. Yöntem A'da tekil piksel ve tampon bölge sonuçları birbirine oldukça yakınken, Yöntem B ve Yöntem C'nin Pozitif Birikim uygulamasında tampon bölge yaklaşımı daha yüksek R^2 değerleri vermiştir. Buna karşılık RMSE ve MAE değerleri tekil piksel ve tampon bölge yaklaşımları arasında genel olarak birbirine yakın kalmıştır.

Yöntem A ve Yöntem B'nin tampon bölge uygulamalarında regresyon eğimlerinin negatif olması, Lievens vd. (2019) tarafından bildirilen pozitif ilişkiden farklı bir davranış göstermektedir. Elde edilen düşük R^2 değerleri ve değişken regresyon eğimleri birlikte değerlendirildiğinde, Sentinel-1 C-bandı çapraz polarizasyon yaklaşımının bu çalışmada incelenen istasyon ve yüzey koşullarında kar derinliği tahmini açısından sınırlı performans gösterdiği görülmektedir.

4.7 Sonuçları Etkileyen Faktörlerin Değerlendirilmesi

LOOCV sonuçlarında düşük R^2 değerlerinin elde edilmesi ve regresyon eğimlerinin yönünün istasyonlara göre değişmesi, Sentinel-1 tabanlı kar derinliği tahminlerini etkileyebilecek diğer faktörlerin de değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Bu amaçla, ΔCR ile gözlenen kar derinliği arasındaki ilişki istasyon bazında incelenmiş; ayrıca algılayıcı özellikleri, istasyon konumları ve arazi koşullarının sonuçlar üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir.

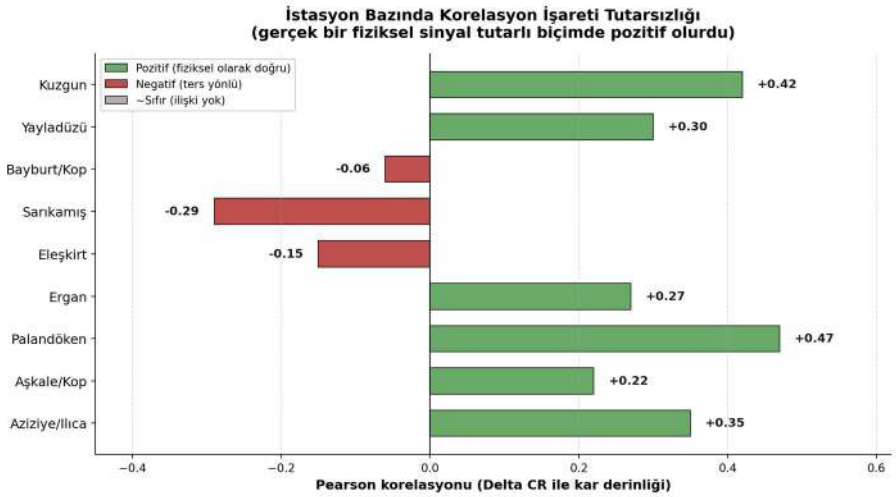
4.7.1 İstasyon Bazında ΔCR–Kar Derinliği İlişkisi

Lievens vd. (2019) tarafından önerilen yaklaşımda, kar derinliğindeki artışla birlikte çapraz polarizasyon oranının artması ve dolayısıyla kar derinliği ile ΔCR arasında pozitif bir ilişki oluşması beklenmektedir. Ancak bu çalışmada tüm istasyon verilerinden elde edilen bazı regresyon eğimlerinin negatif olduğu görülmüştür. Örneğin, Yöntem A ve Yöntem B'nin tampon bölge uygulamalarında eğimler sırasıyla −1,36 ve −1,34 olarak elde edilmiştir.

İlişkinin istasyonlar arasındaki değişimini incelemek amacıyla Yöntem A'nın 1 km²'lik tampon bölge uygulamasından elde edilen ΔCR değerleri kullanılarak, her istasyon için ΔCR ile gözlenen kar derinliği arasındaki Pearson korelasyon katsayısı hesaplanmıştır (Şekil 5). Altı istasyonda pozitif, üç istasyonda ise negatif korelasyon elde edilmiştir. Pozitif korelasyon katsayıları 0,22 ile 0,47 arasında değişirken, negatif korelasyonlar −0,06 ile −0,29 arasında bulunmuştur. Bayburt/Kop istasyonunda elde edilen −0,06 değeri ilişkinin sıfıra yakın olduğunu göstermektedir.

En yüksek pozitif korelasyon Palandöken (r = 0,47) ve Kuzgun (r = 0,42) istasyonlarında, en yüksek negatif korelasyon ise Sarıkamış'ta (r = −0,29) elde edilmiştir. Korelasyon katsayılarının istasyonlar arasında işaret ve büyüklük bakımından değişmesi, ΔCR ile kar derinliği arasındaki ilişkinin çalışma alanındaki istasyonlarda tutarlı olmadığını göstermektedir.

Korelasyon yönündeki bu farklılıklar, geri saçılım tepkisinin yalnızca kar derinliğine bağlı olmadığını düşündürmektedir. İstasyon çevresindeki yüzey özellikleri, mevsimsel bitki örtüsü değişimleri ve donmuş zemin koşulları, gözlenen farklılıklara katkıda bulunabilecek olası faktörler olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5. İstasyon bazında ΔCR ile gözlenen kar derinliği arasındaki Pearson korelasyon katsayıları.

4.7.2 Algılayıcı ve Arazi Kısıtları

Test edilen yöntem ve mekânsal örnekleme yaklaşımlarında en yüksek LOOCV R^2 değerinin yaklaşık 0,19 düzeyinde kalması, Sentinel-1 tabanlı kar derinliği tahminlerinin çalışma alanında sınırlı performans gösterdiğini ortaya koymuştur. C-bandı radar sinyalinin kar özelliklerine duyarlılığının yanı sıra, radar görüntüleme geometrisi, yüzey özellikleri ve noktasal yersel ölçümler ile uydu gözlemlerinin temsil ettiği alan arasındaki mekânsal farklılıklar sonuçları etkileyebilecek faktörler arasındadır.

İstasyon konumlarının geri saçılım zaman serileri üzerindeki olası etkisini incelemek amacıyla, 1 Ocak 2017–31 Aralık 2018 dönemine ait σ^0_{VV}, σ^0_{VH} ve VH/VV oranları Palandöken ve Aziziye/Ilıca istasyonları ile Alpler (46,4940° K, 8,0915° D) ve Ağrı Dağı'nda (39,7113° K, 44,3009° D) seçilen noktasal konumlar için karşılaştırılmıştır. Alpler, Lievens vd. (2019, 2022) çalışmalarında Sentinel-1 tabanlı kar derinliği yaklaşımının değerlendirildiği dağlık bölgelerden biri olması; Ağrı Dağı ise çalışma alanına yakın ve karmaşık arazi koşullarına sahip olması nedeniyle karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Tüm konumlarda geri saçılım zaman serileri aynı işlem yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Dış referans noktalarında VH/VV oranında daha belirgin mevsimsel değişimler gözlenirken, Palandöken'de daha düzensiz, Aziziye/Ilıca'da ise daha değişken bir zaman serisi elde edilmiştir. Bu farklılıklar, farklı arazi ve yüzey koşullarındaki geri saçılım davranışlarının aynı olmayabileceğine işaret etmektedir.

Meteoroloji istasyonlarının uydu tabanlı kar derinliği çalışmalarında referans veri olarak kullanılması, istasyon konumunun çevresindeki araziyi ne ölçüde temsil ettiğinin de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Özellikle karmaşık topoğrafya, yerel yüzey özellikleri, radar görüntüleme geometrisi ve kar örtüsünün rüzgârla yeniden dağılımı, noktasal kar derinliği ölçümleri ile Sentinel-1 geri saçılımı arasındaki ilişkiyi etkileyebilir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda yersel ölçüm noktalarının çevresel ve topografik özelliklerinin radar görüntüleme geometrisiyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Doğu Anadolu'da Sentinel-1 SAR verilerinden kar derinliği tahmini için Python ve GEE tabanlı bir işlem akışı geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. 2017-2025 döneminde dokuz meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler kullanılarak sabit kar öncesi referans, kaydırmalı zamansal referans ve mevsimsel birikim/Kar İndeksi olmak üzere üç farklı tahmin yaklaşımı tekil piksel ve 1 km² tampon bölge yaklaşımlarında istasyon bazlı LOOCV ile değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Test edilen tüm yöntemlerde LOOCV R^2 değerleri düşük kalmış ve en yüksek değer yaklaşık 0,19 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, tahmin edilen ve gözlenen kar derinliği arasındaki ilişkinin genel olarak zayıf olduğunu göstermiştir.
- Yöntem C (Mevsimsel Birikim/Kar İndeksi), yaklaşık ±35 cm RMSE ile Yöntem A ve Yöntem B'ye göre daha düşük tahmin hataları vermiştir. Bununla birlikte, hata değerlerindeki azalmaya R^2 değerlerinde belirgin bir artış eşlik etmemiştir.
- Mekânsal örnekleme yaklaşımının etkisi kullanılan yönteme göre değişmiştir. Yöntem A'da tekil piksel ve 1 km² tampon bölge sonuçları birbirine yakınken, Yöntem B ve Yöntem C'nin bazı uygulamalarında tampon bölge

yaklaşımı daha yüksek R^2 değerleri sağlamıştır. Buna karşılık RMSE ve MAE değerleri iki mekânsal yaklaşım arasında genel olarak birbirine yakın kalmıştır.

- Lievens vd. (2019) tarafından bildirilen pozitif ilişkinin aksine, Yöntem A ve Yöntem B'nin bazı uygulamalarında negatif regresyon eğimleri elde edilmiştir. İstasyon bazındaki ΔCR–kar derinliği korelasyonlarının da işaret ve büyüklük bakımından değişmesi, Sentinel-1 geri saçılımının kar derinliğine verdiği tepkinin istasyonlar arasında tutarlı olmadığını göstermiştir.
- Ham geri saçılım zaman serilerinin incelenmesinde Ağrı Dağı ve Alpler'deki dış referans noktalarında daha belirgin mevsimsel değişimler gözlenirken, Palandöken ve özellikle Aziziye/Ilıca istasyonlarında daha düzensiz zaman serileri elde edilmiştir. Bu farklılıklar, istasyon çevresindeki yüzey ve arazi özellikleri ile radar görüntüleme geometrisinin geri saçılım davranışı üzerindeki olası etkisine işaret etmektedir.

Sonuçlar, Lievens vd. (2019) tarafından önerilen Sentinel-1 çapraz polarizasyon yaklaşımının bu çalışmada incelenen Doğu Anadolu istasyonlarına doğrudan uygulanmasının sınırlı sonuç verdiğini göstermiştir. Bununla birlikte geliştirilen işlem akışı; yörünge ve geçiş yönüne göre görüntü seçimi, geri saçılım değerlerinin doğrusal ölçekte ortalanması, ıslak kar koşullarının belirlenmesi ve istasyon bazlı LOOCV değerlendirmesini bir araya getirmektedir.

Gelecek çalışmalarda, istasyon çevresindeki topoğrafya ve arazi örtüsünün daha ayrıntılı değerlendirilmesi, farklı mekânsal örnekleme ölçeklerinin incelenmesi ve daha geniş yersel kar gözlem ağlarının kullanılması önerilmektedir. Ayrıca farklı radar frekanslarının ve fiziksel kar parametrelerini içeren modelleme yaklaşımlarının kar derinliği tahminine katkısı araştırılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmada kullanılan meteorolojik verilerin temini için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Akyürek, Z. ve Şorman, A. A., 2002. Monitoring snow-covered areas using NOAA-AVHRR data in the eastern part of Turkey. Hydrological Sciences Journal, 47(2), syf: 263-272.

Akyürek, Z., Kuter, S., Karaman, Ç. H. ve Akpınar, B., 2023. Understanding the Snow Cover Climatology over Turkey from ERA5-Land Reanalysis Data and MODIS Snow Cover Frequency Product. Geosciences, 13(10), 311.

Bulovic, N. vd., 2024. Evaluating the Performance of Sentinel-1 SAR Derived Snow Depth Retrievals Over the Extratropical Andes Cordillera. Water Resources Research, 60, e2024WR037766.

Lemos, A., Riihelä, A. ve Moisander, M., 2025. Snow depth derived from Sentinel-1 compared to in situ observations in northern Finland. The Cryosphere, 19, syf: 3939-3947.

Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H. P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I. vd., 2019. Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. Nature Communications, 10(1), 4629.

Lievens, H., Brangers, I., Marshall, H. P., Jonas, T., Olefs, M. ve De Lannoy, G., 2022. Sentinel-1 snow depth retrieval at sub-kilometer resolution over the European Alps. The Cryosphere, 16(5), syf: 1593-1617.

Nagler, T. ve Rott, H., 2000. Retrieval of wet snow by means of SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5), syf: 2154-2165.

Tekeli, A. E. ve Şensoy, A., 2006. Accuracy assessment of MODIS daily snow albedo retrievals with in situ measurements in Karasu basin, Turkey. Hydrological Processes, 20(4), syf: 705-721.

EGE VE GÜNEY MARMARA'DA ZEYTİN ALANLARININ 2005-2025 DÖNEMİNDEKİ MEKANSAL DAĞILIMININ RASTGELE ORMAN VE GLOBAL SHAP İLE ANALİZİ

Elif Özlem YILMAZ[1], Muhammed Yusuf ÖZTÜRK[2], Alihan TEKE[3], Taşkın KAVZOĞLU[4]

[1]Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, eoyilmaz@gtu.edu.tr
[2]Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, m.ozturk2020@gtu.edu.tr
[3]Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, a.teke2020@gtu.edu.tr
[4]Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, kavzoglu@gtu.edu.tr

ÖZET

Zeytin, Akdeniz Havzası'nda ekonomik, ekolojik ve kültürel açıdan önemli bir tarımsal üründür ve Türkiye'nin tarımsal üretiminde önemli bir yere sahiptir. Zeytin alanlarının uzun dönemli mekânsal değişiminin izlenmesi, sürdürülebilir tarımsal planlama ve arazi yönetimi açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda, Ege ve Güney Marmara bölgelerinde yer alan Aydın, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, İzmir, Manisa ve Muğla illerindeki zeytin alanlarının 2005 ve 2025 yıllarındaki mekânsal dağılımı Landsat uydu görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir. İlkbahar ve sonbahar dönemlerine ait çok mevsimli verilerden spektral bantlar ile bitki örtüsü ve nem özelliklerini temsil eden indisler oluşturulmuştur. Arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıflandırması piksel tabanlı Rastgele Orman algoritmasıyla mera-orman, zeytin, tarım alanı, şehir, toprak ve su olmak üzere altı sınıf için gerçekleştirilmiştir. Model, 2005 ve 2025 yıllarında sırasıyla %88,65 ve %89,08 genel doğruluk değerlerine ulaşmıştır. Zeytin sınıfının F1-skoru 2005 yılında 0,8458, 2025 yılında ise 0,7817 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre zeytin alanlarının çalışma alanındaki oranı %20,73'ten %19,14'e gerilemiştir. Modelin zeytin sınıfına ilişkin kararlarını açıklamak amacıyla global SHAP analizi uygulanmıştır. 2005 yılında ilkbahar aylarına ait NIR ve MNDWI spektral değişkenleri öne çıkarken, 2025 yılında sonbahar aylarına ait NDVI ile ilkbahar aylarına ait yeşil ve kırmızı bantların daha etkili olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, çok mevsimli Landsat verilerinin Rastgele Orman ve açıklanabilir yapay zeka ile birlikte kullanımının, zeytin alanlarının mekânsal değişiminin ve model kararlarını yönlendiren spektral özelliklerin değerlendirilmesinde etkili bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: açıklanabilir yapay zeka, Rastgele Orman, SHAP, uzaktan algılama, zeytin alanları.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF OLIVE ORCHARDS IN THE AEGEAN AND SOUTHERN MARMARA REGIONS DURING THE 2005–2025 PERIOD USING RANDOM FOREST AND GLOBAL SHAP

Olive is an economically, ecologically, and culturally important agricultural crop in the Mediterranean Basin and holds a significant place in Türkiye's agricultural production. Monitoring the long-term spatial changes in olive-growing areas is important for sustainable agricultural planning and land management. In this context, the spatial distribution of olive-growing areas in 2005 and 2025 was analyzed using Landsat satellite imagery for the provinces of Aydın, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, İzmir, Manisa, and Muğla, located in the Aegean and Southern Marmara regions. Multi-seasonal data from spring and autumn were used to derive spectral bands and indices representing vegetation and moisture characteristics. Pixel-based land use/land cover classification was performed using the random forest algorithm for six classes: grassland-forest, olive, agricultural land, urban area, bare soil, and water. The model achieved overall accuracies of 88.65% and 89.08% for 2005 and 2025, respectively. The F1-score for the olive class was 0.8458 in 2005 and 0.7817 in 2025. According to the results, the proportion of olive orchards decreased from 20.73% to 19.14% in the study area. Global SHAP analysis was applied to explain the model decisions for the olive class. In 2005, spring NIR and MNDWI variables were among the most influential features, whereas autumn NDVI and spring green and red bands showed greater influence in 2025. The results demonstrate that the combined use of multi-seasonal Landsat data, random forest, and explainable artificial intelligence provides an effective approach for assessing both the spatial changes in olive-growing areas and the spectral characteristics underlying model decisions.

Keywords: explainable artificial intelligence, olive-growing areas, Random Forest, remote sensing, SHAP.

1. GİRİŞ

Zeytin (*Olea europaea L.),* ekonomik değeri, ekolojik uyum kapasitesi ve Akdeniz toplumlarındaki köklü kültürel geçmişi nedeniyle Akdeniz Havzası tarımsal üretim sistemlerinin temel ürünlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Zeytinin, sıcak ve kurak yazlar ile yağışlı kışların hakim olduğu Akdeniz iklim koşullarına yüksek adaptasyon

kapasitesi göstermesi, türün bölgesel tarımsal üretim sistemlerindeki stratejik konumunu pekiştirmektedir (Vossen, 2007; Moriondo vd., 2015). İklim değişikliğiyle ilişkili sıcaklık artışları, yağış rejimindeki değişimler, su stresi ve tarımsal arazi kullanımındaki dönüşümler, zeytin yetiştiriciliğinin mekânsal ve zamansal örüntülerinde değişimlere yol açabilmektedir (Ponti vd., 2014; Sevim vd., 2022). Bu nedenle, zeytin alanlarının uzun dönemli olarak izlenmesi ve arazi örtüsü değişimlerinin ortaya konulması, sürdürülebilir tarımsal planlama ve kaynak yönetimi açısından önem taşımaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda, uzaktan algılama teknolojileri geniş alanların düzenli ve tekrarlanabilir biçimde izlenmesine olanak sağlaması ve uzun dönemli veri arşivleri sunması sayesinde tarımsal alanların zamansal değişiminin değerlendirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Özellikle, Landsat uydu serisi, uzun dönemli arşiv yapısı, düzenli tekrar geçiş süresi ve çok bantlı spektral özellikleri sayesinde arazi örtüsü/arazi kullanımı değişimlerinin farklı yıllar arasında karşılaştırılmasına imkan sağlamaktadır. Piksel tabanlı sınıflandırma yaklaşımları ise uydu görüntülerindeki spektral bilgilerin doğrudan değerlendirilmesine olanak tanımakta ve geniş alanların sınıflandırılmasında uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır (Myint vd., 2011). Bu nedenle, spektral ve zamansal özelliklerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren zeytin sınıflandırması gibi uygulamalarda, yüksek boyutlu verileri işleyebilen ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilen makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Zeytin alanlarının uydu görüntüleri aracılığıyla haritalanmasına yönelik çalışmalar, farklı mekânsal ve zamansal çözünürlüklere sahip uzaktan algılama verilerinin ve makine öğrenmesi yöntemlerinin bu amaçla etkin biçimde kullanılabildiğini göstermektedir. Lin vd. (2021), Fas'taki zeytinliklerin yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve derin öğrenme yöntemleriyle haritalanmasını incelemiş ve özellikle küçük taç yapısına sahip zeytin ağaçlarının belirlenmesinde mekânsal çözünürlüğün ve model aktarılabilirliğinin önemini ortaya koymuştur. Osa vd. (2023), zeytinliklerin belirlenmesi amacıyla zamansal rastgele orman modelini Çok Katmanlı Algılayıcı ve Tek Sınıflı Destek Vektör Makinesi sınıflandırıcılarıyla birleştiren çok aşamalı bir yaklaşım geliştirmiş ve çok zamanlı spektral bilginin zeytin alanlarının diğer bitki örtüsü sınıflarından ayrılmasındaki katkısını göstermiştir. Benzer şekilde, Abubakar vd. (2023), Sentinel-2 zaman serilerinden türetilen fenolojik metrikleri rastgele orman algoritmasıyla kullanarak bahçe, bağ ve zeytin alanlarının ayrımını gerçekleştirmiş ve fenolojik özelliklerin zeytin sınıfının belirlenmesinde ayırt edici bilgi sağladığını bildirmiştir. Gutiérrez-Cabrera vd. (2025) ise çok zamanlı Sentinel-2 verilerinden elde edilen NDVI bilgisi ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak sulanan ve yağışa bağımlı zeytinliklerin ayrımına odaklanmış ve zamansal vejetasyon dinamiklerinin sulama durumunun belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar, zeytin alanlarının belirlenmesinde yalnızca spektral bilginin değil, mevsimsel ve fenolojik değişkenliğin de önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Rastgele orman algoritması, yüksek boyutlu uzaktan algılama verilerini işleyebilmesi, doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi ve farklı veri yapılarına karşı dayanıklı performans sunması nedeniyle arazi örtüsü sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Belgiu ve Drăgut, 2016; Kavzoglu vd., 2025; Teke ve Kavzoglu, 2024). Bununla birlikte, bir sınıflandırma modelinin yalnızca genel doğruluk veya sınıf bazlı performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmesi, model kararlarının hangi spektral ve mevsimsel özelliklere dayandığının anlaşılması açısından yeterli değildir. Özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan karar mekanizmalarına sahip makine öğrenmesi modellerinde bu durum, model çıktılarının yorumlanabilirliğini ve bilimsel şeffaflığını sınırlandırabilmektedir (Kavzoglu ve Teke, 2022). Bu sınırlılığın giderilmesi için geliştirilen açıklanabilir yapay zekâ yöntemleri, model tahminlerinin altında yatan değişken katkılarının nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemlerden biri olan SHapley Additive exPlanations (SHAP), Shapley değerlerini temel alarak girdi değişkenlerinin model tahminlerine katkısını hesaplamakta ve modelin küresel karar davranışının yorumlanmasına yönelik bir çerçeve sunmaktadır (Lundberg ve Lee, 2017). Böylece spektral bantların, spektral indislerin ve farklı mevsimlere ait değişkenlerin sınıflandırma kararlarına olan göreli katkıları belirlenebilmektedir.

Literatürde zeytin alanlarının sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların önemli bir bölümü sınıflandırma doğruluğunun artırılması, mekânsal dağılımın belirlenmesi veya fenolojik özelliklerin ayırt ediciliğinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Model kararlarının hangi spektral ve mevsimsel değişkenler tarafından yönlendirildiğinin açıklanmasına yönelik araştırmalar ise sınırlıdır. Açıklanabilir yapay zeka yöntemlerinin zeytin araştırmalarındaki kullanımına örnek olarak, Costanza vd. (2025) Sentinel-2 verileri ve SHAP yaklaşımını kullanarak zeytin ağaçlarında klorofil floresansı tahminlerini açıklamış ve özellikle kırmızı kenar (red-edge) ile yakın kızılötesi bölgedeki spektral bilgilerin model tahminlerinde önemli rol oynadığını belirlemiştir. Ancak, söz konusu çalışma fizyolojik bir değişkenin tahminine odaklanmaktadır. Farklı yıllara ait arazi örtüsü sınıflandırmalarında zeytin sınıfına yönelik model kararlarının spektral ve mevsimsel düzeyde karşılaştırmalı olarak açıklanması ise literatürde daha sınırlı ele alınmıştır. Bu doğrultuda sunulan çalışmada, Türkiye'nin zeytin üretiminin yoğunlaştığı Ege ve Güney Marmara bölgelerinde yer alan Aydın, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, İzmir, Manisa ve Muğla illerinde 2005 ve 2025 yıllarına ait arazi örtüsü/arazi kullanımı dağılımlarının piksel tabanlı rastgele orman algoritması ile sınıflandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, rastgele orman modelinin zeytin sınıfına ilişkin kararlarında etkili olan spektral ve mevsimsel değişkenlerin global SHAP analizi ile belirlenmesi ve göreli katkılarının yorumlanması hedeflenmiştir. Böylece çalışma, zeytin alanlarının iki farklı dönemdeki mekânsal dağılımının belirlenmesinin yanı sıra model karar mekanizmasının dönemler arasında nasıl farklılaştığının açıklanmasına yönelik bütünleşik bir değerlendirme sunmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Çalışma alanı, Türkiye'de zeytin yetiştiriciliğinin yoğun olarak gerçekleştirildiği Ege ve Güney Marmara bölgelerinde yer alan Aydın, Balıkesir, Bursa, Çanakkale, İzmir, Manisa ve Muğla illerinin birleşik sınırlarından oluşturulmuştur (Şekil 1). Yaklaşık 81.203 km² büyüklüğündeki çalışma alanı, farklı iklim, topoğrafya, tarımsal kullanım ve doğal bitki örtüsü koşullarını birlikte içermesi nedeniyle zeytin alanlarının geniş ölçekte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Söz konusu iller aynı zamanda Türkiye'de zeytin üretiminin yoğunlaştığı başlıca alanları temsil etmektedir. Çalışma alanına ait il sınırları Harita Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Türkiye Mülki İdare Sınırları veri setinden temin edilmiş ve ilgili illere ait geometriler birleştirilerek tek bir bütünleşik çalışma alanı oluşturulmuştur.



Şekil 1. Balıkesir, Bursa, Çanakkale, İzmir, Aydın, Manisa ve Muğla illerini içeren çalışma alanı.

Çalışmada 2005 ve 2025 yıllarındaki arazi örtüsü/arazi kullanımı dağılımlarının karşılaştırılması amacıyla Landsat Collection 2 Level-2 Surface Reflectance ürünlerinden yararlanılmış ve analizler 30 m mekânsal çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS ve Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 sensörleri arasındaki ortak spektral bantlar mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi (NIR), kısa dalga kızılötesi 1 (SWIR1) ve kısa dalga kızılötesi 2 (SWIR2) olarak belirlenmiştir. Zeytin ağaçlarının fenolojik ve spektral değişimlerini temsil etmek amacıyla ilkbahar (1 Nisan–30 Haziran) ve sonbahar (1 Eylül–30 Kasım) dönemleri için ayrı ayrı medoid tabanlı kompozit görüntüler oluşturulmuştur. Medoid yaklaşımı, ilgili zaman aralığındaki çoklu gözlemler arasından spektral özellikleri ortanca davranışa en yakın gerçek piksel değerinin seçilmesine dayanmaktadır (Flood, 2013). Bulut ve gölge maskesi sonrasında oluşan veri boşlukları, ikinci aşamada oluşturulan medoid kompozitlerle tamamlanmıştır. İlkbahar ve sonbahar kompozitleri daha sonra bant düzeyinde birleştirilerek tek birçok mevsimli veri seti oluşturulmuştur. Ayrıca, spektral bantların yanı sıra normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), normalize edilmiş fark nem indeksi (normalized difference moisture index, NDMI), normalize edilmiş fark yapılaşma indeksi (normalized difference built-up index, NDBI) ve modifiye edilmiş normalize edilmiş fark su indeksi (modified normalized difference water index, MNDWI) her iki mevsim için hesaplanarak sınıflandırma veri setine dahil edilmiştir. Bu sayede bitki örtüsü yoğunluğu, nem koşulları, yapılaşmış yüzeyler ve su alanlarına ilişkin spektral bilgiler modele aktarılmıştır.

3. METODOLOJİ

3.1. Piksel Tabanlı Rastgele Orman Sınıflandırması

Çalışmada, 2005 ve 2025 yıllarına ait arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıflarının belirlenmesi amacıyla piksel tabanlı rastgele orman algoritması kullanılmıştır. Rastgele orman, çok sayıda bağımsız karar ağacının bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve sınıflandırma kararını ağaçların çoğunluk oylamasına göre belirleyen topluluk öğrenme tabanlı bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Breiman, 2001). Algoritma, her bir karar ağacının oluşturulması sırasında eğitim

verilerinden ve özellik uzayından rastgele alt örnekler seçerek ağaçlar arasındaki korelasyonu azaltmakta ve aşırı öğrenme riskinin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır (Belgiu ve Drăgut, 2016). Bu özellikleri nedeniyle rastgele orman, çok boyutlu ve heterojen uzaktan algılama verilerinin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sınıflandırma sürecinde her bir piksel, ilkbahar ve sonbahar dönemlerine ait görünür bölge, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantlar ile türetilen spektral indisler kullanılarak temsil edilmiştir. Böylece, modelin yalnızca tek bir döneme ait spektral özelliklerden değil, zeytin ve diğer bitki örtüsü sınıflarının yıl içerisindeki fenolojik farklılıklarından da yararlanması sağlanmıştır. Sınıflandırma işlemi sonucunda mera-orman, zeytin, tarım alanı, şehir, toprak ve su olmak üzere altı arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıfına ait tematik haritalar üretilmiştir.

Rastgele orman modeliyle üretilen sınıflandırma sonuçlarının performansı, referans veriler ile model tahminleri arasındaki uyum temelinde değerlendirilmiştir. Bu amaçla genel doğruluk, Kappa katsayısı, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru ölçütleri kullanılmıştır. Genel doğruluk, doğru sınıflandırılan piksellerin toplam piksel sayısına oranını ifade ederken, kesinlik belirli bir sınıfa atanan piksellerin ne kadarının doğru sınıflandırıldığını göstermektedir. Duyarlılık ise ilgili sınıfa gerçekten ait olan piksellerin model tarafından hangi oranda doğru tespit edildiğini ifade etmektedir. F1-skoru, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalaması olarak hesaplanmakta ve özellikle sınıf bazlı performansın dengeli biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Kappa katsayısı ise gözlenen sınıflandırma başarısını rastlantısal uyumdan arındırarak değerlendirmektedir.

3.2. Açıklanabilir Yapay Zeka

Rastgele orman modelinin zeytin sınıfına ilişkin karar mekanizmasının açıklanması amacıyla SHAP yöntemi kullanılmıştır. SHAP, işbirlikçi oyun teorisindeki Shapley değerlerine dayanan ve her bir girdi değişkeninin model tahmini üzerindeki katkısını nicel olarak ortaya koyan bir açıklanabilir yapay zeka yöntemidir (Lundberg ve Lee, 2017). Yöntem, model girdilerinin farklı kombinasyonlarını dikkate alarak her bir değişkenin tahmine yaptığı marjinal katkıyı hesaplamakta ve böylece model davranışının yorumlanmasına olanak sağlamaktadır (Ozupek vd., 2025). Bu çalışmada, SHAP analizi, rastgele orman modelinin zeytin sınıfına yönelik kararlarında etkili olan spektral ve mevsimsel değişkenlerin global önem düzeylerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Global SHAP yaklaşımı sayesinde tekil piksel tahminlerinden ziyade modelin veri setinin tamamındaki genel karar davranışı değerlendirilmiştir. Değişkenlerin SHAP değerlerinin dağılımları beeswarm grafikleriyle incelenmiştir. Böylece, hangi spektral bantların ve indislerin zeytin sınıfının tahmininde daha yüksek katkıya sahip olduğu belirlenmiştir. SHAP değerlerinin büyüklüğü değişkenin model kararındaki etkisinin derecesini, işareti ise söz konusu değişkenin tahmini pozitif veya negatif yönde etkilediğini göstermektedir. 2005 ve 2025 yılları için global SHAP analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve iki dönemde zeytin sınıfının belirlenmesinde öne çıkan değişkenler karşılaştırılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

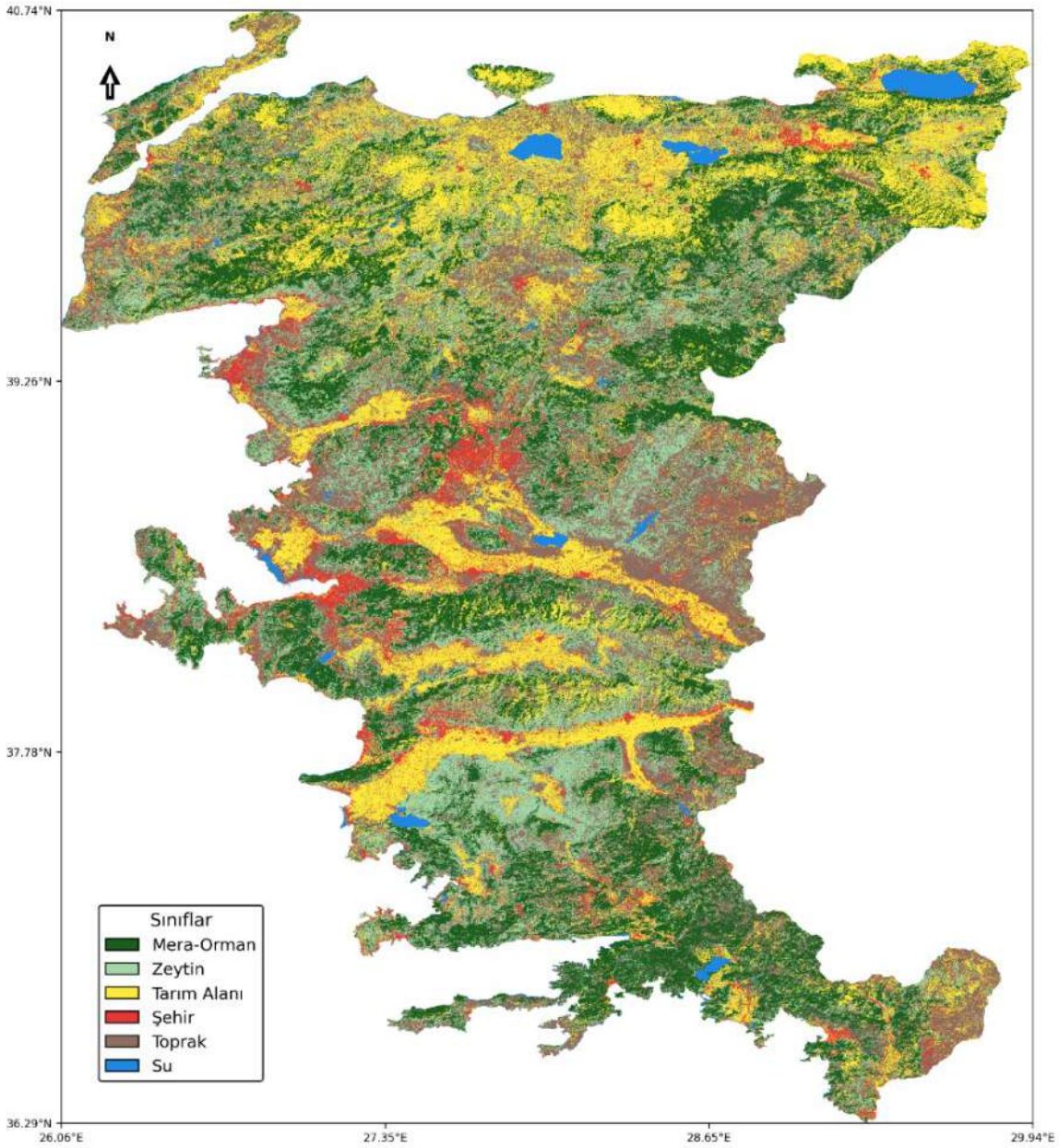
4.1. Sınıflandırma Performansı

2005 ve 2025 yıllarına ait Landsat verilerinin piksel tabanlı rastgele orman algoritmasıyla sınıflandırılması sonucunda; 2005 yılında %88,65 genel doğruluk ve 0,8583 Kappa, 2025 yılında ise %89,08 genel doğruluk ve 0,8682 Kappa değerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, farklı dönemlere ait Landsat verileri kullanılmasına rağmen modelin çalışma alanındaki genel arazi örtüsü/arazi kullanımı yapısını benzer doğruluk düzeylerinde temsil edebildiğini göstermektedir. Genel doğruluk değerleri iki yıl arasında oldukça yakın olmakla birlikte, sınıf bazlı performans ölçütleri incelendiğinde farklı arazi örtüsü sınıflarının dönemlere göre farklı sınıflandırma davranışları sergilediği görülmektedir. Bu nedenle mera-orman, zeytin, tarım alanı, şehir, toprak ve su sınıflarının kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru değerleri birlikte değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. 2005 ve 2025 yılları için Rastgele Orman modelinin sınıf bazlı doğruluk sonuçları.

Sınıf	2005			2025		
	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skoru	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skoru
Mera-Orman	0,8162	0,6938	0,7500	0,7417	0,6611	0,6991
Zeytin	0,8037	0,8927	0,8458	0,7820	0,7815	0,7817
Tarım Alanı	0,9049	0,9094	0,9072	0,9361	0,9444	0,9403
Şehir	0,8398	0,7783	0,8079	0,8949	0,9394	0,9166
Toprak	0,8327	0,8433	0,8380	0,9039	0,9144	0,9091
Su	0,9994	0,9978	0,9986	0,9989	0,9961	0,9975
Genel doğruluk (%)		88,65			89,08	
Kappa		0,8583			0,8682	

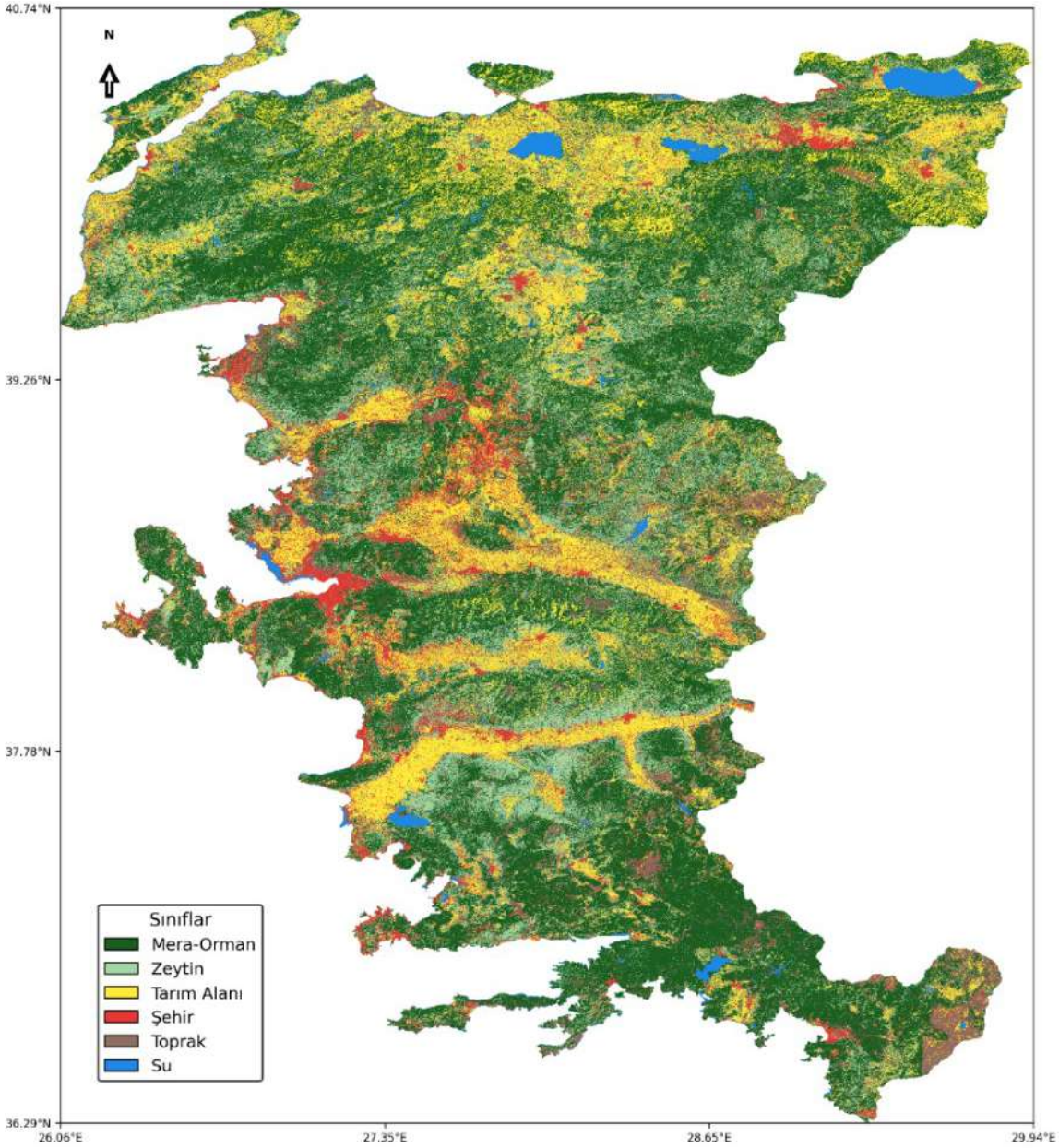
2005 ve 2025 yıllarına ait tematik haritalar Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur. Bunlar, çalışma alanındaki arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıflarının mekânsal dağılımını ve iki dönem arasındaki değişimleri görsel olarak ortaya koymaktadır. Özellikle, zeytin ve mera-orman sınıflarının dağılımındaki farklılıklar, sınıf oranları ve doğruluk sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde daha belirgin hale gelmektedir. 2005 yılı sonuçları incelendiğinde en yüksek sınıflandırma performansının su sınıfında elde edildiği görülmektedir. Su sınıfı 0,9986 F1-skoru ile diğer arazi örtüsü sınıflarından belirgin biçimde ayrılmıştır. Tarım alanı da 0,9072 F1-skoru ile yüksek sınıflandırma başarısı göstermiştir.



Şekil 2. 2005 yılına ait piksel tabanlı rastgele orman arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıflandırma haritası.

Zeytin sınıfında 0,8037 kesinlik, 0,8927 duyarlılık ve 0,8458 F1-skoru elde edilirken, toprak ve şehir sınıflarında F1-skorları sırasıyla 0,8380 ve 0,8079 olarak hesaplanmıştır. Mera-orman sınıfı ise 0,7500 F1-skoru ile 2005 yılında en düşük sınıf bazlı performansı göstermiştir. 2025 yılında da su sınıfı 0,9975 F1-skoru ile en başarılı sınıf olmuştur. Tarım alanı sınıfının F1-skoru 0,9072'den 0,9403'e, şehir sınıfının F1-skoru 0,8079'dan 0,9166'ya ve toprak sınıfının F1-skoru 0,8380'den 0,9091'e yükselmiştir. Buna karşılık, zeytin ve mera-orman sınıflarında performans düşüşü meydana gelmiştir. Zeytin sınıfının F1-skoru 0,8458'den 0,7817'ye, mera-orman sınıfının F1-skoru ise 0,7500'den 0,6991'e gerilemiştir. Elde edilen sonuçlara göre su sınıfının her iki yılda da yaklaşık 1,00 düzeyindeki F1-skorlarıyla yüksek doğrulukla sınıflandırılması, su yüzeylerinin diğer arazi örtüsü sınıflarından belirgin spektral özelliklerle ayrılmasıyla ilişkilidir ve literatürde benzer bulgular raporlanmıştır. Tarım alanı, şehir ve toprak sınıflarında 2025 yılında gözlenen performans artışı da bu sınıflara ait spektral örüntülerin model tarafından daha belirgin biçimde ayrıştırılabildiğine işaret etmektedir. Buna karşılık zeytin ve mera-orman sınıflarında gözlenen daha düşük F1-skorları, bitki örtüsü sınıfları arasındaki spektral benzerliğin sınıflandırmayı güçleştirdiğini göstermektedir. Özellikle,

zeytinliklerin farklı dikim yoğunluklarına sahip olması, ağaçlar arasındaki toprak yüzeyinin piksel spektral yanıtına katkıda bulunması ve zeytin alanlarının tarımsal ya da doğal bitki örtüsüyle geçiş zonları oluşturması sınıflar arasındaki ayrımı sınırlandırabilmektedir. 2005 yılında zeytin sınıfı için duyarlılığın (0,8927) kesinlikten (0,8037) yüksek olması, modelin gerçek zeytin piksellerinin büyük bölümünü tespit ettiğini ancak bazı diğer sınıflara ait pikselleri de zeytin olarak sınıflandırdığını göstermektedir. 2025 yılında ise kesinlik ve duyarlılık değerlerinin yaklaşık 0,78 seviyesine gerilemesi, zeytin alanlarının diğer bitki örtüsü sınıflarından ayrıştırılmasının daha güç hale geldiğine işaret etmektedir.



Şekil 3. 2025 yılına ait piksel tabanlı Rastgele Orman arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıflandırma haritası.

4.2. Arazi Örtüsü/Arazi Kullanımı Sınıflarının 2005-2025 Dönemindeki Oransal Değişimi

Piksel tabanlı sınıflandırma ile üretilen tematik haritalardan hesaplanan arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıf oranları Çizelge 2'de verilmiştir. Sonuçlar, çalışma alanındaki sınıfların iki dönem arasında farklı oranlarda değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. 2005 yılı sonuçlarına göre çalışma alanının %26,39'u mera-orman, %23,40'ı toprak, %22,15'i tarım alanı ve %20,73'ü zeytin sınıfından oluşmaktadır. Şehir ve su sınıflarının oranları ise sırasıyla %5,88 ve %1,46 olarak belirlenmiştir. 2025 yılında mera-orman sınıfı %45,75 ile çalışma alanındaki en yüksek orana sahip sınıf haline gelmiştir. Aynı yıl zeytin sınıfı %19,14, tarım alanı %18,64, toprak %8,68, şehir %6,23 ve su %1,57 oranında belirlenmiştir. İki dönem karşılaştırıldığında en belirgin değişim mera-orman ve toprak sınıflarında gözlenmiştir. Mera-orman sınıfının çalışma alanındaki oranı %26,39'dan %45,75'e yükselerek 19,36 yüzde puan artarken, toprak sınıfı %23,40'tan %8,68'e gerileyerek 14,72 yüzde puan azalmıştır. Tarım alanı sınıfında da

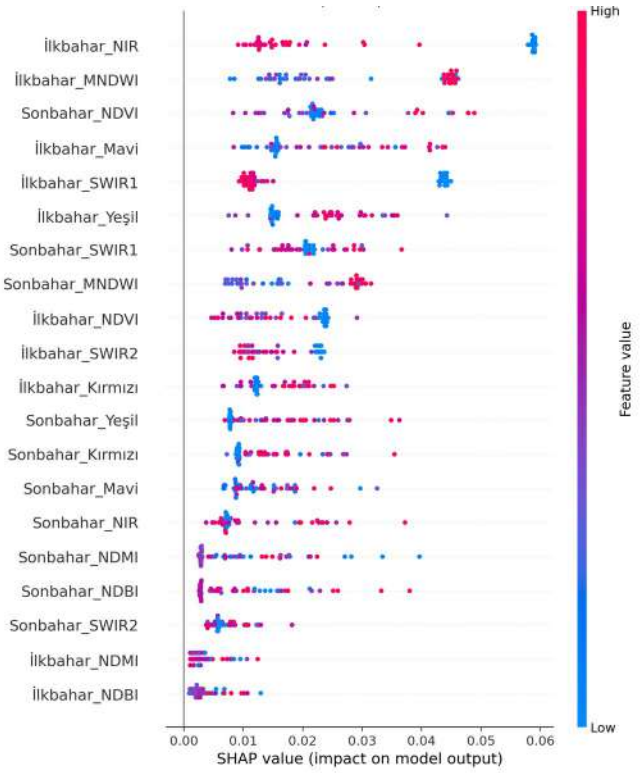
%22,15'ten %18,64'e düşüş meydana gelmiş ve bu değişim 3,51 yüzde puan olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık şehir sınıfı %5,88'den %6,23'e, su sınıfı ise %1,46'dan %1,57'ye yükselmiş ve bu iki sınıfta daha sınırlı değişimler gözlenmiştir. Çalışmanın temel odağını oluşturan zeytin sınıfı 2005 yılında çalışma alanının %20,73'ünü oluştururken, 2025 yılında bu oran %19,14'e gerilemiştir. Böylece tematik haritalara göre zeytin sınıfının çalışma alanındaki payında %1,59 puanlık azalma belirlenmiştir. Bu değişim, zeytin alanlarının çalışma alanındaki göreli payının iki dönem arasında azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, sınıf oranlarında ortaya çıkan değişimlerin doğrudan arazi dönüşüm miktarı olarak yorumlanmasında dikkatli olunması gerekmektedir. Özellikle mera-orman ve zeytin sınıflarında sınıf bazlı F1-skorlarının diğer bazı arazi örtüsü sınıflarından daha düşük olması, spektral karışıklığın hesaplanan sınıf oranları üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle oransal değişimler, sınıflandırma haritaları ve doğruluk sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. 2005 ve 2025 yıllarında Rastgele Orman modeli ile belirlenen arazi örtüsü/arazi kullanımı sınıf oranları.

Sınıf	2005 (%)	2025 (%)	Değişim
Mera-Orman	26,39	45,75	+19,36
Zeytin	20,73	19,14	-1,59
Tarım Alanı	22,15	18,64	-3,51
Şehir	5,88	6,23	+0,35
Toprak	23,40	8,68	-14,72
Su	1,46	1,57	+0,11

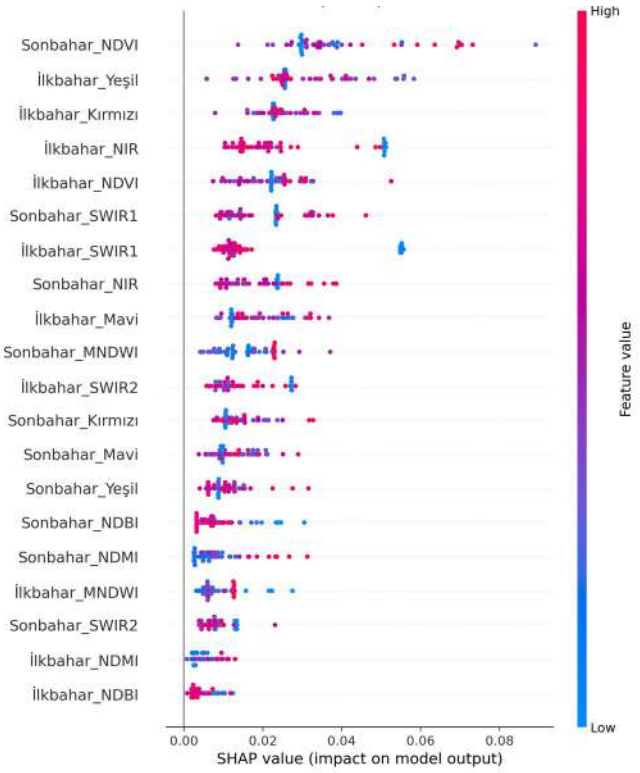
4.3. Global SHAP Sonuçları

Rastgele Orman modelinin zeytin sınıfına ilişkin kararlarında hangi spektral ve mevsimsel değişkenlerin etkili olduğunu belirlemek amacıyla 2005 ve 2025 yılları için global SHAP analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, her iki yılda da bitki örtüsü yoğunluğu, yüzey nemi ve kızılötesi yansıma özellikleriyle ilişkili değişkenlerin model kararlarında belirleyici olduğunu, ancak değişkenlerin göreli önem sıralamalarının yıllara göre farklılaştığını göstermiştir. 2005 yılında rastgele orman modelinde ilkbahar NIR değişkeninin en yüksek katkıya sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Bunu ilkbahar MNDWI, sonbahar NDVI ve ilkbahar mavi bant izlemiştir. NIR ve SWIR tabanlı değişkenlerin üst sıralarda yer alması, zeytin alanlarının yaprak yoğunluğu, bitki yapısı ve yüzey nemiyle ilişkili spektral davranışlarının model tarafından etkin biçimde kullanıldığını göstermektedir. 2025 yılında sonbahar NDVI değişkeni Rastgele Orman modelinin zeytin sınıfına ilişkin kararlarında en yüksek öneme sahip değişken olarak öne çıkmıştır (Şekil 5). Bunun ardından ilkbahar yeşil ve ilkbahar kırmızı bantlar gelmiş, NIR ve SWIR bantlarının da model kararına anlamlı katkılar sunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, 2025 yılında zeytin sınıfının ayrımında sonbahar dönemindeki vejetasyon davranışının daha belirgin bir rol oynadığını göstermektedir. 2005 ve 2025 yıllarına ait sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, NDVI, NIR, MNDWI ve SWIR tabanlı değişkenlerin her iki dönemde de önemli özellik grupları arasında yer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte, 2005 yılında ilkbahar dönemine ait NIR ve MNDWI değişkenleri daha belirgin bir rol üstlenirken, 2025 yılında sonbahar NDVI ile ilkbahar görünür bölge bantlarının göreli öneminin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 2005 yılı rastgele orman modeli için zeytin sınıfına ait global SHAP beeswarm grafiği.

2005 ve 2025 yılları arasında SHAP değişken önemlerinin farklılaşması, rastgele orman modelinin zeytin sınıfını her iki dönemde aynı spektral göstergelere aynı düzeyde dayanarak ayırt etmediğini ortaya koymaktadır. Zeytin alanlarının spektral özellikleri, bitki örtüsünün fenolojik durumu, kanopi yoğunluğu, toprak ve yüzey nemi ile çevredeki tarımsal ve doğal bitki örtüsünün spektral davranışına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, farklı yıllarda model kararlarını yönlendiren değişkenlerin önem sıralamalarında farklılık oluşması beklenebilir. 2005 yılında ilkbahar NIR bandının en önemli değişken olması, zeytin alanları ile diğer vejetasyon sınıfları arasındaki bitki yapısı ve yakın kızılötesi yansıma farklılıklarının bu dönemde model açısından güçlü ayırt edici bilgi sağladığını göstermektedir. İlkbahar MNDWI değişkeninin yüksek katkıya sahip olması ise yüzey ve bitki nemine ilişkin özelliklerin zeytin sınıfının ayrımında destekleyici rol oynadığına işaret etmektedir. Buna karşılık 2025 yılında sonbahar NDVI değişkeninin öne çıkması, zeytin alanları ile diğer bitki örtüsü sınıfları arasındaki ayrımın bu yılda sonbahar dönemindeki vejetasyon yoğunluğu üzerinden daha belirgin şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. İlkbahar yeşil ve kırmızı bantlarının 2025 yılında daha yüksek önem kazanması da görünür spektral bölgedeki farklılıkların model kararlarına daha fazla katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, dönemler arasındaki değişken önem farklılıklarının yalnızca gerçek arazi örtüsü değişimleriyle açıklanması uygun değildir. Farklı yıllardaki fenolojik ve çevresel koşulların yanı sıra sınıflar arasındaki spektral örtüşme düzeyi de SHAP önemlerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle global SHAP sonuçları, değişken önemlerindeki dönemsel farklılıkların doğrudan fiziksel değişim göstergeleri olarak değil, modelin ilgili yılın veri dağılımı altında zeytin sınıfını ayırt ederken kullandığı baskın spektral ve mevsimsel göstergeler olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. 2025 yılı rastgele orman modeli için zeytin sınıfına ait global SHAP beeswarm grafiği.

5. SONUÇLAR

Ege ve Güney Marmara'daki yedi ilde gerçekleştirilen analizler, 2005 ve 2025 yıllarına ait arazi örtüsü/arazi kullanımı yapısının rastgele orman algoritması ile karşılaştırmalı olarak ortaya konulmasına ve özellikle zeytin alanlarındaki mekânsal değişimlerin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, rastgele orman modelinin zeytin sınıfına ilişkin kararlarında etkili olan spektral ve mevsimsel değişkenler global SHAP yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, modelin her iki dönem için de yüksek genel sınıflandırma performansı sağladığını göstermiştir. Genel doğruluk 2005 yılı için %88,65, 2025 yılı için ise %89,08 olarak hesaplanmıştır. Sınıf bazlı sonuçlarda su ve tarım alanı sınıfları en yüksek performansı gösterirken, zeytin ve mera-orman sınıflarında görece daha düşük F1-skorları elde edilmiştir. Özellikle zeytin sınıfının F1-skorunun 2005 yılında 0,8458'den 2025 yılında 0,7817'ye gerilemesi, zeytin alanlarının diğer bitki örtüsü ve tarımsal sınıflardan ayrımının ikinci dönemde daha güç olduğunu göstermektedir.

Sınıflandırma haritalarından hesaplanan sınıf oranları iki dönem arasında önemli farklılıklar ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlara göre, zeytin sınıfının çalışma alanındaki oranı 2005 yılında %20,73 iken 2025 yılında %19,14 olarak belirlenmiş ve 1,59 yüzde puanlık bir azalma meydana gelmiştir. Aynı dönemde mera-orman sınıfının oranında belirgin bir artış, toprak ve tarım alanı sınıflarında ise azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, söz konusu oranların sınıflandırma sonuçlarından türetildiği ve özellikle spektral olarak benzer sınıflardaki model belirsizliklerinden etkilenebileceği dikkate alınmalıdır. 2005 yılında ilkbahar NIR ve ilkbahar MNDWI değişkenleri öne çıkarken, 2025 yılında sonbahar NDVI ile ilkbahar görünür bölge bantlarının göreli önemi artmıştır. Bu sonuçlar, modelin zeytin sınıfını farklı yıllarda aynı değişkenlere aynı düzeyde dayanarak ayırt etmediğini ve mevsimsel-spektral bilgi katkılarının dönemlere göre değişebildiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, çok mevsimli Landsat verilerinin rastgele orman sınıflandırması ve global SHAP analizi ile birlikte kullanılması, zeytin alanlarının yalnızca mekânsal dağılımının belirlenmesine değil, aynı zamanda model kararlarının hangi spektral özelliklere dayandığının açıklanmasına da olanak sağlamıştır. Gelecek çalışmalarda daha sık zaman aralıklı uydu gözlemleri, daha yüksek mekânsal çözünürlüklü veriler ve farklı açıklanabilir yapay zeka yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, zeytin alanlarındaki değişimlerin daha ayrıntılı incelenmesine katkı sağlayabilir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2247-A Ulusal Lider Araştırmacılar Programı kapsamında desteklenen 123C513 numaralı "Türkiye'nin İklim Değişikliğine Uyum Politikası Çerçevesinde Zeytin Yetiştiriciliğinde Sürdürülebilirlik: Yapay Zeka Teknikleri Kullanarak Mevcut Durum Tespiti ve İklim Senaryoları ile Geleceğe Dönük Projeksiyonlar (SUS4CLIMOLIVE)" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Abubakar, M.A., Chanzy, A., Flamain, F., Pouget, G. ve Courault, D., 2023. Delineation of Orchard, Vineyard, and Olive Trees Based on Phenology Metrics Derived from Time Series of Sentinel-2. *Remote Sensing*, 15(9): 2420.

Belgiu, M. ve Drăgut, L., 2016. Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114: 24–31.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45: 5–32.

Costanza, L., Lorente, B., Pedrero Salcedo, F., Pasanisi, F., Giannico, V., Ardito, F., Martí Martínez, C.M. ve Garofalo, S.P., 2025. Predicting Olive Tree Chlorophyll Fluorescence Using Explainable AI with Sentinel-2 Imagery in Mediterranean Environment. *Applied Sciences*, 15(5): 2746.

Flood, N., 2013. Seasonal Composite Landsat TM/ETM+ Images Using the Medoid (a Multi-Dimensional Median). *Remote Sensing*, 5(12): 6481-6500.

Gutiérrez-Cabrera, R., Tarquis, A.M. ve Borondo, J., 2025. A Machine Learning Approach to Generate High-Resolution Maps of Irrigated Olive Groves. *Land*, 14(5): 1001.

Kavzoglu, T. ve Teke, A., 2022. Predictive Performances of Ensemble Machine Learning Algorithms in Landslide Susceptibility Mapping Using Random Forest, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Natural Gradient Boosting (NGBoost). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(6): 7367-7385.

Kavzoglu, T., Uzun, Y.K., Berkan, E. ve Yilmaz, E.O., 2025. Global-scale explainable AI assessment for OBIA-based classification using Deep Learning and Machine Learning methods. *Advances in Geodesy and Geoinformation*, 74(1): e62.

Lin, C., Jin, Z., Mulla, D., Ghosh, R., Guan, K., Kumar, V. ve Cai, Y., 2021. Toward Large-Scale Mapping of Tree Crops with High-Resolution Satellite Imagery and Deep Learning Algorithms: A Case Study of Olive Orchards in Morocco. *Remote Sensing*, 13(9): 1740.

Lundberg, S.M. ve Lee, S.I., 2017. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30: 4768-4777.

Moriondo, M., Ferrise, R., Trombi, G., Brilli, L., Dibari, C. ve Bindi, M., 2015. Modelling Olive Trees and Grapevines in a Changing Climate. *Environmental Modelling & Software*, 72: 387-401.

Myint, S.W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S. ve Weng, Q., 2011. Per-Pixel vs. Object-Based Classification of Urban Land Cover Extraction Using High Spatial Resolution Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(5): 1145–1161.

Osa, P.I., Beck, A.-L., Kleverman, L. ve Mangin, A., 2023. Multi-Classifier Pipeline for Olive Groves Detection. *Applied Sciences*, 13(1): 420.

Ozupek, E., Teke, A., Celik, N. ve Kavzoglu, T., 2025. Explainable Artificial Intelligence to Explore the Intrinsic Characteristics of Climatic Parameters Governing Meteorological Drought Forecasting: Opening the Black Box. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39: 3201-3222.

Ponti, L., Gutierrez, A.P., Ruti, P.M. ve Dell'Aquila, A., 2014. Fine-Scale Ecological and Economic Assessment of Climate Change on Olive in the Mediterranean Basin Reveals Winners and Losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15): 5598–5603.

Sevim, D., Varol, N. ve Köseoğlu, O., 2022. Küresel İklim Değişikliğinin Zeytin Yetiştiriciliği ve Zeytinyağı Üzerine Etkileri. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(2): 415-432.

Teke, A. ve Kavzoğlu, T., 2024. Spatially Aware Landslide Susceptibility Prediction Using a Geographical Random Forest Approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W9-2024: 363–370.

Vossen, P., 2007. Olive Oil: History, Production, and Characteristics of the World's Classic Oils. *HortScience*, 42(5): 1093-1100.

ÇOK ZAMANLI SENTİNEL-2 VERİLERİ KULLANILARAK TARIMSAL ÜRÜN VE KAVAK PLANTASYONLARININ DERİN ÖĞRENME TABANLI HARİTALANMASI VE KULLANICI DOSTU ARAYÜZ TASARIMI

Berat ÇELİKTEPE[1], İsmail ÇÖLKESEN[2], Muhammed Yusuf ÖZTÜRK[3]

[1]Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, b.celiktepe2022@gtu.edu.tr
[2]Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, icolkesen@gtu.edu.tr
[3]Arş. Gör. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, m.ozturk2020@gtu.edu.tr

ÖZET

*Tarımsal üretimin planlanması, gıda güvenliğinin sağlanması, doğal kaynakların etkin yönetimi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından tarım alanlarına ilişkin doğru, güvenilir ve güncel envanter bilgilerinin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ekolojik çeşitliliğin yüksek olduğu Türkiye gibi ülkelerde, farklı tarımsal ürünlerin yanı sıra endüstriyel amaçlı ağaç plantasyonlarının belirlenmesi, sürdürülebilir ve etkin üretim planlaması süreçleri için kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanlara ait yüksek mekânsal çözünürlüklü ve çok zamanlı veri sağlama kapasitesi sayesinde tarımsal alanların izlenmesi ve haritalanmasında güçlü bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda uydu görüntülerinin derin öğrenme algoritmalarıyla birlikte kullanılması, tarımsal ürünlerin düzenli olarak izlenmesi, sınıflandırılması ve haritalanması konusunda önemli ilerlemeler sağlamıştır [1, 2, 6]. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir bölümü sınırlı ölçekli çalışma alanlarında yürütülmekte ve çoğunlukla belirli tarımsal ürün gruplarına odaklanmaktadır [3]. Bu çalışmada, mısır, çeltik ve fındık gibi tarımsal ürünler ile endüstriyel kavak plantasyonlarının çok zamanlı Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak yüksek doğrulukla haritalanması hedeflenmektedir. Bu amaçla, Sakarya ili Akyazı ilçesi ile Bursa-Karacabey ve Balıkesir-Manyas sınırları arasında kalan bölge çalışma alanları olarak seçilmiş ve derin öğrenme tabanlı semantik segmentasyon mimarilerinden U-Net [4], U-Net++ [5], U^2-Net ve Attention U-Net (AU-Net) modellerinin kullanıldığı bir metodoloji oluşturulmuştur. Derin öğrenme modellerinin eğitimi için gerekli etiket veri setlerinin oluşturulmasında, nesne tabanlı görüntü analizi ve Rastgele Orman algoritmasını temel alan yarı otomatik bir etiket üretim yaklaşımı uygulanmış, ardından yanlış sınıflandırılan bölgeler görsel analiz yoluyla manuel olarak düzeltilmiştir. Üretilen etiketli veriler 128*128 boyutlu görüntü parçalarına bölünerek yaklaşık 80 bin parçadan oluşan eğitim ve doğrulama veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setleri derin öğrenme modellerinin eğitimi için kullanılmıştır. Ayrıca modellerin zamansal genelleme performansları farklı tarihli Sentinel-2 görüntüleri üzerinde değerlendirilmiştir. Çizelge 1'de sunulan doğruluk değerleri analiz edildiğinde, çalışma alanlarında yer alan arazi örtüsü sınıflarının spektral heterojenliği ve mekânsal dağılım özelliklerinin model performansları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Spektral karmaşıklığın daha az ve parsel sınırlarının daha düzenli olduğu Bursa çalışma alanında, U-Net++ modeli çeltik ve mısır sınıfları için sırasıyla %90,26 ve %80,03 F-skor değerlerine ulaşarak en yüksek sonuçları üretmiştir. Diğer yandan, çeşitli vejetasyon türlerinin bir arada bulunduğu Akyazı bölgesinde AU-Net modeli mısır, fındık ve kavak sınıfları için sırasıyla %84,35, %79,71 ve %77,81 F-skor değerleri üreterek genel olarak diğer modellere üstünlük sağlamıştır. İstatistiksel sonuçlar bir arada ele alındığında, U-Net ve türevi modellerin homojen alanlarda daha başarılı sonuçlar ürettiği görülürken, spektral benzerliğin arttığı durumlarda sınıflar arası ayrımın zorlaştığı ve buna bağlı olarak model doğruluklarında düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, modellerin operasyonel olarak kullanılabilmesi amacıyla Python ve PyQt5 tabanlı "AGRIVISION AI" karar destek sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen masaüstü uygulama ile kullanıcıların herhangi bir teknik ön bilgiye ihtiyaç duymadan, eğitilmiş modeller aracılığıyla ürün haritaları oluşturabilmeleri ve elde edilen sonuçlara ilişkin doğruluk analizlerini kolaylıkla gerçekleştirebilmeleri amaçlanmıştır (Şekil 1).*

Anahtar Sözcükler: Derin Öğrenme, Semantik Segmentasyon, Tarımsal Haritalama, Sentinel-2, Kullanıcı Dostu Arayüz.

ABSTRACT

DEEP LEARNING-BASED MAPPING OF AGRICULTURAL CROPS AND POPLAR PLANTATIONS USING MULTI-TEMPORAL SENTINEL-2 IMAGES AND USER-FRIENDLY INTERFACE DESIGN

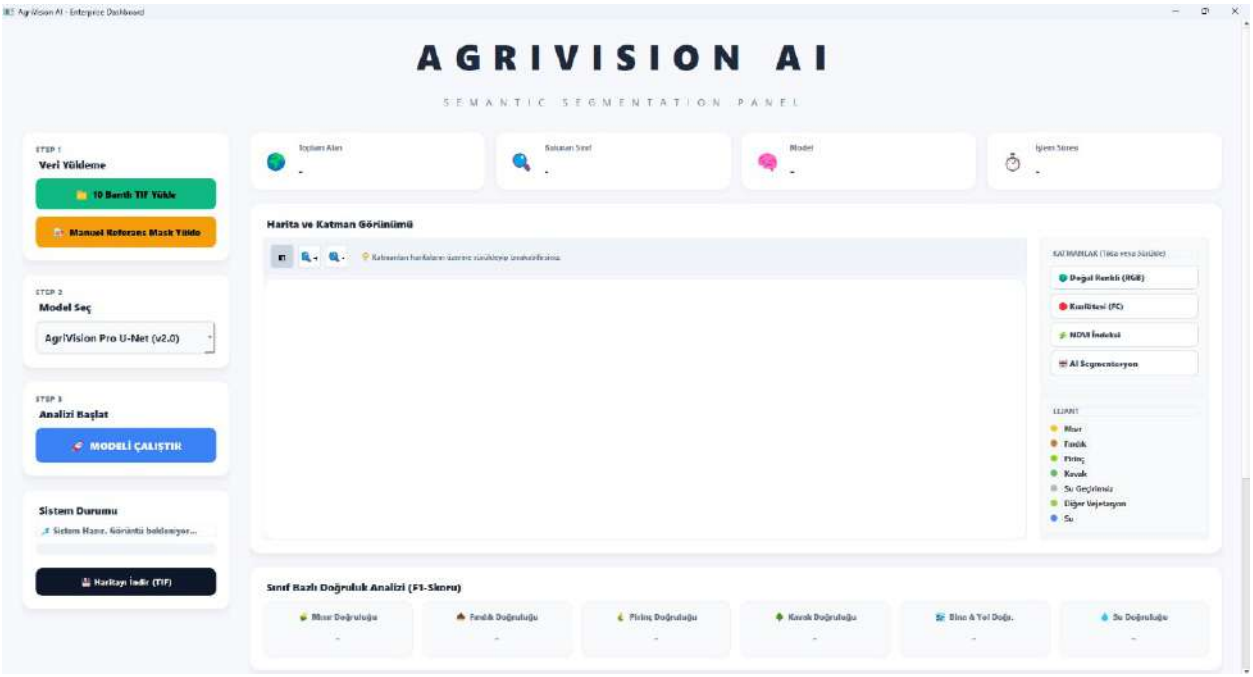
Obtaining accurate, reliable, and up-to-date inventory information on agricultural areas is of great importance for planning agricultural production, ensuring food security, effective management of natural resources, and supporting environmental sustainability. In countries such as Türkiye, where ecological diversity is high, the identification of different crops as well as industrial tree plantations stands out as a critical requirement for sustainable and effective production planning processes. In this context, remote sensing technologies are regarded as a powerful method for monitoring and mapping agricultural areas, owing to their capacity to provide high spatial resolution and multi-temporal data over large areas. In recent years, the use of satellite imagery together with deep learning algorithms has provided significant advances in the temporal monitoring and mapping of vegetation types [1, 2, 6]. However, the majority of existing studies have been conducted in local-scale study areas and have mostly focused on specific agricultural crops [3]. In this study, it is aimed to map agricultural crops such as maize, rice, and hazelnut, as

well as industrial poplar plantations, with high accuracy using multi-temporal Sentinel-2 satellite images. For this purpose, the Akyazi district of Sakarya province and the region between Bursa-Karacabey and Balıkesir-Manyas were selected as study areas, and a methodology was developed using deep learning-based semantic segmentation architectures, namely U-Net [4], U-Net++ [5], U2-Net, and Attention U-Net (AU-Net). In the creation of the labelled datasets required for training the deep learning models, a semi-automatic label production approach based on object-based image analysis and the Random Forest algorithm was applied, then, misclassified regions were manually corrected through visual analysis. The labeled data was divided into 128×128 image patches to create a training and validation dataset consisting of approximately 80,000 patches. These datasets were used to train deep learning models. Additionally, the models' temporal generalization performance was evaluated using Sentinel-2 images from different dates. The analysis of the accuracy values presented in Table 1 indicated that model performances were influenced by the spectral heterogeneity and spatial distribution characteristics of the land cover classes within the study areas. In the Bursa, where spectral complexity is lower and parcel boundaries are more regular, the U-Net++ model produced the highest results, reaching F-score values of 90.26% and 80.03% for the rice and maize classes, respectively. On the other hand, in the Akyazi region, where various vegetation types exist, the AU-Net model outperformed the other models by producing F-score values of 84.35%, 79.71%, and 77.81% for the maize, hazelnut, and poplar classes, respectively.When the statistical results were evaluated collectively, U-Net-derived models were found to achieve more successful results in homogeneous areas, whereas increased spectral similarity made class separation more challenging and consequently led to decreases in model accuracies. Within the scope of the study, the Python- and PyQt5-based "AGRIVISION AI" decision support system was developed to enable the operational use of the models. With the developed desktop application, it was aimed to enable users to generate crop maps through trained models without requiring any technical prior knowledge and to easily perform accuracy analyses related to the obtained results (Figure 1).

Keywords: Deep Learning, Semantic Segmentation, Agricultural Mapping, Sentinel-2, User-Friendly Interface.

Çizelge 1. Değerlendirilen sınıflar için derin öğrenme modelleri tarafından üretilen F-skor değerleri.

Çalışma Alanı	Sınıflar	U-Net	U²-Net	AU-Net	U-Net++
Akyazı	Kavak	65.60	69.05	77.81	76.55
	Fındık	77.70	77.33	79.71	58.69
	Mısır	81.17	84.81	84.35	82.31
Bursa-Balıkesir	Mısır	76.55	75.50	79.98	80.03
	Çeltik	87.57	88.63	89.54	90.26



Şekil 1. AGRIVISION AI arayüzü

KAYNAKLAR

[1] **Luo, K., Lu, L., Xie, Y., Chen, F., Yin, F., Li, Q.,** 2023. Crop type mapping in the central part of the North China Plain using Sentinel-2 time series and machine learning. Computers and Electronics in Agriculture, 205, 107577.

[2] **Lv, J., Shen, Q., Lv, M., Li, Y., Shi, L., Zhang, P.,** 2023. Deep learning-based semantic segmentation of remote sensing images: A review. Frontiers in Ecology and Evolution, 11, 1120125.

[3] **Li, G., Han, W., Dong, Y., Zhai, X., Huang, S., Ma, W., Wang, Y.,** 2023. Multi-year crop type mapping using Sentinel-2 imagery and deep semantic segmentation algorithm in the Hetao irrigation district in China. Remote Sensing, 15(4), 875.

[4] **Li, G., Cui, J., Han, W., Zhang, H., Huang, S., Chen, H., Ao, J.,** 2022. Crop type mapping using time-series Sentinel-2 imagery and U-Net in early growth periods in the Hetao irrigation district in China. Computers and Electronics in Agriculture, 203, 107478.

[5] **Colkesen, I., Saygi, M., Ozturk, M. Y., Altuntas, O. Y.,** 2025. U-shaped deep learning networks for algal bloom detection using Sentinel-2 imagery: Exploring model performance and transferability. Journal of Environmental Management, 381, 125152.

[6] **Buttar, P. K., Sachan, M. K.,** 2024. Semantic segmentation of satellite images for crop type identification in smallholder farms. The Journal of Supercomputing, 80(2), 1367–1395.

UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ KULLANILARAK ORMAN YANGIN ALANLARINDA BİTKİ VE TOPRAK DEĞİŞİMLERİNİN ZAMANSAL ANALİZİ: 2021 MANAVGAT ORMAN YANGINI ÖRNEĞİ

Betül KIRIMLIOĞLU[1], Esra TUNÇ GÖRMÜŞ[2],

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, betulkrmloglu@gmail.com
[2]Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, etuncgormus@ceng.ktu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, 2021 yılında Antalya'nın Manavgat ilçesinde meydana gelen büyük orman yangından sonra bitki örtüsü, toprak ve minerallerde meydana gelen değişimlerin zamansal olarak uzaktan algılama teknikleriyle değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada çok zamanlı Sentinel-2 ve Landsat 8 görüntüleri kullanılmış ve yangın öncesi ile sonrası dönemler karşılaştırılmıştır. Bitki örtüsündeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) ve Normalized Burn Ratio (NBR) indeksleri hesaplanmıştır. NBR indeksi kullanılarak yanık şiddeti analizi ve yangının etkileri ortaya konulmuştur..

Topraktaki değişimleri değerlendirmek amacıyla Land Surface Temperature (LST), Soil Moisture Index (SMI) ve Bare Soil Index (BSI) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kil mineralleri, tuzluluk ve demir oksit içeriklerine ilişkin Clay Minerals, Normalized Difference Salinity Index (NDSI), Iron Oxide (Fe_2O_3), Ferrous (Fe^{2+}) ve Ferric (Fe^{3+}) indeksleri hesaplanarak yangının toprak mineralleri üzerindeki etkiler incelenmiştir. Zaman serisi analizlerinde yıllık değişimler için Pearson ve Spearman korelasyon analizleri ile spektral indeksler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Eğilim analizleri için Mann–Kendall testi ve Sen's Slope yöntemi uygulanmıştır.

Analiz sonuçları, yangının ardından NDVI, SAVI, NDMI ve NBR değerlerinde önemli düşüşler meydana geldiğini, buna karşılık yüzey sıcaklığının arttığını ve toprak neminin azaldığını göstermiştir. Zaman serisi değerlendirmeleri, takip eden yıllarda bitki örtüsünün kademeli olarak toparlandığını ortaya koymuştur. Mineral indekslerinde gözlenen değişimler ise özellikle demir oksit ve kil mineralleriyle ilişkili alanlarda yangının etkilerinin uzun süre devam ettiğini göstermektedir. Sonuçlar, uzaktan algılamanın yangın sonrası ekosistem değişimlerinin izlenmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Bitki örtüsü, orman yangını, spektral indeksler, toprak mineralleri, uzaktan algılama, zamansal analiz

ABSTRACT

TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION AND SOIL CHANGES IN FOREST FIRE AREAS USING REMOTE SENSING TECHNIQUES: THE CASE OF THE 2021 MANAVGAT FOREST FIRE

This study aims to evaluate the temporal changes in vegetation, soil properties, and mineral components following the large-scale forest fire that occurred in Manavgat, Antalya, in 2021, using remote sensing techniques. Multi-temporal Sentinel-2 and Landsat 8 satellite imagery were utilized to compare pre-fire and post-fire conditions. To assess vegetation dynamics, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), and Normalized Burn Ratio (NBR) were calculated. Burn severity analysis was performed using the NBR index to identify the extent and impacts of the wildfire.

To evaluate post-fire soil conditions, Land Surface Temperature (LST), Soil Moisture Index (SMI), and Bare Soil Index (BSI) analyses were conducted. In addition, Clay Minerals, Normalized Difference Salinity Index (NDSI), Iron Oxide (Fe_2O_3), Ferrous (Fe^{2+}), and Ferric (Fe^{3+}) indices were derived to investigate the effects of the wildfire on soil mineral composition. Annual variations were examined through time-series analyses, while Pearson and Spearman correlation analyses were employed to explore the relationships among the spectral indices. Trend analyses were carried out using the Mann–Kendall test and Sen's Slope estimator.

The results revealed significant decreases in NDVI, SAVI, NDMI, and NBR values immediately after the wildfire, accompanied by an increase in land surface temperature and a decline in soil moisture. Time-series evaluations indicated a gradual recovery of vegetation cover during the post-fire period. Changes observed in the mineral indices suggest that wildfire effects persisted over time, particularly in areas associated with iron oxides and clay minerals. Overall, the findings demonstrate that remote sensing techniques provide an effective approach for monitoring post-fire ecosystem dynamics and assessing long-term environmental changes.

Keywords: forest fire, remote sensing, spectral indices, temporal analysis, vegetation cover

GOOGLE ALPHAEARTH FOUNDATIONS EMBEDDING VERİ SETİNİN ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLANDIRMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Eren Can SEYREK[1], Murat UYSAL[2]

[1]Arş. Gör. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez, Afyonkarahisar, ecseyrek@aku.edu.tr
[2]Prof. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü; Uzaktan Algılama ve CBS Uygulama ve Araştırma Merkezi, 03200, Merkez, Afyonkarahisar, muysal@aku.edu.tr

ÖZET

Giriş: *Google tarafından geliştirilen AlphaEarth Foundations (AEF) modeli, çok sensörlü, zamansal ve bağlamsal bilgileri bir araya getiren anlamsal açıdan zengin, önceden eğitilmiş gömmeler sunarak uzaktan algılama alanında yeni bir paradigma ortaya koymaktadır. AEF modeli, binlerce çok sensörlü zaman serisi girdi boyutunu anlamsal açıdan zengin bilgi içeren piksel tabanlı 64 bantlı bir vektör temsiline indirgemek için derin öğrenmeden yararlanmaktadır. İlk sürümü Temmuz 2025'te 10 m konumsal çözünürlükte GEE platformunda yayımlanan bu veri seti; ek özellik çıkarımı gerektirmeksizin sınıflandırma, regresyon ve değişim tespiti gibi görevlerde kullanılabilmektedir (Brown vd., 2025). Ancak arazi örtüsü sınıflandırmasındaki performansına ilişkin literatür henüz oldukça sınırlıdır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için bu çalışmada, Potsdam (Almanya) çalışma alanında GEE platformu üzerinde AEF'in piksel tabanlı sınıflandırma performansı, 2025 yılı için Sentinel-1 ve Sentinel-2 medyan kompozit verilerinden oluşturulan iki farklı veri senaryosuyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.*

Materyal ve Metot: *Arazi sınıflarını temsil eden yersel doğrulama verisi (Şekil 1c), çok yüksek çözünürlüklü görüntülerden elde edilen 6 tematik sınıftan oluşmaktadır (EnMAP-Box Development Team, 2025). Karışık piksel etkisini azaltmak amacıyla ampirik olarak -3 m ters tampon uygulanmış ve veri 10 m çözünürlüklü raster olarak GEE'ye yüklenmiştir. Her sınıftan 150 piksel rastgele seçilerek %70 – %30 tabakalı bölme stratejisiyle eğitim ve test setleri oluşturulmuştur. Üç veri senaryosu tanımlanmıştır: (S-1) Sentinel-2 [10 bant]+ indeksler [20 bant] + Haralick doku parametreleri [5 bant], (S-2) S-1 + Sentinel-1 [2 bant], (S-3) AEF [64 bant]. Tüm senaryolar için Rastgele Orman (RO) modeli ('smileRandomForest', ntree: 300) aynı eğitim-test verisiyle eğitilmiş; performans genel doğruluk (GD), üretici ve kullanıcı doğruluğu (ÜD, KD) ile f-skor metrikleriyle, sınıflandırmalar arası istatistiksel farklılık ise McNemar testiyle incelenmiştir.*

Bulgular: *Çalışmada değerlendirilen üç farklı veri senaryosu için elde edilen doğruluk analizi değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur. GD, S-1=%74,13, S-2=%77,61, S-3=%81,85'e yükselmiştir. Su ve ağaç sınıfları tüm senaryolarda yüksek doğrulukla ayrıştırılırken, yol ve çatı sınıfları en düşük f-skor değerlerini üretmiştir. AEF verisinden oluşan S-3, tüm sınıflarda en iyi performansı sergilemiştir. S-1, S-2 ve S-3 arasında uygulanan McNemar testi sonuçlarına göre ($\alpha = 0,05$), S-1 ile S-2 ($\chi^2 = 2,79$) ve S-2 ile S-3 ($\chi^2 = 2,95$) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. S-1 ile S-3 arasındaki fark ise anlamlı bulunmuştur ($\chi^2 = 7,14$; $p < 0,05$). Sınıflandırma haritaları ise Şekil 1'de sunulmuştur.*

Sonuç: *Bu çalışmada AEF veri seti, elde edilen %81,85 genel doğruluk ve tüm sınıflara ait f-skor değerleriyle en yüksek sınıflandırma performansını sergilemiştir. AEF, terabaytlarca ham uzaktan algılama verisinin indirilmesini gerektirmeksizin sahne düzeyindeki anlamsal bilgiyi sıkıştırılmış bir temsil uzayında sunmakta; indeks hesaplama veya doku analizi gibi ek öznitelik çıkarım adımlarına ihtiyaç duyulmadan doğrudan sınıflandırma sürecine entegre edilebilmektedir. Bu özellikler, AEF'in arazi örtüsü sınıflandırma problemlerinde operasyonel uygulamalar açısından ümit verici bir potansiyel taşıdığına işaret etmektedir.*

Anahtar Sözcükler: Google AlphaEarth Foundations Embedding, piksel tabanlı sınıflandırma, doğruluk analizi

ABSTRACT

EVALUATION OF LAND COVER CLASSIFICATION PERFORMANCE OF THE GOOGLE ALPHAEARTH FOUNDATIONS EMBEDDING DATASET

Introduction: *The AlphaEarth Foundations (AEF) model, developed by Google, offers semantically rich pre-trained embeddings that integrate multi-sensor, temporal, and contextual information, introducing a new paradigm in the field of remote sensing. The AEF model leverages deep learning to reduce thousands of multi-sensor time-series input dimensions into a pixel-based 64-band vector representation containing semantically rich information. Released in its first version in July 2025 at 10 m spatial resolution on the Google Earth Engine (GEE) platform, this dataset can be applied to tasks such as classification, regression, and change detection without requiring additional feature extraction steps (Brown et al., 2025). However, the literature on its performance in land cover classification remains limited. To fill this gap in the literature, this study comparatively evaluates the pixel-based classification performance of AEF on the GEE platform in the Potsdam (Germany) study area, using two different data scenarios generated from Sentinel-1 and Sentinel-2 median composite data for the year 2025.*

Materials and Methods: *The ground truth data representing land cover classes (Figure 1c) consists of six thematic classes derived from very high-resolution imagery (EnMAP-Box Development Team, 2025). To reduce the mixed pixel effect, a -3 m negative buffer was applied empirically, and the data were uploaded to GEE as a 10 m resolution raster. From each class, 150 pixels were randomly selected and divided into training and test sets using a 70% – 30% stratified split strategy. Three data scenarios were defined: (S-1) Sentinel-2 [10 bands] + spectral indices [20 bands] + Haralick texture parameters [5 bands], (S-2) S-1 + Sentinel-1 [2 bands], (S-3) AEF [64 bands]. For all scenarios, a Random Forest (RO) model ('smileRandomForest', ntree: 300) was trained using the same training–test data; performance was assessed using overall accuracy (GD), producer's and user's accuracy (ÜD, KD), and f-score metrics, while statistical differences between classifications were examined with the McNemar test.*

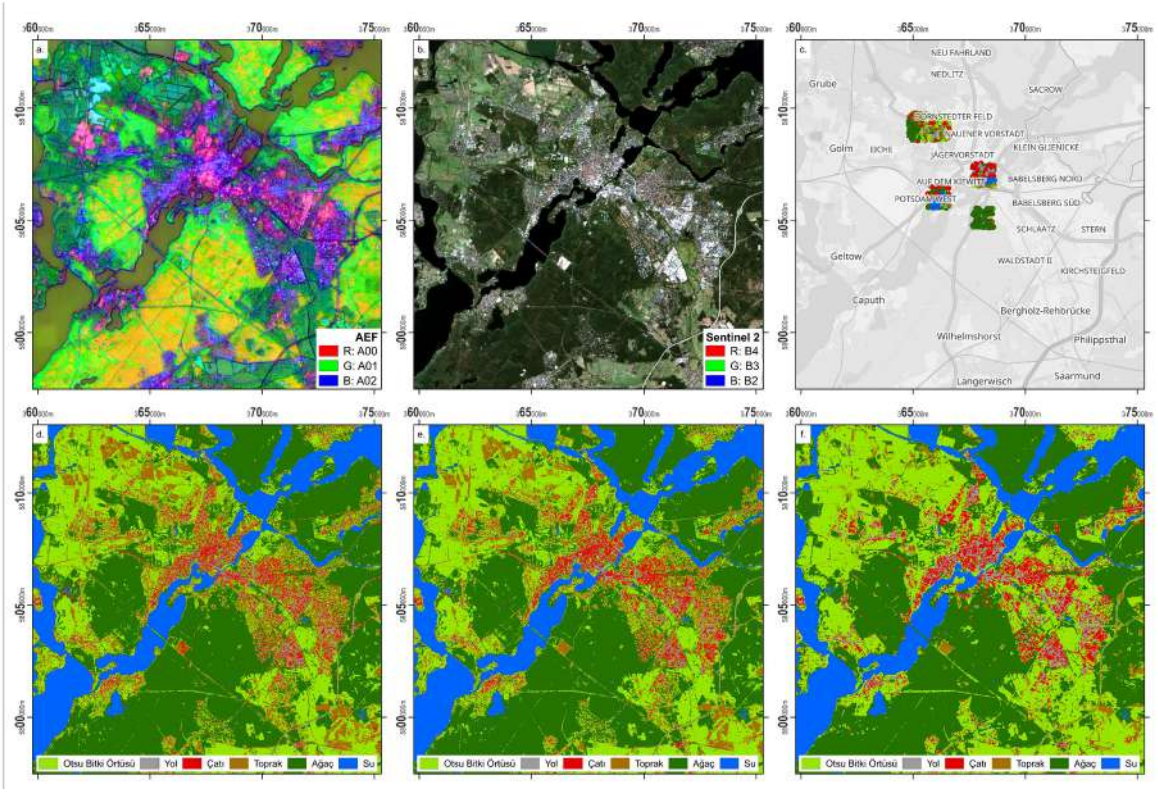
Results: *The accuracy analysis results obtained for the three data scenarios are presented in Table 1. Overall accuracy increased from S-1 = 74,13% to S-2 = 77,61% and S-3 = 81,85%. While the water and tree classes were distinguished with high accuracy across all scenarios, the road and rooftop classes yielded the lowest f-score values. S-3, composed solely of AEF data, achieved the best performance across all classes. According to the McNemar test results ($\alpha = 0,05$), no statistically significant difference was found between S-1 and S-2 ($\chi^2 = 2,79$) or between S-2 and S-3 ($\chi^2 = 2,95$). The difference between S-1 and S-3 was statistically significant ($\chi^2 = 7,14$; $p < 0,05$). Classification result maps are presented in Figure 1.*

Conclusion: *In this study, the AEF dataset achieved the highest classification performance with an overall accuracy of 81,85% and superior f-score values across all classes. AEF delivers scene-level semantic information in a compact representation space without requiring the download of terabytes of raw remote sensing data, and can be directly integrated into the classification workflow without additional feature extraction steps such as index computation or texture analysis. These characteristics suggest that AEF holds promising potential for operational applications in land cover classification problems.*

Keywords: Google AlphaEarth Foundations Embedding, pixel-based classification, accuracy assessment

Çizelge 1. Veri seti senaryolarına göre doğruluk analizi

Sınıf	**Senaryo 1 (Sentinel-2 + İndeksler + Doku Parametreleri)**			**Senaryo 2 (Sentinel-2 + İndeksler + Doku Parametreleri + Sentinel-1)**			**Senaryo 3 (AEF)**		
	Ü.D. (%)	**K.D. (%)**	**f-skor (%)**	**Ü.D. (%)**	**K.D. (%)**	**f-skor (%)**	**Ü.D. (%)**	**K.D. (%)**	**f-skor (%)**
Otsu Bitki Örtüsü	72,34	**75,56**	73,91	72,34	**75,56**	73,91	**78,72**	71,15	**74,75**
Yol	43,75	65,63	52,50	47,92	**85,19**	61,33	**60,42**	82,86	**69,88**
Çatı	68,75	55,00	61,11	**78,13**	53,19	63,29	**78,13**	**59,52**	**67,57**
Toprak	66,67	54,17	59,77	76,92	66,67	71,43	**79,49**	**79,49**	**79,49**
Ağaç	92,59	90,91	91,74	92,59	89,29	90,91	**94,44**	**98,08**	**96,23**
Su	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**
G.D. (%)		74,13			77,61			**81,85**	



Şekil 1. Çalışma alanına ait görüntüler ve sınıflandırma haritaları: (a) AEF sahte renk kompoziti, (b) Sentinel-2 gerçek renk kompoziti, (c) yersel doğrulama noktaları, (d) S-1, (e) S-2 ve (f) S-3 sınıflandırma haritaları.

KAYNAKLAR

Brown, C. F., Kazmierski, M. R., Pasquarella, V. J., Rucklidge, W. J., Samsikova, M., Zhang, C., ... & Kohli, P. 2025. Alphaearth foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. *arXiv preprint*, arXiv:2507.22291.

EnMAP-Box Development Team. 2025. Land Cover Potsdam polygon [Veri seti]. *GitHub*. https://github.com/EnMAP-Box/enmap-box/blob/main/enmapbox/exampledata/landcover_potsdam_polygon.gpkg (Erişim tarihi: 31 Mayıs 2026)

DNBR KILAVUZLU ZAYIF DENETİMLİ ÖĞRENME VE SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİNİ KULLANARAK DERİN ÖĞRENME TABANLI YANMIŞ ALAN HARITALAMA

Sohaib K M ABUJAYYAB[1], Şüheda Semih AÇMALI[2], Mesut ÖZDAĞ[3], İsmail Rakıp KARAŞ[4]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, 78100, Merkez, Karabük, sjayyab@karabuk.edu.tr
[2]Öğr. Gör., Karabük Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, 78100, Merkez, Karabük, semihacmali@karabuk.edu.tr
[3]Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, 78100, Merkez, Karabük, mesut.ozdag@karabuk.edu.tr
[4]Prof. Dr., Karabük Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, 78100, Merkez, Karabük, ismail.karas@karabuk.edu.tr

ÖZET

Yangın sonrası yanık alanların belirlenmesinde kullanılan fark Normalize Yanıklık Oranı (dNBR), düşük maliyetli eğitim etiketleri sağlayabilmekte; ancak bu etiketlerin belirsizliği derin öğrenme sonuçlarının yorumlanmasını güçleştirmektedir. Bu çalışmada, Karabük'teki 2025 orman yangınları bağlamında hazırlanan altı kanallı Sentinel-2 verileri ve dNBR tabanlı olduğu bildirilen ikili maskeler kullanılarak dört segmentasyon ağının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Veri kümesi 128 × 128 piksel boyutunda 180 parçadan oluşmaktadır. Rastgele ayrılan 144 parça eğitimde, 36 parça ise eğitim boyunca doğrulama ve son değerlendirmede kullanılmıştır. U-Net, U-Net++, U-Net 3+ ve V-Net'ten esinlenen iki boyutlu kalıntılı ağ, Adam optimizasyonu ve ikili çapraz entropi kaybıyla 20 epoch eğitilmiştir. Değerlendirme, 589.824 piksel üzerinden mevcut etiket maskeleriyle uyumu ölçmektedir. U-Net; %92,55 genel doğruluk, %84,07 F1/Dice ve %72,51 IoU ile en yüksek genel dengeyi sağlamıştır. En yüksek kesinlik U-Net 3+'ta (%86,56), en yüksek duyarlılık ise V-Net uyarlamasında (%88,22) elde edilmiştir. U-Net 3+ yanlış pozitifleri azaltırken daha fazla yanık pikseli kaçırmış; V-Net uyarlaması ters yönde bir hata dengesi göstermiştir. Bulgular, bu veri kümesi ve eğitim bütçesinde daha karmaşık bağlantı yapılarının kendiliğinden daha yüksek segmentasyon başarısı sağlamadığını göstermektedir. Aynı değerlendirme kümesinin eğitim sırasında izlenmesi, tek sahneden rastgele parçalama ve sıfır dolgu piksellerinin ölçümlere katılması nedeniyle sonuçlar bağımsız saha doğruluğu olarak yorumlanmamalıdır.

Anahtar Sözcükler: derin öğrenme, dNBR, Karabük, yanık alan, zayıf denetim

ABSTRACT

DNBR BASED WEAKLY SUPERVISED LEARNING AND DEEP LEARNING-BASED BURNED AREA MAPPING USING SENTINEL-2 IMAGES

The differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) can provide inexpensive training labels for post-fire burned area mapping, although uncertainty in these labels complicates the interpretation of deep learning results. This study compares four segmentation networks using six-channel Sentinel-2 data prepared in the context of the 2025 forest fires in Karabük, Türkiye, and binary masks reported to originate from dNBR. The dataset comprises 180 patches of 128 × 128 pixels. A random split allocated 144 patches to training and 36 patches to both validation monitoring during training and final evaluation. U-Net, U-Net++, a simplified U-Net 3+, and a V-Net-inspired two-dimensional residual network were trained for 20 epochs using Adam and binary cross-entropy. Evaluation measures agreement with the existing label masks over 589,824 pixels. U-Net achieved the highest overall accuracy (92.55%), F1/Dice (84.07%), and intersection over union (72.51%). The highest precision was obtained by U-Net 3+ (86.56%), whereas the V-Net adaptation achieved the highest recall (88.22%). U-Net 3+ reduced false positives at the cost of missing more burned pixels; the V-Net adaptation exhibited the opposite trade-off. These findings indicate that more complex feature connections do not automatically yield better segmentation under the present dataset and training budget. Reuse of the evaluation subset for validation monitoring, random patch splitting within a single scene, and inclusion of zero-padding pixels limit interpretation as independent mapping accuracy.

Keywords: burned area, deep learning, dNBR, Karabük, weak supervision

1. GİRİŞ

Yanık alan haritaları, yangın sonrası hasar değerlendirmesi ve ekosistem izleme çalışmalarında yangından etkilenen yüzeylerin konumunu ortaya koyar. Uydu görüntülerinin sağladığı spektral ve zamansal bilgi, geniş alanların tutarlı biçimde incelenmesine olanak tanır. Sentinel-2 görüntüleriyle gerçekleştirilen çalışmalar, yanık alan sınırlandırma ile yanma şiddetinin değerlendirilmesini birlikte ele almaktadır (Llorens vd., 2021). Bununla birlikte, bu iki hedef birbirinden ayrılmalıdır: ikili segmentasyon yanmış ve yanmamış pikselleri ayırırken yanma şiddeti analizi ekolojik etkinin derecesini belirlemeyi amaçlar. Bu bildirinin hedefi ikili yanık alan segmentasyonudur.

NBR, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi yansıtımları arasındaki karşıtlıktan yararlanır. Yangın öncesi ve sonrası NBR farkı olan dNBR, yangına bağlı değişimin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak indeksin yorumlanması görüntü tarihi, yüzey özellikleri ve aydınlanma koşullarından etkilenebilir. Fassnacht vd. (2021), ayakta kalan ölü ağaçların oluşturduğu gölgelerin Sentinel-2 tabanlı dNBR sinyalinde belirgin etkileri olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla eşiklenmiş bir indeks maskesi, hatasız bir saha referansı olarak kabul edilmemelidir.

Evrişimli sinir ağları, spektral özelliklerin yanında komşuluk ilişkilerini de öğrenebildiği için yanık alanların segmentasyonunda kullanılmaktadır. Farasin vd. (2020), Double-Step U-Net yaklaşımıyla yanık alan belirleme ve hasar şiddeti tahminini iki aşamada ele almıştır. Pinto vd. (2021) ise Sentinel-2 görüntülerini VIIRS kaynaklı kaba maskelerle birleştirmiş ve eğitim hedeflerini dNBR tabanlı yarı otomatik bir süreçle üretmiştir. Bu çalışmalar, spektral

indekslerin eğitim etiketlerinin oluşturulmasında kullanılabileceğini göstermekte; etiket kalitesinin ve bağımsız doğrulamanın önemini ortaya koymaktadır.

Zayıf denetimli öğrenme, eksik, kaba veya hatalı olabilen etiketlerden yararlanan yöntemleri kapsar (Zhou, 2018). Bu çalışmada zayıf denetim, dNBR kökenli olduğu belirtilen hazır ikili maskelerin eğitim hedefi olarak kullanılması anlamındadır. Ayrı bir dikkat modülü, güven ağırlıklandırması veya sözde etiket güncellemesi uygulanmamıştır. Araştırmanın amacı, aynı altı kanallı veri kümesi üzerinde U-Net, U-Net++, U-Net 3+ ve V-Net esinli iki boyutlu ağın 20 epoch sonunda gösterdiği etiket uyumunu karşılaştırmaktır. Katkı, bu deney koşullarında mimari seçiminin kesinlik –duyarlılık dengesine etkisini ve sonuçların yorumlanma sınırlarını ortaya koymaktır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

Çalışma, Karabük'te Temmuz 2025'te meydana gelen orman yangınları bağlamında yürütülmüştür. Karabük Valiliği, Safranbolu Çavuşlar ve Ovacık Kışla köylerindeki yangınların 23 Temmuz 2025'te başladığını bildirmiştir (Karabük Valiliği, 2025). Deney, il genelindeki bütün yangınların birleşik değerlendirmesini değil, tek bir görüntü ve buna karşılık gelen maske rasterından oluşturulan örneklem kümesini kapsamaktadır. Kaynak rasterın sınırları yaklaşık 32,677925–32,846988° doğu boylamları ve 41,035581–41,165298° kuzey enlemleri arasındadır. Bu coğrafi kapsamın belirli bir resmî yangın perimetresiyle birebir eşleştirilmesi bu deneyin kapsamında değildir.

Kaynak görüntü 1882 sütun ve 1444 satırdan oluşmakta; bant açıklamalarında B4, B3, B2, B8, B11 ve B12 sıralaması bulunmaktadır. Model girdisi 180 × 128 × 128 × 6 boyutundadır. Böylece deney, görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bilgiyi temsil eden altı kanallı bir girdiye dayanmaktadır. Model girdisine ayrıca dNBR, NDVI, NDMI veya SAVI kanalı eklenmemiştir. NPY dönüşümünde kanal sırasının korunduğunu belgeleyen üretim kaydı bulunmadığından nitel gösterimdeki ilk kanal belirli bir bant adıyla etiketlenmemiştir.

Görüntü ve maske WGS84 coğrafi koordinat sistemindedir (EPSG:4326). Rasterın iki eksendeki örnekleme aralığı yaklaşık 0,0000898315 derecedir. Bu nedenle dışa aktarılmış hücreler için doğrudan eşit metrik kenarlı "10 m × 10 m" tanımı kullanılmamıştır. Bildiride hektar veya metre cinsinden perimetre sonucu raporlanmamaktadır. Görüntü edinim tarihleri, ürün seviyesi, bulut maskeleme ayrıntıları ve dNBR eşiği deney kayıtlarında yer almadığından bu unsurların etkisi ayrıca değerlendirilmelidir.

3. YÖNTEM

3.1 Etiketleme Yaklaşımı ve Veri Hazırlama

Çalışmanın kavramsal etiketleme yaklaşımında, yangın öncesi ve sonrası NBR farkından bir başlangıç maskesi oluşturulur. Yakın kızılötesi yansıtımı NIR, kısa dalga kızılötesi yansıtımı SWIR ve maske eşiği τ ile gösterildiğinde bu ilişki Eşitlik 1'de verilmektedir. Bu ifade etiket üretiminin kavramsal tanımıdır; mevcut deneyde dNBR yeniden hesaplanmamış, hazır maske kullanılmıştır.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \; ; \quad dNBR = NBRönce - NBRsonra \; ; \quad y = 1(dNBR > \tau) \tag{1}$$

Maskeler 0 değerini arka plan, 1 değerini yanık alan olarak taşımaktadır. Kaydedilmiş maske dizisi, tek maske rasterının örtüşmeyen 128 × 128 piksel parçalara ayrılması ve sınır parçalarının sıfırla doldurulmasıyla birebir örtüşmektedir. Görüntü, 15 sütun ve 12 satırlık parça düzeniyle 180 örneğe dönüştürülmüştür. Orijinal 2.717.608 piksel, dolgu sonrasında 2.949.120 piksele tamamlanmıştır. Bu fark, 231.512 pikselin fiziksel gözlem yerine dolgu olduğunu göstermektedir.

Girdi dizileri float32 türüne dönüştürülmüş ve tüm veri kümesinin ortak minimum ve maksimumu kullanılarak min–maks normalizasyonu uygulanmıştır. Sonrasında sabit rastgelelik tohumu 42 ile örneklerin %80'i eğitime, %20'si değerlendirmeye ayrılmıştır. Ayrım parça düzeyinde rastgeledir; komşu parçalar farklı alt kümelere düşebilmektedir. Normalizasyon istatistikleri bölünmeden önce hesaplandığı için değerlendirme alt kümesi bu ön işlemde de temsil edilmektedir.

3.2 Karşılaştırılan Ağlar

U-Net, kodlayıcı ve çözücü arasında karşılık gelen ölçeklerdeki özellikleri birleştiren atlama bağlantılarına sahiptir (Ronneberger vd., 2015). Burada kullanılan ağ üç özellik seviyesinden ve iki aşağı örnekleme adımından oluşmaktadır. U-Net++, aynı ölçekler arasında iç içe yoğun bağlantılar kullanmaktadır (Zhou vd., 2018). Yerel U-Net++ uygulamasında derin denetim bulunmamaktadır. Bu iki ağın parametre sayıları sırasıyla 472.417 ve 518.561'dir.

U-Net 3+, farklı ölçeklerdeki özellikleri bir araya getiren bağlantılar temel alınarak uygulanmıştır (Huang vd., 2020). Üç seviyeli bu uygulama, özgün çalışmadaki derin denetim ve sınıflandırma rehberli modülü içermemektedir. 906.145 parametre ile bu karşılaştırmanın en büyük ağıdır. Bu nedenle özgün mimaride bildirilen parametre verimliliği, burada sınanmadan genellenemez.

Özgün V-Net, üç boyutlu hacimsel tıbbi görüntü segmentasyonu için geliştirilmiştir (Milletari vd., 2016). Bu deneydeki V-Net ise Conv2D ve Conv2DTranspose katmanları kullanan, 611.265 parametreli iki boyutlu kalıntılı bir

uyarlamadır. Çalışmada "V-Net" kısaltması bu uyarlamayı belirtmektedir. Ağın zamansal veya hacimsel dinamikleri öğrendiği ileri sürülmemektedir. Dört ağ da aynı altı kanallı girdiyle tek kanallı sigmoid olasılık haritası üretmektedir.

3.3 Eğitim ve Değerlendirme Düzeni

Deneyin ortak ayarları Çizelge 1'de özetlenmiştir. Her ağ, Adam optimizasyonu ve ikili çapraz entropi kaybıyla 20 epoch eğitilmiş; olasılığı 0,5'ten büyük olan pikseller yanık sınıfına atanmıştır. Modeller son epoch sonunda değerlendirilmiş, en iyi doğrulama kaybına göre model seçimi veya erken durdurma yapılmamıştır. Veri artırma, sınıf ağırlıklandırması ve belirsizlik ağırlıklı kayıp uygulanmamıştır. Aynı veri ve epoch sayısı ortak bir karşılaştırma bütçesi sağlasa da farklı büyüklükteki ağların eşit hesaplama maliyetine sahip olduğu anlamına gelmez.

Çizelge 1. Ortak deney ayarları

Ayar	**Uygulama**
Girdi ve maske boyutu	180 × 128 × 128 × 6 ve 180 × 128 × 128 × 1
Veri ayrımı	144 eğitim ve 36 doğrulama / son değerlendirme parçası
Epoch / yığın boyutu / tohum	20 / 8 / 42
Optimizasyon	Adam; öğrenme oranı 0,001; $\beta_1 = 0{,}9$; $\beta_2 = 0{,}999$
Kayıp ve karar	İkili çapraz entropi; sigmoid; olasılık > 0,5
Son model	20. epoch; erken durdurma ve model seçimi yok

Eğitimde 144 parça kullanılmıştır. Kalan 36 parça, her epoch sonunda validation_data olarak izlenmiş ve nihai metrikler de bu parçalarda hesaplanmıştır. Dolayısıyla üç ayrı eğitim, doğrulama ve test kümesi bulunmamaktadır. Şekillerdeki "val" ve sonuç dosyalarındaki "test" ifadeleri aynı alt kümeyi göstermektedir. Bu düzen, dışarıdan bağımsız bir testin yerine geçmez; eğitim sırasında izlenen ayrılmış parçalar üzerindeki son model başarısını gösterir.

Değerlendirmede parçaların pikselleri birlikte düzleştirilerek tek bir karışıklık matrisi hesaplanmıştır. Toplam 589.824 pikselin 133.842'si (%22,69) yanık, 455.982'si (%77,31) arka plan etiketlidir. Bu toplam içinde, maskede arka plan kabul edilen 21.504 sıfır dolgu pikseli (%3,65) de bulunmaktadır. Değerler, parça bazlı metriklerin ortalaması değildir. Dengesiz sınıf dağılımı nedeniyle genel doğruluğun yanında yanık sınıfına ait kesinlik, duyarlılık, F1/Dice ve IoU birlikte kullanılmıştır.

Doğru pozitif TP, doğru negatif TN, yanlış pozitif FP ve yanlış negatif FN olarak gösterildiğinde kullanılan ölçütler Eşitlik 2–4'te tanımlanmıştır. İkili segmentasyonda F1 ve Dice aynı ifadeye sahip olduğundan sonuç tablosunda tek sütunda sunulmuştur.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{2}$$

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \; ; \quad Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

$$F1 = Dice = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \; ; \quad IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \tag{4}$$

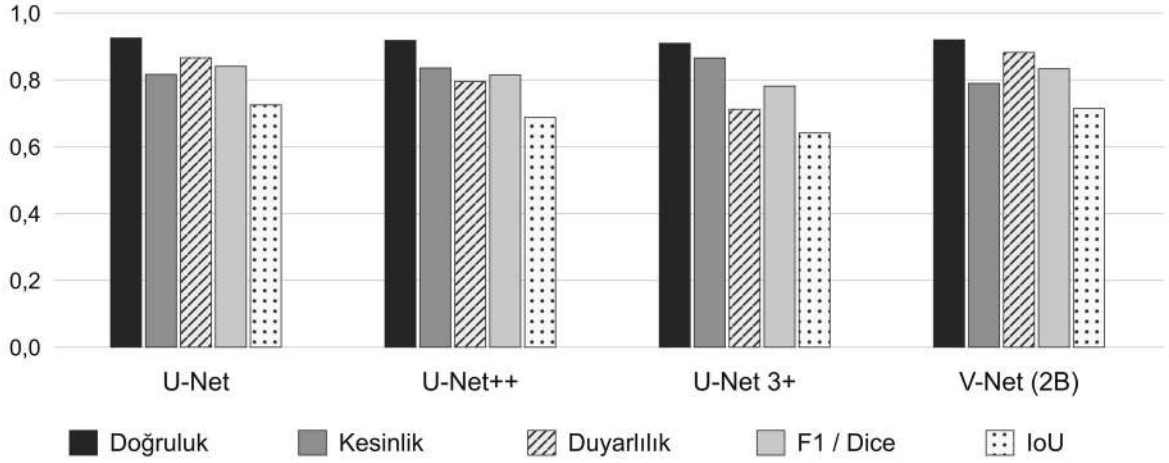
4. BULGULAR

Yirmi epoch sonundaki metrikler Çizelge 2'de, aynı değerlerin görsel karşılaştırması Şekil 1'de sunulmuştur. U-Net 0,9255 genel doğruluk, 0,8407 F1/Dice ve 0,7251 IoU ile bu üç ölçütte ilk sıradadır. V-Net uyarlaması 0,8333 F1/Dice ve 0,7143 IoU ile U-Net'i izlemektedir. U-Net'in V-Net'e göre farkı F1/Dice için yaklaşık 0,73, IoU için 1,08 yüzde puanıdır. Bu farklar tek koşuda gözlenen sayısal farklardır; istatistiksel anlamlılık göstermez.

U-Net++ için F1/Dice 0,8149 ve IoU 0,6877'dir. U-Net 3+ 0,8656 ile en yüksek kesinliği sağlarken duyarlılığı 0,7120'ye, IoU değeri 0,6411'e düşmektedir. Bu durum, yanık olarak işaretlenen piksellerin görece güvenilir olmasına karşın referans maskesindeki yanık piksellerin daha büyük bir bölümünün dışarıda bırakıldığını göstermektedir. V-Net'te ise duyarlılık 0,8822 ile en yüksek, kesinlik 0,7896 ile en düşük düzeydedir. Böylece mimariler arasındaki temel ayrım, yalnızca tek bir toplam skor üzerinden değil, kaçırılan ve fazla işaretlenen piksellerin dengesi üzerinden de görülmektedir.

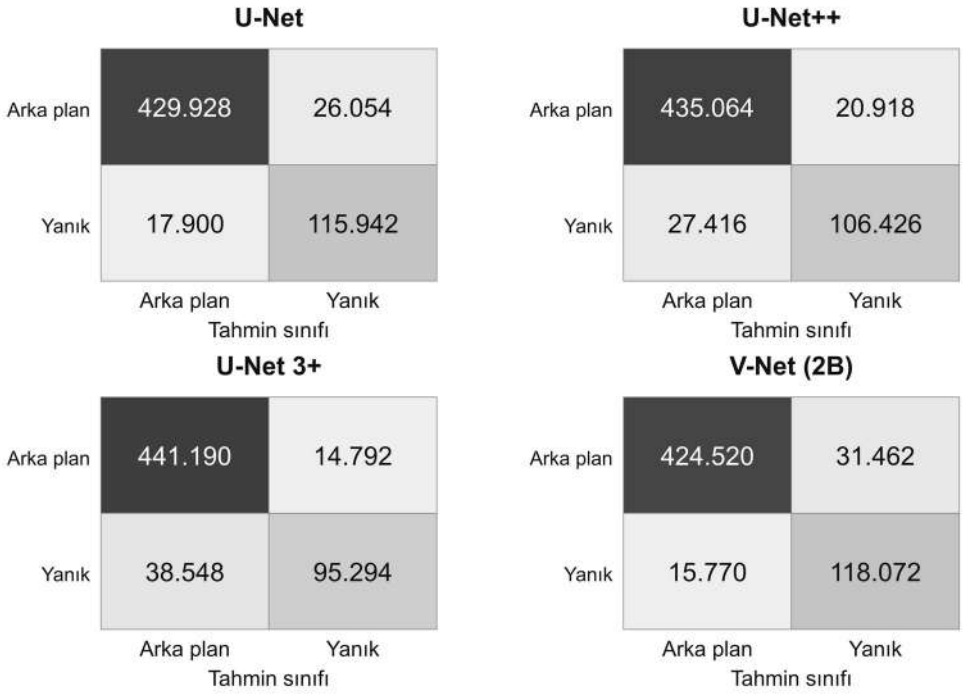
Çizelge 2. Ağların parametre sayıları ve değerlendirme ölçütleri

Model	Parametre	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 / Dice	IoU
U-Net	472.417	0,9255	0,8165	0,8663	0,8407	0,7251
U-Net++	518.561	0,9181	0,8357	0,7952	0,8149	0,6877
U-Net 3+	906.145	0,9096	0,8656	0,7120	0,7813	0,6411
V-Net (2B)	611.265	0,9199	0,7896	0,8822	0,8333	0,7143



Şekil 1. Yirmi epoch sonunda değerlendirme kümesindeki ölçütlerin karşılaştırılması. F1 ve Dice aynı formülle hesaplandığı için birlikte gösterilmiştir. V-Net iki boyutlu uyarlamadır.

Piksel sayılarıyla gösterilen karışıklık matrisleri Şekil 2'de verilmiştir. U-Net 115.942 doğru pozitif üretirken 17.900 yanık pikseli kaçırmış ve 26.054 arka plan pikselini yanık olarak işaretlemiştir. V-Net, 118.072 doğru pozitif ve 15.770 yanlış negatif ile yanık sınıfını en kapsamlı yakalayan modeldir; buna karşılık 31.462 yanlış pozitifle en fazla fazladan yanık tahmini üretmiştir.



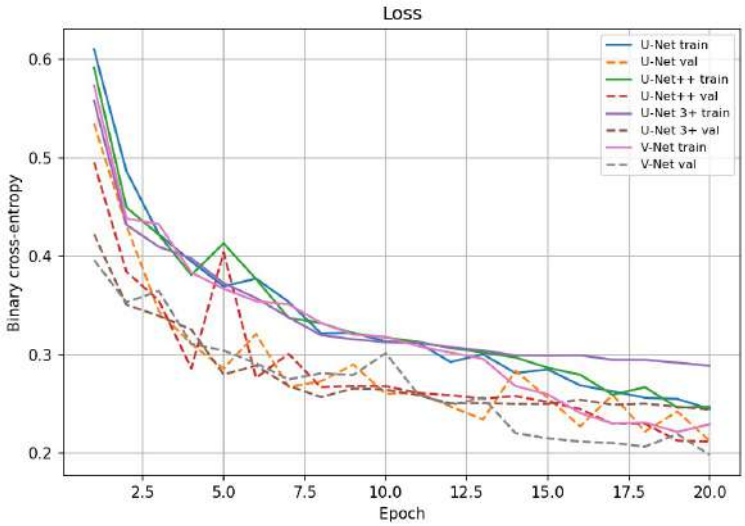
Şekil 2. Dört modelin mevcut etiket maskelerine göre karışıklık matrisleri. Değerler 589.824 piksel üzerinden hesaplanan ham sayılardır; 21.504 sıfır dolgu pikseli de toplam içindedir.

U-Net 3+'ta yanlış pozitif sayısı 14.792'ye düşmüş, ancak yanlış negatif sayısı 38.548'e yükselmiştir. U-Net'e göre yanlış pozitiflerde %43,23 azalma bulunurken yanlış negatifler yaklaşık 2,15 katına çıkmıştır. U-Net++ ise 20.918 yanlış pozitif ve 27.416 yanlış negatif ile bu iki eğilim arasında yer almaktadır. Toplam tahmin edilen yanık piksel

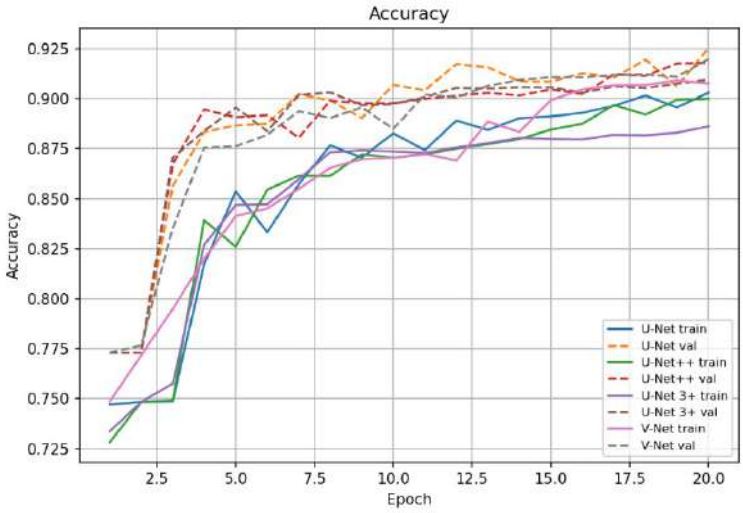
sayıları U-Net için 141.996, U-Net++ için 127.344, U-Net 3+ için 110.086 ve V-Net için 149.534'tür. Referans maskesindeki 133.842 yanık piksel dikkate alındığında U-Net ve V-Net daha geniş, diğer iki ağ daha dar pozitif kapsam üretmiştir. Bunlar dolgu içeren raster örnekleminin piksel sayılarıdır; hektar cinsinden alan tahmini değildir.

Eğitim kaybı ve doğruluk eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Dört ağda da kayıp ilk epochlarda hızla azalmakta, sonraki epochlarda daha yavaş değişmektedir. Eğitim doğruluğu genel olarak artmaktadır. U-Net 3+'ın eğitim kaybı son kısımda diğer ağların üzerinde kalırken doğruluk eğrisi de daha düşük düzeyde seyretmektedir. Bu görünüm, söz konusu modelin mevcut 20 epoch bütçesinde daha yüksek başarım sağlamadığını desteklemektedir; tek başına nedenin model büyüklüğü veya yetersiz yakınsama olduğunu kanıtlamaz.

a) İkili çapraz entropi kaybı



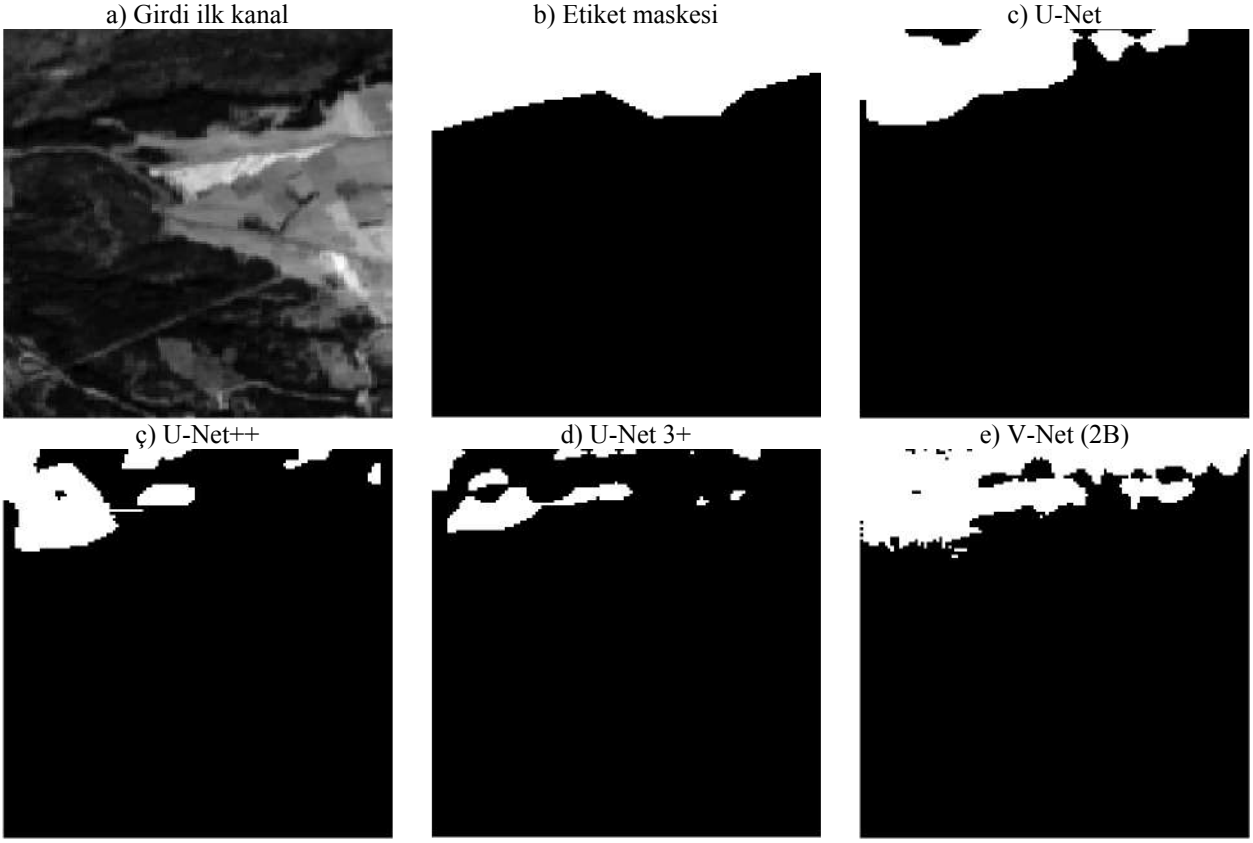
b) Piksel doğruluğu



Şekil 3. Yirmi epoch boyunca eğitim ve doğrulama eğrileri. Düz çizgiler eğitim, kesikli çizgiler doğrulama değerleridir. Grafikteki "val" alt kümesi, nihai metriklerin raporlandığı 36 parçalık kümenin aynısıdır.

Doğrulama kaybının zaman zaman eğitim kaybından düşük, doğrulama doğruluğunun ise yüksek olması tek başına daha güçlü genelleme kanıtı değildir. Alt kümelerin içerik ve güçlük farklılıkları bu görünümü etkileyebilir. Ayrıca doğrulama için izlenen alt küme nihai değerlendirmede de kullanılmıştır. Eğriler boyunca belirgin bir kötüleşme görülmemesi, bu nedenle bağımsız bir test veya çoklu eğitim tekrarı gereksinimini ortadan kaldırmamaktadır.

Nitel örnek Şekil 4'te sunulmuştur. Örnek, yanık etiket oranı %10'u aşan ilk değerlendirme parçasıdır; seçilen parçada bu oran %19,72'dir. İlk panel girdi dizisinin ilk kanalını gri tonlu olarak göstermektedir. Etiket ve tahmin panellerinde beyaz pikseller yanık sınıfını, siyah pikseller arka planı belirtmektedir. Bu seçim rastgele örnekleme veya en iyi örnek seçimi değildir; önceden tanımlı bir pozitif piksel oranı koşuluna dayanmaktadır.



Şekil 4. Yanık etiket oranı %19,72 olan örnek parçanın nitel karşılaştırması. Beyaz yanık, siyah arka plan sınıfıdır. Paneller aynı örneğe aittir; kaynak görsel yalnızca sayfa yerleşimi için ayrı paneller hâlinde gösterilmiştir.

Örnekte U-Net ve V-Net'in üst bölümde daha geniş pozitif bölgeler oluşturduğu, U-Net++ ve U-Net 3+ tahminlerinin ise daha sınırlı ve parçalı olduğu görülmektedir. V-Net tahmininde küçük pozitif adacıklar, U-Net tahmininde bazı arka plan boşlukları bulunmaktadır. Bu gözlemler, toplu kesinlik–duyarlılık dengesiyle uyumludur. Bununla birlikte, tek bir parça yangın perimetresinin bütününü temsil etmez. Sınır F-skoru veya Boundary IoU hesaplanmadığı için bu görsel üzerinden nicel sınır üstünlüğü çıkarılmamıştır.

5. TARTIŞMA

U-Net'in hem en az parametreye sahip olması hem de en yüksek IoU ve F1/Dice değerlerini üretmesi, bu deneyde daha karmaşık özellik birleştirme yapılarının otomatik bir avantaj sağlamadığını göstermektedir. Bununla birlikte, karşılaştırılan ağlar özgün makalelerdeki bütün eğitim bileşenlerini içermemektedir. Özellikle derin denetimin uygulanmaması ve ortak 20 epoch bütçesi, sonuçların mimari ailelerinin bütün olası uygulamalarına genellenmesini sınırlar. U-Net bu deney için uygun bir başlangıç modeli olarak öne çıkmakta; daha kapsamlı bir üstünlük iddiası için model başına hiperparametre araması ve tekrar deneyleri gerekmektedir.

Hata tercihleri kullanım amacına göre farklılaşabilir. U-Net 3+'ın yüksek kesinliği, fazladan yanık işaretlemesini sınırlayan bir tahmin davranışını; V-Net'in yüksek duyarlılığı ise referanstaki yanık alanları kaçırmama yönündeki davranışı göstermektedir. Ancak bu gözlem, eşik 0,5 için geçerlidir. Hassasiyetin öncelikli olduğu uygulamalarla yanlış alarm maliyetinin yüksek olduğu uygulamalarda farklı eşikler seçilebilir. Böyle bir seçim, burada tekrar kullanılan değerlendirme kümesinden ayrı bir doğrulama kümesinde yapılmalıdır.

Zayıf etiketlerin kullanılması, ayrıntılı manuel etiket ihtiyacını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Buna karşın bir ağın dNBR kökenli maskelerle yüksek uyum göstermesi, bu maskelerdeki hataları düzelttiğini kanıtlamaz. Pinto vd. (2021) dNBR tabanlı hedef üretimini görsel kontrol ve dış referans karşılaştırmasıyla desteklemiştir. Buradaki deneyde ise bağımsız uzman çizimi, arazi gözlemi veya farklı çözünürlüklü doğrulama verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle raporlanan ölçütler mevcut ikili etiketlerle uyum olarak değerlendirilmelidir. dNBR başlangıç haritasına göre yanlış pozitiflerin azaltıldığı veya gerçek yanık sınırlarının iyileştirildiği sonucuna varılamaz.

Örneklerin tek sahneden gelmesi ve komşu parçaların rastgele ayrılması, eğitim ve değerlendirme arasındaki mekânsal bağımlılığı artırabilir. Ortak normalizasyon istatistiklerinin bölünmeden önce hesaplanması da değerlendirme ayrılığını zayıflatmaktadır. Ayrıca sıfır dolgu piksellerinin arka plan olarak metriklere katılması, ölçümlerin yalnızca geçerli arazi piksellerini temsil etmesini engellemektedir. Bu etkileri azaltmak için normalizasyon yalnızca eğitim verisinde belirlenmeli, geçerli veri maskesiyle dolgu dışlanmalı ve birbirinden ayrılmış coğrafi bloklar veya farklı yangın olayları üzerinde değerlendirme yapılmalıdır.

Çalışmanın diğer sınırlılıkları, dNBR etiketlerinin üretim tarihlerinin ve eşik değerinin deney kayıtlarında bulunmaması, tek rastgelelik tohumu kullanılması ve işlem süresinin ölçülmemesidir. Tekrarlı eğitim veya uygun mekânsal yeniden örnekleme ile belirsizlik analizi yapılmadığından güven aralığı ve istatistiksel anlamlılık raporlanmamıştır. Süre ölçümleri olmadan operasyonel hız değerlendirilemez. Sonraki aşamada bağımsız referansların hazırlanması, dNBR temel yönteminin aynı geçerli piksellerde sınanması, sınır ölçütlerinin hesaplanması ve etiket güvenilirliğine dayalı kayıpların incelenmesi gerekmektedir. Bu adımlar, maske uyumundan gerçek haritalama doğruluğuna geçişin değerlendirilmesini sağlayacaktır.

6. SONUÇLAR

Karabük yangınları bağlamında hazırlanan altı kanallı Sentinel-2 parçaları üzerinde gerçekleştirilen 20 epoch karşılaştırmasında U-Net, %72,51 IoU ve %84,07 F1/Dice ile en yüksek dengeli etiket uyumunu sağlamıştır. U-Net 3+ %86,56 ile en yüksek kesinliği, V-Net esinli iki boyutlu ağ ise %88,22 ile en yüksek duyarlılığı üretmiştir. Bu sonuçlar, seçilen mimarinin fazladan yanık tespiti ile kaçırılan yanık pikseller arasındaki dengeyi değiştirdiğini göstermektedir.

Bulgular, tek sahneden rastgele ayrılmış ve eğitim sırasında izlenmiş parçalar üzerinde, mevcut sözde etiketlere göre elde edilmiştir. Dolayısıyla dNBR'ye üstünlük, bağımsız yangınlarda genelleme ve perimetre doğruluğu henüz ortaya konmuş değildir. Çalışma, daha kapsamlı bir haritalama sisteminin geliştirilmesi için karşılaştırmalı bir ön deney sunmaktadır. Bağımsız doğrulama, dolgu piksellerinin dışlanması ve sınır değerlendirmesi tamamlandığında, yöntemin CBS tabanlı yangın sonrası izleme süreçlerindeki kullanılabilirliği daha güvenilir biçimde belirlenebilecektir.

KAYNAKLAR

Farasin, A., Colomba, L. ve Garza, P., 2020. Double-Step U-Net: A Deep Learning-Based Approach for the Estimation of Wildfire Damage Severity through Sentinel-2 Satellite Data. Applied Sciences, 10(12): 4332. https://doi.org/10.3390/app10124332

Fassnacht, F.E., Schmidt-Riese, E., Kattenborn, T. ve Hernández, J., 2021. Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 95: 102262. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102262

Huang, H., Lin, L., Tong, R., Hu, H., Zhang, Q., Iwamoto, Y., Han, X., Chen, Y.-W. ve Wu, J., 2020. UNet 3+: A Full-Scale Connected UNet for Medical Image Segmentation. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelona, İspanya, 1055–1059. https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053405

Karabük Valiliği, 2025. Yangın bölgesinde hayat normale dönüyor. 31 Temmuz 2025. https://www.karabuk.gov.tr/yangin-bolgesinde-hayat-normale-donuyor [Erişim tarihi: 08.09.2026].

Llorens, R., Sobrino, J.A., Fernández, C., Fernández-Alonso, J.M. ve Vega, J.A., 2021. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 95: 102243. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102243

Milletari, F., Navab, N. ve Ahmadi, S.-A., 2016. V-Net: Fully Convolutional Neural Networks for Volumetric Medical Image Segmentation. Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), Stanford, ABD, 565–571. https://doi.org/10.1109/3DV.2016.79

Pinto, M.M., Trigo, R.M., Trigo, I.F. ve DaCamara, C.C., 2021. A Practical Method for High-Resolution Burned Area Monitoring Using Sentinel-2 and VIIRS. Remote Sensing, 13(9): 1608. https://doi.org/10.3390/rs13091608

Ronneberger, O., Fischer, P. ve Brox, T., 2015. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Münih, Almanya, LNCS 9351: 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Zhou, Z., Siddiquee, M.M.R., Tajbakhsh, N. ve Liang, J., 2018. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support, Granada, İspanya, LNCS 11045: 3–11. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00889-5_1

Zhou, Z.-H., 2018. A brief introduction to weakly supervised learning. National Science Review, 5(1): 44–53. https://doi.org/10.1093/nsr/nwx106

TÜRKİYE'DE KAYIN ORMANLARININ MEKÂNSAL DAĞILIMININ UZAKTAN ALGILAMA TABANLI SINIFLANDIRMA İLE HARİTALANMASI

Hande OKURLAR[a], Resul ÇÖMERT[b], Alper Ahmet ÖZBEY[c], Hasan Burak ÖZMEN[b], Nebi BİLİR[d], Mustafa ÜSTÜNER[e] ve Gordana KAPLAN[b]

[a] Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye
[b] Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye
[c] Güneybatı Anadolu Ormancılık Araştırma Enstitüsü, Antalya, Türkiye
[d] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Isparta, Türkiye
[e] Samsun Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
* Sorumlu yazar: handeokurlar322@gmail.com

ÖZET

Türkiye'de geniş yayılış gösteren kayın (Fagus spp.), orman ekosistemlerinin yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen önemli geniş yapraklı türlerdendir. Bununla birlikte, mevcut ormancılık veri setleri farklı tarihlerde üretilmiş olmaları, değişken ayrıntı düzeyleri ve güncellik sorunları nedeniyle kayın ormanlarının ülke genelindeki mekânsal dağılımını tutarlı biçimde ortaya koyamamaktadır. Tür düzeyinde güncel ve bütüncül ulusal haritaların sınırlı olması, kayın ormanlarının uzaktan algılama teknikleriyle modellenmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışma, Türkiye'deki kayın ormanlarını uzaktan algılama tabanlı bir iş akışıyla ulusal ölçekte haritalamayı ve zaman serisiyle izlemeyi amaçlamıştır. Google Earth Engine (GEE) platformunda hazırlanan Sentinel-2 yüzey yansıtım görüntüleri, mevsimsel kompozitler, spektral bantlar ve bitki indeksleri temel veri kaynağını oluşturmuştur. Güvenilir referans örnekleriyle hedef sınıfa ait spektral imza belirlenmiş ve heterojen arazi örtüsü içinde yalnızca kayın sınıfına odaklanan Spektral Açı Eşleştiricisi (SAM) tabanlı tek sınıf (one-class) yaklaşımı uygulanmıştır. Model performansı; genel değerlendirme örnekleri, eğitim ve eşik belirleme sürecinden ayrı bölgesel doğrulama verileri, doğruluk metrikleri ve hata dengeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Senaryo karşılaştırmalarında, Haziran–Ağustos dönemini kapsayan spektral indeksli yaz veri setinin P90 eşiğindeki tekrarlı çalıştırmaları %80–82 genel doğruluk ve %85–86 F1 skoru üretmiştir. Eğitim örneklemi duyarlılık analizleri, 1.000 noktanın model kararlılığı için yeterli olduğunu göstermiştir. Model, etkileşimli bir GEE uygulamasına entegre edilmiş; 2016–2025 yıllarına uygulanarak yıllık kayın ormanı haritaları üretilmiş ve dağılım mekânsal-zamansal olarak değerlendirilmiştir. Bölgesel doğrulama sonuçları, model başarısının orman yapısı ve ekolojik bağlama göre değiştiğini göstermiştir. Elde edilen ulusal harita ürünü, yerel saha ölçümlerini destekleyen ve geçmişe dönük orman izleme çalışmalarında kullanılabilecek sürdürülebilir bir altlık sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Google Earth Engine, kayın ormanları, SAM, Sentinel-2, uzaktan algılama.

ABSTRACT

MAPPING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF BEECH FORESTS IN TÜRKİYE USING REMOTE SENSING-BASED CLASSIFICATION

Beech (Fagus spp.) is an important broadleaved tree species widely distributed across Türkiye. Existing forestry datasets, produced at different times and levels of detail, cannot consistently represent its nationwide distribution. The limited availability of current and comprehensive species-level maps necessitates remote-sensing-based modelling. This study aimed to map beech forests across Türkiye and monitor them using a time-series workflow. Sentinel-2 surface reflectance imagery prepared in Google Earth Engine (GEE), seasonal composites, spectral bands, and vegetation indices constituted the main data source. A target-class spectral signature was derived from reliable reference samples, and a one-class Spectral Angle Mapper (SAM) approach was applied to focus exclusively on beech within heterogeneous land cover. Performance was assessed using general evaluation samples, region-based validation data independent of training and threshold derivation, accuracy metrics, and error trade-offs. In repeated runs, the spectral-index-enhanced June–August dataset at the P90 threshold yielded 80–82% overall accuracy and F1 scores of 85–86%. Training-sample sensitivity analyses indicated that 1,000 points provided sufficient model stability. The model was integrated into an interactive GEE application and applied to 2016–2025 datasets to produce annual beech forest maps and assess spatiotemporal distribution. Regional results showed that performance varied with forest structure and ecological context. The resulting national map provides a sustainable basis for supporting field measurements and retrospective forest monitoring.

Keywords: beech forests, Google Earth Engine, remote sensing, SAM, Sentinel-2.

1. GİRİŞ

Ağaç türlerinin güncel ve mekânsal olarak tutarlı biçimde haritalanması; orman yönetimi, biyolojik çeşitliliğin izlenmesi ve iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Sentinel-2'nin 10–20 m mekânsal çözünürlüğü ve sık tekrar geçişinin yer yüzeyi izleme uygulamalarına sağladığı olanaklar açıklanmıştır (Drusch vd., 2012). Sentinel-2 verilerinin ürün ve ağaç türü sınıflandırmasındaki potansiyeli gösterilmiştir (Immitzer vd., 2016). Çok zamanlı Sentinel-2 verilerinin ağaç türlerinin spektral ve fenolojik farklılıklarını belirlemede etkili olduğu ortaya konmuştur (Persson vd., 2018). Bununla birlikte türler arası spektral benzerlik, karışık meşcere yapısı, farklı tarihlerde üretilmiş referans veriler ve ulusal ölçekte güvenilir negatif örneklerin yetersizliği önemli belirsizlikler oluşturmaktadır (Fassnacht vd., 2016).

Türkiye'de Doğu kayını (Fagus orientalis Lipsky) başlıca Trakya, Marmara'nın güneyi ve Karadeniz kuşağında, yer yer saf ancak çoğunlukla farklı geniş yapraklı ve iğne yapraklı türlerle karışık meşcereler halinde yayılış göstermektedir. Mevcut meşcere haritaları tür bileşimi açısından değerli olmakla birlikte farklı üretim yılları ve ayrıntı düzeyleri nedeniyle tek başına güncel, duvardan duvara bir ulusal ürün sağlamamaktadır. Polonya için geliştirilen güncel ulusal tür haritası, çok yıllı Sentinel-2 metrikleri, çevresel değişkenler, 4.500 saf meşcere poligonu ve RF

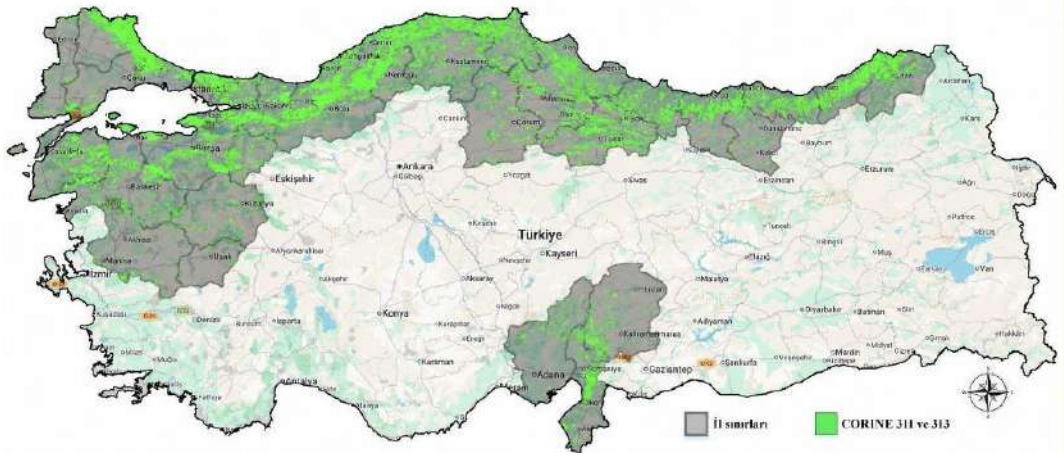
kullanmaktadır (Grabska-Szwagrzyk vd., 2024). Buradaki çalışma ise kayına odaklanan tek sınıf yapısı ve yıllık uygulanabilirliğiyle mevcut haritalardan ayrılmakta, ormancılık verilerini tamamlamaktadır (Okurlar vd., 2026).

Random Forest (RF) ve Destek Vektör Makineleri (SVM), her sınıf için yeterli, dengeli ve doğru etiketli örnek bulunduğunda türler arasındaki karar sınırlarını öğrenebilmektedir. Ancak bu çalışmada hedef dışı sınıf; farklı geniş yapraklı ve iğne yapraklı türleri, karışımları, gelişim çağlarını ve ekolojik koşulları kapsayan heterojen bir arka plandır. Bu çeşitliliğin ülke genelinde eksiksiz örneklenmesi güç olduğundan hedef sınıfa ait güvenilir pozitiflerden öğrenen tek sınıf yaklaşımı tercih edilmiştir. Tek sınıf sınıflandırma yöntemlerinin hedef sınıf örnekleriyle çalışabildiği belirtilmektedir (Khan ve Madden, 2014). Bu yaklaşımlarda model güvenilirliğinin ayrıca değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Mack vd., 2014). SAM, piksel ile referans imza arasındaki vektörel açıyı kullanması, parlaklık/albedo farklarına görece düşük duyarlılığı, hesaplama kolaylığı ve karar ölçütünün doğrudan yorumlanabilmesi nedeniyle one-class SVM gibi daha karmaşık sınırlara kıyasla bu ulusal iş akışında uygun bulunmuştur (Kruse vd., 1993). Bu tercih SAM'ın RF veya SVM'den genel olarak üstün olduğu anlamına gelmemekte; çalışmadaki pozitif-veri ağırlıklı problem yapısına uygunluğunu ifade etmektedir.

Çalışmanın amacı; farklı mevsimsel Sentinel-2 kompozitlerini, bant/indeks kombinasyonlarını, eğitim örneklem büyüklüklerini ve SAM eşiklerini karşılaştırarak Türkiye kayın ormanlarının mekânsal dağılımını modellemek; seçilen yapının performansını bağımsız saha ve bölgesel doğrulama alanlarıyla incelemek ve 2016–2025 döneminde tekrarlanabilir haritalama altyapısı oluşturmaktır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

Çalışma alanı, FAO GAUL 2015 il sınırları kullanılarak kayının bilinen çekirdek, geçiş ve marjinal yayılışlarını temsil eden Marmara, Batı, Orta ve Doğu Karadeniz ile Hatay–Osmaniye çevresindeki toplam 33 ili kapsamaktadır. İşlemler Google Earth Engine ortamında yürütülmüştür (Gorelick vd., 2017). Orman dışı alanlardan kaynaklanabilecek yanlış pozitifleri azaltmak amacıyla analiz yalnızca CORINE Land Cover 2018'in 311 (geniş yapraklı orman) ve 313 (karışık orman) sınıfları içinde yürütülmüştür (European Environment Agency, 2020).



Şekil 1. Çalışma alanı ve CORINE 2018 sınıf 311–313 orman maskesi.



Şekil 2. On tekrarlı analizlerden birinde 31.300 noktalık eğitim havuzundan rastgele seçilen 1.000 kayın noktasının mekânsal dağılımı.

Her tekrarda eğitim havuzundan farklı 1.000 nokta seçilmiştir. Noktalar kayının Trakya, Marmara, Batı, Orta ve Doğu Karadeniz ile Hatay–Osmaniye'deki bilinen yayılış alanlarını kapsamakta; yoğunlukları türün doğal dağılışı ve uygun referans poligonlarının sıklığına göre değişmektedir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan temel veri setleri.

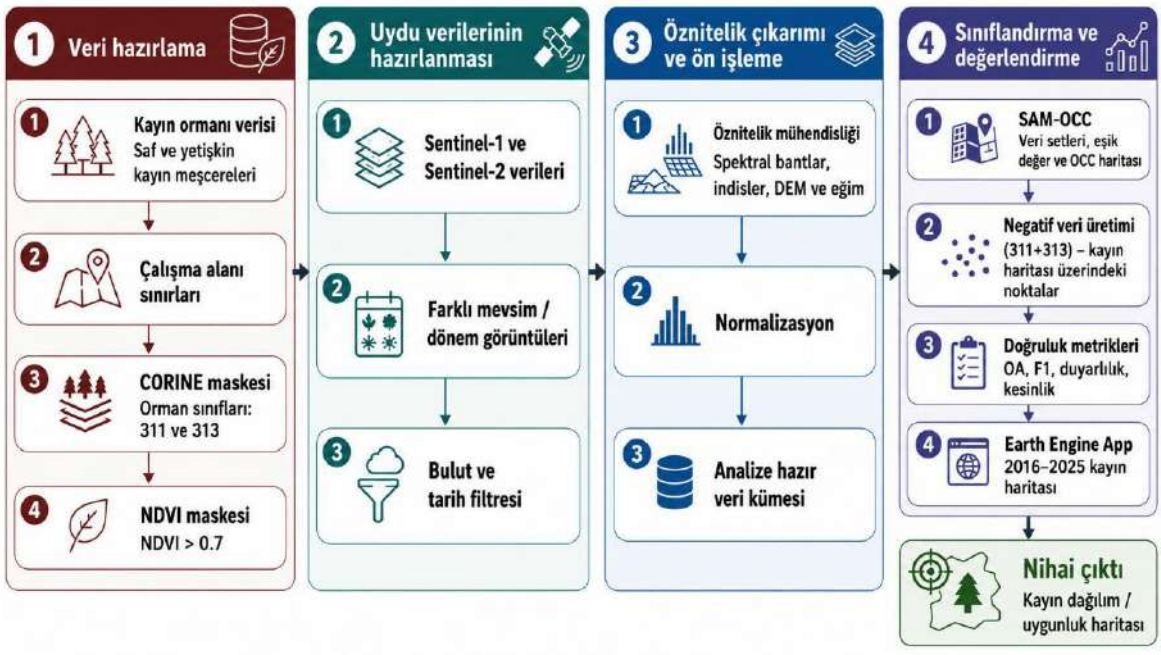
Veri seti	Kapsam / çözünürlük	Kullanım
Sentinel-2 MSI L2A	2024; 10 ve 20 m; aylık/mevsimsel	Spektral bantlar ve indeksler
Sentinel-2 Cloud Probability ve SCL	Görüntü tarihleriyle uyumlu; 10/20 m	Bulut, gölge, kar ve su maskesi
CORINE Land Cover 2018	100 m; sınıflar 311 ve 313	Orman maskesi
FAO GAUL 2015	İl düzeyi vektör sınırlar	33 ilin analize alınması
OGM meşcere verileri	2015–2025; vektör poligon	Pozitif eğitim ve test havuzu
Saha doğrulaması	Balıkesir 27–29.08.2025; Kırklareli 27.09–01.10.2025	Bağımsız bölgesel kontrol

2.1. Referans Verinin Kaynağı ve Niteliği

Pozitif referansların temel kaynağı OGM'nin 2015–2025 döneminde üretilmiş meşcere poligonlarıdır. Bu veri; tür bileşimi, gelişim çağı ve kapalılık bilgisi içerir. Doğrudan kullanım yerine önce saf kayın ve kayın baskın poligonlar seçilmiş; karışık veya belirsiz yapılar, gençlik çağları, düşük kapalılıklı alanlar ve poligon sınır etkisi oluşturabilecek örnekler mümkün olduğunca elenmiştir. Uydu sinyalinin üst örtüyü daha güçlü temsil etmesi amacıyla KnC, KnD ve KnE gelişim çağları kullanılmış, ayrıca NDVI < 0,7 olan noktalar çıkarılmıştır. Böylece 34.770 yüksek güvenilirlikli pozitif nokta elde edilmiştir.

Referans seçimi nicel bir "pikselde en az %x kayın" oranına dayanmamaktadır; saflık/baskınlık OGM meşcere kodu, gelişim çağı ve NDVI kalite kontrolüyle tanımlanmıştır. Bu nedenle sınıflandırılan piksel "kesin saf kayın" değil, kayın referans imzasına benzer ve kayın baskınlığı olası orman pikseli olarak yorumlanmalıdır. Sentinel-2'nin 10–20 m çözünürlüğünde karışık taçların aynı piksele girmesi temel sınırlılıklardandır. OGM katmanları farklı yıllara ait vektör ürünlerin birleşimidir; bütün veri için tek bir üretim ölçeği ve homojen konumsal doğruluk değeri tez veri paketinde bulunmadığından bu özellik bağımsız olarak doğrulanamamış, 2024 Sentinel-2 görüntüleriyle zamansal ve geometrik uyumsuzluk olası belirsizlik kaynağı olarak kabul edilmiştir.

3. YÖNTEM



Şekil 3. Veri hazırlama, öznitelik üretimi, SAM sınıflandırması ve doğrulama iş akışı.

Sentinel-2 görüntülerinde Cloud Probability ve SCL katmanlarıyla bulut, gölge, kar ve su pikselleri maskelenmiş; farklı çözünürlükteki bantlar ortak piksel geometrisinde birleştirilmiştir. B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 ve B12 bantları kullanılmıştır. Her dönem için NDVI, NDMI, NDRE1, NBR, MSI, RECI, TCARI, SIRERP, RERP1,

RERP2, MTCI, IRECI ve LCI hesaplanmış ve SAM vektörüne ayrı öznitelikler olarak eklenmiştir. Nihai Haziran, Temmuz ve Ağustos yapısında 3 × (10 bant + 13 indeks) olmak üzere 69 öznitelik bulunmaktadır.

3.1. Örnekleme, Referans İmza ve Mekânsal Temsil

34.770 pozitif nokta rastgele ve tekrarlanabilir biçimde yaklaşık %90 eğitim (31.300) ve %10 pozitif test (3.470) havuzlarına ayrılmıştır. Senaryo ve örneklem büyüklüğü analizlerinde eğitim havuzundan 250–2.000 noktalık alt örnekler çekilmiş; 1.000 nokta performans-kararlılık ve hesaplama maliyeti dengesi bakımından seçilmiştir. Genel değerlendirmede pozitif test havuzundan 1.000 nokta ile model eğitiminde hiç kullanılmayan 750 negatif orman noktası kullanılmıştır. Negatifler; CORINE 311/313 içinde kalan meşe, gürgen, kızılağaç, karaçam ve diğer kayın dışı türleri temsil eden OGM, saha ve görsel yorumlama destekli alanlardan seçilmiştir.

Referans havuzu çekirdek, geçiş ve marjinal kayın yayılışlarını kapsayan 33 ildeki uygun OGM poligonlarından türetilmiştir; dolayısıyla yalnızca birkaç sahaya dayanmamaktadır. Bununla birlikte 1.000 noktalık alt örnekleme bölge başına kota uygulanarak tabakalandırılmamış, ulusal eğitim havuzundan rastgele yapılmıştır. On tekrarlı analiz rastgele seçime karşı sayısal kararlılığı göstermiş olsa da, bu tasarım her ekolojik bölgenin eşit ağırlıkla temsil edildiğini garanti etmez. Bu nedenle gerçek eğitim noktalarının mekânsal dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur. Bununla birlikte, bölge bazlı örnek sayılarının ayrıca raporlanması örnekleme temsilinin daha ayrıntılı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

SAM için birden fazla endmember yerine tek bir ulusal imza kullanılmıştır. Her eğitim noktasındaki 69 öznitelik örneklenmiş ve her özniteliğin aritmetik ortalaması alınarak tek referans vektörü oluşturulmuştur. Ortalama, yerel gürültüyü azaltarak ülke ölçeğinde genel kayın temsilini üretmektedir; ancak farklı ekolojik bölgelerdeki spektral varyasyonu tek başına tam yansıtmayabilir. Bu risk, farklı bölgelerden referans kullanılması ve Bursa, Balıkesir/Güğü, Kırklareli/Kurudere ile Hatay–Osmaniye'de ayrı doğrulama yapılmasıyla değerlendirilmiştir. Bölgeye özgü veya çoklu endmember yaklaşımı gelecek çalışma gereksinimidir.

3.2. SAM ve Eşik Seçimi

Her pikselin 69 boyutlu öznitelik vektörü ile ortalama kayın referans vektörü arasındaki spektral açı hesaplanmıştır. Küçük açı yüksek benzerliği gösterir. Sürekli açı yüzeyini ikili kayın/kayın dışı haritasına dönüştürmek için eğitim örneklerinin açı dağılımındaki P85, P88, P90, P92 ve P95 yüzdelikleri karşılaştırılmıştır. P90, eğitim kayın noktalarının %90'ının altında kaldığı açı değeridir. Yüksek yüzdelikler kabul alanını genişleterek duyarlılığı, düşük yüzdelikler ise daha sıkı seçimle kesinliği artırabilmektedir.

Eşik değerinin sayısal değeri yalnızca eğitim noktalarının açı dağılımından türetilmiş ve pozitif test noktaları endmember/eşik hesabına katılmamıştır. Ancak P85–P95 seçenekleri arasından nihai P90 kararının verilmesinde genel değerlendirme kümesindeki F1 ve hata dengesi de kullanılmıştır. Dolayısıyla %82 genel doğruluk ve %86 F1 değeri tamamen dokunulmamış bir nihai test tahmini değil, senaryo seçimi performansıdır ve bir miktar iyimserlik içerebilir. Bu riski görünür kılmak amacıyla eğitimden ve eşik dağılımından ayrı saha/ROI doğrulamaları ayrıca raporlanmıştır; gelecekte eşik kalibrasyonu, model seçimi ve nihai test için üçlü ve mekânsal bloklu veri ayrımı önerilmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mevsimsel, öznitelik, eşik ve eğitim örneklem büyüklüğü deneyleri aynı doğruluk ölçütleriyle karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki çizelgeler, nihai Haziran–Ağustos, indeksli ve P90 eşikli yapının seçimine götüren bulguları özetlemektedir.

Çizelge 2. Mevsimsel Sentinel-2 senaryolarının genel performansı (P95; 1.000 eğitim, 750 negatif test noktası).

Veri seti	OA	Duy.	Kes.	F1	TP	TN	FP	FN	Bant
S2-SP	0,60	0,95	0,59	0,73	946	97	653	54	10
S2-SU	**0,73**	**0,97**	**0,67**	**0,80**	**965**	**308**	**442**	**35**	**10**
S2-AU	0,64	0,95	0,62	0,75	946	181	569	54	10
S2-SP-SU	0,63	0,96	0,61	0,75	957	143	607	43	20
S2-SP-AU	0,59	0,96	0,59	0,73	956	83	667	44	20
S2-SU-AU	0,65	0,96	0,62	0,76	959	173	577	41	20
S2-SP-SU-AU	0,62	0,94	0,61	0,74	941	137	613	59	30

Ham bantlı senaryolarda yaz kompoziti (S2-SU) %73 genel doğruluk, %97 duyarlılık ve %80 F1 ile en başarılı mevsim olmuştur. Çok mevsimli bant birleşimleri performansı kendiliğinden artırmamış; yüksek yanlış pozitif sayısı kesinliği sınırlamıştır.

Çizelge 3. Farklı öznitelik setlerine ait sınıflandırma performansı sonuçları (P95).

Veri seti	OA	Duy.	Kes.	F1	TP	TN	FP	FN	Bant
S2-SP-SU-AU-DEM	0,62	0,93	0,61	0,74	933	152	598	67	33
S2-SP-SU-AU-DEM-S1	0,61	0,95	0,60	0,73	947	112	638	53	42
S2-SP-SU-AU-DEM-S1-İnd.(13)	0,70	0,95	0,67	0,79	948	283	467	52	81
S2-SP-SU-SEP-OCT-NOV	0,61	0,94	0,60	0,74	940	135	615	60	50
S2-SP-SU-SEP-OCT-NOV-DEM	0,63	0,96	0,61	0,75	955	149	601	45	53
S2-SP-SU-SEP-OCT-NOV-DEM-S1	0,59	0,96	0,58	0,72	956	68	682	44	68
S2-SP-SU-SEP-OCT-NOV-DEM-S1-İnd.(13)	0,63	0,94	0,62	0,75	942	166	584	58	133

Spektral indeksler bazı birleşimlerde ayırt ediciliği belirgin biçimde artırmış; dört mevsim, DEM, Sentinel-1 ve 13 indeksli yapı %70 genel doğruluk ve %79 F1 üretmiştir. DEM ve radar değişkenlerinin tek başına veya her birleşimde tutarlı katkı sağlamaması, kayın ayrımında optik-fenolojik bilginin daha belirleyici olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4. F1 skoru %80 ve üzerinde olan senaryolar (1.000 eğitim, 750 negatif test noktası).

No	Veri seti	OA	Duy.	Kes.	F1	TP	TN	FP	FN	Bant	Eşik
1	S2-SU	0,73	0,95	0,69	0,80	952	324	426	48	10	P95
2	S2-SU-İnd.(13)	0,78	0,95	0,74	0,83	948	410	340	52	23	P95
3	S2-SU-İnd.(13)	0,81	0,93	0,78	0,85	932	481	269	68	23	P92
4	S2-SU-İnd.(13)	0,81	0,92	0,79	0,85	915	501	249	85	23	P90
5	S2-SU-DEM-İnd.(13)	0,75	0,91	0,73	0,81	905	411	339	95	26	P92
6	S2-SU-S1-İnd.(13)	0,76	0,94	0,72	0,82	938	387	363	62	26	P92
7	S2-SU-DEM-S1-İnd.(13)	0,75	0,96	0,71	0,82	960	358	392	40	29	P95
8	S2-SU-DEM-S1-İnd.(13)	0,77	0,91	0,75	0,82	913	441	309	87	29	P92
9	S2-JUN-JUL-AUG-İnd.(13)	0,75	0,96	0,71	0,82	961	356	394	39	69	P95
10	S2-JUN-JUL-AUG-İnd.(13)	0,79	0,94	0,75	0,83	939	439	311	61	69	P92
11	S2-JUN-JUL-AUG-İnd.(13)	0,81	0,92	0,79	0,85	915	504	246	85	69	P90
12	S2-JUN-JUL-AUG-DEM-S1-İnd.(13)	0,76	0,93	0,73	0,82	934	404	346	66	81	P92

İndeks içeren yaz senaryolarının tamamı %80'in üzerinde F1 değerine ulaşmıştır. P95'ten P92/P90'a geçiş kabul alanını daraltmış; duyarlılık sınırlı ölçüde azalırken kesinlik ve genel doğruluk artmıştır. Bu hata dengesi, nihai modelde P90 eşiğinin seçilmesini desteklemiştir.

Çizelge 5. Nihai senaryonun farklı eğitim örneklem büyüklüklerindeki performansı.

Eğitim noktası	OA	Duyarlılık	Kesinlik	F1	TP	TN	FP	FN
250	0,81	0,86	0,81	0,83	860	550	200	140
500	0,82	0,90	0,80	0,85	901	526	224	99
750	0,82	0,91	0,80	0,85	905	524	226	95
1.000	0,82	0,92	0,80	0,86	921	518	232	79
1.250	0,82	0,91	0,80	0,86	914	526	224	86
1.500	0,81	0,89	0,80	0,84	893	525	225	107
1.750	0,81	0,91	0,80	0,85	909	516	234	91
2.000	0,82	0,91	0,80	0,85	910	518	232	90

1.000 noktalı P90 yapılandırmasında duyarlılığın (%92) kesinlikten (%80) yüksek olması, modelin gerçek kayınların büyük bölümünü yakalarken kayına spektral olarak benzeyen bazı geniş yapraklı ormanları yanlış pozitif olarak seçtiğini göstermektedir. Bu hata yapısı, negatif türleri ayrı ayrı öğrenmeyen tek sınıf yaklaşımının beklenen sonucudur. On farklı rastgele örneklemede genel doğruluk %80–82, F1 ise %85–86 aralığında kalmış ve modelin örnek seçimine karşı görece kararlı olduğu görülmüştür.

Çizelge 6. On tekrarlı çalıştırmanın minimum–maksimum sonuçları (Veri seti I: S2-JUN-JUL-AUG-İndeksler; II: S2-SU-İndeksler).

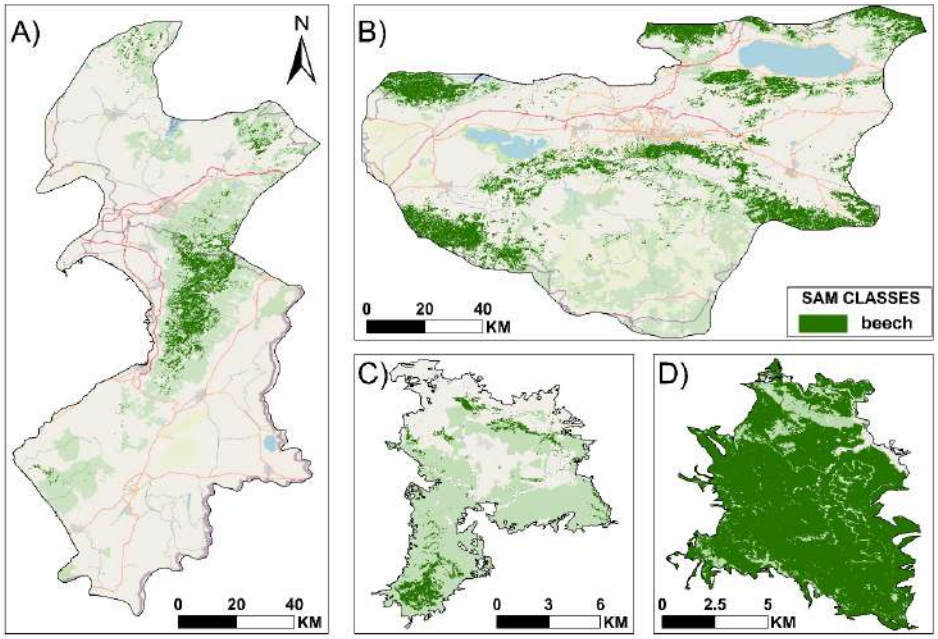
Veri	Özet	OA	Duy.	Kes.	F1	TP	TN	FP	FN	Bant	Eşik
I	Min.	0,80	0,90	0,78	0,85	904	490	226	80	69	P90
I	Maks.	0,82	0,92	0,80	0,86	920	524	260	90	69	P90
I	Min.	0,79	0,93	0,76	0,83	928	453	270	56	69	P92
I	Maks.	0,81	0,94	0,78	0,85	944	480	297	72	69	P92
II	Min.	0,79	0,91	0,76	0,83	914	460	257	63	23	P92
II	Maks.	0,81	0,94	0,78	0,85	933	493	290	86	23	P92
II	Min.	0,79	0,90	0,78	0,83	895	490	224	70	23	P90
II	Maks.	0,82	0,93	0,80	0,85	930	526	260	105	23	P90

On farklı rastgele eğitim örneklemesinde genel doğruluk ve F1'in dar aralıklarda kalması, sonuçların tek bir rastgele çekime aşırı bağımlı olmadığını göstermiştir. Veri seti I–P90 birleşimi en yüksek %86 F1'e ulaşarak nihai yapılandırmanın sayısal kararlılığını desteklemiştir.

Çizelge 7. Bağımsız alt bölge doğrulama sonuçları (Veri seti I: Haziran–Ağustos; II: Eylül–Kasım).

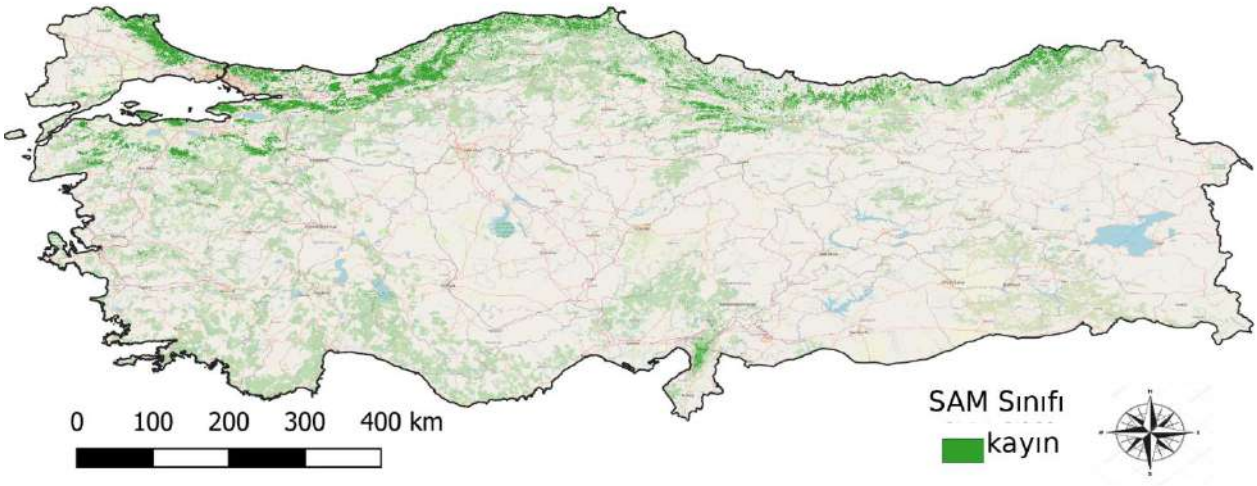
Alan	Veri seti	OA	Duyarlılık	Kesinlik	F1	n
Bursa	I	0,79	0,92	0,77	0,84	818
Bursa	II	0,65	0,85	0,67	0,75	820
Kırklareli/Kurudere	I	0,83	0,91	0,89	0,90	144
Kırklareli/Kurudere	II	0,81	0,86	0,91	0,89	144
Balıkesir/Güğü	I	0,49	0,37	0,94	0,53	59
Balıkesir/Güğü	II	0,78	0,96	0,80	0,87	59
Hatay–Osmaniye	I	0,64	0,86	0,69	0,76	147
Hatay–Osmaniye	II	0,55	0,77	0,64	0,70	147

Bölgesel sonuçlar tek bir ulusal F1 değerinin yerel güvenilirliği temsil etmediğini göstermektedir. Yaz dönemi Bursa, Kurudere ve Hatay–Osmaniye'de daha başarılıyken Balıkesir/Güğü'de sonbahar F1 değerini 0,53'ten 0,87'ye yükseltmiştir. Bu farklılık; meşcere saflığı, tür karışımı ve bölgesel fenolojik zamanlamayla ilişkilidir. Bulgular, tek bir ortalama endmember ve tek bir ulusal eşik kullanımının yerel koşullarda sınırlı kalabileceğini desteklemektedir.



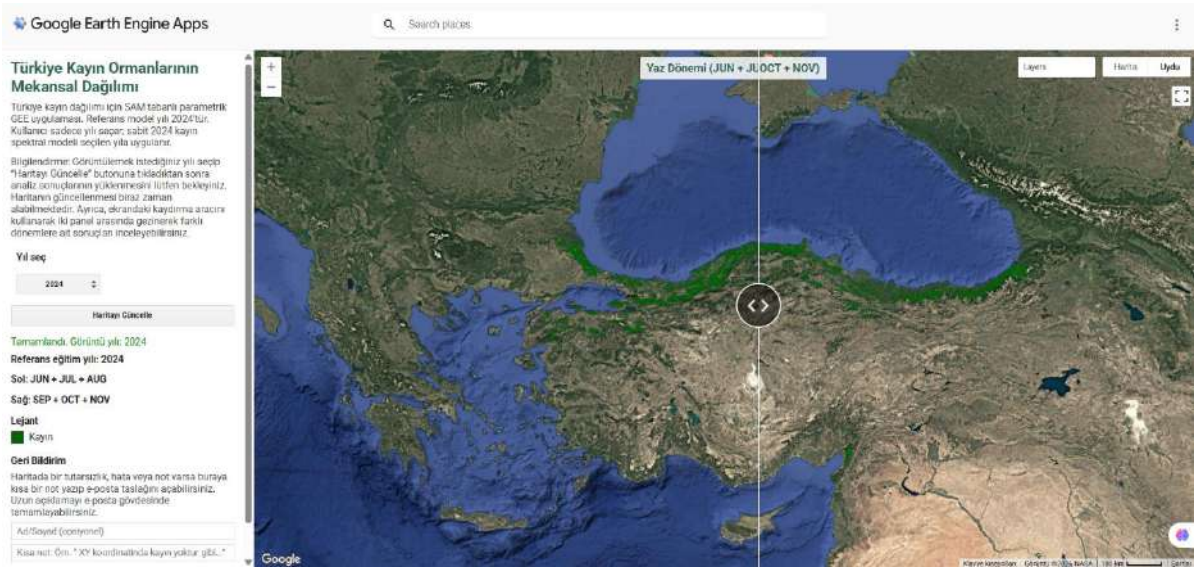
Şekil 4. Yaz veri seti kullanılarak elde edilen bölgesel sınıflandırma sonuçları: A) Hatay–Osmaniye, B) Bursa, C) Balıkesir/Güğü ve D) Kırklareli/Kurudere.

Bölgesel haritalar, ulusal modelin farklı ekolojik ve meşcere koşullarındaki mekânsal davranışını görünür kılmaktadır. Sonuç alanlarının sürekliliği ve yanlış pozitif örüntüsü bölgeler arasında değişmiş; bu durum Çizelge 7'deki yerel performans farklarıyla uyumlu bulunmuştur.



Şekil 5. Nihai P90 yapılandırmasıyla üretilen Türkiye kayın dağılım tahmini.

Nihai haritada kayın tahminleri ağırlıklı olarak Batı ve Doğu Karadeniz boyunca süreklilik göstermiş, Marmara ve geçiş bölgelerinde daha parçalı, Hatay–Osmaniye çevresinde ise ayrık bir örüntü oluşturmuştur. Bu dağılım kayının bilinen ekolojik yayılışıyla genel olarak uyumludur. Bununla birlikte harita, kesin envanter sınırı değil, CORINE orman maskesi içinde kayın imzasına P90 eşiğinde benzeyen piksellerin model tahminidir.



Şekil 6. Google Earth Engine Apps arayüzünde yıllık kayın dağılım haritası görüntüleme ekranı.

2024 referans modeli GEE Apps ortamında 2016–2025 Sentinel-2 verilerine uygulanmış ve kullanıcının yılı seçerek kayın dağılım tahminini görüntüleyebildiği bir arayüz oluşturulmuştur. Uygulama, aynı yöntemle üretilen yıllık sonuçların karşılaştırılmasını kolaylaştırmakta; yıllar arası farkların gerçek değişim kadar görüntü kalitesi ve fenolojik koşullardan da etkilenebileceği dikkate alınmalıdır.

5. SONUÇLAR

Çalışma, güvenilir pozitif örneklerin bulunduğu ancak hedef dışı sınıfın ülke ölçeğinde heterojen olduğu kayın haritalama probleminde SAM tabanlı tek sınıf yaklaşımının uygulanabilir olduğunu göstermiştir. En başarılı ulusal yapı Haziran–Ağustos kompozitleri, 10 Sentinel-2 bandı, 13 spektral indeks, 1.000 eğitim noktası ve P90 eşiğinden oluşmuştur. Bu yapı senaryo değerlendirme kümesinde %82 genel doğruluk ve %86 F1 üretmiştir. Bağımsız alt bölge sonuçları ise başarının orman yapısı ve fenolojik döneme göre önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur.

Çalışmanın temel belirsizlikleri açısından üç sonuç öne çıkmaktadır.Birincisi, kayın saflığı nicel bir taç oranıyla değil OGM meşcere kodu, gelişim çağı ve NDVI filtresiyle tanımlandığından karışık pikseller tamamen dışlanamamıştır. İkincisi, tek ortalama endmember ulusal uygulamayı yalınlaştırmış ancak bölgesel spektral çeşitliliği sınırlı temsil etmiştir. Üçüncüsü, P90 seçiminin genel değerlendirme verisinden yararlanması nedeniyle %82/%86 değerleri dışsal ve tarafsız nihai test doğruluğu olarak değil model seçimi göstergesi olarak kullanılmalıdır. Gelecek çalışmalarda bölgesel kotalı eğitim örneklemesi, çoklu/bölgesel endmember, kalibrasyon-doğrulama-test ayrımı ve yüksek çözünürlüklü görüntü/saha verisiyle konumsal doğrulama önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2515 COST Aksiyon Üyeleri Ar-Ge Destek Programı kapsamında desteklenen 124E794 numaralı "SylvaSense" projesiyle ilişkili araştırmalardan yararlanmıştır. Çalışmaya veri, saha ve akademik katkı sağlayan kurum ve araştırmacılara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. ve Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment,* 120: 25–36.

European Environment Agency, 2020. *CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, version 2020_20u1.* Copernicus Land Monitoring Service. https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac

Fassnacht, F.E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L.T., Straub, C. ve Ghosh, A., 2016. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment,* 186: 64–87.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. ve Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment,* 202: 18–27.

Grabska-Szwagrzyk, E., Tiede, D., Sudmanns, M. ve Kozak, J., 2024. Map of forest tree species for Poland based on Sentinel-2 data. *Earth System Science Data,* 16(6): 2877–2891.

Immitzer, M., Vuolo, F. ve Atzberger, C., 2016. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote Sensing,* 8(3): 166.

Khan, S.S. ve Madden, M.G., 2014. One-class classification: Taxonomy of study and review of techniques. *The Knowledge Engineering Review,* 29(3): 345–374.

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. ve Goetz, A.F.H., 1993. The spectral image processing system (SIPS): Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment,* 44(2–3): 145–163.

Mack, B., Roscher, R. ve Waske, B., 2014. Can I trust my one-class classification? *Remote Sensing,* 6(9): 8779–8802.

Okurlar, H., Çömert, R., Özbey, A.A., Özmen, H.B., Bilir, N., Üstüner, M. ve Kaplan, G., 2026. Wall-to-wall mapping of Fagus orientalis Lipsky distribution across Türkiye's forests using satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 47(15): 6809–6831.

Persson, M., Lindberg, E. ve Reese, H., 2018. Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing,* 10(11): 1794.

FISTIK (PİSTACİA VERA) AĞAÇLARININ SEGFORMER İLE SEMANTİK SEGMENTASYONU

Şeyma AKÇA[1]

[1]Arş. Gör. Dr., Harran Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63000, Osmanbey Kampüsü, Şanlıurfa, seymakca@harran.edu.tr

ÖZET

Hassas tarım uygulamalarında ağaç envanterinin doğru ve hızlı bir şekilde çıkarılması, ürün verimliliğinin artırılması, hastalık takibi ve sürdürülebilir tarımsal yönetim açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'yle özdeşlemiş olan fıstık ağaçları (Pistacia vera L.), ekonomik değeri yüksek olan ticari bitkilerdir. Bu sebeple, Ortadoğu ülkelerinde "yeşil altın" veya "altın ağacı" olarak da isimlendirilmektedir. Ülkemizde, üretim alanında 1,5 milyon dekar alan ile en fazla üretim payı (%38) Şanlıurfa ilindedir. Geniş alanlara yayılmış fıstık bahçelerinde, ağaç sayısının belirlenmesi, hastalık tespiti ve rekolte tahminlerinin gerçekleştirilmesi geleneksel arazi ölçümleriyle zaman alıcı ve yüksek iş gücü gerektirmektedir.

Son yıllarda yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip İnsansız Hava Aracı (İHA) görüntüleri ile derin öğrenme tabanlı yöntemlerin birlikte kullanılması, ağaç taçlarının otomatik olarak belirlenmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle son yıllarda geliştirilen Transformer tabanlı modeller, mekânsal ilişkileri öğrenebilme ve farklı özellikleri etkin biçimde temsil edebilme yetenekleri sayesinde uzaktan algılama uygulamalarında öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Şanlıurfa ilinin Bozova ilçesinde yeralan Büyükhan bölgesinde, RGB bantlardan oluşan yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinden fıstık ağaçlarının (Pistacia vera) otomatik olarak belirlenmesi amacıyla Transformer tabanlı SegFormer semantik segmentasyon modeli kullanılmıştır.

Eğitim sonrasında oluşturulan modeller üzerinde yersel doğrulama gerçekleştirilmiş olup Genel Doğruluk (GD), Üretici Doğruluğu (ÜD), Kullanıcı Doğruluğu (KD), F1-Score ve Intersection over Union (IoU) metrikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla %93.80 GD, %75.32 ÜD, %80.91 KD, %77.82 F1-Skor ve %65.04 IoU olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan SegFormer mimarisi, ilgili özellikleri daha etkin öğrenebilmesi ve genel bağlam bilgisini kullanması sayesinde yüksek çözünürlüklü İHA görüntüleri üzerinde başarılı sonuçlar üretmiştir. Özellikle düzensiz taç yapısına sahip fıstık ağaçlarının belirlenmesinde Transformer tabanlı mimarilerin önemli bir potansiyel sunduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: İHA, SegFormer, Transformer, Semantik Segmentasyon, Derin Öğrenme.

ABSTRACT

SEMANTIC SEGMENTATION OF PISTACHIO (PISTACIA VERA) TREES USING SEGFORMER

Accurate and rapid tree inventory extraction is of paramount importance in precision agriculture for improving crop productivity, monitoring plant diseases, and ensuring sustainable agricultural management. Pistachio trees (Pistacia vera L.), which are strongly associated with the Southeastern Anatolia Region of Türkiye, are high-value commercial crops. For this reason, they are commonly referred to as "green gold" or the "golden tree" in Middle Eastern countries. In Türkiye, Şanlıurfa Province accounts for the largest share of pistachio production, representing 38% of the total cultivation area with approximately 1.5 million decares. In extensive pistachio orchards, determining tree numbers, detecting diseases, and estimating yield through conventional field surveys are time-consuming and labor-intensive processes.

In recent years, the integration of high-spatial-resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery with deep learning-based approaches has provided significant advantages for the automatic delineation of tree crowns. In particular, Transformer-based models have gained considerable attention in remote sensing applications due to their ability to capture long-range spatial relationships and effectively represent multi-scale features. In this study, a Transformer-based SegFormer semantic segmentation model was employed to automatically identify pistachio trees (Pistacia vera) from high-resolution RGB UAV imagery acquired over the Büyükhan region of the Bozova district in Şanlıurfa Province.

Following model training, ground-truth validation was performed using the reference masks. Performance was evaluated using Overall Accuracy (OA), Producer's Accuracy (PA), User's Accuracy (UA), F1-score, Dice coefficient, and Intersection over Union (IoU). The model achieved an Overall Accuracy of 93.80%, Producer's Accuracy of 75.32%, User's Accuracy of 80.91%, an F1-score of 77.82% and an IoU value of 65.04%. The experimental results demonstrate that the SegFormer architecture successfully identified pistachio trees from high-resolution UAV imagery by effectively learning discriminative features and exploiting global contextual information. The findings indicate that Transformer-based semantic segmentation architectures offer considerable potential for the accurate detection of pistachio trees, particularly those exhibiting irregular crown geometries.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), SegFormer, Transformer, Semantic Segmentation, Deep Learning.

1.GİRİŞ

Tarımsal verimliliği arttırmak ve iklim değişikliği sebebiyle meydana gelen gıda krizlerini önlemek amacıyla günümüzde hassas tarım uygulamaları hız kazanmıştır. Hasas tarım sayesinde tarıma teknolojik iyileşmelerin entegre edilmesi, sürdürülebilir tarımsal faaliyetleri hızlandırarak bitkilerin tür, rekolte, hastalık gibi bilgilerinin kolaylıkla tespit edilmesine imkan sağlanmaktadır.

Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'yle özdeşlemiş olan fıstık ağaçları (Pistacia vera L.), ekonomik değeri yüksek olan ticari bitkilerdir. Ortadoğu ülkelerinde ekonomik değeri sebebiyle "yeşil altın" veya "altın ağacı" olarak da isimlendirilmektedir (AK, 2012). Kökeni Orta ve Güneybatı Asya'ya dayanan fıstık ağaçları menengiç bitkisinin aşılanmasıyla elde edilen bir yalancı makidir. Dünya genelinde, ülkemiz fıstık üretiminde 185.000 ton yıllık üretimle 3 sırada yer almaktadır. Yaygın olarak GAP (Güneydoğu Anadolu Projesi) illerinde yetiştirilen fıstık ağaçlarının büyük çoğunluğu, 1,5 milyon dekar alan (%38) ile Şanlıurfa ilinde üretilmektedir (TCGB, 2026).

Geçen 6 yıl içerisinde ülkemiz genelinde fıstık üretimi artsa da, fıstık ağaçlarının periyodisite (bir yıl var bir yıl yok), iklim koşulları, dallarda kurumalara (Neoscytalidium Dimidiatum) ve kök çürüklüğüne (Veticillium dahliae) sebep olan mantarlar sebebiyle alınan verim düşmüştür (Mandollu ve Kayım, 2023). Son 12 yılda 4 milyon dekarda yapılan fıstık yetiştiriciliğinin geniş alanlara yayılmış olması ağaç sayısının belirlenmesi, hastalık tespiti ve rekolte tahminlerinin belirlenmesi geleneksel arazi ölçümleriyle zaman alıcı ve yüksek iş süreçleri gerektirmektedir (AK, 2012).

Yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip İnsansız Hava Aracı (İHA) görüntüleri hassas tarım uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. İHA'lar otonom veye manuel olarak kontrol edilebilen, bir uçuş planı boyunca ilgili çalışma sahasını görüntüleyen hava araçlarıdır (Gençtürk ve Üncü, 2025). Akıllı ilaçlama, sulama ve su stresi izleme, bitki sağlığı, zararlı ve hastalık tespiti gibi birçok hassas tarım uygulamasında İHA'lar kullanılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışma da ağaç türü, taç yapısı ve hastalık durumunun tespitine yönelik çalışmalar mevcuttur. Gürbüz ve Türker (2019) yaptıkları çalışma da nesne tabanlı sınıflandırma yöntemleriyle birlikte ağaç taçlarının lokal minimumlarını hesaplanarak, ağaç tesbiti gerçekleştirmişlerdir. Ağaç tespitinde, ağaçların sağlıklı olup olmadığının belirlenmesi amacıyla NDVI bitki indeksi, multispektral kameralara sahip İHA'lar kullanılarak üretilmiştir (Yiğit ve Orhan, 2025). Taş ve Akay (2025) Fıstık Çamı ağaç türü için ağaç boyu ve tepe taç genişliğini belirlemek amacıyla İHA görüntülerinden oluşturdukları ortofoto ve nokta bulutunu kullanmışlardır. Benzer şekilde kızılçam ağaçlarının ağaç taç, boy ve gövde hacminin belirlenmesi için İHA görüntülerinden üretilen ortofo ve mozaikler kullanılarak 0.92 korelasyonla belirlenmiştir (Durdun vd., 2022). Şahin vd., (2026) zeytin ağaçlarının dijital kimliklendirme, takip ve otomatik tespiti için YOLO8 yöntemi ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) birlikte entegre etmişlerdir.

İHA görüntüleri sayesinde büyük alanlar, uydu sistemlerine nazaran daha ucuz bir maliyetle görüntülebilmektedir. Yüksek çözünürlük sağlayan İHA görüntüleri üzerinde derin öğrenme tabanlı yöntemlerin birlikte kullanılması, ağaç taçlarının otomatik olarak belirlenmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Akca ve Polat, 2022).

Tarım alanlarında İHA görüntülerinin derin öğrenme yöntemleriyle analiz edilmesi, özellikle bitki örtüsünün ayrıntılı olarak haritalanması ve ağaçların belirlenmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. İHA görüntüleri; ağaç taçları, yapraklar, sıra yapıları ve bitki–toprak sınırları gibi küçük ölçekli özelliklerin ayırt edilmesine olanak sağlarken, derin öğrenme modelleri bu karmaşık spektral ve mekânsal örüntüleri otomatik olarak öğrenebilmektedir. Bu kapsamda, semantik segmentasyon yöntemleri her bir pikseli belirli bir sınıfa atayarak tarımsal alanların ve bitki örtüsünün hassas biçimde ayrıştırılmasını sağlamakta ve özellikle ağaç taçlarının belirlenmesi, bitki yoğunluğunun hesaplanması ve fenotipik özelliklerin çıkarılması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel CNN tabanlı mimarilerin yanı sıra Transformer tabanlı modellerin geliştirilmesi, görüntü içerisindeki mekânsal ilişkilerin öğrenilmesini sağlayarak, İHA görüntülerindeki karmaşık nesnelerin segmentasyonunu sağlamaktadır.

Geniş alanlara yayılan fısıtk ağaçlarının yapay zeka tabanlı derin öğrenme mimarileriyle otomatik tespiti zaman ve maliyet açısından oldukça avantajlıdır. Son yıllarda geliştirilen derin öğrenme mimarilerininden olan Transformer tabanlı modeller, mekânsal ilişkileri öğrenebilme ve farklı özellikleri etkin biçimde temsil edebilme yetenekleri sayesinde uzaktan algılama uygulamalarında öne çıkmaktadır (Han vd., 2022). Özellikle CNN tabanlı sınıflandırma, nesne tespiti ve semantik segmentasyon yaklaşımları, İHA görüntülerinden bitki ve ürünlerin piksel veya nesne düzeyinde belirlenmesinde başarılı sonuçlar ortaya koymuştur (Osco et al., 2021; Bouguettaya et al., 2022). U-Net, DeepLab, SegFormer gibi encoder–decoder ve Transformer tabanlı mimarilerin İHA görüntülerine uygulanması,

özellikle yüksek çözünürlüklü tarımsal görüntülerde hassas mekânsal detayların ve karmaşık nesne sınırlarının daha başarılı şekilde modellenmesini sağlamıştır.

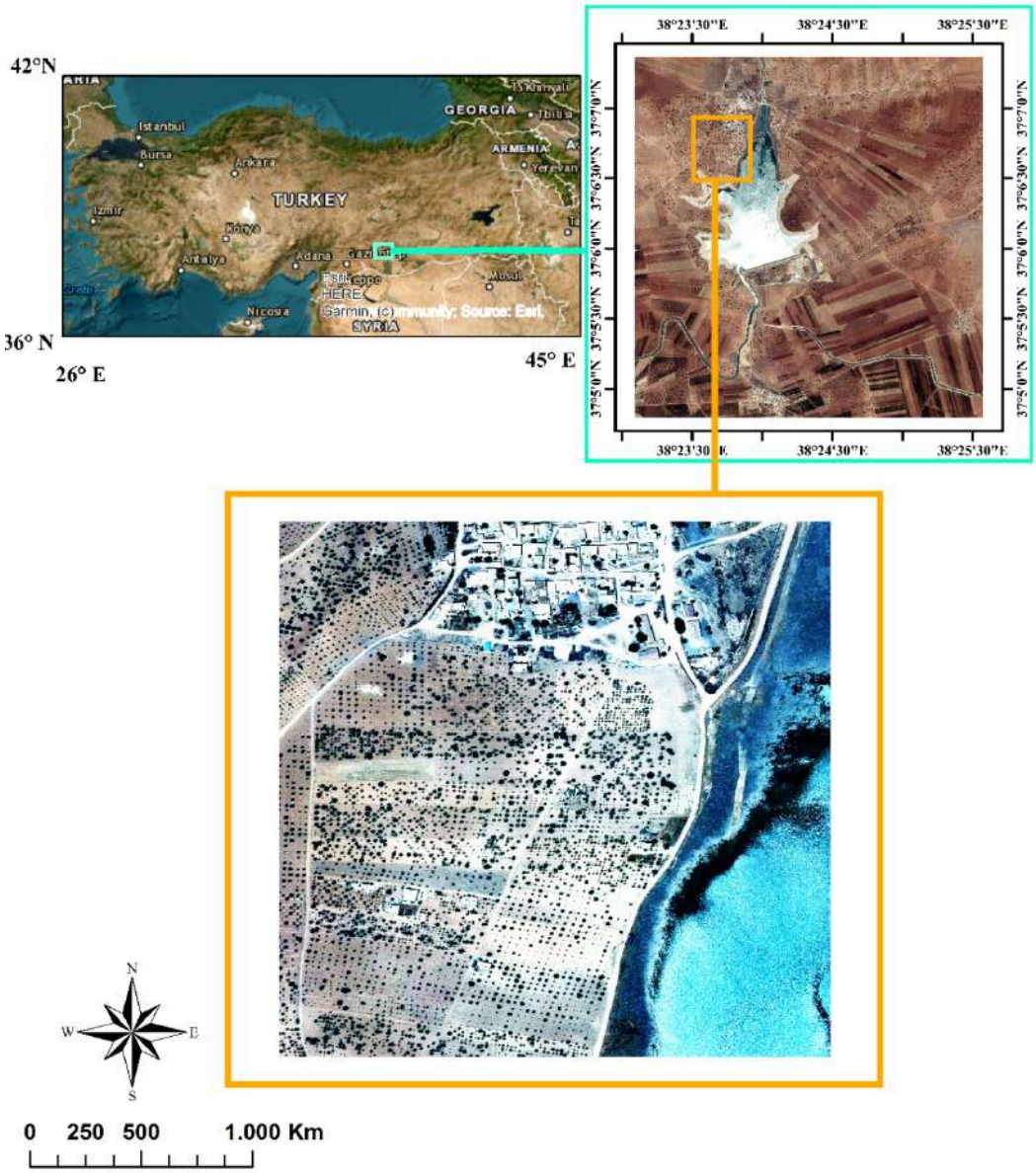
Transformer tabanlı modeller arasında SegFormer, görüntü segmentasyonu için geliştirilen ve Transformer encoder ile multilayer perceptron (MLP) decoder yapısını birleştiren bir mimaridir. SegFormer'ın hiyerarşik Transformer encoder yapısı farklı ölçeklerdeki özellikleri çıkarırken, MLP tabanlı decoder bu özellikleri düşük hesaplama maliyetiyle birleştirerek piksel düzeyinde sınıflandırma gerçekleştirmektedir (Xie vd., 2021). Bu yapı, özellikle yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinde bitki taçları ile arka plan arasındaki karmaşık mekânsal ilişkilerin modellenmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, İHA görüntülerinden özellikle ağaç taçlarının ayrıştırılmasına yönelik çalışmaların önemli bir bölümü U-Net, Mask R-CNN ve diğer CNN tabanlı mimarilere odaklanmakta (Liao vd., 2024); SegFormer gibi Transformer tabanlı semantik segmentasyon mimarilerinin farklı meyve türleri üzerindeki performansı ise hâlen sınırlı sayıda çalışma ile temsil edilmektedir (Aldana vd., 2023). Bu durum, yüksek mekânsal çözünürlüklü İHA görüntülerinde fıstık ağaçlarının otomatik ve piksel düzeyinde ayrıştırılması için Transformer tabanlı yaklaşımların araştırılmasını önemli hâle getirmektedir.

Fıstık ağaçları, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde ekonomik açıdan önemli bir tarımsal ürün olmakla birlikte, ağaçların düzensiz taç yapısı, toprak ve bitki örtüsünün benzer renk özellikleri ve ağaçlar arasındaki mekânsal farklılıklar, görüntülerden otomatik olarak ayrıştırılmasını güçleştirebilmektedir. Bu nedenle, İHA tabanlı görüntülerin derin öğrenme yöntemleriyle analiz edilmesi, Antep fıstığı ağaçlarının hassas ve hızlı biçimde belirlenmesi için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada, yüksek mekânsal çözünürlüklü RGB İHA görüntülerinden Antep fıstığı ağaçlarının otomatik olarak ayrıştırılması amacıyla Transformer tabanlı SegFormer semantik segmentasyon mimarisi kullanılmıştır. Modelin performansı doğruluk genel doğruluk, üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, F1-Skor ve IoU segmentasyon metrikleri kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar, İHA görüntülerinin derin öğrenme tabanlı analizinin hassas tarım uygulamalarında ağaç düzeyinde bilgi üretme potansiyelini ortaya koymuştur.

2. METODOLOJİ

2.1. Çalışma Bölgesi

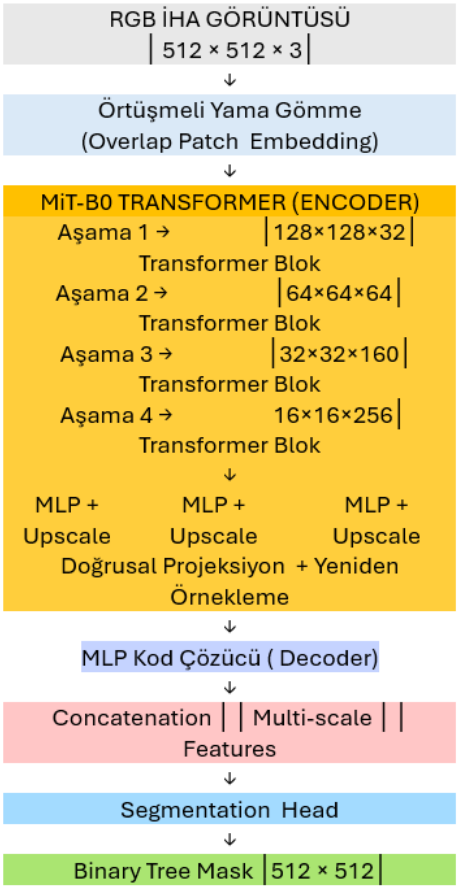
Çalışma bölgesi Şanlıurfa idari sınırları içerisinde yer alan Bozova ilçesindeki Büyükhan sulama göletine sınırdır. Şekil 1.'de verildiği üzere çalışma alanında fıstık ağaçları belirli bir düzende dikilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Bölgesi Büyükhan, Şanlıurfa.

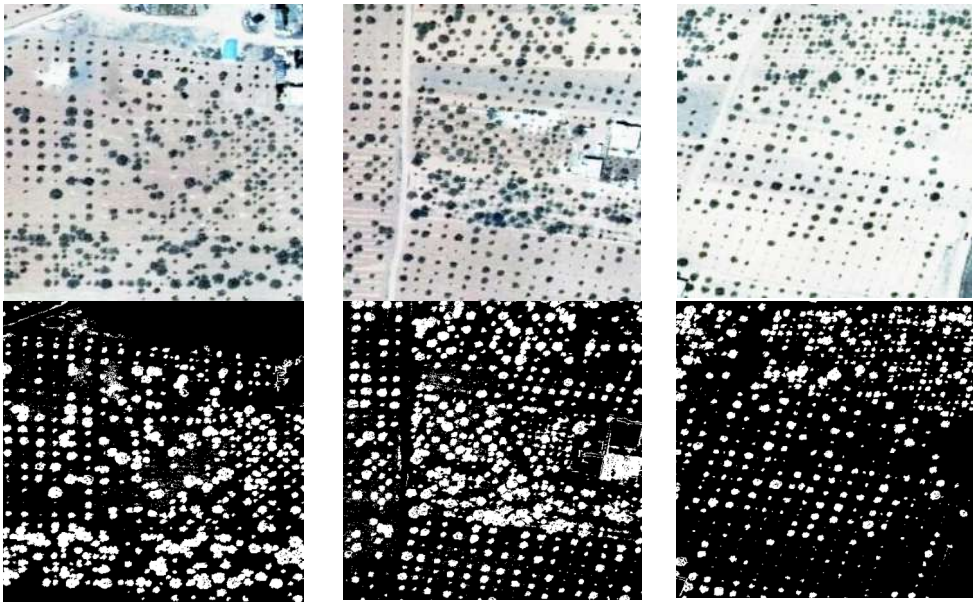
2.2.SegFormer

SegFormer, encoder–decoder yapısına sahip Transformer tabanlı bir segmentasyon modelidir. Modelin encoder bölümünde, klasik Vision Transformer (ViT) mimarilerinden farklı olarak Mix Vision Transformer (MiT) yapısı kullanılmaktadır. MiT, görüntüyü Overlapping Patch Embedding yöntemiyle örtüşen yamalara ayırarak orijinal mekânsal bilgilerin korunmasını sağlar. Sonraki aşamada gerçekleştirilen Efficient Multi-Head Self-Attention mekanizması ile hem bölgesel hem de genel bağlam bilgisini öğrenir. Encoder'dan elde edilen özellik haritaları esnek yapılı decoder mimarisi sayesinde birleştirilerek piksel düzeyinde sınıflandırma gerçekleştirilir (Xie vd., 2021). Bu mimari, özellikle düzensiz ağaç yapısına sahip ağaçların belirlenmesinde klasik evrişimsel sinir ağı tabanlı modellere göre önemli avantajlar sağlamaktadır (Joshi ve Witharana, 2025).



Şekil 2. SegFor Mimarisi

Çalışmada, 1981 × 2037 piksel boyutunda RGB İHA görüntüsü ve MATLAB ortamında oluşturulan referans maske kullanılmıştır. Maske yalnızca iki sınıf içerecek şekilde düzenlenmiş olup, diğer sınıflar 0, fıstık ağaçları ise 1 olarak tanımlanmıştır. SegFormer modelinin giriş boyutu gereksinimi nedeniyle görüntü ve maske sıfır dolgusu (padding) uygulanarak 2048 × 2048 piksel boyutuna genişletilmiş ve daha sonra 512 × 512 piksel boyutunda örtüşmesiz yamalara ayrılmıştır. Böylece toplam 16 görüntü-maske çifti elde edilmiş ve veri kümesi eğitim (%75) ile test (%25) olarak ayrılmıştır. Modelin eğitim işlemi Google Colab ortamında Tesla T4 GPU üzerinde gerçekleştirilmiştir. Eğitimde AdamW optimizasyon algoritması, Cross Entropy Loss kayıp fonksiyonu, 1×10^{-4} öğrenme oranı, 50 epoch ve 2 batch büyüklüğü kullanılmıştır. Oluşturulan verisetine ait örnek görseller Şekil 3.'te verilmiştir.



Şekil 3. Veriseti örnekleri ve maskeleri

2.3. Model Değerlendirme Metrikleri

Kullanılan metriklere ait eşitlikler denklem 1-5 arasında verilmiştir.

$$Üretici \;\; Doğruluğu = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \tag{1}$$

$$Kullanıcı \;\; Doğruluğu = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \tag{2}$$

$$Genel \;\; Doğruluk = \frac{\sum_{i}^{\eta} TP_i}{\sum_{i}^{\eta} TP_i + FP_i + TN_i + FN_i} \tag{3}$$

$$F1 \;\; Skor = \frac{2\,TP_i}{2\,TP_i + FP_i + FN_i} \tag{4}$$

$$IoU = \sum_{i=1}^{\eta} \frac{TP_i}{TP_i + FP_i + FN_i} \tag{5}$$

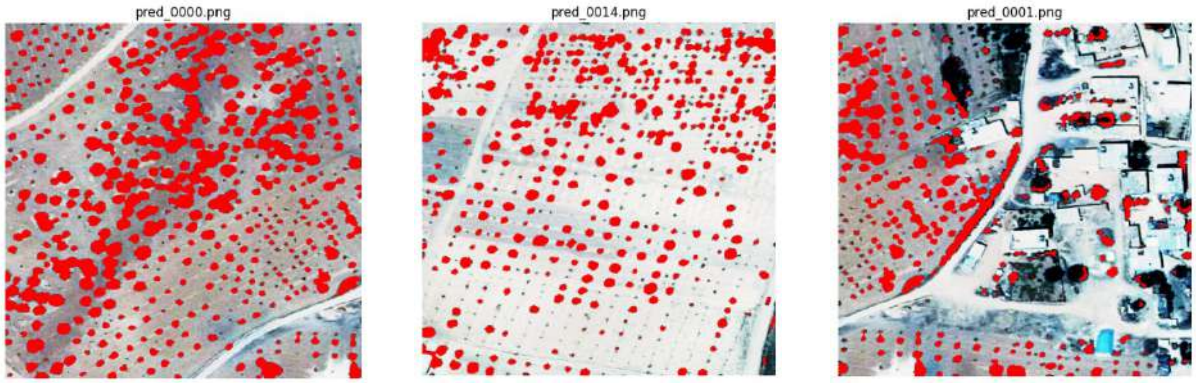
TP_i ve TN_i, doğru şekilde etiketlenmiş sınıfları temsil ederken, FP_i ve FN_i yanlış şekilde etiketlenmiş sınıfları temsil etmektedir. KD, ÜD, GD, IoU,Dice katsayısı ve F1-Skoru metrikleri tüm sınıflar için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

ÜD ağaçların ne kadarının doğru bir şekilde tespit edilebildiğini ifade ederken, KD, ağaç olarak sınıflandırılan piksellerin ne kadarının gerçekten ağaç olduğunu ifade etmektedir.

IoU metriği, referans (ground truth) ağaç sınıfları ile segmentasyon sonucunda elde edilen ağaç sınıfları arasındaki örtüşme oranını nicel olarak belirlemek amacıyla kullanılan bir metriktir. Buna karşılık, Genel Doğruluk, çalışmanın tamamındaki genel bir sınıflandırma doğruluğu hakkında bilgi vermektedir.

3. SONUÇ

Genel Doğruluk (GD), Üretici Doğruluğu (ÜD), Kullanıcı Doğruluğu (KD), F1-Score, ve Intersection over Union (IoU) metrikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla %93.80 GD, %75.32 ÜD, %80.91 KD, %77.82 F1-Skor ve %65.04 IoU olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan SegFormer mimarisi, ilgili özellikleri daha etkin öğrenebilmesi ve genel bağlam bilgisini kullanması sayesinde yüksek çözünürlüklü İHA görüntüleri üzerinde başarılı sonuçlar üretmiştir. Özellikle düzensiz taç yapısına sahip fıstık ağaçlarının belirlenmesinde Transformer tabanlı mimarilerin önemli bir potansiyel sunduğu görülmüştür. Şekil 4.'te bazı test görsellerine ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4. Test Sonuç Örnekleri

4. TEŞEKKÜR

Yazar, İHA görüntüleri için Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder.

KAYNAKÇA

Aldana, A. R. E., et al. 2023. Large-Scale Date Palm Tree Segmentation from Multiscale UAV-Based and Aerial Images Using Deep Vision Transformers. Drones, 7(2), 93. https://doi.org/10.3390/drones7020093

AK, B. E., Sakar, E., Yeşiloğlu, H. M., & Öztürk, F. F. 2012. Antepfıstığı yetiştiriciliği. TC Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Çiftçi Eğitim Seti yayın, (2012/31).

Akca, S., & Polat, N. 2022. Semantic segmentation and quantification of trees in an orchard using UAV orthophoto. Earth Science Informatics, 15(4), 2265-2274.

Bouguettaya, A., Zarzour, H., Kechida, A., & Taberkit, A. M. 2022. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: a review. Neural Computing and Applications, 34, 9511–9536.

Durgun, H., Çoban, H. O., & Eker, M. 2022. İnsansız hava aracıyla elde edilen hava fotoğraflarından kızılçam ağaçlarının çap ve boylarının ölçümü ve gövde hacminin tahmini. Turkish Journal of Forestry, 23(4), 255-267.

Gençtürk, A. G. F., & ÜNCÜ, İ. S. İnsansız Hava Araçları Temellerinden Hassas Tarım ve Ormancılık Uygulamalarına.

Gürbüz, M. F., & Türker, M. 2017. Çok yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinden otomatik ağaç tespiti. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği IX. Teknik Sempozyumu (TUFUAB2017), 27-29.

Han, K., Wang, Y., Chen, H., Chen, X., Guo, J., Liu, Z., ... & Tao, D. 2022. A survey on vision transformer. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 45(1), 87-110.

Joshi, D., & Witharana, C. 2025. Vision transformer-based unhealthy tree crown detection in mixed northeastern us forests and evaluation of annotation uncertainty. Remote Sensing, 17(6), 1066.

Liao, F., Lin, W., & Liu, H. 2024. Segmenting single tree crown using rasterization of UAV LiDAR point cloud and mask R-CNN. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 40(23), 258–266. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406165.

Mandollu, M., & Kayım, M. 2023. Antepfıstığı Ağaçlarında Kök Çürüklüğü ve Geriye Doğru Ölüme Neden Olan Fungal Hastalıkların Araştırılması. Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 38(1), 96-106.

Osco, L. P., et al. 2021. A review on deep learning in UAV remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 102, 102456.

Taş, İ., & Akay, A. E. 2025. İHA Verileri ile Ağaç Parametrelerinin (Ağaç Boyu ve Tepe Tacı Genişliği) Belirlenmesi. Ağaç ve Orman, 6(1), 48-59.

T**ürkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı.** 2026. Sert Kabuklu Meyveler. https://ticaret.gov.tr/data/5b8700a513b8761450e18d81/2026%20Sert%20Kabuklu%20ve%20Kuru%20Meyveler.pdf [11.09.2026]

Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., & Luo, P. 2021. SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers. Advances in neural information processing systems, 34, 12077-12090.

Yiğit, A. Y., & Orhan, O. 2025. Multispektral İHA Görüntüleri Kullanılarak Nesne Tabanlı Görüntü Analizi ile Ağaç Tespiti ve NDVI Tabanlı Bitki Sağlığı Analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 27(2), 183-209.

UZAKTAN ALGILAMA VE CA-ANN MODELİ İLE ARAZİ ÖRTÜSÜ DEĞİŞİMİNİN ZAMANSAL-MEKANSAL ANALİZİ VE GELECEK PROJEKSİYONU: ARTVİN İLİ ÖRNEĞİ

Cemile KOCA[1], Osman Salih YILMAZ[2], Çağlar Kıvanç KAYMAZ[3],

[1]Doktora Öğr., Atatürk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 25050, Yakutiye, Erzurum, kocacemile10@gmail.com, 0000-0001-5175-4230
[2]Doç.Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Demirci Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 45900, Demirci, Manisa, osmansalih.yilmaz@cbu.edu.tr , 0000-0003-4632-9349
[3]Doç.Dr., Atatürk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 25050, Yakutiye, Erzurum, ckkaymaz@atauni.edu.tr, 0000-0003-2313-870X

ÖZET

Küresel ölçekte artan insan faaliyetleri, ekosistemler üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Zengin doğal kaynaklara sahip olan Artvin ili de son yıllarda barajlar, altyapı projeleri ve beşerî müdahaleler nedeniyle arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimi (LULC) yaşamaktadır. Bu çalışmada, Artvin ilinin 2005, 2015 ve 2025 yıllarına ait LULC dinamikleri uzaktan algılama ve makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edilmiş; Hücresel Otomat–Yapay Sinir Ağları (CA-ANN) modeli kullanılarak 2035 yılına yönelik arazi örtüsü projeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Landsat 5, 8 ve 9 uydu görüntüleri Google Earth Engine (GEE) platformunda filtrelenmiş ve Rastgele Orman (RO) algoritması ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak amacıyla NDVI, NDWI, NDBI ve BSI indeksleri hesaplanarak sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Üretilen LULC haritalarının genel doğruluğu %98, Kappa değerleri ise 0,95 ve üzerinde bulunmuştur. Gelecek projeksiyonu için QGIS MOLUSCE eklentisi kullanılarak topoğrafik ve lojistik bağımsız değişkenler sisteme entegre edilmiştir. 2025 yılı simülasyon geçerliliği %91,45 doğruluk oranı ve 0,87 Genel Kappa değeri ile genel düzeyde yüksek uyum göstermiştir. 2035 yılı olağan trend projeksiyonu; orman alanlarının 3.640,3 km²'ye (%49,33), su kütlelerinin 84,5 km²'ye (%1,15) ve yerleşim alanlarının %61,3'lük bir artışla 22,20 km²'ye ulaşacağını, çıplak arazilerin 2.836 km²'ye (%38,43) gerileyeceğini, tarım alanlarının ise 796,3 km² ile görece dengede kalacağını öngörmektedir. Çalışmada ayrıca, bölgede ilan edilen maden sahasının bu olağan trendin tersine çevirme potansiyeli ve üretilen modelin maden faaliyetlerinin çevresel etkilerini nicel olarak ölçmede bir referans çerçevesi sunacağı tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Artvin, CA-ANN, Arazi Kullanımı, Makine Öğrenmesi, Uzaktan Algılama

ABSTRACT

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS AND FUTURE PROJECTION OF LAND COVER CHANGE USING REMOTE SENSING AND CA-ANN MODEL: A CASE STUDY OF ARTVIN PROVINCE

Globally increasing human activities exert severe pressures on ecosystems. The province of Artvin, which possesses rich natural resources, has likewise been experiencing land use/land cover (LULC) change in recent years due to dams, infrastructure projects and anthropogenic interventions. In this study, the LULC dynamics of Artvin province for the years 2005, 2015 and 2025 were analysed using remote sensing and machine learning methods, and a land cover projection for the year 2035 was carried out using the Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA-ANN) model. In the study, Landsat 5, 8 and 9 satellite images were filtered on the Google Earth Engine (GEE) platform and classified with the Random Forest (RF) algorithm. In order to improve classification accuracy, the NDVI, NDWI, NDBI and BSI indices were calculated and incorporated into the classification. The overall accuracy of the LULC maps produced was found to be 98%, and the Kappa values 0.95 and above. For the future projection, topographic and logistic independent variables were integrated into the system using the QGIS MOLUSCE plugin. The simulation validity for the year 2025 showed a high level of overall agreement, with an accuracy rate of 91.45% and an Overall Kappa value of 0.87. The business-as-usual trend projection for 2035 predicts that forest areas will reach 3,640.3 km² (49.33%), water bodies 84.5 km² (1.15%) and settlement areas 22.20 km² with an increase of 61.3%, that bare lands will decline to 2,836 km² (38.43%), and that agricultural areas will remain relatively stable at 796.3 km². The study also discusses the potential of the mining site declared in the region to reverse this business-as-usual trend, and the fact that the model produced will provide a reference framework for quantitatively measuring the environmental impacts of mining activities.

Keywords: Artvin, CA-ANN, Land Use, Machine Learning, Remote Sensing

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte hızla artan beşeri faaliyetler, iklim değişikliği ve kontrolsüz arazi kullanımı değişimleri, ekosistemler üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır (Yono vd., 2025). Bu baskılar, özellikle biyolojik çeşitlilik açısından zengin olan orman ve su kaynakları gibi kritik bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir. Türkiye'nin kuzeydoğusunda yer alan Artvin ili; zengin orman varlığı, su kütleleri ve doğal kaynakları ile öne çıkmasına karşın, son yıllarda baraj inşaatları, altyapı projeleri ve yoğun insan müdahaleleri nedeniyle arazi kullanımı/arazi örtüsünde (LULC) hızlı bir değişim sürecine girmiştir. Bölgesel iklimi, yüzey sıcaklığını ve ekosistem dengesini tehdit eden bu dinamiklerin izlenmesi ve gelecekteki arazi kullanım değişikliklerinin tahmin edilmesi, doğal alanların korunması ile sürdürülebilir çevre politikalarının geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Ullah vd., 2019; Gündüz, 2025; Kocaman ve Ağaççıoğlu, 2025; Yao vd., 2015). Bu bağlamda çalışmada, Artvin ilinin 2005, 2015 ve 2025 yıllarına ait LULC dinamiklerinin uzaktan algılama ve makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edilmesi, CA-ANN (Hücresel Otomat - Yapay Sinir Ağları) modeli yardımıyla ilin 2035 yılındaki arazi desenlerinin simüle edilmesi ve kentleşme ile altyapı baskısının doğal kaynaklar üzerindeki potansiyel etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Arazi kullanım/örtüsü değişimlerinin modellenmesinde uzaktan algılama verileri ile makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu güncel literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle rastgele orman (RO), destek vektör makineleri (DVM) ve yapay sinir ağları (YSA) gibi algoritmaların yüksek doğruluk oranları sunduğu gösterilmiştir (Talukdar vd., 2020; Zafar vd., 2024; Hussain vd., 2024). Hücresel Otomat (HO) ile YSA'nın entegre edildiği modeller ise mekânsal-zamansal dinamiklerin daha gerçekçi simülasyonunu sağlamaktadır. QGIS yazılımı içinde yer alan MOLUSCE eklentisi, bu tür entegre modellemeler için kullanıcı dostu bir platform sunmakta; Kappa istatistikleriyle model doğruluğu etkin biçimde değerlendirilebilmektedir (Muhammad vd., 2022; Baig vd., 2022). Ayrıca Türkiye'de Manisa, Düzce, Elazığ ve Sinop gibi farklı illerde benzer LULC simülasyonları gerçekleştirilmiş; bu çalışmaların çoğu uzaktan algılama verileriyle makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma ve CA-ANN modellemesini bir arada kullanmıştır (Gündüz, 2025; Değermenci, 2023; Sunbul vd., 2025; Buğday ve Buğday, 2019).

Artvin ili, sahip olduğu zengin doğal potansiyeli ve eşsiz coğrafi konumu nedeniyle bugüne kadar heyelan duyarlılık analizleri (Özşahin ve Kaymaz, 2013), buzul turizmi ve jeomiras değerlendirmeleri (Dede ve Zorlu, 2022) ile nüfus ve yerleşme coğrafyası (Rızvanoğlu, 2008; Sevindi vd., 2018; Albayrak ve Yılmaz, 2021; Ceylan, 2001; Koday ve Erhan, 2010) gibi çok çeşitli bilimsel çalışmalara konu olmuştur. Ancak Artvin ili özelinde arazi kullanımı simülasyonu çalışmasına literatürde rastlanılmamıştır. Çalışmanın bu anlamda da literatüre katkı sağlaması beklenmektedir. Ayrıca, elde edilen olağan projeksiyonun, sahadaki kentsel-altyapısal baskıların yönünü ortaya koyarak yerel karar vericilerin sürdürülebilir çevre politikalarına, arazi yönetimi stratejilerine ve bölgedeki olası arazi dönüşümlerinin (maden sahası faaliyetleri vb.) çevresel etkilerini sistematik olarak izlemeye imkân tanıyacak somut bir altlık sunacağı öngörülmektedir.

1.1 Çalışma Alanı

Artvin ili, Türkiye'nin kuzeydoğusunda, Doğu Karadeniz Bölümü'nde, 41° 09'–42° 26' doğu boylamları ile 40° 35'–41° 32' kuzey enlemleri arasında yer almakta; kuzeybatısında Karadeniz, batısında Rize, güneyinde Erzurum, doğusunda Ardahan ve kuzeyinde Gürcistan ile çevrilmektedir (Kaymaz, 2021). Kıyı ile iç kesim dağlarının birbirine oldukça yaklaştığı ilde Kaçkar ve Karçal Dağları başlıca yüksek kütleleri oluştururken, Yalnızçam, Akdağ ve Mescit sıradağları güney ve doğu sınırlarını şekillendirmektedir (Yakut ve Koday, 2025). Kuzey Anadolu Orojenik Kuşağı içerisinde yer alan saha, orojenez ve epirojenez hareketleri ile yükselmiş, akarsu aşındırması ve Kuvaterner buzullaşma süreçleri sonucunda günümüzdeki parçalı ve engebeli jeomorfolojik görünümünü kazanmıştır (Ceylan, 1995). Bu yapı; yüksek dağlar, sırtlar, dar ve derin vadiler ile kıyı şeridinden oluşan bir topoğrafyanın gelişmesine neden olmuştur. Deniz seviyesinden 3900 m'nin üzerine ulaşan yükselti ve yüksek eğim değerleri, yerleşim ve tarımsal faaliyetlerin dağılışını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Kaymaz, 2021; Orhan, 2015). Nüfus ve yerleşmeler çoğunlukla 1000–1500 m arasındaki nispeten uygun yamaçlarda yoğunlaşırken, daha yüksek alanlar özellikle yaz döneminde yaylacılık ve mera kullanımı amacıyla değerlendirilmektedir (Ceylan, 1995).

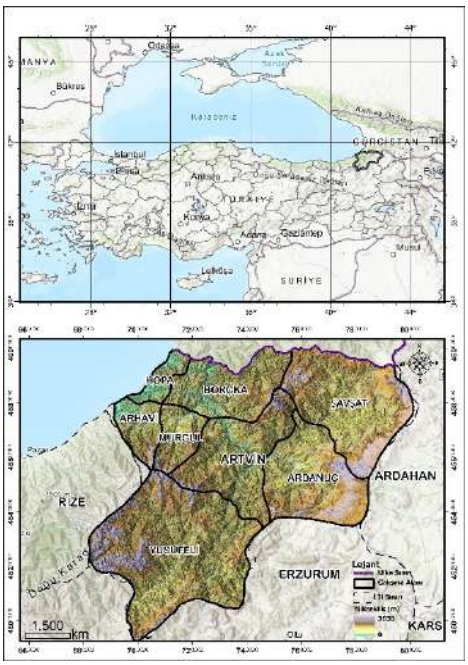
Başta Çoruh Nehri olmak üzere Barhal, Murgul ve Arhavi akarsuları araziyi derin vadilerle parçalamıştır (Kaymaz, 2021; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Dar ve derin vadi tabanlarının taşkın ve heyelan riskleri taşıması nedeniyle yerleşmeler daha çok vadi yamaçlarında gelişmiştir (Koday, 1995). Çoruh Nehri ve kolları üzerinde gerçekleştirilen Muratlı, Borçka, Deriner, Artvin ve Yusufeli barajları ise ilin arazi kullanım desenini önemli ölçüde değiştirmiştir. Barajlar nedeniyle yaklaşık 8.137 ha orman, tarım ve yerleşim alanı su altında kalmış; özellikle Yusufeli ilçesinde bazı köylerin daha yüksek kotlara veya mezra alanlarına taşınması gerekmiştir (Kaymaz, 2021; Kaya, 2022; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bunun yanında, havzadaki biyolojik ve kültürel kaynakların yeterince değerlendirilmeden gerçekleştirilen büyük ölçekli yatırımların ekolojik ve turizm açısından riskler oluşturabileceği belirtilmektedir (Sever, 2005).

Artvin, Doğu Karadeniz ile Doğu Anadolu arasında geçiş konumunda bulunması nedeniyle belirgin iklimsel farklılıklar göstermektedir (Ceylan, 1995). Atalay (2011a; 2011b), Karadeniz iklimini nemli ılıman Karadeniz kıyı

kuşağı, nemli soğuk Karadeniz ve Karadeniz ardı yarı nemli-yarı kurak Çoruh Vadisi olmak üzere üç alt tipe ayırmaktadır. Artvin kent merkezinde Akdeniz iklimine benzer geçiş özellikleri görülürken, Hopa'da yıl boyunca nemli ve yağışlı kıyı iklimi, Çoruh Havzası'nda ise daha karasal ve kurak koşullar hâkimdir (Sarış, 2012). Bu iklimsel farklılıklar, topoğrafik çeşitlilikle birlikte ilin bitki örtüsü ve arazi kullanım deseninin mekânsal farklılaşmasında önemli rol oynamaktadır. Karadeniz Bölgesi; Nemli-Ilıman Geniş Yapraklı Orman, Karadeniz Dağ Kuşağı Nemli-Soğuk İğne Yapraklı Orman, Karadeniz Ardı Olukları Çalı-Kurakçıl Orman, Karadeniz Ardı Yarı Nemli Ormanlar ve Karadeniz Dağ Çayırları olmak üzere farklı ekolojik kuşaklardan oluşmaktadır (Atalay, 2014a; Atalay, 2014b).

Topoğrafik ve iklimsel çeşitlilik, Artvin'in yüksek biyolojik çeşitliliğe sahip olmasını sağlamış ve il genelinde çok sayıda korunan alanın oluşturulmasına neden olmuştur. Hatila Vadisi, Karagöl-Sahara ve Kaçkar Dağları milli parkları; Altıparmak, Balıklı-Güneşli Şelaleleri, Borçka Karagöl, Cehennem Deresi Kanyonu ve Tavşan Tepesi tabiat parkları ile Camili-Efeler Ormanı, Camili-Gorgit ve Çamburnu tabiatı koruma alanları ilin başlıca korunan alanlarını oluşturmaktadır. Ayrıca iki tabiat anıtı ve Yusufeli Çoruh Yaban Hayatı Geliştirme Sahası bulunmaktadır (Artvin Doğa Koruma ve Milli Parklar Müdürlüğü, 2026). Korunan alanların yanı sıra il sınırlarında 4 tarihi, 8 arkeolojik ve 1 karma olmak üzere toplam 13 sit alanı bulunmaktadır (Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, 2026). Bu alanlar, arazi kullanımının gelecekteki gelişimini sınırlandırabilecek veya yönlendirebilecek önemli mekânsal faktörlerdir. Parçalı topoğrafya nedeniyle tarım arazileri dağınık bir yapı gösterirken, bu durum kırsal yerleşmelerin de dağınık karakter kazanmasına neden olmuştur. Ulaşım ağı büyük ölçüde Çoruh Vadisi ve kıyı kuşağını takip etmekte; baraj projeleri nedeniyle sular altında kalan güzergâhların yerine tünel ve viyadüklerden oluşan yeni ulaşım koridorları oluşturulmaktadır (Kaymaz, 2021). Kırsal alanlarda ise yaylaları birbirine bağlayan Yeşil Yol gibi turizm güzergâhları arazi kullanımında yeni mekânsal gelişim alanları oluşturmaktadır. Artvin'in toplam nüfusu 167.531 olup nüfusun %65'i ilçe merkezlerinde, %35'i ise köylerde yaşamaktadır (TÜİK, 2026).

Sonuç olarak Artvin'in arazi kullanım deseni; yüksek ve parçalı topoğrafya, yükselti ve eğim, iklimsel farklılıklar, hidrolojik yapı, korunan alanlar, yerleşim ve nüfus dağılışı, ulaşım ağları ve baraj gibi büyük ölçekli altyapı yatırımlarının birlikte etkisiyle şekillenmektedir. Bu nedenle gelecekteki LULC değişimlerinin modellenmesinde söz konusu doğal ve beşerî faktörlerin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmada LULC haritalarının üretilmesi amacıyla, Google Earth Engine bulut tabanlı platformu (Gorelick vd., 2017) üzerinden Landsat 5 TM (LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA), Landsat 8 OLI/TIRS (LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA) ve Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 (LANDSAT/LC09/C02/T1_TOA) koleksiyonlarına ait Collection 2, Tier 1 atmosfer üstü (TOA) yansıtım ürünleri kullanılmıştır. Tier 1 ürünleri en yüksek geometrik doğruluk sınıfında yer almakta ve çok zamanlı analizler için önerilmektedir. 2005 yılı için Landsat 5 TM, 2015 yılı için Landsat 8 OLI ve 2025 yılı için Landsat 9 OLI-2 görüntüleri esas alınmıştır. Her üç sensör için 30 m mekânsal çözünürlüklü mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi 1 (SWIR1) bantları kullanılmış, sensörler arası bant karşılıkları Tablo 1'de verilmiştir. Her yıl için Haziran–Eylül dönemine ait ve bulut örtüsü %5'in altında olan görüntüler seçilmiş; bu görüntülerden medyan birleştirme yöntemiyle yıllık kompozitler üretilmiştir. Spektral ayrımı güçlendirmek amacıyla kompozit bantlarından dört indeks türetilerek veri setine eklenmiştir: NDVI (Rouse vd., 1974), NDWI (McFeeters,

1996), NDBI (Zha vd., 2003) ve BSI (Rikimaru vd., 2002). İndekslere ait eşitlikler Eşitlik 1–4'te sunulmuştur. Çalışma alanı orman, su kütlesi, yapılaşmış alan, çıplak arazi ve tarım alanı olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Referans örnekler, her sınıf için yaklaşık 500 örnek olacak şekilde belirlenmiş; örnekler her yıl için ayrı ayrı toplanmıştır. Referans veri seti %70 eğitim, %30 doğrulama olacak şekilde ayrılmıştır. Sınıflandırma, arazi sınıflarını ayırmadaki yüksek performansı nedeniyle RO algoritması tercih edilerek gerçekleştirilmiştir. Üretilen LULC haritalarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla genel doğruluk, kullanıcı doğruluğu, üretici doğruluğu ve Kappa istatistiksel analizlerinden yararlanılmıştır (Congalton vd., 1983; Rosenfield ve Fitzpatrick-Lins, 1986; Congalton, 1991; Kafy vd., 2021; Kadı ve Yılmaz, 2024). Elde edilen LULC haritaları, gelecek projeksiyon modelinin temel bağımlı değişkenlerini oluşturmuştur.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{1}$$

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \tag{2}$$

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \tag{3}$$

$$BSI = \frac{(SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE)} \tag{4}$$

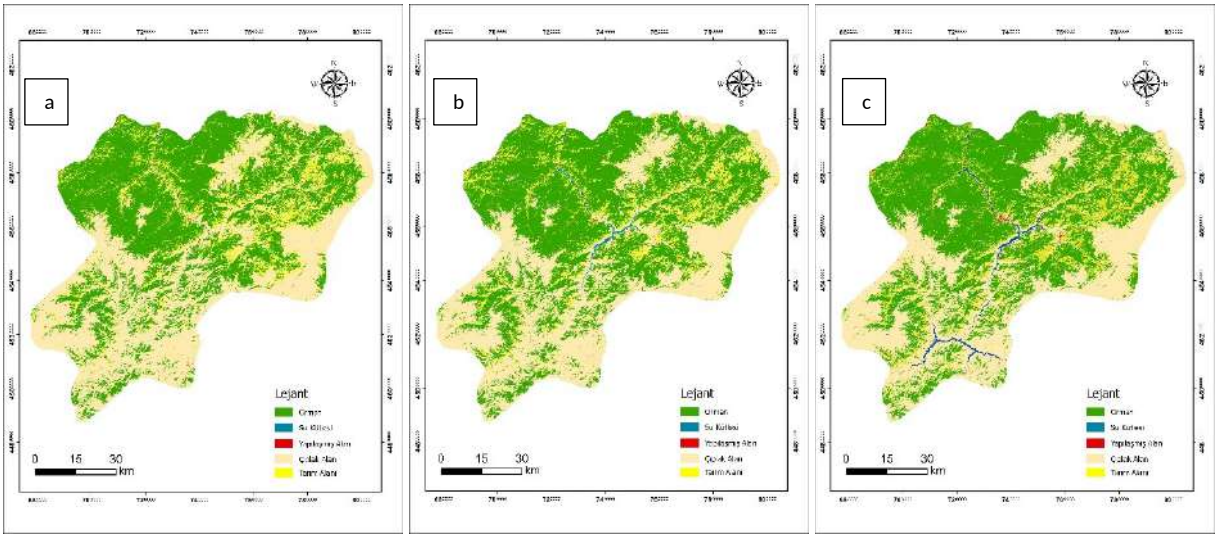
Tablo 1. Kullanılan bantlar

Bantlar	Landsat 5 TM	Dalga boyu (μm)	Landsat 8/9 OLI	Dalga boyu (μm)
Mavi (BLUE)	B1	0,45–0,52	B2	0,45–0,51
Yeşil (GREEN)	B2	0,52–0,60	B3	0,53–0,59
Kırmızı (RED)	B3	0,63–0,69	B4	0,64–0,67
Yakın kızılötesi (NIR)	B4	0,76–0,90	B5	0,85–0,88
Kısa dalga kızılötesi 1 (SWIR1)	B5	1,55–1,75	B6	1,57–1,65

QGIS MOLUSCE eklentisi (NextGIS) bünyesinde yürütülen model eğitiminde, LULC değişimini yönlendiren bağımsız mekânsal değişkenler olarak sayısal yükseklik modeli (SYM), eğim, bakı ile yollara, nehirlere, korunan alanlara ve barajlara olan uzaklık haritaları sisteme entegre edilmiştir. Sınıflar arası geçiş kuralları ve mekânsal dinamikler, YSA tabanlı Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarisi kullanılarak modellenmiştir. Modelin 2025 yılı LULC simülasyonunu gerçekleştirmek amacıyla 2005 ve 2015 yıllarına ait gerçek LULC haritaları kullanılmıştır. Elde edilen 2025 yılı simülasyon haritası, RO algoritması ile bağımsız olarak üretilen gerçek 2025 yılı LULC haritası ile karşılaştırılarak modelin simülasyon performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Genel Kappa, Histogram Kappa ve Konumsal Kappa istatistikleri ile doğruluk oranı hesaplanmıştır. Model simülasyon doğruluğunun kabul edilebilir eşik olan %80'in üzerinde olduğu belirlenerek 2035 yılı LULC projeksiyonuna geçilmiştir. 2035 yılı projeksiyonu ise RO algoritması kullanılarak elde edilen 2015 ve 2025 yılı LULC haritası temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nihai LULC tematik haritalarının görselleştirilmesi ve kartografik tasarımı aşamasında ise ArcGIS Pro yazılımı kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE SONUÇ

Bu çalışmada, GEE platformu ve RO algoritması kullanılarak Artvin ilinin 2005, 2015 ve 2025 yıllarına ait LULC haritaları başarıyla üretilmiştir (Şekil 2). Sınıflandırma süreci neticesinde elde edilen bu haritaların sınıf bazlı ve genel doğruluk performansını ortaya koyan analiz değerleri ise Tablo 2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

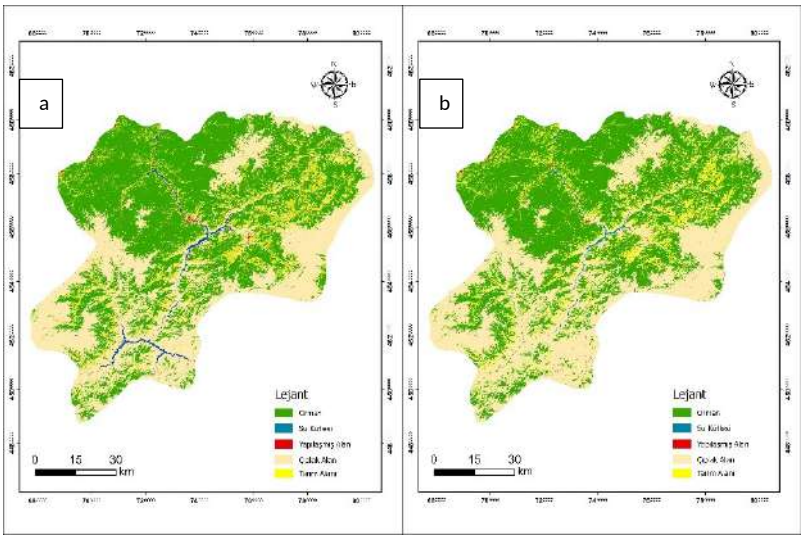


Şekil 2. a) 2005 yılı mevcut LULC haritası **(b)** 2015 yılı mevcut LULC haritası. **(c)** 2025 yılı mevcut LULC haritası

Tablo 2. 2005, 2015 ve 2025 yılları LULC doğruluk oranları

Yıl	Genel Doğruluk (GD)	Kappa	Kullanıcı Doğruluğu (KD)		Üretici Doğruluğu (ÜD)	
2005	98,89	0,96	Orman	99,81	Orman	99,23
			Su Kütlesi	96,22	Su Kütlesi	100
			Yapılaşmış Alan	94,3	Yapılaşmış Alan	89,28
			Çıplak Arazi	97,76	Çıplak Arazi	99,5
			Tarım Alanı	76	Tarım Alanı	83
Yıl	**Genel Doğruluk (GD)**	**Kappa**	**Kullanıcı Doğruluğu (KD)**		**Üretici Doğruluğu (ÜD)**	
2015	98,36	0,95	Orman	99,82	Orman	98,29
			Su Kütlesi	100	Su Kütlesi	99,65
			Yapılaşmış Alan	96,63	Yapılaşmış Alan	89,84
			Çıplak Arazi	96,88	Çıplak Arazi	99,71
			Tarım Alanı	78,10	Tarım Alanı	94,72
Yıl	**Genel Doğruluk (GD)**	**Kappa**	**Kullanıcı Doğruluğu (KD)**		**Üretici Doğruluğu (ÜD)**	
2025	98,46	0,95	Orman	99,74	Orman	98,58
			Su Kütlesi	100	Su Kütlesi	100
			Yapılaşmış Alan	98,55	Yapılaşmış Alan	98,55
			Çıplak Arazi	95,44	Çıplak Arazi	98,70
			Tarım Alanı	80	Tarım Alanı	92

Tematik LULC haritalarının (Şekil 2) elde edilmesinin ardından, geleceğe yönelik arazi değişimlerini öngörebilmek için QGIS MOLUSCE eklentisi ve CA-ANN algoritması yardımıyla ilk olarak 2025 yılı LULC simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon haritasının doğruluğu (Şekil 3b), aynı yıla ait gerçek sınıflandırılmış harita (Şekil 3a) ile piksel tabanlı karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve modelin validasyon istatistikleri hesaplanmıştır. Bu doğrultuda; Doğruluk oranı %91,45, Genel Kappa değeri 0,87, Histogram Kappa Değeri 0,99 ve Konumsal Kappa Değeri 0,89 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu parametreler, gerçek ve simüle edilmiş LULC haritaları arasında genel düzeyde yüksek bir uyum olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte bu değerler, alanın yaklaşık %99'unu kaplayan ve dönem boyunca büyük ölçüde durağan kalan orman, çıplak arazi ve tarım sınıflarının ağırlığını yansıttığından, sınıf bazlı performans aşağıda ayrıca değerlendirilmiştir. 2025 yılına ait gerçek ve simüle edilmiş LULC sınıflarının alansal ve yüzdesel dağılımları ise Tablo 3'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



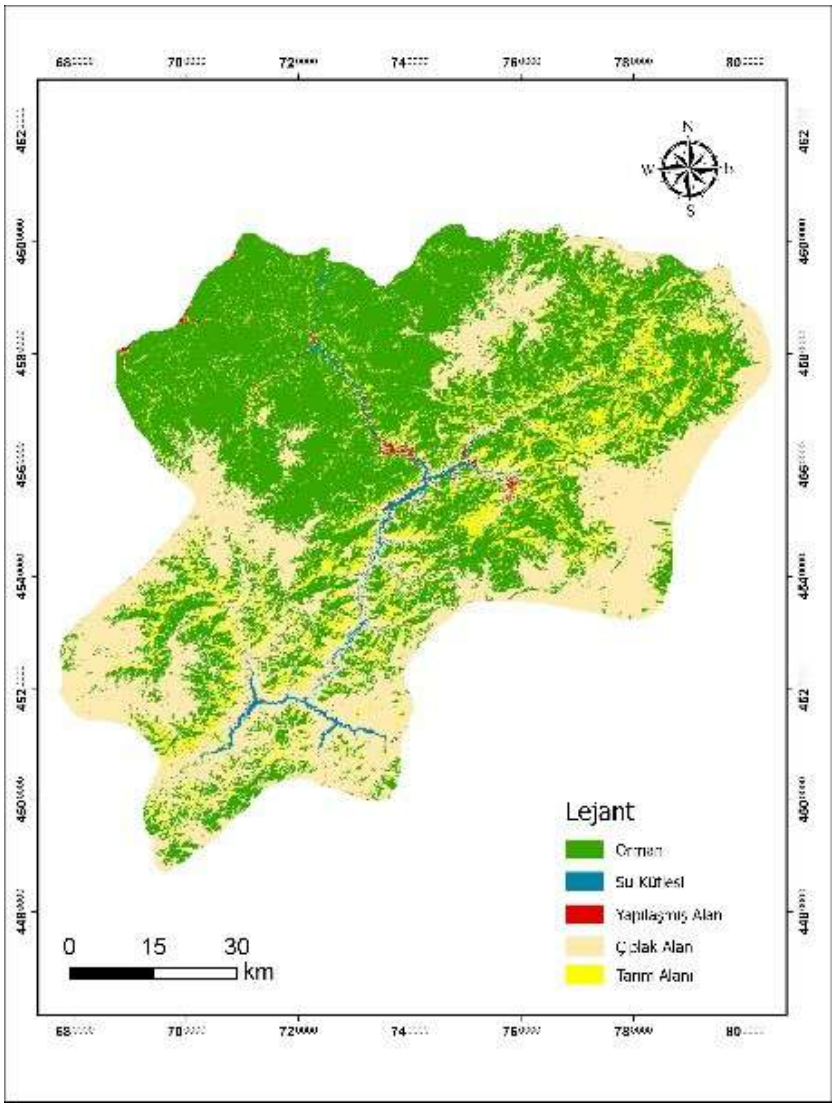
Şekil 3. (a) 2025 yılı mevcut LULC haritası (b) 2025 yılı simüle LULC haritası

Tablo 3. 2025 yılı mevcut ve simüle edilen LULC alan dağılımları.

LULC	**Mevcut LULC Alanı (km^2)**	%	**Simüle LULC Alanı (km^2)**	%
Orman	3607,7	48,90	3549,7	48,12
Su Kütlesi	57,9	0,78	27,6	0,37
Yapılaşmış Alan	13,8	0,19	13,0	0,18
Çıplak Arazi	2907,9	39,42	3046,7	41,31
Tarım Alanı	789,9	10,71	740,1	10,03

Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen modelin Artvin ili arazi örtüsü dinamiklerini %91'in üzerinde bir doğrulukla temsil ettiği görülmektedir. Gözlemlenen sınıf bazlı farklılıklar ağırlıklı olarak su kütleleri sınıfında yoğunlaşmakta olup; bu durumun temel nedeni, modelin 2005–2015 dönemi geçiş kurallarıyla eğitilmiş olmasına karşın su yüzeyindeki asıl artışın bu dönemin dışında gerçekleşmiş olmasıdır. Eğitim döneminde karşılığı bulunmayan bu tek seferlik ve dışsal olay, modelin 2025 yılı su kütlesi alanını gerçek değerin yaklaşık yarısı düzeyinde (57,9 km²'ye karşılık 27,6 km²) tahmin etmesine yol açmıştır. Doğrusal olmayan bu karmaşık hidrolojik süreçler ve ani su yüzeyi artışları, geçmiş dönemlerde gözlenen LULC değişim eğilimleri ve mekânsal ilişkiler temelinde çalışan CA-ANN modelinin öngörü kapasitesini sınırlayabilmektedir. Sapmanın yönü ve büyüklüğü dikkate alındığında modelin su kütleleri sınıfında diğer sınıflara kıyasla daha düşük bir başarım sergilediği anlaşılmaktadır; bununla birlikte temel dönüşüm eğilimi diğer sınıflarda doğru yönde simüle edilmiştir. Tarım arazilerinde ortaya çıkan hafif sapmalara ise bölgenin sarp topoğrafyasına bağlı parçalı arazi yapısı ve mevsimsel spektral benzerlikler (nadas ve ürün dönemleri arasındaki geçişler) katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak, söz konusu lokal sapmalar modelin 2035 yılı projeksiyonlarında kullanılmasını engelleyecek düzeyde olmayıp, uygulanan yöntemin genel güvenilirliğini ve tahmin kabiliyetini temelden sarsmamaktadır.

Modelin gelecekteki arazi kullanımı değişimlerini tahmin etmedeki performansının değerlendirilmesinin ardından, 2035 yılına yönelik LULC projeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2035 yılı simülasyonu, 2015 yılı gerçek LULC haritası ile RO algoritması kullanılarak üretilen 2025 yılı gerçek LULC haritası arasındaki sınıf geçişleri ve sisteme tanıtılan bağımsız mekânsal değişkenlerin entegrasyonu kullanılarak yürütülmüştür. 2035 yılına ait simüle edilmiş LULC haritası ve sınıfların mekânsal-alansal dağılımları Şekil 4 ve Tablo 4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 4. 2035 yılı simüle LULC haritası

Tablo 4.2035 yılı simüle LULC alanı

LULC	Simüle LULC Alanı (km²)	(%)
Orman	3640,3	49,33
Su Kütlesi	84,5	1,15
Yapılaşmış Alan	22,2	0,30
Çıplak Arazi	2836,0	38,43
Tarım Alanı	796,3	10,79

Mevcut arazi kullanımı eğilimlerinin kesintisiz devam edeceği varsayımı altında gerçekleştirilen 2035 yılı projeksiyonu, Artvin ilinde on yıllık perspektifte değişimin büyük ölçüde küçük alansal paya sahip yerleşim ve su kütlesi sınıflarında yoğunlaşacağına işaret etmektedir. Tablo 4'te sunulan değerler incelendiğinde, doğal alanların görece istikrarını koruyacağı; bununla birlikte yerleşim ve altyapı sınıflarında dikkat çekici bir genişlemenin yaşanacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, 2035 yılında orman alanlarının 3640,3 km²'ye (%49,33) ulaşması beklenmektedir. 2025 yılı gerçek değerine kıyasla öngörülen yaklaşık 32,59 km²'lik bu artış, sahadaki doğal yenilenme ve ağaçlandırma faaliyetlerinin bir yansıması olarak yorumlanabilir. 2025 yılında 57,87 km² olan su kütleleri alanının 2035'te 84,54 km²'ye yükseleceği tahmin edilmektedir. Bu artış, modelin 2015–2025 eğitim döneminde Yusufeli Barajı rezervuar dolumundan öğrendiği eğilimi geleceğe taşımasının yanı sıra, havzada süregelen baraj yatırımlarının işaret ettiği genişleme potansiyelini de yansıtmaktadır. Ancak öngörülen düzeye ulaşılması rezervuar kapasitelerindeki artışın sürmesine bağlı olduğundan, bulgu ihtiyatla yorumlanmalıdır. Diğer taraftan, on yıl içinde %61,3 oranında radikal bir büyüme göstererek 13,76 km²'den 22,20 km²'ye ulaşması beklenen yerleşim alanları; kırsal altyapı hamleleri ve bölgesel kalkınma politikalarının bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Bu kentsel genişleme eğilimine tezat olarak, 2025'te 2907,9 km² olan çıplak arazi miktarının vejetasyon kazanımı veya farklı kullanımlara dönüşüm nedeniyle 2836 km²'ye (%38,43) gerileyeceği, tarım alanlarının ise 796,3 km² ile görece dengede kalacağı belirlenmiştir. Öte yandan, projeksiyona dahil edilen sahada resmi olarak bir maden sahasının ilan edilmiş olması yukarıda özetlenen olağan seyir senaryosundan köklü biçimde ayrışan yeni bir arazi dönüşüm sürecini tetikleyecektir. Bu çalışma, mevcut trend verileriyle maden faaliyeti olmadığı varsayımı altındaki referans durumu ortaya koyduğundan, gelecekte sahada gözlemlenecek fiili dönüşümler ile model tahminleri arasındaki farklar, madenciliğin mekânsal etkilerini nesnel olarak ölçmeye imkân tanıyacaktır. Örneğin; olağan koşullarda model orman ve tarım alanlarında nispi bir artış öngörürken; galeri girişleri, tahkimat yolları ve taşıma sistemleri gibi maden operasyonları bu eğilimi tersine çevirerek yeşil örtünün hızla yok olmasına neden olabilecektir. Benzer şekilde, modelin 2035'te azalacağını öngördüğü çıplak araziler, cüruf depolama ve hafriyat alanları sebebiyle dramatik şekilde genişleyebilecek ve bu durum sahadaki en erken dönüşüm sinyali olacaktır. Ayrıca şantiye alanları ve lojistik altyapı nedeniyle yerleşim sınıfındaki fiili artışın da modelin öngördüğü toplam %0,30'luk alansal pay sınırını çok aşması kaçınılmazdır. Sonuç olarak bu araştırma, yalnızca statik bir gelecek tahmini sunmakla kalmayıp, maden sahası ilanı gibi majör politika ve yapısal statü değişikliklerinin coğrafi çevre üzerindeki net etkilerini ileride ölçebilecek dinamik bir referans çerçevesi oluşturmaktadır. İzleme amaçlı gerçekleştirilecek periyodik LULC analizleri, model projeksiyonları ile gelecekteki gerçek arazi örtüsü arasındaki sapmaları sistematik olarak ortaya koyarak çevresel tahribatı kanıta dayalı verilerle belgeleme olanağı sunacaktır. Bu bağlamda, karar vericilerin ve bölge plancılarının, Artvin'in hassas dağlık ekosistemlerini koruyabilmek adına, maden faaliyetlerinin sınırlarını sıkı denetleyen koruma politikaları ile iklime ve topoğrafyaya duyarlı sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerini acilen benimsemeleri gerekmektedir.

Bu çalışma, Artvin ilinin gelecekteki arazi örtüsü dinamiklerini anlamak için güçlü bir çerçeve sunsa da veri ve model kaynaklı bazı sınırlılıklara sahiptir. İlk olarak, 30 metre mekansal çözünürlüğe sahip Landsat verileri, mikro ölçekteki kentsel değişimlerin tespitini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, bölgenin yüksek bulutluluk oranı net görüntü teminini kısıtlarken; açık alanlar ile kentsel alanlar veya ormanlar ile tarım arazileri arasındaki spektral benzerlikler piksel karışmalarına yol açabilmektedir. Yardımcı indekslerle bu sorun hafifletilmeye çalışılsa da sınıflandırma hataları modelin doğal bir kısıtıdır. Son olarak, kullanılan CA-ANN yaklaşımı, geçmiş dönemlerde gözlenen arazi dönüşüm eğilimlerinin ve bu dönüşümleri yönlendiren mekânsal ilişkilerin gelecekte de büyük ölçüde geçerli olacağı varsayımına dayanmaktadır. Bu durum; ani politika değişiklikleri, mega altyapı projeleri veya doğal afetler gibi öngörülemeyen deterministik şokların modele entegre edilmesini engellemektedir.

KAYNAKLAR

Albayrak, L., & Yılmaz, C. (2021). Güverda bağlarının coğrafi özellikleri ve kültürel ekolojisi (Artvin). *International Journal of Geography and Geography Education*, (43), 298–316. https://doi.org/10.32003/igge.782402

Artvin Doğa Koruma ve Milli Parklar Müdürlüğü. (2026). https://bolge12.tarimorman.gov.tr/Menu/43/Artvin-Doga-Koruma-Ve-Milli-Parklar-Mudurlugu

Atalay, İ. (2011a). *Türkiye Coğrafyası ve Jeopolitiği*. İzmir: Meta Basım Matbaacılık Hizmetleri.

Atalay, İ. (2011b). *Türkiye İklim Atlası*. İstanbul: İnkılap Yayınları.

Atalay, İ. (2014a). *Toprak, Bitki ve Çölleşme Atlası*. İstanbul: İnkılap Kitabevi.

Atalay, İ. (2014b). *Türkiye'nin Ekolojik Bölgeleri* (Genişletilmiş 2. Baskı). İzmir: Meta Basım Matbaacılık Hizmetleri.

Baig, M. F., Mustafa, M. R., Baig, I., Takaijudin, H. B., & Zeshan, M. T. (2022). Assessment of land use land cover changes and future predictions using CA-Ann Simulation for Selangor, Malaysia. *Water*, *14*(3), 402. https://doi.org/10.3390/w14030402

Buğday, E., & Buğday, S. E. (2019). Modeling and simulating land use/cover change using artificial neural network from remotely Sensing Data. *Cerne*, *25*(2), 246–254. https://doi.org/10.1590/01047760201925022634

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Artvin İli 2024 Yılı Çevre Durum Raporu*. Çevre Yönetimi ve Denetimi Şube Müdürlüğü.

Ceylan, S. (1995). *Artvin Yöresinin Coğrafi Etüdü*. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Erzurum: Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Ceylan, S. (2001). Artvin yöresinde geçici yerleşmelerden olan bağ evlerinin üç farklı örneği: bağevi, üzüm ambarı ve koğlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Burdur Eğitim Fakültesi Dergisi*, *2*, (52-70).

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, *37*(1), 35–46. https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-b

Congalton, R. G., Oderwald, R. G., & Mead, R. A. (1983). Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *University of New Hampshire Scholars Repository (University of New Hampshire at Manchester)*, *49*(12), 1671–1678. https://scholars.unh.edu/faculty_pubs/1245

Dede, V., & Zorlu, K. (2022). Geoheritage assessment with entropy-based WASPAS approach: An analysis on Karçal mountains (Turkey). *Geoheritage*, *15*(1). https://doi.org/10.1007/s12371-022-00777-7

Değermenci, A. S. (2023). Spatio-temporal change analysis and prediction of land use and land cover changes using CA-ann model. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(10). https://doi.org/10.1007/s10661-023-11848-9

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Gündüz, H. İ. (2025). Land-use land-cover dynamics and future projections using gee, ML, and QGIS-MOLUSCE: A case study in Manisa. *Sustainability*, *17*(4), 1363. https://doi.org/10.3390/su17041363

Hussain, K., Mehmood, K., Yujun, S., Badshah, T., Anees, S. A., Shahzad, F., Nooruddin, Ali, J., & Bilal, M. (2024). Analysing LULC transformations using remote sensing data: Insights from a multilayer perceptron neural network approach. *Annals of GIS*, *31*(3), 473–500. https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2343399

Kadı, F., & Yılmaz, O. S. (2024). Orman içi açıklıklara ait zamansal değişimlerin uzaktan algılama teknikleri ile Google Earth Engine platformunda tespit edilmesi: Trabzon-Düzköy İlçesi örneği. *Geomatik*, *9*(2), 141–155. https://doi.org/10.29128/geomatik.1363873

Kafy, A.-. A., Abdullah-Al-Faisal, N., Raikwar, V., Rakib, A. A., Kona, M. A., & Ferdousi, J. (2021). Geospatial approach for developing an integrated water resource management plan in Rajshahi, Bangladesh. *Environmental Challenges*, *4*, 100139. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100139

Kaya, G. (2022). *Yusufeli barajı'nın Çevresel Etkileri*. Kriter Yayınevi.

Kaymaz, Ç. K. (2021). *Artvin İlinin Ekoturizm Potansiyeli ve Sürdürülebilir Yönetimi*. Atatürk Üniversitesi Yayınevi. https://ekitap.atauni.edu.tr/

Kocaman, B., & Ağaççıoğlu, H. (2025). Assessment of the impact of land use/land cover changes on carbon emissions using remote sensing and Deep Learning: A Case Study of the kağıthane basin. *Sustainability*, *17*(23), 10690. https://doi.org/10.3390/su172310690

Koday, S., & Erhan, K., (2010). Çoruh vadisinde nüfusun dağılışı. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* , *14*, (221-230).

Koday, Z. (1995). Hopa İlçesinin Coğrafyası. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Erzurum: Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü. (2026). *Artvin ili sit alanları*. https://kvmgm.ktb.gov.tr/

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Muhammad, R., Zhang, W., Abbas, Z., Guo, F., & Gwiazdzinski, L. (2022). Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and Remote Sensing Big Data: A case study of Linyi, China. *Land*, *11*(3), 419. https://doi.org/10.3390/land11030419

Orhan, F. (2015). *Şavşat'ın Beşeri ve Ekonomik Coğrafyası*. Ankara: Eflal Ajans.

Özşahin, E., & Kaymaz, Ç. K. (2013). Camili (Macahel) Biyosfer Rezerv Alanının (Artvin, Kd Türkiye) Heyelan Duyarlılık Analizi. Turkish Studies, 8(3). https://www.arastirmax.com/en/system/files/dergiler/79199/makaleler/8/3/arastrmx_79199_8_pp_471-493.pdf

Rikimaru, A., Roy, P., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, *43*(1), 39–47. https://www.researchgate.net/publication/255718070_Tropical_forest_cover_density_mapping

Rızvanoğlu, M. T., (2008). Mezra yerleşmelerinin fonksiyonel değişimine bir örnek:Ardanuç mezraaları. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* .

Rosenfield, G. H., & Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *52*(2), 223–227. https://pubs.er.usgs.gov/publication/70014667

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS-1 Symposium, Volume I: Technical Presentations* (NASA SP-351, s. 309–317). Washington, DC: NASA

Sarış, F. (2012). *Kuzeydoğu Türkiye'de (Doğu Karadeniz ve Çoruh Havzaları) Sıcaklık, Yağış ve Akım Serilerinin Rejim ve Trend Analizi* [Bildiri]. I. Ulusal Coğrafya Sempozyumu Bildirileri, 28-30 Mayıs 2012, (ss. 35-47), Erzurum

Sever, R. (2005). *Coğrafi Açıdan Bir Araştırma: Çoruh Havzası Enerji Yatırım Projeleri ve Çevresel Etkileri*. Ankara: Çizgi Kitabevi

Sevindi, C., Kaya, G., & Zaman, M., (2018). Yeri değiştirilmesi planlanan yerleşmelere bir örnek: Yusufeli (Artvin). *4. Uluslararası Sosyal, Beşeri ve İdari Bilimler Sempozyumu* (332-351). Alanya, Turkey

Sunbul, F., Karadeniz, E., Sengun, M. T., & Kocaoglu, M. (2025). Forecasting urban shifts post-earthquake: lulc change analysis in Elazığ, Turkey using ann and Markov models. *The Geographical Journal*, *191*(3). https://doi.org/10.1111/geoj.70022

Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, Pal, S., Liou, Y.-A., & Rahman, A. (2020). Land-use land-cover classification by Machine Learning classifiers for satellite observations—a review. *Remote Sensing*, *12*(7), 1135. https://doi.org/10.3390/rs12071135

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2026). https://www.tuik.gov.tr/

Ullah, S., Tahir, A. A., Akbar, T. A., Hassan, Q. K., Dewan, A., Khan, A. J., & Khan, M. (2019). Remote sensing-based quantification of the relationships between land use land cover changes and surface temperature over the Lower Himalayan region. *Sustainability*, *11*(19), 5492. https://doi.org/10.3390/su11195492

Yakut, E. B., & Koday, Z. (2025). Artvin'de nüfusun demografik yapısı. *Artvin Çoruh Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, *11*(1), 217–239. https://doi.org/10.22466/acusbd.1716954

Yao, F., Hao, C., & Zhang, J. (2015). Simulating urban growth processes by integrating cellular automata model and artificial optimization in Binhai New Area of Tianjin, China. *Geocarto International*, *31*(6), 612–627. https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1073365

Yono, A., Mokua, R. A., & Dube, T. (2025). Remote Sensing of land cover change dynamics in mountainous catchments and semi-arid environments: A Review. *Geocarto International*, *40*(1). https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2476602

1D-CNN TABANLI HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMASINDA AĞIRLIK BAŞLATMANIN ROLÜ VE BATCH NORMALIZATION İLE ETKİLEŞİMİ

Selver GÜNGÖR[1], Berra Nur TUNÇ[2], Ümit Haluk ATASEVER[3]
Erkan BEŞDOK[4]

[1]Arş. Gör., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi Kayseri, selvergungor@erciyes.edu.tr
[2]Arş. Gör., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi Kayseri, berranursen@erciyes.edu.tr
[3]Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, uhatasever@erciyes.edu.tr
[4]Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi, Kayseri, ebesdok@erciyes.edu.tr

ÖZET

Hiperspektral görüntü sınıflandırması, tarım, uzaktan algılama ve çevre izleme gibi alanlarda yaygın biçimde uygulanmakta ve bu alanda derin öğrenme tabanlı yöntemlerin kullanımı hızla artmaktadır. Bu yöntemlerin başarısı ise büyük ölçüde modelin eğitim sürecine bağlıdır. Derin öğrenme modellerinin eğitiminde ağırlık başlatma stratejileri, modelin yakınsamasını ve sınıflandırma başarısını doğrudan etkileyen bir hiperparametredir. Bununla birlikte hiperspektral veriye özgü tek boyutlu evrişimli sinir ağı (1D-CNN) mimarilerinde farklı başlatma yöntemlerinin batch normalization (BN) varlığı ve yokluğunda sistematik olarak karşılaştırıldığı çalışmalar literatürde sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma He normal, He uniform, Xavier normal, Xavier uniform, LeCun normal, orthogonal, random ve zeros başlatma yöntemlerinin 1D-CNN tabanlı hiperspektral görüntü sınıflandırması üzerindeki etkisini BN koşuluna göre ayrı ayrı değerlendirmektedir. Deneyler Salinas-A ve Indian Pines veri kümeleri üzerinde yürütülmüştür. Sınıflandırma modeli olarak üç evrişim bloğu ve iki tam bağlantılı katmandan oluşan bir 1D-CNN mimarisi kullanılmıştır. Model performansı genel doğruluk, ortalama doğruluk, Kappa, F1, mIoU, MCC ve SSIM ölçütleriyle değerlendirilmiştir. BN devre dışı bırakıldığında başlatma yöntemleri arasındaki fark her iki veri kümesinde de belirgindir. Ancak farkın büyüklüğü veri kümesinin zorluğuna bağlıdır. He normal ve He uniform gibi varyans ölçekli yöntemler arasındaki genel doğruluk farkı Salinas-A'da 0,6 yüzde puanı iken Indian Pines'ta 7,2 yüzde puanına yükselmektedir. Random başlatma dâhil edildiğinde bu aralık sırasıyla 3,1 ve 22,2 yüzde puanına çıkmaktadır. En yüksek doğruluğu Salinas-A'da 0,9922 ile He uniform, Indian Pines'ta 0,8184 ile He normal vermiştir. Zeros başlatma ise en büyük sınıfın oranında kalmış ve hiç öğrenememiştir. BN eklendiğinde ise aradaki fark 0,1 ve 1,9 yüzde puanına gerileyerek varyans ölçekli yöntemleri istatistiksel olarak eşitlemiştir. Buna karşın sıfır başlatma her iki kümede, random başlatma ise Indian Pines'ta geride kalmayı sürdürmüştür. Bu yüzden BN katmanı bu farkları daraltsa da doğru bir başlatma tercihinin yerini tutmamaktadır. BN bulunmayan modellerde ise başlatma seçimi oldukça önem taşımakta ve modelin sınıflandırma başarısını doğrudan etkilemektedir.

Anahtar Sözcükler: 1D-CNN, batch normalization, hiperspektral görüntü sınıflandırması, ağırlık başlatma

ABSTRACT

THE ROLE OF WEIGHT INITIALIZATION AND ITS INTERACTION WITH BATCH NORMALIZATION IN 1D-CNN-BASED HYPERSPECTRAL IMAGE CLASSIFICATION

Hyperspectral image classification is widely applied in agriculture, remote sensing and environmental monitoring, where deep learning methods are increasingly used. The success of these methods depends largely on the training process. In the training of deep learning models, weight initialization is a hyperparameter that directly affects model convergence and classification performance. Nevertheless, studies systematically comparing initialization methods with and without batch normalization (BN) in one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) architectures for hyperspectral data remain limited. This study evaluates the effect of He normal, He uniform, Xavier normal, Xavier uniform, LeCun normal, orthogonal, random and zeros initialization for each BN condition separately. Experiments were carried out on the Salinas-A and Indian Pines datasets. The classification model was a 1D-CNN with three convolutional blocks and two fully connected layers. Performance was evaluated with overall accuracy, average accuracy, Kappa, F1, mIoU, MCC and SSIM. When BN is disabled, the difference between initialization methods is evident on both datasets. However, its magnitude depends on dataset difficulty. Among variance-scaled methods such as He normal and He uniform, the overall accuracy difference is 0.6 percentage points on Salinas-A and rises to 7.2 on Indian Pines. Including random initialization, the range rises to 3.1 and 22.2 percentage points respectively. He uniform gave the highest accuracy on Salinas-A with 0.9922 and He normal on Indian Pines with 0.8184. Zeros initialization remained at the proportion of the largest class and failed to learn. With BN, the performance difference falls to 0.1 and 1.9 percentage points, statistically equalizing the variance-scaled methods. In contrast, zeros on both datasets and random on Indian Pines continued to lag behind. Therefore, although the BN layer narrows these differences, it does not substitute for a sound initialization choice. In models without BN, the choice of initialization is critical and directly affects classification performance.

Keywords: 1D-CNN, batch normalization, hyperspectral image classification, weight initialization

1. GİRİŞ

Hiperspektral görüntüler, her piksel için yüzlerce dar ve ardışık spektral bantta ölçüm sunar. Bu özellik sayesinde yüzey örtüsünü ayırt etmede geleneksel çok bantlı verilere göre belirgin bir üstünlük sağlar. Bu zengin spektral içerik tarımsal ürün deseni belirleme, bitki sağlığı izleme, mineral haritalama ve çevresel değişim analizi gibi birçok alanda hiperspektral sınıflandırmayı öne çıkarmıştır. Son yıllarda bu alanda derin öğrenme tabanlı yöntemler yaygınlaşmıştır. Özellikle evrişimli sinir ağları, klasik makine öğrenmesi yaklaşımlarına göre daha yüksek doğruluk değerlerine ulaşmaktadır (Hu vd., 2015; Chen vd., 2016; Paoletti vd., 2019).

Hiperspektral verilerde piksel bazlı spektral imza tek boyutlu bir sinyal olarak kabul edilebilir. Bu nedenle tek boyutlu evrişimli sinir ağları (1D-CNN) bu veri türü için oldukça doğal bir modelleme yapısı sunar. Son dönemde hem uzamsal hem de spektral bilgiyi birlikte kullanan 2B/3B evrişimli ağlar ile spektral transformer mimarileri oldukça popüler hale gelmiştir. Ancak bu çalışmada 1D-CNN mimarisi bilinçli bir kararla tercih edilmiştir. Uzamsal bağlam devreye girdiğinde, komşu piksellerin eğitim ve test kümelerine dağılması bilgi sızıntısına yol açabilir. Ayrıca artan model karmaşıklığı da sonuçları etkiler. Bu durum ağırlık ölçeklemesi ile BN katmanının saf optimizasyon dinamiklerini perdeleyebilmektedir. Salt spektral bir yapı kurmak ise bu dinamiği dış etkilerden yalıtarak gözlemlemeye olanak tanır.

Derin ağların başarısı sadece model mimarisine değil aynı zamanda eğitim sürecinin nasıl kurulduğuna da bağlıdır. Ağırlık başlatma adımı eğitim başlamadan önce ağdaki öğrenilebilir parametrelere ilk değerlerin atanması işlemidir. Gradyan tabanlı optimizasyon bu ilk noktadan başladığı için seçilen değerler eğitimin gidişatını ve ulaşılan başarıyı doğrudan belirler. Hatalı bir başlatma tercihi, sinyal ve gradyan varyansının katmanlar boyunca korunmasını zorlaştırır. Bunun sonucunda gradyanlar sönebilir veya patlayabilir (Glorot ve Bengio, 2010; He vd., 2015).

Batch normalization (BN) eğitim sırasında her katmanın çıkışını yığın istatistiklerini kullanarak sıfır ortalama ve birim varyansa ölçekler. Ardından öğrenilebilir parametrelerle bu çıkışları yeniden konumlandırır (Ioffe ve Szegedy, 2015). Literatürde BN'nin aktivasyon dağılımını dengelediği, optimizasyon yüzeyini pürüzsüzleştirdiği ve modele ilk atanan değerlere olan bağımlılığı azalttığı gösterilmiştir (Santurkar vd., 2018). Bu durum ağırlık başlatma yönteminin önem derecesinin ağda BN bulunup bulunmamasına göre değişebileceğini düşündürmektedir.

Literatür incelendiğinde ağırlık başlatma yöntemleri ile BN'nin ayrı ayrı yoğun biçimde araştırıldığı görülmektedir. Buna karşın hiperspektral veriye özel 1D-CNN modellerinde farklı başlatma yaklaşımlarını BN varlığında ve yokluğunda sistematik olarak kıyaslayan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca mevcut çalışmaların çoklu rastgele tohumlarla tekrarlanması ve istatistiksel testlerle desteklenmesi tarafında da eksiklikler bulunmaktadır. Bu çalışma söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında He normal, He uniform, Xavier normal, Xavier uniform, LeCun normal, orthogonal, random ve zeros olmak üzere sekiz farklı ağırlık başlatma yöntemi ele alınmıştır. Yöntemler zorluk düzeyi birbirinden belirgin biçimde farklı iki hiperspektral veri kümesi üzerinde test edilmiştir. 1D-CNN tabanlı sınıflandırma modelleri hem BN etkin hem de devre dışı koşullarda ayrı ayrı eğitilmiştir. Rastgelelik etkisini azaltmak amacıyla her deney 10 farklı tohumla tekrarlanmıştır. Böylece veri kümesi başına 160, toplamda ise 320 bağımsız eğitim koşusu yapılmıştır. Yöntemler arasındaki farklar Friedman testi ve Holm-Bonferroni düzeltmeli Wilcoxon işaretli sıralar testi ile incelenmiştir. Çalışmanın temel katkısı başlatma seçiminin öneminin BN kullanımına bağlı olarak nasıl değiştiğini iki farklı zorluk düzeyindeki veri kümesinde ve sağlam bir istatistiksel çerçevede ortaya koymasıdır.

2. VERİ SETLERİ

Çalışmada hiperspektral sınıflandırma literatüründe yaygın olarak kullanılan ve zorluk düzeyi belirgin biçimde farklı iki veri kümesi seçilmiştir. Salinas-A az sayıda ve spektral olarak iyi ayrışan tarımsal sınıf içerdiğinden görece kolaydır. Indian Pines ise çok sayıda sınıf, yüksek sınıf dengesizliği ve spektral olarak birbirine yakın ürün türleri barındırdığından zorlu bir kümedir. Bu ikili seçim elde edilen bulguların tek bir veri kümesine özgü olup olmadığının sınanmasına olanak tanımaktadır.

2.1. Salinas-A

Salinas-A, AVIRIS algılayıcısı tarafından ABD'nin Kaliforniya eyaletindeki Salinas Vadisi üzerinden elde edilen Salinas sahnesinin bir alt bölgesidir. Görüntü 86 × 83 piksel boyutunda ve 3,7 m uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Toplam 224 spektral banttan su emilimi ve gürültü nedeniyle kullanılamayan bantlar çıkarıldıktan sonra kalan 204 bant kullanılmıştır (Green vd., 1998; Graña vd., t.y.). Veri kümesi altı tarımsal örtü sınıfı ve 5348 etiketli piksel içermektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Salinas-A veri kümesindeki sınıflar ve piksel sayıları

No	Sınıf	Toplam piksel	Eğitim	Test
1	Brokoli / yeşil yabancı ot	391	313	78
2	Olgunlaşmış mısır	1343	1075	268
3	Marul (romaine), 4 hafta	616	492	124
4	Marul (romaine), 5 hafta	1525	1220	305
5	Marul (romaine), 6 hafta	674	540	134
6	Marul (romaine), 7 hafta	799	639	160
	Toplam	5348	4279	1069

Eğitim sütunu, doğrulama kümesini de içeren toplam eğitim havuzunu göstermektedir; üç parçalı bölünmenin ayrıntısı Çizelge 3'te sunulmuştur.

2.2. Indian Pines

Indian Pines, yine AVIRIS algılayıcısıyla ABD'nin Indiana eyaletindeki bir tarım bölgesi üzerinden elde edilmiştir. Görüntü 145 × 145 piksel boyutunda olup 20 m uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Su emilimi bantları çıkarıldıktan sonra 200 spektral bant kullanılmıştır. Veri kümesi 16 sınıf ve 10249 etiketli piksel içermektedir. Sınıf dağılımı son derece dengesizdir. En kalabalık sınıf 2455 piksel içerirken en küçük sınıf yalnızca 20 piksel içermektedir (Baumgardner vd., 2015). Bu oran yaklaşık 123 kata karşılık gelmektedir (Çizelge 2). Söz konusu dengesizlik, genel doğruluk (OA) ile ortalama doğruluk (AA) arasında belirgin bir farka yol açmakta ve sonuçların yorumlanmasında dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2. Indian Pines veri kümesindeki sınıflar ve piksel sayıları

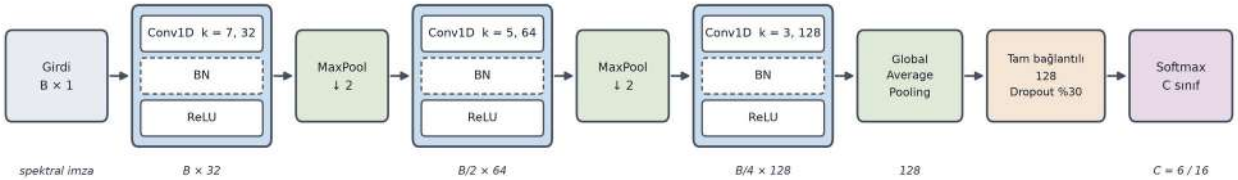
Sınıf	Toplam	Eğitim	Test	Sınıf	Toplam	Eğitim	Test
Yonca	46	39	7	Yulaf	20	16	4
Mısır — sürülmemiş	1428	1142	286	Soya — sürülmemiş	972	786	186
Mısır — az sürülmüş	830	655	175	Soya — az sürülmüş	2455	1972	483
Mısır	237	189	48	Soya — temiz	593	464	129
Çayır — mera	483	388	95	Buğday	205	162	43
Çayır — ağaçlık	730	575	155	Orman	1265	1018	247
Çayır — biçilmiş	28	20	8	Yapı–çim–ağaç–yol	386	314	72
Saman balyası	478	385	93	Taş-çelik kule	93	74	19

Eğitim sütunu, doğrulama kümesini de içeren toplam eğitim havuzunu göstermektedir; üç parçalı bölünmenin ayrıntısı Çizelge 3'te sunulmuştur.

3. YÖNTEM

3.1. 1D-CNN Mimarisi

Sınıflandırma modeli olarak her pikselin spektral imzasını tek boyutlu bir sinyal olarak işleyen bir 1D-CNN mimarisi kullanılmıştır. Mimari sırasıyla 7, 5 ve 3 çekirdek boyutuna ve 32, 64 ve 128 filtreye sahip üç ardışık evrişim bloğundan oluşmaktadır. Her evrişim katmanını BN etkin olduğu durumda bir batch normalization katmanı ve ardından ReLU etkinleştirme işlevi izlemektedir. İlk iki bloğun ardından boyut indirgemek amacıyla 2 adım aralıklı maksimum havuzlama uygulanmaktadır. Bant sayısı B ile gösterilmek üzere katman çıkışlarının boyutu sırasıyla B × 32, B/2 × 64 ve B/4 × 128 biçiminde ilerlemektedir. Evrişim katmanlarından elde edilen öznitelik haritaları global average pooling ile 128 boyutlu tek bir vektörde birleştirilmektedir. Ardından 128 nöronlu tam bağlantılı bir katman, %30 oranlı seyreltme (dropout) ve sınıf sayısı kadar çıkışa sahip softmax katmanıyla sınıflandırma tamamlanmaktadır (Srivastava vd., 2014). Mimari her iki veri kümesinde aynıdır. Yalnızca girdi uzunluğu ile çıkış katmanının nöron sayısı veri kümesine göre değişmektedir. Mimarinin genel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. B spektral bant sayısını (Salinas-A: 204, Indian Pines: 200), C ise sınıf sayısını (Salinas-A: 6, Indian Pines: 16) göstermektedir. Kesikli çerçeveli BN katmanları yalnızca BN=1 koşulunda etkindir; BN=0 koşulunda mimariden çıkarılmıştır.



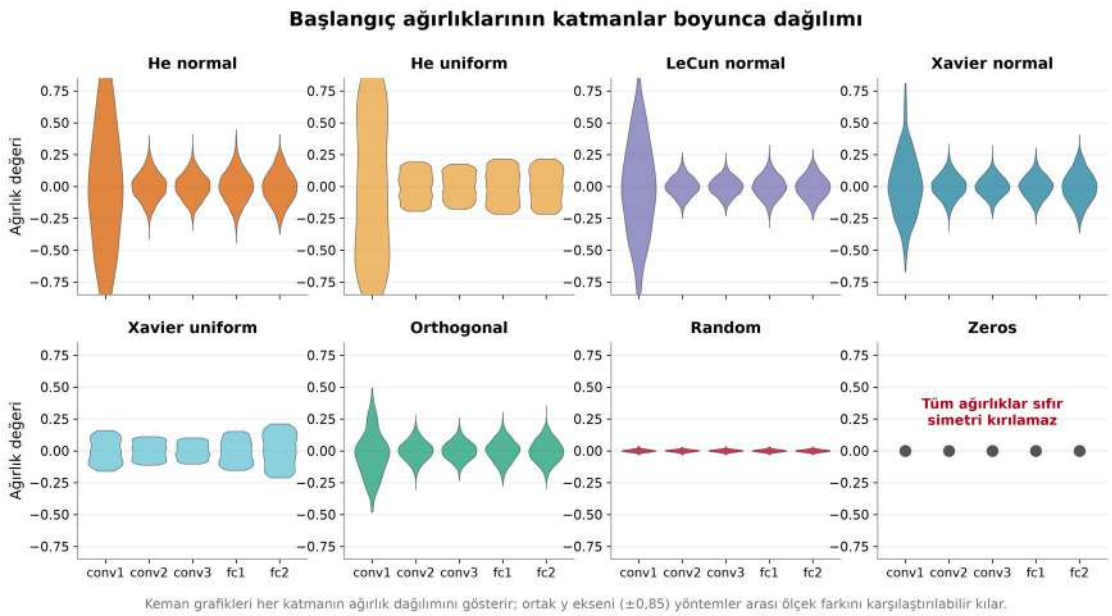
Şekil 1. Çalışmada kullanılan 1D-CNN mimarisi

3.2. Ağırlık Başlatma Yöntemleri

Karşılaştırmaya alınan sekiz başlatma yöntemi, giren bağlantı sayısı (fan-in) ve çıkan bağlantı sayısı (fan-out) temelinde varyans ölçekleyen yaklaşımlar ile bunlara referans oluşturan iki sınır durumdan oluşmaktadır. He normal ve He uniform, ReLU etkinleştirmesinin varyansı yarıya düşürmesini telafi edecek biçimde 2/fan-in ölçeklemesi kullanır (He vd., 2015). Xavier normal ve Xavier uniform, ileri ve geri yayılımda varyansı birlikte korumayı hedefleyerek 2/(fan-in + fan-out) ölçeklemesine dayanır (Glorot ve Bengio, 2010). LeCun normal 1/fan-in ölçeklemesini kullanır (LeCun vd., 1998). Orthogonal başlatma, ağırlık matrisini dik (ortogonal) bir matris olarak kurarak tekil değerlerin birim büyüklükte kalmasını ve gradyan normunun katmanlar boyunca korunmasını amaçlar (Saxe vd., 2014). Random başlatma, varyans ölçeklemesi yapılmayan dar bir normal dağılımı temsil eder. Zeros başlatma ise tüm ağırlıkların sıfıra atandığı dejenere durumdur ve simetri kırılamadığı için öğrenmenin gerçekleşemeyeceği bir alt sınır referansı olarak çalışmaya dâhil edilmiştir.

Bu yöntemlerin ürettiği başlangıç ağırlıklarının katmanlar boyunca dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Fan-in değeri 7 olan ilk evrişim katmanında He ailesi en geniş dağılımı ($\sigma \approx 0{,}54$–$0{,}57$), LeCun normal bunun yaklaşık $1/\sqrt{2}$ katını ($\sigma \approx 0{,}40$), Xavier ve orthogonal ise daha darını üretmektedir. Fan-in değeri büyüyen sonraki katmanlarda tüm varyans ölçekli yöntemlerin standart sapması 0,06–0,13 bandına yakınsamaktadır. Random başlatma ise fan-in değerinden bağımsız olarak tüm katmanlarda $\sigma \approx 0{,}01$ düzeyinde sabit kalmaktadır. Zeros başlatmada ise tüm ağırlıklar sıfır olduğundan dağılım tek bir noktaya çökmekte ve nöronlar arası simetri kırılamamaktadır. Şekil 2 aynı zamanda normal ve uniform varyantları görsel olarak ayırt etmektedir. Normal varyantlar çan biçimli uniform varyantlar ise düz tepeli dağılımlar üretmektedir.

Şekil 2, Salinas-A veri setinin boyutlarıyla (204 bant, 6 sınıf) üretilmiştir. Evrişim katmanlarının ağırlık boyutları bant sayısından bağımsız olduğu için bu seçim genelliği bozmamaktadır; iki veri kümesi arasındaki tek fark olan çıkış katmanı boyutunun ağırlık ölçeğine etkisi yöntemlerin çoğunda %1'in, Xavier varyantlarında %5'in altında kalmaktadır. Ortak y ekseni yöntemler arası ölçek farkını karşılaştırılabilir kılmaktadır.



Şekil 2. Başlangıç ağırlıklarının katmanlar boyunca dağılımı (Salinas-A)

3.3. Veri Bölünmesi ve Deney Tasarımı

Test kümesi eğitim sürecinin hiçbir aşamasında kullanılmamış yalnızca nihai değerlendirmede devreye alınmıştır. Eğitim havuzu sınıf oranları korunacak biçimde %80 eğitim ve %20 doğrulama olarak ikiye ayrılmıştır. Bu ayrım tabakalı hold-out örneklemesiyle yapılmıştır. Tabakalama, cvpartition işlevine sınıf etiketleri kategorik değişken olarak verilerek sağlanmıştır. Böylece her sınıfın eğitim ve doğrulama alt kümelerindeki oranı o sınıfın eğitim havuzundaki oranına eşit tutulmuştur. Tabakalama özellikle Indian Pines gibi çok az örnekli sınıflar içeren kümelerde bir sınıfın doğrulama kümesinde hiç temsil edilmemesini önlemek açısından gereklidir. Üç parçalı bölünmenin sayıları ve oranları Çizelge 3'te verilmiştir.

Bölünme işlemi sabit bir rastgelelik tohumuyla bir kez gerçekleştirilmiş ve 160 koşunun tamamında aynı eğitim doğrulama bölünmesi kullanılmıştır. Tohuma bağlı olarak değişen unsurlar ağırlıkların başlangıç değerleri ile yığınların her dönemde karıştırılma sırasıdır. Bu tasarım gözlenen farkların veri bölünmesinden değil yalnızca başlatma yönteminden kaynaklandığını güvence altına almaktadır.

Çizelge 3. Veri kümelerinin üç parçalı bölünmesi

Veri kümesi	Eğitim	Doğrulama	Test	Toplam
Salinas-A	3424 (%64,0)	855 (%16,0)	1069 (%20,0)	5348
Indian Pines	6560 (%64,0)	1639 (%16,0)	2050 (%20,0)	10249

Başlatma yönteminin etkisini yalıtmak amacıyla eğitimle ilgili tüm hiperparametreler bütün koşullarda sabit tutulmuştur. Sabit tutulan parametreler şunlardır: üç evrişim bloğu ve iki tam bağlantılı katman, Adam optimizasyon algoritması, 0,001 öğrenme oranı, 128 örneklik yığın boyutu, en fazla 100 dönem, 20 dönemlik erken durdurma parametresi, 0,30 dropout oranı, %20 oranlı tabakalı doğrulama ayrımı, tek ve sabit tohumla üretilen eğitim doğrulama bölünmesi ve eğitim kümesi istatistikleriyle yapılan z-skor ölçekleme. Sistematik olarak değiştirilen üç etken ise ağırlık başlatma yöntemi, batch normalization koşulu ve rastgelelik tohumudur (1–10). Öğrenme oranı başlatma yöntemlerinin sonuçlarını doğrudan etkileyen bir parametre olduğundan özellikle önemlidir. Bu nedenle tüm koşullarda 0,001 değerinde sabitlenmiş ve yöntemler arası karşılaştırma tek bir öğrenme oranı altında yapılmıştır.

Her başlatma yöntemi, BN etkin (BN=1) ve BN devre dışı (BN=0) olmak üzere iki koşulda ayrı ayrı eğitilmiştir. Tohuma bağlı rastgeleliğin sonuçları etkilemesini önlemek amacıyla her deney 10 farklı rastgele tohumla tekrarlanmıştır. Böylece veri kümesi başına 8 başlatma yöntemi × 2 BN koşulu × 10 tohum = 160, iki veri kümesi için toplam 320 bağımsız eğitim gerçekleştirilmiştir.Eğitimde Adam optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Kingma ve Ba, 2015). Nihai model olarak doğrulama kaybının en düşük olduğu ağ seçilmiş, öznitelikler eğitim kümesi istatistikleriyle standartlaştırılmış (z-skor) ve aynı dönüşüm doğrulama ile test kümelerine uygulanmıştır.

3.4. Değerlendirme Ölçütleri

Model performansı hiperspektral sınıflandırma literatüründe yaygın olarak kullanılan ölçütlerle değerlendirilmiştir: genel doğruluk (OA), ortalama doğruluk (AA), Kappa katsayısı, F1 skoru, ortalama kesişim/birleşim oranı (mIoU), Matthews korelasyon katsayısı (MCC) ve sınıflandırma haritasının yapısal benzerliğini ölçen SSIM (Wang vd., 2004). Bunlara ek olarak eğitim davranışını değerlendirmek için iki temel ölçüt kullanılmıştır. İlki, modelin en yüksek doğrulama doğruluğunun %95'ine ulaştığı dönemi belirten yakınsama dönemi (ConvEpoch) ölçütüdür. İkincisi ise modelin farklı tohumlar arasındaki tutarlılığını gösteren 10 tohumluk OA standart sapması (kararlılık ölçütü) değeridir.

Hesaplama adımında standart parametreler tercih edilmiştir. Bu doğrultuda 11 × 11 boyutunda Gauss ağırlıklı yerel pencere ($\sigma = 1,5$) ile kararlılık sabitleri olarak $K_1 = 0,01$ ve $K_2 = 0,03$ değerleri kullanılmıştır. Haritalar çift duyarlıklı sayı dizisi şeklinde işlendiği için dinamik aralık (L) varsayılan kurallar gereği 1 olarak kabul edilmiştir. Oysa haritadaki değerler sınıf numaralarını temsil ettiği için gerçek aralık Salinas-A verisinde 0–6, Indian Pines verisinde ise 0–16 seviyesindedir. Dinamik aralığın gerçek etiket sınırlarına ayarlanması SSIM skorunu bir miktar artırmaktadır. Örneğin Salinas-A veri kümesinin en iyi modelinde bu skor 0,9695 yerine 0,9825 seviyesine çıkmaktadır. Ancak tüm deneylerde aynı varsayılan hesaplama kuralı uygulandığı için yöntemler arasındaki kıyaslama geçerliliğini korumaktadır.

Değerlendirme sürecinde iki ölçütün yapısal sınırları göz önünde bulundurulmuştur. SSIM metriği harita üzerindeki pikselleri parlaklık değeri gibi ele alır. Oysa buradaki piksel değerleri sırasız sınıf etiketleridir. Ayrıca arka plan her iki haritada da aynı değere ayarlandığı için hiç öğrenme gerçekleştiremeyen bir model bile arka plan eşleşmesi sayesinde yüksek SSIM skoru alabilmektedir. Nitekim Indian Pines verisinde BN katmanı olmadan eğitilen zeros başlatması hiçbir şey öğrenememesine rağmen en yüksek SSIM değerini üretmiştir. Benzer bir durum F1 skoru için de geçerlidir. Makro F1 sınıf bazlı değerlerin ortalamasını aldığı için sadece tek bir sınıfı tahmin eden modellerde yanıltıcı biçimde yüksek sonuçlar doğurabilmektedir. Bu gerekçelerle her iki ölçüt de tek başına değil mutlaka OA, AA, Kappa ve MCC metrikleriyle birlikte yorumlanmıştır. Ayrıca zeros başlatma yöntemine ait F1 ve SSIM değerleri yanıltıcı tablo oluşturmaması adına sonuç çizelgelerinde raporlanmamıştır.

3.5. İstatistiksel Analiz

Yöntemler arasındaki performans farklarının rastlantısal olup olmadığını belirlemek için Friedman testi uygulanmıştır (Friedman 1937). Bu test her veri kümesi ve her BN koşulu için 10 farklı tohumdan elde edilen test OA değerleri üzerinde yürütülmüştür. Friedman testinin anlamlı sonuç vermesi durumunda ikili karşılaştırmalara geçilmiştir. Bu aşamada, en yüksek doğrulama doğruluğuna sahip yöntem referans seçilmiştir. Referans model ile diğer yöntemler arasındaki farklar Wilcoxon işaretli sıralar testi kullanılarak incelenmiştir (Wilcoxon 1945). Çoklu test sürecinde ortaya çıkabilecek birinci tip hata artışını engellemek için Holm-Bonferroni düzeltmesi yapılmıştır (Holm 1979). Tercih edilen bu yöntem sınıflandırıcı modellerin birden fazla koşul altında karşılaştırılması için literatürde tavsiye edilen parametrik olmayan standart yaklaşımla tam uyumludur (Demšar 2006). Tüm analizlerde istatistiksel anlamlılık eşiği 0,05 olarak kabul edilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Salinas-A Sonuçları

BN devre dışı bırakıldığında en yüksek genel doğruluğu 0,9922 ile He uniform başlatma elde etmiştir. Bunu 0,9916 ile He normal ve 0,9894 ile Xavier normal izlemiştir. Random başlatma 0,9614 doğrulukla geride kalmış ve 0,0169 standart sapmasıyla en kararsız yöntem olmuştur. Zeros başlatma ise 0,2853 düzeyinde kalmıştır. Bu değer test kümesindeki en büyük sınıfın oranına karşılık gelmekte olup modelin hiç öğrenemediğini ve tüm pikselleri tek bir sınıfa atadığını göstermektedir. Nitekim bu yöntemin Kappa ve MCC değerleri sıfırdır. BN etkinleştirildiğinde zeros dışındaki yedi yöntemin tamamı 0,9922 – 0,9930 aralığına toplanmış ve aralarındaki en büyük fark 0,1 yüzde puanına inmiştir. Ayrıntılı sonuçlar Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Salinas-A test sonuçları

Başlatma	BN	OA	AA	Kappa	F1	mIoU	MCC	SSIM
He uniform	0	**0,9922**	**0,9899**	**0,9902**	**0,9912**	**0,9825**	**0,9902**	0,9552
	1	0,9925	0,9901	0,9906	0,9915	0,9832	0,9906	0,9713
He normal	0	0,9916	0,9893	0,9895	0,9908	0,9818	0,9895	**0,9589**
	1	0,9922	0,9900	0,9902	0,9913	0,9828	0,9902	0,9690
Xavier normal	0	0,9894	0,9872	0,9868	0,9885	0,9772	0,9868	0,9492
	1	**0,9930**	**0,9909**	**0,9912**	**0,9922**	**0,9845**	**0,9912**	**0,9719**
LeCun normal	0	0,9893	0,9872	0,9866	0,9885	0,9772	0,9866	0,9475
	1	0,9927	0,9906	0,9908	0,9919	0,9839	0,9908	0,9695
Orthogonal	0	0,9878	0,9865	0,9847	0,9872	0,9747	0,9847	0,9402
	1	0,9927	0,9904	0,9908	0,9919	0,9839	0,9908	0,9717
Xavier uniform	0	0,9860	0,9850	0,9825	0,9855	0,9714	0,9825	0,9351
	1	0,9925	0,9903	0,9906	0,9916	0,9834	0,9907	0,9680
Random	0	0,9614	0,9632	0,9516	0,9623	0,9315	0,9520	0,8466
	1	0,9923	0,9899	0,9903	0,9915	0,9832	0,9903	0,9667
Zeros	0	0,2853	0,1667	0,0000	—	0,0476	0,0000	—
	1	0,2853	0,1667	0,0000	—	0,0476	0,0000	—

En iyi değerler her BN koşulu için ayrı ayrı koyu yazılmıştır; zeros dejenere referans olduğu için değerlendirmeye alınmamış, F1 ve SSIM değerleri — ile gösterilmiştir (bkz. Bölüm 3.4). Standart sapmalar Bölüm 4.4'te verilmiştir.

BN varlığı yöntemler arasındaki başarı farkını belirgin biçimde daraltmaktadır. BN bulunmayan koşulda yayılım varyans ölçekli yöntemler arasında 0,6, random başlatma dâhil edildiğinde 3,1 yüzde puanı iken BN bulunan koşulda 0,1 yüzde puanına inmektedir.

4.2. Indian Pines Sonuçları

Indian Pines'ta başlatma yönteminin etkisi çok daha belirgindir. BN devre dışı bırakıldığında en yüksek doğruluğu 0,8184 ile He normal ardından 0,8153 ile He uniform elde etmiştir. Bu iki yöntemi 0,7890 ile LeCun normal ve 0,7823 ile Xavier normal izlemektedir. Xavier uniform 0,7464 düzeyine gerilemekte, random başlatma ise 0,5967 ile çok belirgin biçimde geride kalmaktadır. Karşılaştırılan yöntemler arasındaki yayılım, varyans ölçekli yöntemler arasında 7,2 yüzde puanı iken random başlatma dâhil edildiğinde 22,2 yüzde puanına ulaşmaktadır. Bu değerler Salinas-A'da gözlenen 0,6 ve 3,1 yüzde puanının belirgin biçimde üzerindedir. Zeros başlatma yine en büyük sınıfın oranında kalmıştır. Kappa ve MCC değerleri sıfır çıkmıştır. BN etkinleştirildiğinde tablo kökten değişmekte ve zeros dışındaki yedi yöntem 0,8180 – 0,8371 aralığına toplanmaktadır. Aralarındaki fark 1,9 yüzde puanına inmektedir. Ayrıntılı sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Indian Pines test sonuçları

Başlatma	BN	OA	AA	Kappa	F1	mIoU	MCC	SSIM
He normal	0	**0,8184**	**0,7274**	**0,7921**	**0,7662**	**0,6361**	**0,7930**	0,7823
	1	0,8282	0,7368	0,8039	0,7726	0,6481	0,8043	0,8106
He uniform	0	0,8153	0,7151	0,7885	0,7641	0,6244	0,7896	**0,7850**
	1	0,8277	0,7256	0,8033	0,7773	0,6369	0,8037	0,8063
LeCun normal	0	0,7890	0,6805	0,7581	0,7330	0,5860	0,7593	0,7650
	1	0,8288	0,7362	0,8046	0,7878	0,6492	0,8051	0,8130
Xavier normal	0	0,7823	0,6625	0,7504	0,7252	0,5690	0,7517	0,7653
	1	0,8331	0,7447	0,8093	0,7923	0,6552	0,8099	0,8108
Orthogonal	0	0,7663	0,6418	0,7321	0,7027	0,5469	0,7335	0,7532
	1	0,8299	0,7293	0,8059	0,7689	0,6404	0,8063	0,8179
Xavier uniform	0	0,7464	0,5975	0,7080	0,6655	0,5018	0,7105	0,7486
	1	**0,8371**	**0,7525**	**0,8138**	**0,7978**	**0,6665**	**0,8143**	**0,8212**
Random	0	0,5967	0,4449	0,5255	0,5284	0,3471	0,5389	0,7068
	1	0,8180	0,7208	0,7921	0,7618	0,6336	0,7927	0,7989
Zeros	0	0,2356	0,0625	0,0000	—	0,0147	0,0000	—
	1	0,2356	0,0625	0,0000	—	0,0147	0,0000	—

En iyi değerler her BN koşulu için ayrı ayrı koyu yazılmıştır; zeros dejenere referans olduğu için değerlendirmeye alınmamış, F1 ve SSIM değerleri — ile gösterilmiştir (bkz. Bölüm 3.4). Standart sapmalar Bölüm 4.4'te verilmiştir.

BN bulunmayan koşuldaki 22,2 yüzde puanlık yayılım, BN ile 1,9 yüzde puanına inmektedir. Indian Pines'ta dikkat çeken bir başka bulgu OA ile AA arasındaki farktır. En iyi modelde OA 0,8371 iken AA 0,7525 düzeyinde kalmaktadır. Bu fark, veri kümesindeki şiddetli sınıf dengesizliğinden kaynaklanmaktadır ve bu nedenle Indian Pines için genel doğruluğun tek başına raporlanması yanıltıcı olacaktır. Sınıflandırma haritalarının referans veriye yapısal benzerliği SSIM ölçütüyle incelendiğinde BN katmanının harita bütünlüğü üzerinde de toparlayıcı bir etkisi olduğu görülmektedir. Salinas-A veri kümesinde BN devre dışıyken varyans ölçekli yöntemlerin SSIM değerleri 0,9351 ile 0,9589 arasında değişirken BN eklendiğinde tüm yöntemler 0,9680–0,9719 bandına toplanmıştır. Benzer bir eğilim Indian Pines üzerinde de gözlenmiştir. BN olmadan 0,7068 seviyesine kadar gerileyen random başlatmanın SSIM skoru, BN desteğiyle 0,7989 düzeyine yükselmiştir. Bu artış BN katmanının harita üzerindeki beneklenmeleri ve parsel içi sınıf sıçramalarını azaltarak geometrik sürekliliği iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte SSIM nominal sınıf etiketlerini sayısal parlaklık değeri gibi ele aldığından ve arka plan piksellerinin örtüşmesinden etkilendiğinden tek başına bir kalite göstergesi olarak değil OA ve Kappa değerlerini mekânsal açıdan destekleyen tamamlayıcı bir ölçüt olarak değerlendirilmelidir.

4.3. BN'nin Kazancı ve Yöntemin Başlangıç Başarısı

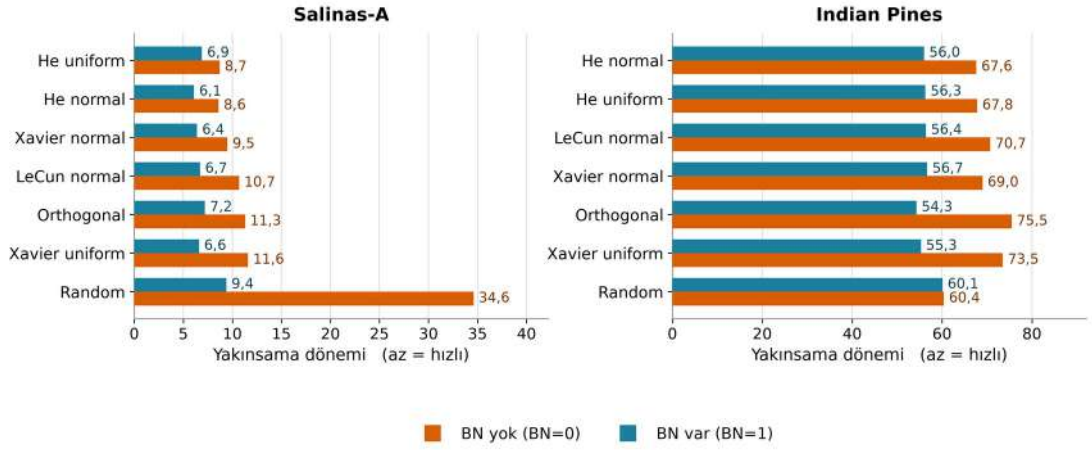
BN etkinken varyans ölçekli yöntemlerin tamamı Salinas-A'da 0,9922–0,9930, Indian Pines'ta 0,8180–0,8371 gibi dar bir banda toplanır. Bu bant bir üst sınır gibi davrandığından kazanç BN'nin yönteme kattığı doğruluğu değil yöntemin bu sınırın ne kadar altında başladığını ölçer. BN'siz en düşük başlangıca sahip random başlatma her iki kümede de en yüksek kazancı verir (3,1 ve 22,1 yüzde puanı). En yüksek başlangıca sahip He ailesi ise neredeyse hiç kazanmaz (0,03–0,06 ve 1,0–1,2 yüzde puanı). Çünkü kapatacak açığı yoktur. Zeros başlatmada simetri kırılamadığı için kazanç sıfırdır. Dolayısıyla Çizelge 6'daki kazanç sütunu başlatma seçiminin BN'siz bir mimaride kaça mal olduğunu göstermektedir. BN bu bedeli gizlemekte ancak seçimi gereksiz kılmamaktadır.

Çizelge 6. Batch normalization'ın başlatma yöntemine göre sağladığı kazanç

Başlatma	Salinas-A			Indian Pines		
	OA (BN=0)	OA (BN=1)	Kazanç (yüzde puanı)	OA (BN=0)	OA (BN=1)	Kazanç (yüzde puanı)
He normal	0,9916	0,9922	+0,06	0,8184	0,8282	+1,0
He uniform	0,9922	0,9925	+0,03	0,8153	0,8277	+1,2
LeCun normal	0,9893	0,9927	+0,34	0,7890	0,8288	+4,0
Xavier normal	0,9894	0,9930	+0,36	0,7823	0,8331	+5,1
Orthogonal	0,9878	0,9927	+0,49	0,7663	0,8299	+6,4
Xavier uniform	0,9860	0,9925	+0,65	0,7464	0,8371	+9,1
Random	0,9614	0,9923	+3,09	0,5967	0,8180	+22,1

4.4. Yakınsama Hızı ve Kararlılık

BN, her iki veri kümesinde de yakınsama hızını belirgin biçimde artırmıştır. Zeros dışındaki yöntemlerde yakınsama dönemi Salinas-A'da 8,6 – 34,6 aralığından 6,1 – 9,4 aralığına, Indian Pines'ta ise 60,4 – 75,5 aralığından 54,3 – 60,1 aralığına inmiştir (Şekil 3). Bu bulgu, BN'nin optimizasyon yüzeyini düzleştirerek daha büyük ve daha kararlı adımlara olanak tanıdığı yönündeki açıklamayla uyumludur (Santurkar vd., 2018). Indian Pines'ta random başlatmanın BN olmadan görece erken yakınsaması (60,4 epoch), hızlı ama düşük nitelikli bir çözüme takıldığını göstermektedir. Nitekim bu yöntemin ulaştığı doğruluk aynı koşuldaki diğer yöntemlerin belirgin biçimde altındadır.



Şekil 3. Yakınsama için gereken ortalama dönem sayısı: Salinas-A (solda) ve Indian Pines (sağda)

Kararlılık açısından BN'nin etkisi, yöntemler arasındaki farkı daraltma biçiminde ortaya çıkmaktadır. Salinas-A'da tohumlar arası OA standart sapması BN bulunmayan koşulda 0,0011 ile 0,0169 arasında değişirken BN ile 0,0011 – 0,0014 bandına toplanmaktadır. Indian Pines'ta ise BN bulunmayan koşuldaki 0,0065 – 0,0196 aralığı BN ile 0,0062 – 0,0120 aralığına inmektedir. Her iki kümede de en büyük daralma BN olmadan en kararsız davranan random başlatmada gözlenmiştir.

4.5. İstatistiksel Anlamlılık

Friedman testi dört koşulun tamamında yöntemler arasında anlamlı fark bulmuştur (Salinas-A: BN=0 için $p = 2{,}28 \times 10^{-10}$, BN=1 için $p = 1{,}29 \times 10^{-4}$; Indian Pines: BN=0 için $p = 1{,}84 \times 10^{-11}$, BN=1 için $p = 3{,}45 \times 10^{-6}$). Holm-Bonferroni düzeltmeli Wilcoxon testiyle yapılan ikili karşılaştırmalar ise iki BN koşulu arasında nitel bir ayrım ortaya koymaktadır.

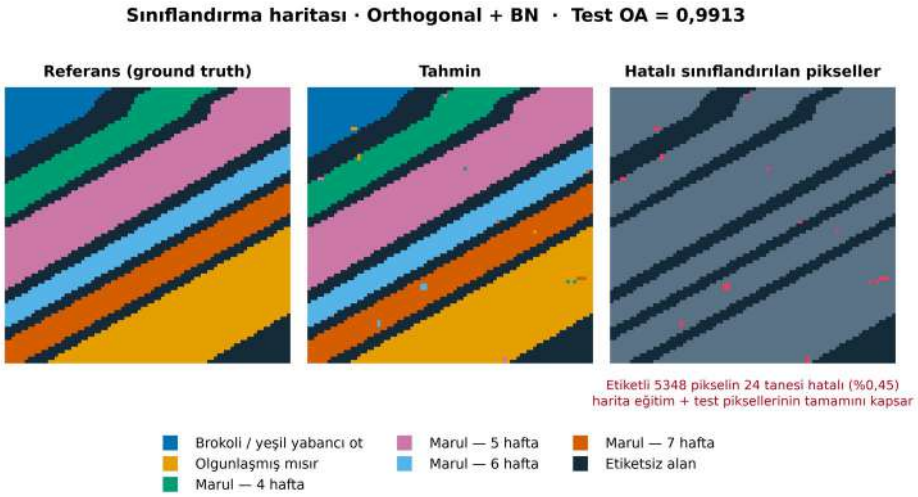
BN bulunmayan koşulda referans yöntem doğrulama doğruluğuna göre seçildiği için her iki veri kümesinde de He normal olmuştur. Salinas-A'da test doğruluğunda He uniform önde olmasına karşın ikili karşılaştırmalar bu referans üzerinden yürütülmüştür. Salinas-A'da He normal; Xavier normal, Xavier uniform, random ve zeros başlatmalardan anlamlı biçimde üstündür ($p = 0{,}012$–$0{,}031$). Indian Pines'ta üstünlük daha da belirgindir. He uniform dışındaki altı yöntemin tamamından anlamlı biçimde üstündür ($p = 0{,}004$–$0{,}014$), He uniform ile arasındaki fark ise anlamlı değildir ($p = 0{,}625$). Bu sonuç BN içermeyen bir mimaride başlatma seçiminin sonucu rastlantısal olmayan biçimde değiştirdiğini doğrulamaktadır.

BN bulunan koşulda ise ayrım yalnızca varyans ölçekli yöntemler arasında kaybolmaktadır. Salinas-A'da zeros dışındaki tüm karşılaştırmalarda düzeltilmiş p değeri 1,00 çıkmış, zeros referanstan ayrılmıştır ($p = 0{,}012$). Indian Pines'ta varyans ölçekli beş yöntemin hiçbiri referanstan anlamlı biçimde ayrılmamış ($p = 0{,}074$–$0{,}539$), buna karşılık

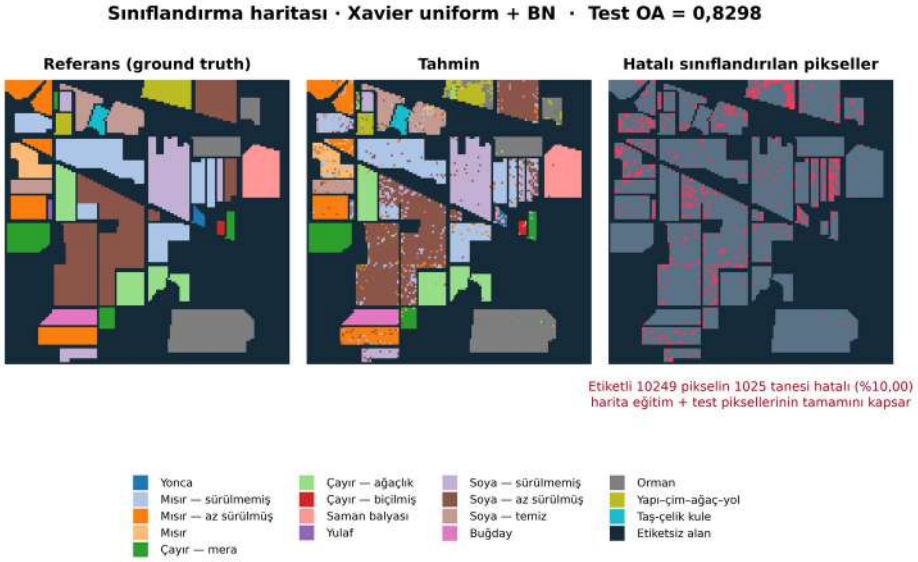
zeros (p = 0,012) ve random (p = 0,014) ayrışmayı sürdürmüştür. Dolayısıyla BN, uygun biçimde ölçeklenmiş yöntemler arasındaki farkı istatistiksel olarak silmekte ancak varyans ölçeklemesi yapılmamış bir başlatmayı telafi edememektedir. İstatistiksel bulgu da başlatma seçiminin gerekliliğini göstermektedir.

4.6. Sınıflandırma Haritaları ve Sınıf Bazlı Başarı

Doğrulama doğruluğuna göre seçilen en iyi modellerin ürettiği sınıflandırma haritaları Şekil 4 ve Şekil 5'te referans haritalarla birlikte sunulmuştur. Salinas-A'da tahmin haritası veri kümesine özgü çapraz şerit desenini büyük ölçüde doğru yeniden üretmektedir. Hatalar dağınık tekil pikseller biçiminde kalmaktadır. Indian Pines'ta ise hatalar belirli parsellerde yoğunlaşmakta ve özellikle spektral olarak benzer ürün türlerinin bulunduğu bölgelerde artmaktadır.



Şekil 4. Salinas-A için referans harita, tahmin haritası ve hatalı sınıflandırılan pikseller



Şekil 5. Indian Pines için referans harita, tahmin haritası ve hatalı sınıflandırılan pikseller

Sınıf bazlı karışıklık matrisleri her iki veri kümesi için ayrıca incelenmiştir. Salinas-A'da köşegen değerleri %98,2 ile %99,8 arasında değişmekte olup karışmalar yalnızca spektral açıdan komşu sınıflar arasında ve çok düşük oranlarda görülmektedir. Marul 4 hafta ile Marul 5 hafta arasında %1,1, Marul 6 hafta ile Marul 7 hafta arasında ise karşılıklı olarak %1,0 ve %0,8 düzeyindedir. Bu dağılım veri kümesindeki sınıfların birbirinden iyi ayrıştığını ve Salinas-A'nın görece kolay bir problem oluşturduğunu doğrulamaktadır.

Indian Pines'ta ise durum farklıdır ve düşük AA değerinin kaynağı doğrudan görünür hale gelmektedir. Hatalar rastgele dağılmamakta ve neredeyse tamamı az sayıda örneğe sahip sınıflarda toplanmaktadır. Test kümesinde yalnızca 4 piksel bulunan Yulaf sınıfı hiç doğru sınıflandırılamamış; 7 piksellik Yonca sınıfının %28,6'sı doğru bilinmiş, %71,4'ü Saman balyası olarak etiketlenmiştir. Buna karşılık kalabalık sınıflarda başarı yüksektir. Orman %98,0, Çayır–ağaçlık %98,7, Saman balyası %97,8 ve Taş-çelik kule %100 doğrulukla sınıflandırılmıştır. Bu tablo

düşük AA değerinin modelin genel yetersizliğinden değil birkaç sınıftaki örnek kıtlığından kaynaklandığını göstermektedir.

5. TARTIŞMA

Ağırlık başlatma, 1D-CNN tabanlı hiperspektral sınıflandırmada doğruluğu doğrudan etkileyen bir tasarım kararıdır. Etkisinin büyüklüğü ise sabit değildir. Mimaride batch normalization bulunup bulunmamasına ve veri kümesinin zorluğuna göre değişir. BN içermeyen mimarilerde her ikisi de yaygın kullanılan iki standart yöntem arasındaki tercih bile sonucu değiştirir. He normal ile Xavier uniform arasındaki test OA farkı Indian Pines'ta 7,2 yüzde puanıdır. Bu fark yalnızca başlatma seçiminden kaynaklanır. Mimaride, optimizasyon algoritmasında ve hiperparametrelerde hiçbir değişiklik yapılmamıştır. Friedman testi de aynı koşulda yöntemler arasındaki farkı anlamlı bulmuştur ($p < 0,001$). Farkın büyüklüğü veri kümesi zorlaştıkça artar. Görece kolay olan Salinas-A'da 0,6 yüzde puanında kalırken Indian Pines'ta on kattan fazlasına çıkar. Varyans ölçeklemesi yapmayan başlatmalarda aralık çok daha geniştir. Random başlatmada 22,2 yüzde puanına ulaşır. Zeros başlatmada ise simetri kırılamadığı için öğrenme hiç gerçekleşmez. Varyans ölçekli yöntemler arasında He ailesi her iki veri kümesinde de en yüksek doğruluğu vermiştir. Bu durum, ReLU etkinleştirmesinin varyansı yarıya düşürmesini telafi eden 2/fan-in ölçeklemesinin kuramsal gerekçesiyle uyumludur (He vd., 2015). BN eklendiğinde ise varyans ölçekli yöntemler arasındaki farklar hem pratik hem istatistiksel olarak ortadan kalkmaktadır. Bu gözlem, BN'nin aktivasyon dağılımını yeniden ölçekleyerek başlangıç varyansına ilişkin bilgiyi büyük ölçüde geçersiz kılmasıyla açıklanabilir ve optimizasyon yüzeyinin düzleştiği yönündeki kuramsal çerçeveyle tutarlıdır (Santurkar vd., 2018).Çizelge 6'daki kazanç örüntüsü bu yorumu nicel olarak desteklemektedir. BN'nin katkısı yöntemin BN'siz doğruluğu düştükçe artmaktadır.

BN'nin telafi gücünün bir sınırı bulunmaktadır. Zeros başlatmada tüm nöronlar aynı değeri aldığından simetri kırılamamakta ve gradyanlar ayrışamamaktadır. BN bu yapısal sorunu gideremediği için doğruluk her iki veri kümesinde ve her iki koşulda da en büyük sınıfın oranında kalmıştır. Dolayısıyla BN, başlatma seçimine karşı bir tampon işlevi görmekte ancak başlatmanın yerine geçmemektedir. Pratik açıdan bu bulgular iki öneriye dönüşmektedir. BN içermeyen mimarilerde He normal veya He uniform gibi varyans ölçekli yöntemler tercih edilmeli ve bu tercihin önemi veri kümesi zorlaştıkça artmaktadır. BN içeren mimarilerde ise varyans ölçekli yöntemler arasındaki fark küçülmektedir. Burada belirleyici olan hangi varyans ölçekli yöntemin seçildiği değil varyans ölçeklemesi yapan bir yöntemin kullanılmış olmasıdır. Ancak varyans ölçeklemesi içermeyen bir başlatma Indian Pines'ta random örneğinde görüldüğü gibi BN ile bile geride kalabilmektedir.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Deneyler AVIRIS kaynaklı iki veri kümesiyle sınırlıdır ve yalnızca spektral bilgi kullanılmıştır. Farklı algılayıcılardan gelen verilerle ve uzamsal spektral mimarilerle doğrulama yapılması yararlı olacaktır. Öğrenme oranı tüm koşullarda 0,001 değerinde sabit tutulduğundan elde edilen sıralamalar bu değere koşulludur. Başlatma yöntemi ile öğrenme oranı arasındaki etkileşim ayrı bir çalışma konusudur. Son olarak SSIM, sınıf indekslerini yoğunluk değeri gibi ele aldığı ve maskelenen arka plan her iki haritada eşleştiği için hiç öğrenemeyen modellere dahi yüksek değer verebilmektedir. Bu nedenle SSIM çalışmada tek başına bir kalite göstergesi olarak kullanılmamış, OA, AA, Kappa ve MCC ile birlikte yorumlanmış ve yanıltıcı olabilecek zeros değerleri sonuç çizelgelerinde raporlanmamıştır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada sekiz ağırlık başlatma yönteminin 1D-CNN tabanlı hiperspektral görüntü sınıflandırması üzerindeki etkisi batch normalization koşuluna göre ayrı ayrı ve istatistiksel testlerle desteklenerek iki farklı veri kümesinde değerlendirilmiştir. Salinas-A ve Indian Pines üzerinde 10 tohumla tekrarlanan toplam 320 eğitim sonucunda BN bulunmayan mimarilerde başlatma seçiminin doğruluğu varyans ölçekli yöntemler arasında Salinas-A'da 0,6, Indian Pines'ta 7,2 yüzde puanı aralığında değiştirdiği, random başlatma dâhil edildiğinde bu aralığın 3,1 ve 22,2 yüzde puanına çıktığı ve her iki kümede de He ailesinin en iyi sonucu sağladığı belirlenmiştir. BN bulunan mimarilerde ise istatistiksel ayrım yalnızca varyans ölçekli yöntemler arasında kaybolmuş zeros her iki kümede, random ise Indian Pines'ta referanstan ayrışmayı sürdürmüştür. BN ayrıca her iki veri kümesinde yakınsamayı hızlandırmış ve yöntemler arasındaki kararlılık farklarını daraltmıştır. Buna karşılık BN simetriyi kıramayan zeros başlatmayı hiçbir koşulda telafi edememiştir.

Sonuç olarak ağırlık başlatma, 1D-CNN tabanlı hiperspektral sınıflandırmada başarıyı doğrudan belirleyen bir tasarım kararıdır. BN bulunmayan mimarilerde bu kararın etkisi doğrudan ölçülebilmekte, varyans ölçekli yöntemler arasındaki tercih bile Indian Pines'ta 7,2 yüzde puanlık bir fark yaratmaktadır. BN eklenmesi varyans ölçekli yöntemler arasındaki farkı istatistiksel olarak daraltmakta ancak başlatma seçimini gereksiz kılmamaktadır. Random başlatma BN ile bile Indian Pines'ta referanstan ayrışmış, zeros başlatma ise hiçbir koşulda öğrenememiştir. Bu nedenle He normal veya He uniform gibi varyans ölçekli bir başlatma, ek bir hesaplama maliyeti getirmeden her iki koşulda da güvenli tercih olmayı sürdürmektedir. Bu sonucun zorluk düzeyi farklı iki veri kümesinde tutarlı biçimde elde edilmesi bulgunun tek bir veri kümesine özgü olmadığını göstermektedir. Gelecek çalışmalarda değerlendirmenin farklı algılayıcılar, uzamsal-spektral mimariler ve alternatif normalizasyon katmanları için genişletilmesi planlanmaktadır.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2025-14681 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Baumgardner, M. F., Biehl, L. L., Landgrebe, D. A., 2015. 220 Band AVIRIS Hyperspectral Image Data Set: June 12, 1992 Indian Pine Test Site 3. Purdue University Research Repository. doi:10.4231/R7RX991C

Chen, Y., Jiang, H., Li, C., Jia, X., Ghamisi, P., 2016. Deep feature extraction and classification of hyperspectral images based on convolutional neural networks. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(10), 6232-6251.

Demšar, J., 2006. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. Journal of Machine Learning Research, 7, 1-30.

Friedman, M., 1937. The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. Journal of the American Statistical Association, 32(200), 675-701.

Glorot, X., Bengio, Y., 2010. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. Proceedings of the 13th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 249-256.

Graña, M., Veganzons, M. A., Ayerdi, B., t.y. Hyperspectral Remote Sensing Scenes. Computational Intelligence Group, Universidad del País Vasco (UPV/EHU). https://www.ehu.eus/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes (Erişim tarihi: 13 Eylül 2026).

Green, R. O., Eastwood, M. L., Sarture, C. M., Chrien, T. G., Aronsson, M., Chippendale, B. J., Faust, J. A., Pavri, B. E., Chovit, C. J., Solis, M., Olah, M. R., Williams, O., 1998. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, 65(3), 227-248.

He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2015. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on ImageNet classification. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 1026-1034.

Holm, S., 1979. A simple sequentially rejective multiple test procedure. Scandinavian Journal of Statistics, 6(2), 65-70.

Hu, W., Huang, Y., Wei, L., Zhang, F., Li, H., 2015. Deep convolutional neural networks for hyperspectral image classification. Journal of Sensors, 2015, 258619.

Ioffe, S., Szegedy, C., 2015. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML), 448-456.

Kingma, D. P., Ba, J., 2015. Adam: A method for stochastic optimization. International Conference on Learning Representations (ICLR).

LeCun, Y., Bottou, L., Orr, G. B., Müller, K.-R., 1998. Efficient BackProp. In: Neural Networks: Tricks of the Trade, Springer, Berlin, 9-48.

Paoletti, M. E., Haut, J. M., Plaza, J., Plaza, A., 2019. Deep learning classifiers for hyperspectral imaging: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 158, 279-317.

Santurkar, S., Tsipras, D., Ilyas, A., Madry, A., 2018. How does batch normalization help optimization? Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 31, 2483-2493.

Saxe, A. M., McClelland, J. L., Ganguli, S., 2014. Exact solutions to the nonlinear dynamics of learning in deep linear neural networks. International Conference on Learning Representations (ICLR).

Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R., 2014. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. Journal of Machine Learning Research, 15(1), 1929-1958.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P., 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600-612.

Wilcoxon, F., 1945. Individual comparisons by ranking methods. Biometrics Bulletin, 1(6), 80-83.

AFET RİSKLERİNİN AZALTILMASINDA ÖLÇEKLER ARASI EŞGÜDÜMÜN SAĞLANMASI: CBS TABANLI BÖLGESEL AFET YÖNETİŞİMİ YAKLAŞIMI OLARAK "BARAP" MODELİ

Tahsin YOMRALIOĞLU[1], Fatih TERZİ[2], Orhan TATAR[3]

[1]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, tahsin@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, 34437, Taksim/Beyoğlu, İstanbul, terzifati@itu.edu.tr
[3]Prof. Dr., AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, 06800, Çankaya, Ankara, orhantatar@afad.gov.tr

ÖZET

Modern afet yönetimi stratejileri kriz odaklı reaktif yaklaşımlardan risk odaklı proaktif süreçlere doğru evrilirken, güçlü bir afet risk yönetişiminin mekânsal veri altyapıları ile desteklenmesi zorunluluğu ön plana çıkmaktadır. Birleşmiş Milletler Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi (2015-2030) ilkeleri ve Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP) hedefleri doğrultusunda yerel ölçekte İl Afet Risk Azaltma Planları (İRAP) yürürlüğe konulmuş olsa da mevcut yapı makro hedefler ile mikro eylemler arasında mekânsal ve idari bir kopukluk barındırmaktadır. Afetlerin idari sınır tanımayan doğası ve özellikle Marmara Havzası gibi yoğun nüfuslu, karmaşık ekonomik, endüstriyel ve lojistik ağlara sahip kırılgan mega-kent bölgelerinde tetiklenen zincirleme afet dinamikleri, risklerin tek bir ilin mülki sınırları içinde yönetilmesini yetersiz kılmaktadır. Bu çalışmada, mevcut ölçekler arası ve kurumsal boşluğu kapatmak amacıyla Bölgesel Afet Risk Azaltma Planı (BARAP) kavramsal modeli ile bu modelin teknik ve yönetsel omurgası olarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bütünleşik bir bölgesel afet yönetişimi yaklaşımı önerilmektedir. Modelin pilot uygulaması olarak yürütülen Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) projesi kapsamında bölgedeki çoklu tehlikeler, kritik altyapı kırılganlıkları, sektörel bağımlılıklar ve NaTech senaryoları; PostgreSQL/PostGIS tabanlı merkezî mekânsal veri tabanı, 1 km x 1 km grid tabanlı analiz birimi, Çok Ölçütlü Karar Analizi (MCDA) ve Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI) yaklaşımlarıyla modellenmiştir. Sonuç olarak BARAP modeli, afet yönetişiminde geleneksel mülki sınır esaslı yaklaşımdan coğrafi havza esaslı bütüncül yönetime geçişi sağlayarak, afet risk azaltma planlamasını statik raporlama mantığından çıkarmakta ve ulusal ile uluslararası düzeydeki stratejik yatırım kararlarına rehberlik edecek veri güdümlü, güncellenebilir ve ölçeklenebilir bir dijital dönüşüm altyapısı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: afet yönetimi, BARAP, coğrafi bilgi sistemleri, MARAP, risk azaltma

ABSTRACT

BRIDGING SCALES IN DISASTER RISK REDUCTION: THE "BARAP" MODEL AS A GIS-BASED REGIONAL DISASTER GOVERNANCE APPROACH

As modern disaster management strategies evolve from crisis-oriented reactive approaches toward risk-oriented proactive processes, the need to support robust disaster risk governance with spatial data infrastructures becomes increasingly prominent. Although Provincial Disaster Risk Reduction Plans (İRAP) have been put into effect at the local scale in line with the principles of the United Nations Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030) and the objectives of the Türkiye Disaster Risk Reduction Plan (TARAP), the existing structure still entails a spatial and administrative disconnect between macro-level objectives and micro-level actions. The boundary-transcending nature of disasters, together with the cascading disaster dynamics triggered particularly in vulnerable mega-city basins such as the Marmara Basin, characterised by dense population and complex economic, industrial and logistics networks, makes it insufficient to manage risks solely within the administrative boundaries of a single province. To address this inter-scale and institutional gap, this study proposes the conceptual model of a Regional Disaster Risk Reduction Plan (BARAP) together with an integrated GIS-based regional disaster governance approach as its technical and managerial backbone. Within the scope of the Marmara Region Disaster Risk Reduction Plan (MARAP) project, conducted as the pilot implementation of the model, multiple hazards, critical infrastructure vulnerabilities, sectoral interdependencies and Natech scenarios were modelled using a PostgreSQL/PostGIS-based central spatial database, a 1 km x 1 km grid-based analysis unit, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Geographic Artificial Intelligence (GeoAI) approaches. As a result, the proposed BARAP model enables a shift in disaster governance from traditional administrative-boundary-based management towards integrated geographic basin-based management, transforms disaster risk reduction planning from static reporting into a data-driven and updateable process, and provides a scalable digital transformation infrastructure capable of guiding strategic investment decisions and resilience policies at national and international levels.

Keywords: BARAP, disaster management, geographic information systems, MARAP, risk reduction

1. GİRİŞ

Afet risklerinin artan karmaşıklığı, afet yönetimini olay sonrası müdahaleyle sınırlı teknik-idari bir faaliyet olmaktan çıkarmış; çok aktörlü, çok ölçekli, veri güdümlü ve proaktif bir risk yönetişimi alanına dönüştürmüştür. IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu; kentler, yerleşimler ve kritik altyapılar için iklim kaynaklı tehlikelerin artan risk ürettiğini, bu risklerin kentsel sistemler, altyapı ağları ve sosyo-ekonomik kırılganlıklarla etkileşim içinde mekânsal olarak yoğunlaştığını ortaya koymaktadır (IPCC, 2022). Bu bağlamda afet riski, yalnızca belirli bir tehlikenin belirli bir idari alanda yol açtığı fiziksel hasar olarak değil; altyapı, nüfus, ekonomi, lojistik, enerji, sanayi ve çevresel sistemler arasındaki bağımlılıklar üzerinden yayılan çok boyutlu bir sistem riski olarak ele alınmaktadır. Literatürde bu dönüşüm, reaktif kriz yönetiminden proaktif afet risk azaltma yaklaşımına geçiş olarak açıklanmaktadır. Sendai Afet Risk Azaltma Çerçevesi 2015-2030 ise riskin anlaşılması, afet risk yönetişiminin güçlendirilmesi, risk azaltmaya yatırım yapılması ve hazırlık kapasitesinin geliştirilmesi önceliklerini tanımlayarak bu paradigmanın temel politika belgesini oluşturmaktadır (UNDRR, 2015).

Türkiye, bu küresel politika dönüşümüne uyum sağlamak amacıyla ulusal ölçekte 2022-2030 dönemini kapsayan Türkiye Afet Risk Azaltma Planı'nı (TARAP) yürürlüğe koymuş (AFAD, 2022a); yerel ölçekte ise 81 ilin tehlike ve risk profillerini ortaya koyan İl Afet Risk Azaltma Planları (İRAP) tamamlanmıştır (AFAD, 2022b). Bu iki düzeyli yapı, afet risk azaltma planlamasının ulusal ve il ölçeklerinde kurumsallaşması bakımından önemli bir ilerleme sağlamıştır. Bununla birlikte ulusal plan stratejik hedefler ve politika öncelikleri bakımından kapsayıcı bir çerçeve sunarken, il planları yerel tehlike ve riskleri belirli idari sınırlar içinde ele almakta; ulusal stratejik hedefler ile il ölçeğindeki eylemler arasında coğrafi ve işlevsel açıdan bütünleşik bir "ara ölçek" planlama kademesinin eksikliği belirgin biçimde hissedilmektedir.

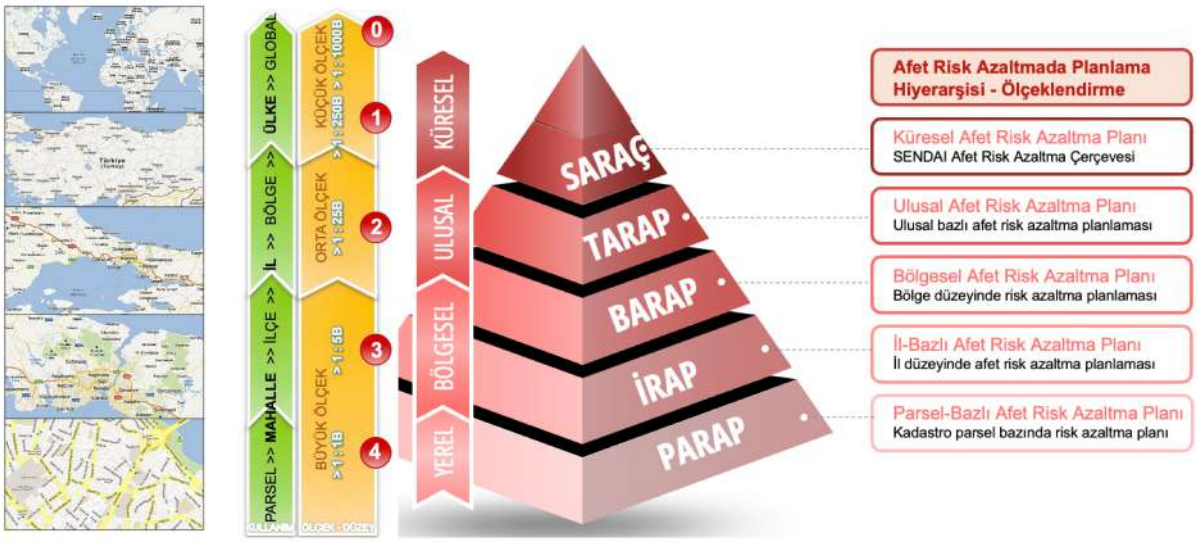
Bu eksikliğin temelinde, afet risklerinin il, ilçe veya belediye sınırlarıyla örtüşmeyen coğrafi ve sistemsel niteliği bulunmaktadır. Doğa ve teknoloji kaynaklı tehlikeler; havza sınırları, fay zonları, ulaşım koridorları, enerji iletim hatları, lojistik ağlar, sanayi kümeleri, liman bölgeleri ve su toplama alanları gibi fonksiyonel mekânsal sistemler üzerinden etkili olmaktadır. Kritik altyapı literatürü de bu gerekliliği desteklemektedir: Rinaldi vd. (2001) modern altyapı sistemlerinin fiziksel, siber, coğrafi ve mantıksal bağımlılıklar üzerinden birbirine bağlandığını ve bir sistemdeki arızanın diğerlerinde zincirleme kesintilere yol açabileceğini ortaya koymuş; Pescaroli ve Alexander (2015) ise zincirleme afetleri, toplumsal ve teknik sistemlerdeki bağımlılıkların yeni kırılganlıklar üretmesiyle gelişen karmaşık süreçler olarak tanımlamıştır. Dolayısıyla afet risk azaltma planlamasının yalnızca tehlike haritaları üretmekle sınırlı kalmaması; risklerin altyapı bağımlılıkları, sektörel etkileşimler, lojistik süreklilik ve hizmet kesintileri üzerinden çok katmanlı olarak modellenmesi gerekmektedir.

Bu durum özellikle Marmara Havzası'nda görünür hâle gelmektedir. MARAP projesi çalışma alanı olarak tanımlanan 11 il (İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Balıkesir, Bilecik, Çanakkale, Tekirdağ, Edirne ve Kırklareli), idari olarak ayrı birimler olmakla birlikte ekonomik, fiziksel ve altyapısal olarak yüksek derecede bütünleşmiş bir mega-kent havzası niteliği taşımaktadır (AFAD ve İTÜ, 2025). Bölge, Türkiye nüfusunun yaklaşık üçte birini barındırmakta; yalnızca İstanbul 2023 yılında Türkiye gayrisafi yurt içi hâsılasından %30,4 pay almaktadır (TÜİK, 2024). Bir il sınırı içinde meydana gelebilecek sismik, hidro-meteorolojik veya teknolojik bir tehlike; komşu illerdeki organize sanayi bölgelerini, limanları, enerji ve boru hatlarını, ulaşım koridorlarını ve su havzalarını etkileyerek ikincil ve üçüncül afet süreçlerini tetikleyebilmektedir. Nitekim havza genelinde yoğunlaşan organize sanayi bölgeleri, petrokimya ve enerji tesisleri, liman ve depolama alanları ile karayolu-demiryolu koridorları, birbirine bağımlı bir kritik altyapı ağı oluşturmakta; bu ağın herhangi bir düğümünde ortaya çıkan işlev kaybı, il sınırlarıyla tanımlanan müdahale kapasitesinin çok ötesinde bölgesel ölçekli kesintilere yol açabilmektedir. Dolayısıyla risk değerlendirmesinin yalnızca idari birim bazında değil, fonksiyonel havza bütünlüğü içinde ele alınması gerekmektedir.

Risklerin bu çok katmanlı ve sınır aşan yapısı; coğrafi bilgi sistemleri (CBS), mekânsal veri altyapıları, uzaktan algılama, yapay zekâ ve çok ölçütlü karar analizi yöntemlerinin afet risk azaltma planlamasındaki rolünü kritik hâle getirmektedir. CBS; tehlike-maruziyet-kırılganlık ilişkilerini ve çoklu veri katmanları arasındaki topolojik ilişkileri analiz etmeye olanak sağlayan temel karar destek ortamıdır. CBS tabanlı Çok Ölçütlü Karar Analizi (MCDA), risk bileşenlerinin ağırlıklandırılması ve mekânsal risk sınıflarının üretilmesi bakımından yaygın biçimde kullanılmaktadır (Malczewski, 2006). Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI) yaklaşımları ise büyük hacimli mekânsal verilerden örüntü çıkarımı yapılmasına, tehlike duyarlılıklarının sınıflandırılmasına ve karar destek süreçlerinin otomatikleştirilmesine katkı sağlamaktadır (Pierdicca ve Paolanti, 2022). Bu yöntemlerin etkili kullanımı, güvenilir, güncel ve birlikte çalışabilir mekânsal veri altyapılarının (SDI) kurulmasına bağlıdır (Rajabifard vd., 2002); OGC standartları ise kurumlar, platformlar ve yazılım sistemleri arasında mekânsal veri ve servislerin birlikte çalışabilirliğini sağlamak bakımından kritik öneme sahiptir (OGC, 2024).

Bu çerçevede çalışmanın amacı; afet risklerinin azaltılmasında ulusal ve yerel ölçekler arasında ortaya çıkan yönetişim ve planlama boşluğunu CBS tabanlı bölgesel bir afet yönetişimi modeliyle ele almak, Bölgesel Afet Risk Azaltma Planı (BARAP) kavramsal modelini tanımlamak ve Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) pilot uygulaması üzerinden bu modelin teknik, yönetsel ve metodolojik uygulanabilirliğini tartışmaktır (AFAD ve İTÜ, 2025). Çalışma üç soruya yanıt aramaktadır: TARAP ile İRAP arasında neden bölgesel bir ara ölçek planlama modeline ihtiyaç duyulmaktadır; CBS, GeoAI, MCDA ve mekânsal veri tabanı yönetim sistemleri bu boşluğu kapatmada nasıl bir karar destek altyapısı sağlayabilir; Marmara Havzası özelinde geliştirilen MARAP yaklaşımı, idari sınırları aşan çoklu tehlike, kritik altyapı kırılganlığı ve zincirleme afet süreçlerinin modellenmesinde nasıl bir bölgesel afet yönetişimi çerçevesi sunmaktadır?

Çalışmanın özgün katkısı, Türkiye'de afet risk azaltma planlama sistemine coğrafi havza ve fonksiyonel bölge temelli yeni bir ara ölçek önerisi getirmesi ve bu öneriyi CBS tabanlı bölgesel veri altyapısı, GeoAI destekli analiz süreçleri ve çok ölçütlü karar destek yaklaşımıyla bütünleştirmesidir (Şekil 1). BARAP; ulusal ve yerel planlar arasındaki ölçek boşluğunu kapatarak planlama hiyerarşisini tamamlamakta, afet risklerinin idari sınırları aşan mekânsal sürekliliğini modelleyerek çoklu tehlike, çoklu sektör ve çoklu altyapı bağımlılıklarını aynı analiz ortamında değerlendirmekte ve yatırım önceliklendirme, altyapı güçlendirme, lojistik süreklilik, tahliye kapasitesi ile acil durum kaynak tahsisi gibi stratejik kararların mekânsal veriyle desteklenmesini sağlamaktadır. Böylece afet risk azaltma süreci, statik plan belgelerinden dinamik, güncellenebilir ve veri güdümlü bir karar destek sistemine dönüşmektedir. Bu dönüşüm, kurumlar arası veri paylaşımını kolaylaştırmakta, izleme ve değerlendirme süreçlerini güçlendirmekte ve ölçekler arası eşgüdümün sürdürülebilir biçimde kurumsallaşmasına zemin hazırlamaktadır.



Şekil 1. TARAP-BARAP-İRAP ölçekler arası öngörülen afet risk azaltma planlama hiyerarşisi.

2. BARAP KAVRAMSAL MODELİ

2.1 Modelin Tanımı ve Planlama Hiyerarşisindeki Konumu

Bölgesel Afet Risk Azaltma Planı (BARAP) modeli; Türkiye'nin afet risk azaltma planlama hiyerarşisinde ulusal stratejik hedefler ile yerel uygulama eylemleri arasında ortaya çıkan ara ölçek boşluğunu kapatmaya yönelik kavramsal ve teknik bir planlama çerçevesidir. Model, TARAP'ın ulusal ölçekte tanımladığı stratejik amaç, hedef ve eylemleri, İRAP'ların yerel ölçekte belirlediği risk azaltma öncelikleriyle coğrafi havza ve fonksiyonel bölge ölçeğinde ilişkilendirmeyi amaçlamaktadır. Bu yönüyle BARAP, İRAP'ların yerine geçen yeni bir yerel plan değil; İRAP'ları bölgesel ölçekte tamamlayan, iller arası risk ilişkilerini görünür kılan ve TARAP ile İRAP arasında dikey ve yatay eşgüdüm sağlayan bir ara ölçek yönetişim aracıdır (AFAD, 2022a; Yomralıoğlu ve Yılmaz, 2025).

Modelin çıkış noktası, afet riskinin idari sınırlarla sınırlı olmayan mekânsal ve sistemik karakteridir. Birleşmiş Milletler terminolojisine göre afet riski; tehlike, maruziyet, kırılganlık ve kapasite bileşenlerinin etkileşimi sonucunda ortaya çıkabilecek potansiyel can, mal, ekonomik ve çevresel kayıpları ifade etmektedir (UNDRR, 2017). BARAP bu tanımdan hareketle planlama nesnesini "idari alan"dan "bölgesel risk sistemi"ne kaydırmakta; doğal ve teknolojik tehlike kaynaklarını, nüfus ve yapı maruziyetini, kritik altyapı ağlarını, ekonomik üretim ve lojistik sistemlerini, çevresel hassasiyetleri ve kurumsal müdahale kapasitesini tek bir analiz çerçevesinde ele almaktadır. Model üç kuramsal dayanak üzerinde yükselmektedir: Sendai Çerçevesi'nin çok ölçekli afet risk yönetişimi öncelikleri (UNDRR, 2015), mekânsal veri altyapılarına dayalı karar destek yaklaşımı (Rajabifard vd., 2002; UN-GGIM, 2017) ve kritik altyapı bağımlılıklarını esas alan sistemik/zincirleme afet riski kavramsallaştırması (Rinaldi vd., 2001; Pescaroli ve Alexander, 2015).

2.2 Modelin Temel İlkeleri

Modelin ilk ilkesi çok ölçekliliktir: ulusal ölçekte stratejik hedefler ve kaynak tahsis politikaları, yerel ölçekte ise somut risk azaltma eylemleri belirlenirken; havza, metropoliten bölge, lojistik koridor, sanayi kuşağı ve kritik altyapı ağı gibi fonksiyonel mekânlarda bölgesel ölçek belirleyici hâle gelmektedir. İkinci ilke, idari sınır yerine coğrafi ve işlevsel sürekliliğin esas alınmasıdır; planlama birimi olarak fay zonları, su toplama havzaları, taşkın ovaları, heyelan duyarlılık alanları, ulaşım ve enerji koridorları, liman art alanları, organize sanayi bölgeleri ve günlük nüfus hareketliliği dikkate alınır. Üçüncü ilke veri güdümlü ve dinamik planlamadır: uydu görüntüleri, uzaktan algılama ürünleri, sismik ve meteorolojik izleme verileri, yapı envanterleri, altyapı ağları ve kurumsal kapasite verileri güncellenebilir bir mekânsal veri tabanı mimarisinde bütünleştirilerek plan, basılı bir belge olmaktan çıkıp sürekli güncellenen bir karar destek mekanizmasına dönüşür.

Dördüncü ilke birlikte çalışabilirliktir. Bölgesel afet risk azaltma planlaması farklı kurumların ürettiği veri ve servislerin aynı sistem içinde kullanılmasını gerektirdiğinden; veri standartları, metaveri yönetimi, web tabanlı coğrafi bilgi servisleri ve WMS, WFS, WCS, GeoPackage gibi paylaşım protokolleri modelin kritik bileşenleridir (OGC, 2024; UN-GGIM, 2017). Beşinci ilke ise senaryo tabanlı ve karar odaklı risk analizidir. Model, tekil tehlike haritalarını bir araya getiren pasif bir veri deposu değil; deprem, taşkın, heyelan, yangın, endüstriyel kaza ve iklim kaynaklı tehlikeleri maruziyet ve kırılganlık bileşenleriyle birlikte değerlendiren aktif bir analiz sistemidir. CBS tabanlı MCDA, risk bileşenlerinin ağırlıklandırılmasına ve mekânsal risk sınıflarının üretilmesine olanak verirken (Malczewski, 2006); GeoAI ve makine öğrenmesi yöntemleri büyük hacimli mekânsal verilerden örüntü çıkarımını, duyarlılık sınıflamalarını ve risk göstergelerinin dinamik güncellenmesini desteklemektedir (Pierdicca ve Paolanti, 2022).

2.3 Modelin Bileşenleri ve Karar Destek İşlevleri

BARAP modeli, kavramsal olarak birbirini tamamlayan yedi ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler; bölgesel tehlike ve risk envanteri, maruziyet-kırılganlık veri modeli, kritik altyapı ve ağ bağımlılığı analizi, çoklu tehlike ve zincirleme afet senaryoları, bölgesel coğrafi veri altyapısı, kurumsal yönetişim ve eşgüdüm modülü ile risk azaltma eylem/yatırım önceliklendirme matrisidir. Modelin bileşenleri ve karar destek işlevleri Çizelge 1'de, bileşenler arasındaki ilişkiler ise Şekil 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. BARAP modelinin temel bileşenleri ve karar destek işlevleri.

BARAP bileşeni	Kapsam	Karar destek işlevi
1. Bölgesel tehlike ve risk envanteri	Deprem, taşkın, heyelan, yangın, endüstriyel kaza, iklim ve NaTech tehlikeleri	Bölgesel risk kümelerinin ve öncelikli müdahale alanlarının belirlenmesi
2. Maruziyet ve kırılganlık veri modeli	Nüfus, yapı stoku, arazi kullanımı, sosyal kırılganlık, ekonomik varlıklar	Risk azaltma yatırımlarının hedef gruplara ve hassas alanlara yönlendirilmesi
3. Kritik altyapı ve ağ bağımlılığı analizi	Enerji, ulaşım, su, haberleşme, lojistik, liman, boru hattı ve sanayi ağları	Hizmet kesintisi, erişilebilirlik ve sistem sürekliliği risklerinin modellenmesi
4. Çoklu tehlike ve zincirleme afet senaryoları	Birincil tehlikelerin ikincil/üçüncül afetleri tetiklemesi	Domino etkilerinin, sektörel bağımlılıkların ve bölgesel yayılımın analizi
5. Bölgesel coğrafi veri altyapısı	Standartlaştırılmış, güncel, birlikte çalışabilir mekânsal veri ve servisler	Kurumlar arası ortak veri kullanımı ve dinamik karar destek altyapısının kurulması
6. Kurumsal yönetişim ve eşgüdüm modülü	Merkezî idare, yerel yönetimler, altyapı işletmecileri, özel sektör ve akademi	Dikey ve yatay eşgüdümün sağlanması, sorumlulukların mekânsal ilişkilendirilmesi
7. Risk azaltma eylem ve yatırım matrisi	Proje, önlem, sorumlu kurum, zamanlama, maliyet ve öncelik ilişkisi	Stratejik yatırımların risk azaltma etkisine göre önceliklendirilmesi

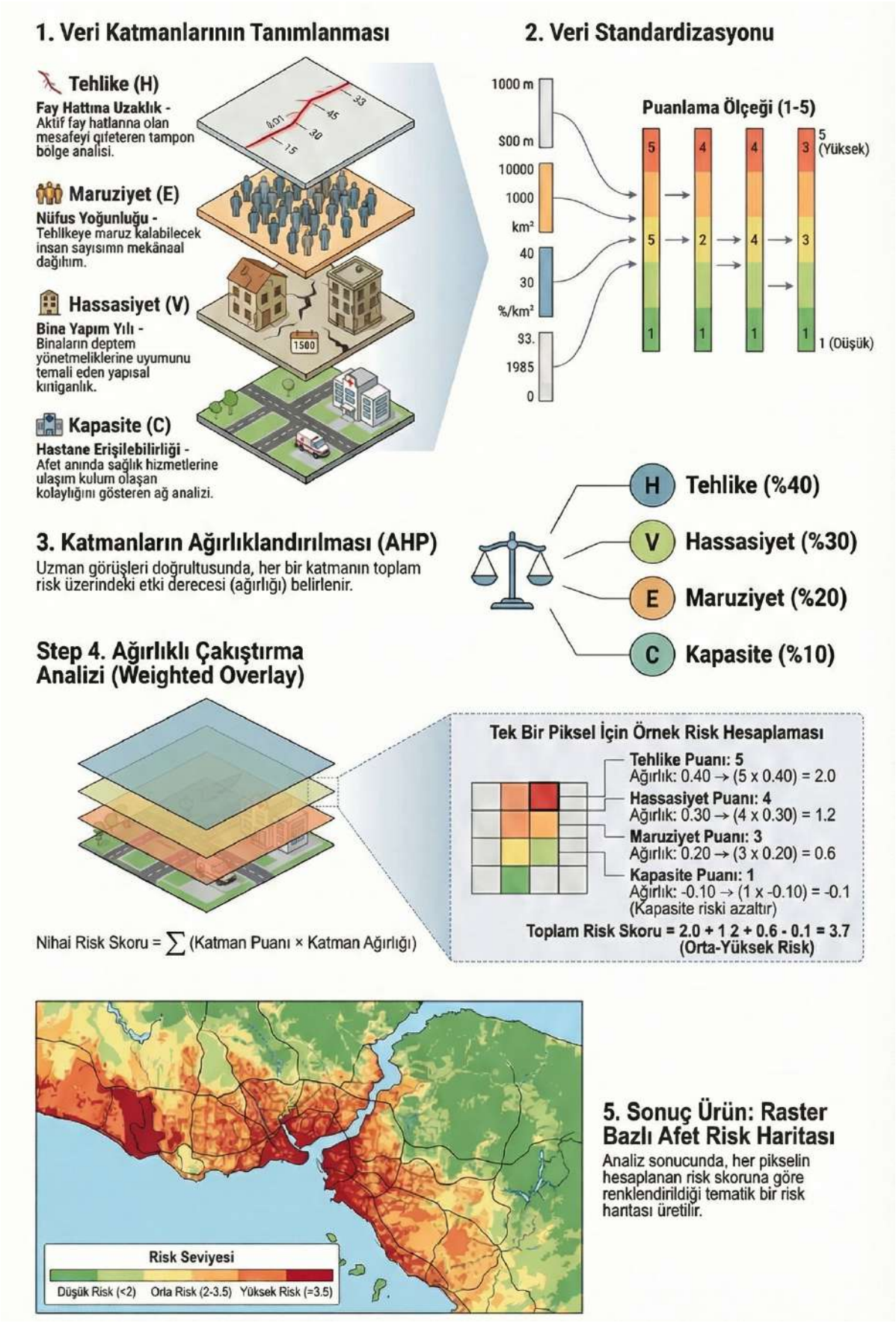
Bu bileşenlerin birlikte çalışması, BARAP'ı geleneksel afet planlarından ayırmaktadır. Geleneksel yaklaşımda tehlike ve risk bilgisi rapor, tablo ve harita çıktıları hâlinde sunulurken; BARAP'ta bu bilgi ilişkisel ve mekânsal veri tabanı yapısında yönetilir. PostgreSQL/PostGIS tabanlı bir mimari, çoklu tehlike senaryolarının, kritik altyapı ağlarının ve mekân-zaman (spatio-temporal) veri akışlarının aynı karar destek ortamında bütünleştirilmesine olanak sağlar (PostGIS Project, 2024).

3. MARAP PİLOT UYGULAMASI: VERİ ALTYAPISI VE YÖNTEM

3.1 Pilot Alan ve Bölgesel Risk Sistemi

BARAP modelinin uygulanabilirliğini test etmek üzere ilk pilot alan olarak Marmara Havzası seçilmiştir. Proje çalışma alanı İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Balıkesir, Bilecik, Çanakkale, Tekirdağ, Edirne ve Kırklareli olmak üzere 11 il olarak tanımlanmıştır (AFAD ve İTÜ, 2025). Bölge; metropoliten etkileşim alanı, yoğun sanayi kümeleri, liman sistemleri, lojistik koridorlar, enerji ve boru hatları, su havzaları ve yüksek nüfus yoğunluğu nedeniyle Türkiye'nin en karmaşık bölgesel risk sistemlerinden birini oluşturmaktadır. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Marmara Denizi içindeki devamı ve Ana Marmara Fayı'nın kilitli segmentleri, yoğun yerleşim ve altyapı sistemleri için kritik sismik risk üretmektedir (Parsons vd., 2000; Erdik vd., 2003; Guvercin ve Barbot, 2025). 1999 Kocaeli depremi sonrasındaki saha gözlemleri ise etkilerin yapı hasarlarıyla sınırlı kalmadığını; karayolu, demiryolu, su, enerji, haberleşme, sağlık, liman ve sanayi altyapılarında hizmet kesintileri oluşturduğunu, petro-kimya, otomotiv ve enerji tesislerinde üretim kesintisi ile işletme sürekliliği kayıplarına yol açtığını göstermiştir (Sezen ve Whittaker, 2004).

MARAP pilotunda Marmara Havzası; çoklu tehlike, çoklu maruziyet, çoklu kırılganlık ve çoklu kurumsal sorumluluğun kesiştiği dinamik bir bölgesel risk sistemi olarak ele alınmaktadır. Sistem beş bileşen altında kavramsallaştırılmıştır: deprem, taşkın, heyelan, yangın, iklim kaynaklı tehlikeler ve teknolojik kazaları içeren bölgesel tehlike ortamı; nüfus, yapı stoku, arazi kullanımı ve ekonomik faaliyet kümelerinden oluşan maruziyet yapısı; yapı kalitesi, zemin koşulları, sosyal kırılganlık ve müdahale kapasitesi göstergelerini kapsayan kırılganlık; enerji, ulaşım, su, haberleşme, liman, boru hattı ve organize sanayi bölgeleri arasındaki kritik altyapı bağımlılıkları; ve kurumsal yönetişim ilişkileri. Bu yaklaşım tehlikeleri tekil olaylar olarak değil, birbirini tetikleyen süreçler olarak ele alır: büyük bir deprem senaryosu endüstriyel yangınlar, boru hattı hasarları, liman operasyonlarının durması, enerji kesintileri ve ulaşım ağlarının kopması gibi çok katmanlı sonuçlar üretebilir. Özellikle doğal tehlike kaynaklı teknolojik kazalar (NaTech), 1999 Kocaeli depreminde rafineri ve petro-kimya tesislerinde gözlendiği üzere, birincil fiziksel hasarın ötesinde sistemler arası bağımlılık ve hizmet sürekliliği boyutuyla değerlendirilmelidir (Rinaldi vd., 2001; Pescaroli ve Alexander, 2015). Bu nedenle pilot kapsamında her tehlike türü, tetikleyebileceği ikincil süreçler ve etkilediği altyapı bileşenleriyle birlikte ilişkisel olarak tanımlanmış; zincirleme etkiler bölgesel ölçekte izlenebilir hâle getirilmiştir. Böylece tehlikeler arası etkileşimler ortak bir analiz çerçevesinde değerlendirilebilmekte, senaryo temelli sorgulamalar yapılabilmekte ve öncelikli müdahale alanları bölgesel bütünlük içinde belirlenebilmektedir.



Şekil 2. BARAP kavramsal modeli: tehlike envanteri, maruziyet-kırılganlık modeli, kritik altyapı bağımlılıkları, çoklu tehlike senaryoları, bölgesel coğrafi veri altyapısı ve karar destek bileşenleri.

3.2 Veri Yönetimi ve Bölgesel CBS Altyapısı

MARAP pilot uygulaması, statik metin ve harita dokümanları yerine güncellenebilir coğrafi veri katmanlarına dayanan bir karar destek yapısı üzerine kurulmuştur. Farklı kurum, kaynak, ölçek ve formatlardan elde edilen raster, vektör ve grid tabanlı katmanlar ortak projeksiyon, geometri, topoloji ve metaveri standartlarına göre düzenlenmiş; veri standardizasyonunda EPSG:5637 (TUREF / LCC Europe) koordinat sistemi tercih edilerek ulusal ve uluslararası uyum hedeflenmiştir (AFAD ve İTÜ, 2025). Veriler PostgreSQL/PostGIS tabanlı merkezî bir mekânsal veri tabanında bütünleştirilmiş; bu açık kaynak kodlu mimari, farklı afet türleri için üretilen tehlike yüzeylerinin, maruziyet ve kırılganlık katmanlarının ve kritik altyapı ağlarının aynı karar destek ortamında depolanmasını, indekslenmesini, sorgulanmasını ve analiz edilmesini sağlamıştır (PostGIS Project, 2024). Kurumlar arası paylaşım ve birlikte çalışabilirlik ise OGC uyumlu web servisleri üzerinden kurgulanmıştır (OGC, 2024). Pilot uygulamada kullanılan temel veri grupları ve bunların karar destek sürecindeki işlevleri Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. MARAP pilot uygulamasında temel veri grupları ve karar destek işlevleri.

Veri grubu	Örnek veri katmanları	Karar destek işlevi
Tehlike verileri	Aktif faylar, sismik kataloglar, zemin sınıfları, taşkın alanları, heyelan duyarlılığı, yangın tehlikesi, meteorolojik gözlemler	Çoklu tehlike senaryolarının oluşturulması ve yüksek riskli alanların belirlenmesi
Maruziyet verileri	Nüfus yoğunluğu, yapı envanteri, arazi kullanımı, kentsel gelişme alanları, ekonomik varlıklar	Risk altındaki nüfus, yapı ve ekonomik değerlerin mekânsal olarak tanımlanması
Kırılganlık verileri	Yapı yaşı, yapı türü, zemin koşulları, sosyal kırılganlık göstergeleri, erişilebilirlik, müdahale kapasitesi	Öncelikli güçlendirme, dönüşüm ve müdahale alanlarının belirlenmesi
Kritik altyapı verileri	Enerji hatları, boru hatları, su ve atık su ağları, limanlar, karayolu ve demiryolu ağları, haberleşme altyapısı	Altyapı kesinti risklerinin, bağımlılıkların ve alternatif güzergâhların analiz edilmesi
Ekonomik ve sektörel veriler	Organize sanayi bölgeleri, lojistik merkezler, depolama alanları, üretim kümeleri, tedarik zinciri düğümleri	Üretim kesintisi, sektörel bağımlılık ve ekonomik kayıp potansiyelinin değerlendirilmesi
Kurumsal-operasyonel veriler	AFAD kapasitesi, belediye hizmet alanları, toplanma alanları, sağlık tesisleri, itfaiye ve arama-kurtarma birimleri	Acil müdahale, tahliye, kaynak tahsisi ve kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesi

Yöntem; veri yönetimi ve mekânsal standartlaştırma, çoklu tehlike modelleme, risk bileşenlerinin bütünleştirilmesi, grid tabanlı karşılaştırmalı analiz, yapay zekâ destekli harita yorumlama ve karar destek çıktılarının üretilmesi aşamalarından oluşmaktadır (Şekil 3). Projenin başlangıç sürecinde veri standardizasyonu, projeksiyon uyumu, topolojik bütünlük ve metaveri yönetimi geliştirilmiş; ardından afet türleri önceliklendirilmiş, kritik altyapı ve toplumsal sistem verileri analiz edilmiş ve risk haritalama metodolojileri tanımlanmış; bir ileri aşamada ise bu birikim operasyonel haritalama ve çok katmanlı karar destek ürünlerine dönüştürülmüştür (AFAD ve İTÜ, 2025; AFAD ve İTÜ, 2026).

3.3 Ölçek Geçişi ve 1 km x 1 km Grid Tabanlı Analiz Birimi

MARAP modelinde mikro ölçekteki yüksek çözünürlüklü veriler ile bölgesel ölçekli sentez haritaları arasında tutarlı bir ölçek geçiş mekanizması kurulmuştur. Analiz sonuçları AFAD'tan temin edilen 1 km x 1 km boyutlarındaki hücresel grid ağı üzerine yazılmakta; bu yapı, tehlike ve risk değerlerinin karşılaştırılabilir biçimde üretildiği standart analiz altlığı olarak tanımlanmaktadır (AFAD ve İTÜ, 2026). Böylece deprem, heyelan, sel-taşkın, orman yangını, kentsel ısı adası, kuraklık, zirai don ve teknolojik/NaTech tehlikeleri aynı mekânsal birim üzerinde üst üste bindirilebilir ve önceliklendirilebilir hâle gelmekte; ölçekler arası eşgüdüm kurumsal bir ilke olmaktan çıkıp ortak bir analiz biriminde teknik olarak tanımlanmış olmaktadır.

3.4 Risk Modelleme ve Afet Türlerine Göre İş Akışı

Risk haritalama yaklaşımı, uluslararası literatürde yaygın kabul gören "Risk = Tehlike x Maruziyet x Kırılganlık" çerçevesi üzerine kurulmuştur. Projenin "Risk Haritalama Metodolojileri" süreci, riski bu parametrelerin çarpımsal fonksiyonu olarak ele almakta, yönetilebilirlik kapasitesini ise toplam riski azaltıcı bir parametre olarak modele dâhil etmektedir. Bu çerçevede kullanılan kavramsal risk eğilimi formülü Eşitlik (1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\textit{Risk Eğilimi} = (\textit{Tehlike Düzeyi} \times \textit{Maruziyet Göstergesi} \times \textit{Kırılganlık Göstergesi}) / \textit{Yönetilebilirlik Kapasitesi} \quad (1)$$

Bu formülasyon, aynı tehlike düzeyine sahip iki alanın nüfus yoğunluğu, yapı stoku, altyapı yoğunluğu, sosyal kırılganlık ve müdahale kapasitesi farklılıkları nedeniyle farklı risk karakterleri gösterebileceğini kabul etmektedir. Bileşenlerin ağırlıklandırılmasında ve sınıflandırılmasında CBS tabanlı çok ölçütlü karar analizi yöntemlerinden yararlanılmıştır (Malczewski, 2006). Ağırlıklı çakıştırma, her bir bileşenin kendi göstergelerinden tek bir puana

indirgenmesinde kullanılırken; bileşenlerin birbiriyle birleştirilmesi Eşitlik (1)'deki çarpımsal kurguya göre yapılmaktadır. Böylece bileşen içi ağırlıklandırma ile bileşenler arası çarpımsal bütünleştirme aynı model içinde birbirini tamamlamaktadır.

Deprem tehlikesi açısından sismotektonik yapı, aktif fay hatları, yer hareketi parametreleri ve zemin koşulları dikkate alınmış; Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ile deterministik yaklaşımlar birlikte ele alınarak OpenQuake platformu üzerinden PGA ve PGV gibi yer hareketi parametreleri Vs30 gibi yerel zemin koşullarıyla ilişkilendirilmiştir (AFAD ve İTÜ, 2026; GEM Foundation, 2026). Teknolojik afetler ve NaTech senaryolarında sanayi tesisleri, limanlar, boru hatları, tehlikeli madde taşımacılığı, enerji altyapıları ve kritik ulaşım ağları birlikte değerlendirilmiş; deprem, sel ve heyelan gibi olayların sanayi tesislerinde ikincil afetlere yol açma potansiyeli esas alınmıştır (AFAD ve İTÜ, 2025).

İklim kaynaklı afetler kapsamında kuraklık, aşırı sıcaklıklar, kentsel ısı adaları ve zirai don ayrı başlıklar altında ele alınmış; bu riskler yalnızca meteorolojik değişkenler üzerinden değil, arazi kullanımı, nüfus dağılımı, sektörel faaliyetler ve kırılganlık bileşenleriyle birlikte değerlendirilmiştir (AFAD ve İTÜ, 2026). Kütle hareketleri, sel-taşkın ve orman yangını tehlikeleri için de aynı grid altlığı üzerinde duyarlılık ve risk yüzeyleri üretilerek bölgesel ölçekte karşılaştırılabilir bir çoklu tehlike sentezi elde edilmiştir.



Şekil 3. MARAP CBS entegre-tabanlı veri altyapısı ve analiz iş akışı.

4. BULGULAR

MARAP pilot uygulaması kapsamında elde edilen bulgular; Marmara Bölgesi'nde afet risklerinin il sınırları içinde kapalı ve birbirinden bağımsız olgular olarak ele alınamayacağını, tehlike kaynakları, maruziyet alanları, kırılgan altyapılar, sektörel bağımlılıklar ve kurumsal sorumluluk alanları arasında süreklilik gösteren bölgesel bir risk sistemi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Afet türlerinde önceliklendirme analizi depremi birinci öncelikli tehlike olarak belirlemiş; meteorolojik afetler ve iklim değişikliği, NaTech kazaları, sel-taşkın olayları, kütle hareketleri, kimyasal kazalar ve orman yangınlarını izleyen öncelikler olarak değerlendirmiştir (AFAD ve İTÜ, 2026). İl bazlı İRAP çıkarım analizleri de risk türlerinin il ölçeğinde farklılaştığını, ancak bölgesel düzeyde süreklilik ve bütünleşik çoklu risk yapısı ürettiğini göstermektedir. Bu bulgular, bölgesel risk profilinin yalnızca sismik tehlike üzerinden açıklanamayacağını ortaya koymaktadır (Şekil 4).

4.1 Deprem Tehlikesi ve Bölgesel Sismik Risk Omurgası

Projede DD-2 düzeyi PGA dağılım haritası, bölgenin ana sismik karar destek katmanı olarak değerlendirilmektedir. Yüksek ve çok yüksek PGA değerleri Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Marmara Denizi ve İzmit Körfezi boyunca uzanan kuzey kolunda yoğunlaşmakta; en yüksek tehlike bandı Çanakkale'nin kuzeydoğusundan Tekirdağ kıyıları, İstanbul'un güney kesimleri, Yalova, Kocaeli ve Sakarya-Düzce hattına kadar süreklilik göstermektedir. Ancak PGA dağılımı tek başına bir risk haritası değildir; sismik tehlikenin risk üretme kapasitesi yapı stoku, nüfus yoğunluğu, zemin büyütmesi, sıvılaşma potansiyeli, kritik altyapı yoğunluğu ve sosyal kırılganlık göstergeleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Tehlike bandının il sınırlarını keserek süreklilik göstermesi, ara ölçek planlama gereksiniminin en somut mekânsal kanıtıdır.

4.2 Kritik Altyapı, Sanayi ve NaTech Risk Kümeleri

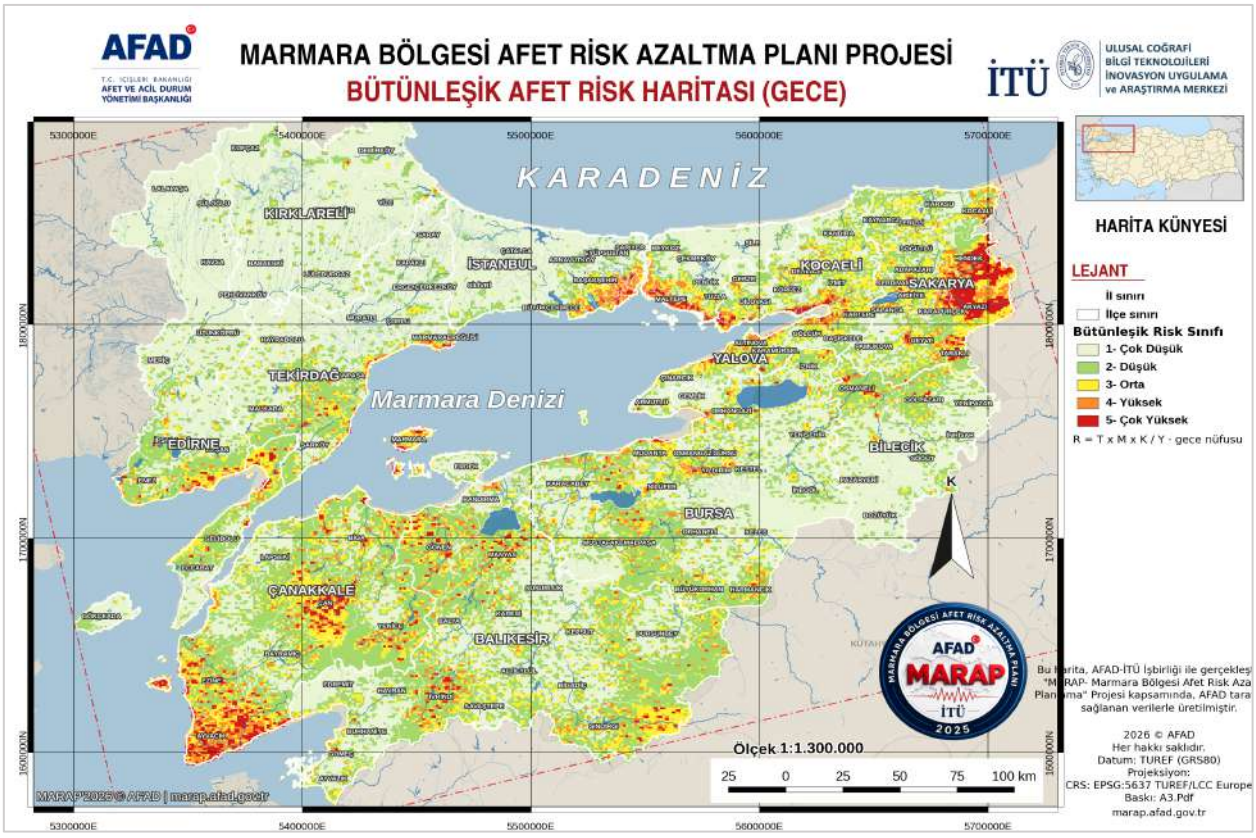
Teknolojik afet ve NaTech riskleri, Marmara Bölgesi'nde bölgesel afet yönetişimi açısından merkezî önemdedir. Projede; Kocaeli Körfez-Derince-Dilovası-Gebze hattı, İstanbul Tuzla-Ambarlı-Silivri aksı, Tekirdağ Marmaraereğlisi-Çorlu-Çerkezköy-Ergene hattı, Yalova Taşköprü kimya kümesi, Bursa-Gemlik-Bandırma-Karabiga kıyı endüstri zinciri ve Sakarya Arifiye-Hendek-Karasu aksı, çoklu risk kümeleri bakımından kritik alanlar olarak değerlendirilmektedir. Bu alanlarda deprem, sıvılaşma, taşkın, kıyı baskını veya altyapı kesintileri; kimyasal sızıntı, yangın, patlama, toksik yayılım ve domino etkisi gibi teknolojik sonuçları tetikleyebilmektedir. Ulusal mevzuat büyük endüstriyel kazalar için tesis ölçeğinde güvenlik yönetim sistemleri tanımlarken (Resmî Gazete, 2013), MARAP yaklaşımı bu tesis ve ağların bölgesel CBS ortamında çoklu tehlike bağlamında birlikte analiz edilmesini önermektedir. Kümelerin il sınırlarını aşan coğrafi sürekliliği, NaTech risklerinin tesis bazlı denetim mantığının yanı sıra bölgesel ağ mantığıyla da ele alınmasını gerektirmektedir.

4.3 İklim Kaynaklı Tehlikeler ve Kentsel Kırılganlık Alanları

İklim kaynaklı riskler yalnızca meteorolojik değişkenler üzerinden değil; arazi kullanımı, nüfus dağılımı, sektörel faaliyetler, doğal kaynak baskısı ve kırılganlık bileşenleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Kuraklık açısından Ergene Havzası, Kocaeli'nin doğusu ve Balıkesir'in kuzeydoğusu; aşırı sıcaklıklar bakımından İstanbul-Kocaeli sanayi ve yerleşim koridoru, Trakya ovaları, Sakarya-Adapazarı Ovası, Gemlik Körfezi çevresi ile Bandırma-Biga hattı; kentsel ısı adaları bakımından ise İstanbul metropoliten alanı, İstanbul-Gebze-Dilovası-İzmit sanayi koridoru, Gemlik Körfezi ve Edremit Körfezi'nin kuzeydoğusu bölge ortalamasının üzerinde risk yoğunlaşması gösteren alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, iklim kaynaklı kronik risklerin sismik tehlike gibi ani etkili tehlikelerle aynı karar destek sisteminde ele alınması gerektiğini göstermektedir.

4.4 Yapay Zekâ Destekli Harita Analizlerinin Karar Destek Katkısı

MARAP proje çalışmasının en yenilikçi bulgularından biri, üretilen CBS haritalarının yapay zekâ destekli analizlerle karar destek mekanizmasına dönüştürülmesidir. Projede haritaların uzman yorumuna bağlı statik ürünler olmaktan çıkarılarak; farklı veri katmanlarını birlikte değerlendirebilen, risk desenlerini otomatik tanıyabilen, öncelikli müdahale alanlarını sıralayabilen ve senaryo bazlı karar önerileri üretebilen akıllı bir karar destek altyapısına dönüştürülmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım ŞESİM ve AYDES gibi sistemlerle entegre edildiğinde erken uyarı, kaynak tahsisi, tahliye, müdahale önceliklendirmesi ve izleme-değerlendirme süreçlerine operasyonel destek sağlayabilir. ŞESİM modeli; çevresel sensör altyapısı, CBS ile bütünleştirilen veri işleme katmanı, yapay zekâ destekli karar destek mekanizmaları ve çok paydaşlı kullanıcı etkileşimi bileşenlerinden oluşan çok katmanlı bir mimari olarak kurgulanmıştır (AFAD ve İTÜ, 2025).



Şekil 4. Marmara Bölgesi bütünleşik afet risk haritası (gece senaryosu): altı afet türünün 1 km x 1 km ızgarada birleştirilmesiyle elde edilen bölgesel risk yoğunlaşma alanları (AFAD ve İTÜ, 2026).

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

BARAP modeli, afet risk azaltma süreçlerinin veri, kurum, mekân ve yatırım ilişkileri içinde yeniden örgütlenmesine yönelik bir bölgesel yönetişim yaklaşımıdır. Klasik planlama anlayışında plan, belirli bir tarih için üretilmiş statik metin, tablo ve harita belgelerinden oluşurken; BARAP güncellenebilir mekânsal veri tabanları, OGC uyumlu coğrafi bilgi servisleri, dinamik risk göstergeleri ve karar destek panelleriyle sürekli yaşayan bir planlama altyapısı önermektedir. Bu dönüşüm üç temel değişimi gerektirir: tehlike haritası odaklı yaklaşımdan risk sistemi odaklı yaklaşıma geçiş; idari sınır esaslı planlamadan coğrafi havza, fonksiyonel bölge ve kritik altyapı ağı esaslı planlamaya geçiş; kurumlar arası koordinasyonun protokol ve toplantılar yerine ortak veri modeli, ortak analiz birimi ve ortak karar destek dili üzerinden kurulması. MARAP pilotunda 1 km x 1 km grid altlığının ortak analiz birimi olarak tanımlanması, bu üçüncü değişimin teknik karşılığıdır.

MARAP pilot uygulamasının en önemli katkısı, afet risk azaltma planlamasını il düzeyinde parçalı veri ve eylem listelerinden çıkararak bölgesel ölçekte ortak veri, ortak senaryo ve ortak karar destek yapısına taşımasıdır. Örneğin bir ilin lojistik altyapısını güçlendirmeye yönelik yatırımı; komşu ilin liman kapasitesi, ana ulaşım aksları veya enerji tedarik sürekliliğiyle ilişkilendirilmediğinde bölgesel risk azaltma etkisi sınırlı kalmaktadır. Model bu yönüyle yalnızca görev ve sorumluluk listeleri üretmemekte; hangi kurumun hangi veri katmanından sorumlu olduğunu, hangi risk azaltma eyleminin hangi bölgesel kırılganlığı azalttığını ve hangi yatırımın hangi kritik altyapı bağımlılığını güçlendirdiğini mekânsal olarak ilişkilendirmektedir. UN-GGIM (2017)'in vurguladığı üzere güvenilir, erişilebilir ve birlikte çalışabilir coğrafi bilgi altyapıları, afet risk azaltmada kurumlar arası koordinasyonun temel bileşenidir.

MARAP bulguları BARAP modelinin üç temel iddiasını doğrulamaktadır. Birincisi, Marmara Havzası'nda fay sistemleri, ulaşım ağları, enerji koridorları, su havzaları, sanayi kümeleri ve liman sistemleri iller arası süreklilik gösterdiğinden, riskin il sınırları içinde parçalı biçimde ele alınması yetersiz kalmaktadır. İkincisi, heterojen coğrafi verilerin mekânsal veri tabanı mimarisinde bütünleştirilmesi, çoklu tehlike senaryolarının CBS ortamında analiz edilmesi ve çıktıların güncellenebilir biçimde sunulması; statik belge üretiminden dinamik karar destek sistemine geçişin teknik altyapısını oluşturmaktadır. Üçüncüsü, TARAP ile İRAP arasında coğrafi havza ve fonksiyonel bölge esaslı bir ara ölçek kurulması, ölçekler arası eşgüdümü kurumsal bir ilke olmaktan çıkarıp ortak bir analiz biriminde teknik olarak tanımlanabilir hâle getirmektedir.

Modelin kurumsallaşması için bölgesel coğrafi veri altyapılarının mevzuat, yatırım planlaması ve üst ölçekli mekânsal planlarla ilişkilendirilmesi gerekmektedir. 7269 ve 5902 sayılı kanunların BARAP modelini destekleyecek biçimde yorumlanması; bölgesel veri altyapılarının ise yalnızca bir proje çıktısı değil, sürekli güncellenen ulusal karar destek sisteminin bileşeni olarak tanımlanması önemlidir. Modelin diğer bölgelere aktarılabilirliği veri erişimi, kurumsal kapasite ve güncelleme sürekliliği koşullarına bağlıdır. Bu koşullar sağlandığında BARAP; Ege, Çukurova veya Orta Anadolu gibi fonksiyonel bölgeler için de uyarlanabilir bir çerçeve sunmakta ve kırılgan mega-kent havzaları için ölçeklenebilir bir dijital dönüşüm omurgası oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ile İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) koordinasyonunda yürütülen "Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP)" projesi kapsamında geliştirilen kavramsal, metodolojik ve teknik çıktılardan yararlanılarak hazırlanmıştır. Çalışmaya katkı sağlayan AFAD ve İTÜ proje ekiplerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

AFAD, 2022a. Türkiye Afet Risk Azaltma Planı (TARAP) 2022-2030. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

AFAD, 2022b. İl Afet Risk Azaltma Planları (İRAP). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. https://www.afad.gov.tr/il-afet-risk-azaltma-pl, [Erişim tarihi: 12.09.2026].

AFAD ve İTÜ, 2025. Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) Projesi Teknik Raporları: Cilt I-III, Teknik Şartname ve İRAP Çıkarım Analizleri (İş Paketi 1-2). T.C. İçişleri Bakanlığı AFAD ve İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

AFAD ve İTÜ, 2026. Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) Projesi Teknik Raporları: Afet Türlerinde Önceliklendirme, Risk Haritalama Metodolojileri, Haritalama ve Yapay Zekâ Destekli Analizler (İş Paketi 3-4). T.C. İçişleri Bakanlığı AFAD ve İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Erdik, M., Aydınoğlu, N., Fahjan, Y., Şeşetyan, K., Demircioğlu, M., Siyahi, B., Durukal, E., Özbey, C., Biro, Y., Akman, H. ve Yüzügüllü, O., 2003. Earthquake risk assessment for Istanbul metropolitan area. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2(1): 1-23.

GEM Foundation, 2026. OpenQuake Engine Documentation. Global Earthquake Model Foundation. https://docs.openquake.org/oq-engine/manual/latest/, [Erişim tarihi: 12.09.2026].

Guvercin, S. E. ve Barbot, S., 2025. Persistent rupture segmentation of the Main Marmara Fault. Communications Earth and Environment, 6(1): 1028.

IPCC, 2022. Cities, settlements and key infrastructure. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge. 907-1040.

Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, 20(7): 703-726.

OGC, 2024. OGC Standards. Open Geospatial Consortium. https://www.ogc.org/standards/, [Erişim tarihi: 12.09.2026].

Parsons, T., Toda, S., Stein, R. S., Barka, A. ve Dieterich, J. H., 2000. Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation. Science, 288(5466): 661-665.

Pescaroli, G. ve Alexander, D., 2015. A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the "toppling dominos" metaphor. Planet@Risk, 3(1): 58-67.

Pierdicca, R. ve Paolanti, M., 2022. GeoAI: A review of artificial intelligence approaches for the interpretation of complex geomatics data. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 11(1): 195-218.

PostGIS Project, 2024. PostGIS: Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL. https://postgis.net/, [Erişim tarihi: 12.09.2026].

Rajabifard, A., Feeney, M.-E. F. ve Williamson, I. P., 2002. Future directions for SDI development. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4(1): 11-22.

Resmî Gazete, 2013. Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik. 30 Aralık 2013, Sayı: 28867 (Mükerrer), Ankara.

Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. ve Kelly, T. K., 2001. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. IEEE Control Systems Magazine, 21(6): 11-25.

Sezen, H. ve Whittaker, A. S., 2004. Performance of industrial facilities during the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Kanada, Bildiri No: 282. 1-12.

TÜİK, 2024. İl Bazında Gayrisafi Yurt İçi Hâsıla, 2023. Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, Sayı: 53575, Ankara.

UNDRR, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Cenevre. 37 sayfa.

UNDRR, 2017. Terminology on Disaster Risk Reduction: Disaster Risk. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Cenevre. https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk, [Erişim tarihi: 12.09.2026].

UN-GGIM, 2017. Strategic Framework on Geospatial Information and Services for Disasters. United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management, New York. 28 sayfa.

Yomralıoğlu, T. ve Yılmaz, G., 2025. Türkiye'de afet risklerinin azaltılmasında bölgesel düzeyli planlama yaklaşımının gerekliliği: MARAP projesi örneğinde yeni bir model önerisi. 7. Uluslararası Afet Dirençliliği Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul. 1-10.

ORMAN VE ENERJİ GÜVENLİĞİ İÇİN UZAKTAN ALGILAMA VE CBS DESTEKLİ YANGIN YÖNETİMİ

Nebiye MUSAOĞLU[1], Gülşen TAŞKIN[2], Ertuğrul BİLGİLİ[3], Kadir Alperen COŞKUNER[3], Hüseyin Kaya[4], Gizem AYTAÇ[5]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, musaoglune@itu.edu.tr
[2]İstanbul Teknik Üniversitesi Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, tasking@itu.edu.tr
[3] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Trabzon kacoskuner@ktu.edu.tr, bilgili@ktu.edu.tr
[5]İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, aytac20@itu.edu.tr

ÖZET

Ormanlar, biyoçeşitliliğin sağlanması, karbon yutulumu, erozyon önleme gibi birçok fonksiyonu olan ve dünya üzerindeki yaşamı doğrudan etkileyen ekosistemlerdir. Hem ekonomik faydaları hem de canlı yaşamı ve gezegenin yaşanabilirliği için orman alanlarının sürdürülebilirliğinin sağlanması oldukça önemli bir konudur. Küresel iklim değişikliği nedeniyle dünya birçok doğal afete giderek daha sık aralıklarla maruz kalmaktadır. Bu afetlerden ormanlar da büyük oranda etkilenmektedir. Bunun yanı sıra orman alanları, ormansızlaştırma, orman bozunumu, şehirleşme ya da tarım alanlarının genişletilmesi gibi insan kaynaklı baskılarla da karşı karşıyadır. Orman alanlarının en sık karşı karşıya kaldığı afetler orman yangınlarıdır. Orman yangınları, ekosistemi şekillendiren, yüzey albedosu ve karbon dinamikleri gibi küresel dinamikleri olumsuz etkileyen afetlerdir.

Orman yangınlarının oluşumunda iklimsel koşullar ve doğal faktörlerin yanı sıra insan kaynaklı etkenler de önemli bir rol oynamaktadır. Bu faktörler arasında elektrik iletim ve dağıtım hatlarından kaynaklanan arızalar, özellikle kurak ve rüzgârlı dönemlerde yangınların tetiklenmesinde kritik bir risk unsuru olarak öne çıkmaktadır. İletken kopması, hatların bitki örtüsü ile teması, kısa devreler ve ekipman arızaları sonucunda oluşan kıvılcımlar, uygun meteorolojik ve çevresel koşullar altında yangın başlangıcına neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda literatürde elektrik altyapısı ile orman yangınları arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Elektrik iletim ve dağıtım altyapısı, orman yangınları gibi doğal tehlikeler karşısında savunmasız olup, aynı zamanda felaket boyutuna ulaşabilen yangınların tetiklenmesinde önemli bir rol oynayabilmektedir. Elektrik ekipmanlarında meydana gelen arızalar sonucu oluşan kıvılcımlar, ani alevlenme olaylarını başlatarak orman yangınlarının ortaya çıkmasına ve hızla yayılmasına neden olabilmektedir (Jazebi vd., 2020). Dolayısıyla elektrik şebekesi altyapısı, meteorolojik ve biyofiziksel koşulların yangın davranışını desteklediği ortamlarda, yangınların oluşumunu ve hızla yayılmasını kolaylaştıran bir katalizör rolü üstlenebilmektedir. Bölgesel ölçekte değerlendirildiğinde, enerji kaynaklı yangınların sayısının Akdeniz ve Ege bölgelerinde daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, hem enerji nakil hatlarının yoğunluğu hem de kurak ve sıcak iklim koşullarının yangın oluşumunu kolaylaştırması ile ilişkilendirilebilir. Özellikle şiddetli rüzgâr koşulları, elektrik hatlarında elektriksel ark oluşumuna yol açabilmekte veya bitki örtüsünün elektrik ekipmanlarıyla temas etmesine neden olarak yangınların tetiklenmesine zemin hazırlayabilmektedir (Eagleston vd., 2025).

Bu çalışmada, enerji nakil hatları çevresindeki orman yangını riskinin daha duyarlı ve güncellenebilir biçimde haritalanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, İzmir, Seferihisar ve çevresini kapsayan alan pilot bölge olarak seçilmiştir. Son yıllarda yangın risk potansiyelini belirleme ve izleme süreçlerinde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Derin öğrenme modelleri, hiyerarşik özellik çıkarımı özelliği ile büyük veri setlerini verimli biçimde işleyebilmekte ve genelleştirme kapasitesini artırmaktadır. Derin öğrenme mimarileri (CNN, ConvLSTM, U-Net tabanlı ağlar) ile uydu görüntülerinin, meteorolojik verilerin ve insan kaynaklı etken verilerinin bütünleşik biçimde değerlendirilmesi, yangın riski tahmininde geleneksel istatistiksel yaklaşımlara kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Xu vd., 2024). Bu modellerin eğitimi ve doğrulanması, FireCube (Prapas vd., 2022) ve EO4WildFires gibi meteorolojik veriler, uydu görüntüleri, bitki örtüsü ve yangın kayıtlarını bütünleştiren açık erişimli veri setleri sayesinde desteklenmekte; bu kaynaklar farklı coğrafyalarda geliştirilen modellerin karşılaştırılabilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmaktadır.

*Güçlü bir yapay zeka modelinin başarısı, beslendiği verinin kalitesine bağlıdır. Orman yangını tahmini için; günlük zamansal sürekliliğe sahip, yüksek mekansal çözünürlüklü ve çok kaynaklı (uydu görüntüleri, yer gözlemleri, topoğrafya ve insan kaynaklı faktörler) verilerin bir araya getirildiği bütünleşik veri küplerine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde veri hacminin hızla artması ve bu verilerden anlamlı bilgilere ulaşma gereksinimi, veri yönetimi ve analiz teknolojilerine yönelik yeni yaklaşımları zorunlu kılmıştır. Verilerin farklı boyutlarda (örneğin zaman, mekân, konu başlığı gibi) düzenlenmesi ve bu çok boyutlu yapı üzerinden hızlı analizler yapılabilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de veri küpü (data cube) teknolojisidir. Bu teknoloji, büyük verinin çok boyutlu veri yapıları altında saklanmasını ve hızlı biçimde sorgulanmasını sağlayarak çok farklı alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır (Musaoglu vd., 2026). Ormandaki meşcere tiplerinin ayırt edilmesi ve orman yangınları için de oluşturulmuş veri küpleri bulunmaktadır. Pilot bölgede yangın riskini belirlemek amacıyla FireCube veri seti kullanılmıştır (URL-1). Bu veri seti, Yunanistan'da ertesi günkü yangın tehlikesini tahmin etmek amacıyla Atina Ulusal Gözlemevi tarafından hazırlanmış, günlük veri küpü formatında bir veri setidir. Avrupa Birliği'nin DeepCube (Horizon 2020) projesi kapsamında geliştirilmiştir (Prapas vd., 2022). Yangın riskini belirlemek amacıyla yangın oluşumu ve yayılımını etkileyen 90 değişken (Hantson vd., 2016) ve 2009-2021 yılları arasındaki 30 hektardan büyük yanmış alanları kapsayan 1*1 km grid boyutundaki günlük verileri kapsayan FireCube veri seti, ülkemizde Ege Bölgesi'nin büyük bir kısmını da dahil olmak üzere 1.253 km × 983 km'lik bir alanı kaplamaktadır. Veri setinde, pilot bölge içinde 171 yangın gerçekleşen, 140 yangın gerçekleşmeyen olmak üzere toplam 311 adet etiketli örnek bulunmaktadır. Öncelikle veri seti; 2020 yılı öncesi eğitim, 2020 yılı doğrulama ve 2021 yılı test olacak şekilde üç parçaya ayrılmıştır. Model eğitiminde veri sızıntısını (data leakage) önlemek amacıyla pilot bölgeye ait tüm veriler eğitim ve doğrulama*

(train/validation) veri setlerinden tamamen dışlanmış ve sadece test setine dahil edilmiştir. Derin öğrenme modeli olarak, mekansal ve zamansal veriyi birlikte kullanan Convolutional Long-Short Term Memory (ConvLSTM) kullanılmıştır (Shi vd., 2015). Model çıkarım ve başarımı performans metrikleri ile ölçüldüğünde; %89,71 doğruluk, %88.83 kesinlik, %92,98 duyarlılık ve F1 skoru olarak da %90,86 elde edilmiştir. ROC eğrisi altındaki alan değeri (AUC-ROC) %96,45 ve kesinlik-duyarlılık eğrisi altındaki alan değeri (AUPRC) ise %97,14'dür.

Yapılan değerlendirmeler, yangın risk tahmininde derin öğrenme ile yüksek doğruluk elde edileceğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan veri setinin pilot bölge özellikleri ile uyumlu olması, model doğruluğunu artırmıştır. Orman yangını gibi karmaşık süreçlerin hem zamansal birikimini hem de mekansal komşuluk ilişkilerini kavrayabilmek adına transfer öğrenme ve hibrit yaklaşımların karar vericiler için daha anlamlı sonuçlar üreteceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Orman Yangını, Elektrik Hattı, Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Görüntü İşleme.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından desteklenen "Doğa Kalkanı – Orman ve Enerji Güvenliği için CBS ve Uydu Destekli Yangın Yönetimi" Ar-Ge Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, destekleri için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na teşekkür eder.

ABSTRACT

REMOTE SENSING AND GIS-SUPPORTED FIRE MANAGEMENT FOR FOREST AND ENERGY SECURITY

Forests are ecosystems that directly sustain life on Earth through their numerous functions, including the conservation of biodiversity, carbon sequestration, and erosion prevention. Ensuring the sustainability of forest ecosystems is therefore of critical importance, not only because of their economic value but also for the preservation of biodiversity and the long-term habitability of the planet. Owing to global climate change, the world is increasingly exposed to natural disasters at shorter and more frequent intervals, and forests are among the ecosystems most severely affected. In addition to climate-related pressures, forests are also threatened by human-induced factors such as deforestation, forest degradation, urban expansion, and agricultural land conversion. Among the various disturbances affecting forests, wildfires are the most frequent and destructive. Forest fires are major ecological disturbances that reshape ecosystems while adversely affecting global processes such as surface albedo and carbon dynamics.

In addition to climatic conditions and natural factors, anthropogenic activities play a significant role in the occurrence of forest fires. Among these, failures in electricity transmission and distribution systems have emerged as a critical source of ignition, particularly during hot, dry, and windy periods. Conductor failures, vegetation contact with power lines, short circuits, and equipment malfunctions can generate sparks that ignite wildfires under favorable meteorological and environmental conditions. Consequently, there has been a growing number of studies in recent years investigating the relationship between electrical infrastructure and forest fires. Electricity transmission and distribution networks are not only highly vulnerable to natural hazards such as wildfires but can also serve as important ignition sources capable of triggering catastrophic fire events. Sparks generated by electrical equipment failures may initiate rapid ignition events, resulting in the outbreak and rapid spread of wildfires (Jazebi et al., 2020). Thus, under meteorological and biophysical conditions conducive to fire behavior, power grid infrastructure can act as a catalyst that facilitates both wildfire ignition and propagation. At the regional scale, energy-related wildfire incidents are particularly concentrated in the Mediterranean and Aegean regions of Türkiye. This pattern can be attributed to both the high density of power transmission infrastructure and the hot, dry climatic conditions that favor wildfire occurrence. Strong winds, in particular, can induce electrical arcing along transmission lines or cause vegetation to come into contact with electrical equipment, thereby increasing the likelihood of wildfire ignition (Eagleston et al., 2025).

This study aims to develop a more sensitive and updatable wildfire risk mapping approach for forest areas surrounding electricity transmission lines. For this purpose, the region covering Seferihisar and its surrounding areas in İzmir was selected as the pilot study area. In recent years, the use of artificial intelligence (AI)-based methods for wildfire risk assessment and monitoring has become increasingly widespread. Deep learning models can efficiently process large-scale datasets through their hierarchical feature extraction capabilities, thereby improving their generalization performance. The integrated analysis of satellite imagery, meteorological data, and anthropogenic variables using deep learning architectures such as Convolutional Neural Networks (CNNs), Convolutional Long Short-Term Memory (ConvLSTM), and U-Net-based networks has demonstrated higher predictive accuracy than conventional statistical approaches for wildfire risk estimation (Xu et al., 2024). The training and validation of these models are supported by open-access datasets such as FireCube (Prapas et al., 2022) and EO4WildFires, which integrate meteorological observations, satellite imagery, vegetation characteristics, and historical fire records. These datasets enhance the reproducibility and comparability of wildfire prediction models developed for different geographical regions.

The performance of a robust AI model largely depends on the quality of the data used for training. Accurate wildfire prediction requires integrated data cubes that combine daily temporal observations with high spatial resolution and multi-source datasets, including satellite imagery, ground observations, topographic information, and anthropogenic factors. The rapid growth in data volume and the increasing need to extract meaningful information from these datasets have necessitated new approaches to data management and analysis. One such approach is data cube technology, which organizes data across multiple dimensions, such as time, space, and thematic variables, enabling efficient storage and rapid multidimensional analysis. This technology provides significant advantages by facilitating the storage and efficient querying of large-scale multidimensional datasets (Musaoglu et al.,

2026). Data cubes have also been developed for distinguishing forest stand types and for wildfire-related applications. In this study, the FireCube dataset (URL-1) was employed to estimate wildfire risk within the pilot region. FireCube is a daily data cube developed by the National Observatory of Athens to predict next-day wildfire danger in Greece and was created within the framework of the European Union's DeepCube (Horizon 2020) project (Prapas et al., 2022). To support wildfire risk prediction, the dataset incorporates 90 variables affecting wildfire ignition and spread (Hantson et al., 2016) together with daily observations on a 1 × 1 km spatial grid representing burned areas larger than 30 ha between 2009 and 2021. The dataset covers an area of approximately 1,253 km × 983 km, including a substantial portion of the Aegean Region of Türkiye. Within the pilot study area, the dataset contains 311 labeled samples, consisting of 171 wildfire events and 140 non-fire cases.The dataset was divided into three subsets: data collected before 2020 were used for training, data from 2020 for validation, and data from 2021 for testing. To prevent data leakage, all samples belonging to the pilot region were completely excluded from the training and validation datasets and were included only in the independent test dataset. A Convolutional Long Short-Term Memory (ConvLSTM) network (Shi et al., 2015), which jointly exploits spatial and temporal information, was adopted as the deep learning model. Model performance was evaluated using standard classification metrics. The proposed model achieved an overall accuracy of 89.71%, precision of 88.83%, recall (sensitivity) of 92.98%, and an F1-score of 90.86%. Furthermore, the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC-ROC) reached 96.45%, while the Area Under the Precision–Recall Curve (AUPRC) was 97.14%.

The evaluation results demonstrate that deep learning can achieve high predictive accuracy for wildfire risk assessment. The compatibility between the characteristics of the FireCube dataset and those of the pilot study area contributed significantly to the model's performance. Considering the complex nature of wildfire dynamics, which involve both temporal evolution and spatial neighborhood interactions, transfer learning and hybrid deep learning approaches are expected to provide more robust and operationally valuable decision-support tools for wildfire risk management.

Keywords: Forest Fire, Power Line, Remote Sensing, Geographic Information System, Image Processing.

ACKNOWLEDGMENT

This study was conducted within the framework of the R&D project entitled "Nature Shield – GIS and Satellite-Based Wildfire Management for Forest and Energy Security," funded by the Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority (EPDK). The authors gratefully acknowledge the EPDK for its financial support.

REFERENCES

Chen, X., Zhang, Y., Wang, S., Zhao, Z., Liu, C. and Wen, J., (2024). Comparative study of machine learning methods for mapping forest fire areas using Sentinel-1B and 2A imagery. Frontiers in Remote Sensing, 5, p.1446641.

Eagleston, H., Bester, M., Yusuf, J., Damodaran, A., Reno, M. J. (2025). Systemic Drivers of Electric-Grid-Caused Catastrophic Wildfires: Implications for Resilience in the United States. Challenges,16(1), 13.

Hantson, S. , Arneth, A. , Harrison, SP , Kelley, DI , Prentice, IC , Rabin , SS , vd. (2016) . Küresel yangın modellemesinin durumu ve zorlukları . Biogeosciences , 13 (11), 3359–3375 . https://doi.org/10.5194/bg-13-3359-2016.

Jazebi, S., De Leon, F., Nelson, A. (2020). Review of Wildfire Management Techniques. Part I: Causes, Prevention, Detection, Suppression, and Data Analytics. IEEE Transactions on Power Delivery, 35(1), 430-439.

Musaoğlu,N., & Kapukaya, B., & Lenk, O., & Erbay, A.Y., & Kara, S.N., (2026). Uzaktan Algılama Verisi Tabanlı Coğrafi Veri Küpü Teknolojisi: UDENE Uygulaması, Geomatik, 11 (1), 53-60.

Prapas, I., Kondylatos, S. and Papoutsis, I., (2022). FireCube: A daily datacube for the modeling and analysis of wildfires in Greece. URL: https://doi. org/10.5281/zenodo, 6475592.

Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D.Y., Wong, W. K., & Woo, W.C.. (2015). Convolutional LSTM network: A machine learning approach forprecipitation nowcasting. Advances in Neural Information Processing Systems, 28, 802 –810.

URL-1: https://zenodo.org/records/6475592, DOI 10.5281/zenodo.4943353, son erişim: 20.07.2026.

Xu, Z., Li, J., Cheng, S., Rui, X., Zhao, Y., He, H., Guan, H., Sharma, A., Erxleben, M., Chang, R. and Xu, L.L., (2025). Deep learning for wildfire risk prediction: Integrating remote sensing and environmental data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 227, pp.632-677.

DİL MODELLERİNDE HİYERARŞİK MEKÂNSAL YANILGILAR: TÜRKİYE İL VE İLÇELERİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR İNCELEME

Abdulkadir MEMDUHOĞLU[1]

[1]Doç. Dr., Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63050, Şanlıurfa, akadirm@harran.edu.tr

ÖZET

Mekânsal bilgi insan belleğinde hiyerarşik olarak örgütlenir. Üst düzey birimlere (bölge, il) ilişkin bilgi, alt düzey birimlerin (şehir, ilçe) göreli konumları hakkında çıkarım yapılırken sistematik hatalara yol açabilir. Stevens ve Coupe (1978) tarafından gösterilen bu hiyerarşik mekânsal yanılgı, insan bilişsel haritalarının iyi belgelenmiş bir özelliğidir. Dil modelleri coğrafi bilgilerini büyük metin derlemlerinden örtük olarak edinir. Bu çalışma, yerel donanımda çalıştırılabilen küçük dil modellerinin (KDM) Türkiye'nin il–ilçe hiyerarşisi üzerinde benzer bir yanılgı sergileyip sergilemediğini incelemektedir. Büyük dil modelleri (BDM) tavan referansı olarak tek bir öncü modelle (frontier model, GPT-5.4) temsil edilmiştir. İki tamamlayıcı görev tasarlanmıştır. Yön görevinde (A) ilçelerin gerçek sıralaması ile bağlı oldukları il merkezlerinin sıralamasının çeliştiği "yanılgı" çiftleri, çelişmediği "kontrol" çiftleriyle karşılaştırılmıştır. Koordinat görevinde (B) ilçe koordinatları kestirilmiş ve hata vektörlerinin il merkezine doğru çekimi ölçülmüştür. On bir yerel KDM ile öncü model, örneksiz (zero-shot) ve akıl yürütme (reasoning) kapalı koşulda, sıcaklık = 1.0 ile değerlendirilmiştir. Yön görevi dil başına 5, koordinat görevi 3 kez yinelenmiştir. Model başına sırasıyla 3.080 ve 1.281 sorgu üretilmiştir. Ham karşılaştırmada on iki modelin onunda kontrol doğruluğu anlamlı biçimde yüksektir (GPT-5.4'te +0.21, en büyük yerel modelde +0.28). Ancak yanılgı çiftleri tasarım gereği çok daha dar ayrımlıdır. Bu nedenle farkın önemli bir bölümü ayırt etme zorluğuyla açıklanmaktadır. Zorluk eşitlendiğinde etki dört yerel modelde sürmekte (+0.10 ile +0.19 arası), öncü modelde ise kaybolmaktadır. Yanılgı Gemma 4 ailesinde ölçekle güçlenmiş, Qwen 3.5 ailesinde belirmemiştir. Bu ailede yanlılık koordinat kestirimlerinde bulunmakta, ancak doğrudan karşılaştırmada kullanılmamaktadır. Yanılgı birçok modelde Türkçede daha şiddetli olmuş ve Türkçeye ince ayarla artmıştır. Koordinat kestirimleri il merkezine doğru çekilmiştir. Çekimin büyüklüğü "her zaman il merkezini söyle" referans düzeyiyle aynı mertebede kaldığından bulgu, bilgi yokluğunda il merkezine yaslanma (fallback) olarak yorumlanmıştır. Sonuçlar, hiyerarşik yanlılığın gerçek olduğunu ancak madde zorluğu denetlenmeden olduğundan güçlü görünebileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: dil modelleri, mekânsal biliş, hiyerarşik mekânsal yanılgı, coğrafi muhakeme, bilişsel yanlılık, Türkiye il–ilçe hiyerarşisi

ABSTRACT

HIERARCHICAL SPATIAL DISTORTIONS IN LANGUAGE MODELS: AN EXPERIMENTAL STUDY ON TURKEY'S PROVINCES AND DISTRICTS

Spatial knowledge is organized hierarchically in human memory. Information about higher-level units (regions, provinces) can systematically bias judgements about the relative positions of lower-level units (cities, districts). This hierarchical spatial distortion, demonstrated by Stevens and Coupe (1978), is a well-documented property of human cognitive maps. Language models acquire geographic knowledge implicitly from large text corpora. This study examines whether small language models (SLMs) that run on local hardware exhibit a comparable distortion over Turkey's province-district hierarchy. Large language models (LLMs) are represented by a single frontier reference model (GPT-5.4) used as a ceiling. Two complementary tasks are used: (A) a direction task contrasting illusion pairs, where the true district ordering conflicts with the ordering of their province centers, with control pairs; and (B) a coordinate-estimation task measuring the attraction of error vectors toward province centers. Eleven locally runnable SLMs and the frontier model were evaluated zero-shot with reasoning disabled. In the raw comparison, ten of twelve models are significantly more accurate on control pairs (+0.21 for GPT-5.4, +0.28 for the largest local model). Illusion pairs are, however, necessarily far more finely separated by construction, so much of that gap reflects discrimination difficulty. Once difficulty is matched, the effect persists in four local models (+0.10 to +0.19) and disappears in the frontier model. The distortion strengthens with scale in the Gemma 4 family, is absent in Qwen 3.5, is often stronger in Turkish than English, and is increased by Turkish fine-tuning. Coordinate estimates are drawn toward province centers, but by a margin comparable to a baseline that always answers the province center, so the finding is read as a fallback to the province center when district-level knowledge is absent. Hierarchical bias is real but appears stronger than it is unless item difficulty is controlled.

Keywords: language models, spatial cognition, hierarchical spatial distortion, geographic reasoning, cognitive bias, Turkey province–district hierarchy

1. GİRİŞ

İnsanlar çevrelerine ilişkin mekânsal bilgiyi düz (metrik olarak doğru) bir harita gibi değil, hiyerarşik olarak örgütlenmiş bir yapı içinde saklar (Stevens ve Coupe, 1978; Hirtle ve Jonides, 1985; McNamara 1986). Bu örgütlenme verimlidir. Ancak alt düzey birimlerin konumu doğrudan hatırlanmadığında, üst düzey birime ait bilgi bir vekil (proxy) olarak kullanılır ve sistematik hatalar ortaya çıkar. Stevens ve Coupe'nin (1978) klasik örneğinde katılımcıların çoğu, Kaliforniya genel olarak Nevada'nın batısında olduğu için San Diego'yu Reno'dan daha batıda sanmıştır. Oysa San Diego gerçekte Reno'nun doğusundadır. Üst düzey birimlerin (eyaletlerin) göreli konumu, alt düzey birimlerin

(şehirlerin) konumuna ilişkin yargıyı kendine doğru "çeker". Bilişsel haritalar yalnızca eksik değil, öngörülebilir biçimde yanlıdır. Bu metinde yanılgı, üst düzey bilginin alt düzey yargıyı yanlış yöne çektiği olguyu ve deney tasarımındaki koşul adını karşılamaktadır. Yanlılık ise bu olgunun ölçülen sistematik ve yönlü bileşenidir.

Büyük dil modelleri (BDM) ve bunların yerel donanımda çalıştırılabilen karşılığı olan küçük dil modelleri (KDM), coğrafi bilgilerini açık bir harita temsilinden değil eğitim derlemlerindeki metinlerden örtük olarak edinir. Bu metinlerde yer adları çoğunlukla idari hiyerarşi ve göreli konum ifadeleriyle birlikte geçer. Modellerin coğrafi temsillerinin de benzer bir hiyerarşik yapıyı ve ona eşlik eden yanlılıkları taşıyıp taşımadığı, hem coğrafi bilgi sistemleri (CBS) bağlamında dil modeli temelli araçların güvenilirlik sınırlarını belirler, hem de mekânsal bilginin nasıl içselleştirildiğine dair bilişsel-bilimsel bir pencere açar.

Bu sorunun doğrudan öncülü, bu çalışmanın yazarının da ortak yazarları arasında bulunduğu Fulman vd.'nin (2024) çalışmasıdır. Yazarlar, ABD şehirleri arasındaki ara-yön (intercardinal) ilişkilerini soran, yedisi hiyerarşik yanlılığı tetikleyen ve yedisi kontrol amaçlı 14 maddelik bir kıyaslama kümesi (benchmark) tasarlamıştır. GPT-4 genel olarak %55.3 doğruluk göstermiştir. Yanlılık içeren sorularda doğruluğu %32.9'a düşerken yanlılık içermeyen sorularda %85.7'de kalmıştır. Yazarlar, kümenin ABD'nin büyük şehirleriyle sınırlı olmasını açık bir sınırlılık saymış, dil dâhil kültürel ve bağlamsal etkenleri gelecek çalışmalara bırakmıştır. Elle hazırlanmış 14 soru da kapsamı sınırlamaktadır.

Bu çalışma söz konusu öncülü dört yönde genişletir: (i) koşul ve yön bakımından dengeli, algoritmik olarak üretilen 308 çiftlik bir örneklem; (ii) çevrimiçi metinlerde daha seyrek temsil edilen Türkiye il–ilçe hiyerarşisi; (iii) Türkçe ile İngilizce karşılaştırması ve Türkçeye ince ayarın sınanması; (iv) koordinat kestirimi üzerinden yanılgının geometrik mekanizmasını (il merkezine doğru çekim) ölçen ikinci bir görev. Değerlendirme, öncül çalışmadaki üç modele karşılık bir öncü model ile aile ve ölçek eksenlerinde çok sayıda yerel KDM'yi kapsar.

İnceleme yerel çalıştırılabilir KDM'lere odaklanmaktadır. Tek bir öncü model (GPT-5.4) yalnızca üst referans (tavan) sağlamak için değerlendirmeye katılmıştır. Veri gizliliği, maliyet ve çevrimdışı çalışabilme gereksinimleri KDM'leri pek çok uygulama bağlamında öne çıkarmaktadır (Lu vd., 2024; Wang vd., 2024). Otomatik harita üretimi, coğrafi soru-yanıt ve konum çıkarımı gibi görevlerde sistematik mekânsal yanlılıklar, yanlış bilgi üretimi ve bölgesel temsil adaletsizliği gibi etik açıdan kritik sonuçlar doğurabilir (Gallegos vd., 2023). Türkiye'nin il–ilçe idari hiyerarşisi bu ölçüm için doğal bir zemindir. İl merkezleri üst düzey, ilçe merkezleri alt düzey birimlerdir ve aralarındaki göreli konum çelişkileri Stevens–Coupe paradigmasını yeniden kurmaya elverişlidir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Mekânsal bilginin zihinsel temsillerinin metrik olarak doğru olmadığı bilişsel psikolojide iyi belgelenmiştir. Stevens ve Coupe (1978), katılımcıların alt düzey konumları üst düzey birimlerin göreli konumuna doğru kaydırdığını ortaya koymuştur. Hirtle ve Jonides (1985) öğelerin kavramsal kümeler hâlinde gruplandığını ve küme içi ilişkilerin çarpıtıldığını göstermiş; Wilton (1979), Maki (1981) ve McNamara (1986) mekânsal ilişkilerin kategorik ve hiyerarşik düzeyler üzerinden geri çağrıldığını bulmuş; Huttenlocher vd. (1991) yargının belirsizlik arttıkça kategori prototipine doğru ağırlıklandığını modellemiştir. Tversky (1992) bu bozulmaları hiyerarşik organizasyon, hizalama ve döndürme yanlılıkları çerçevesinde toparlamıştır. Ortak çıkarım, mekânsal yargının üst düzey bir çerçeveye doğru çekildiği ve bu çekimin nicel olarak öngörülebilir olduğudur.

Dil modellerinin coğrafi bilgi taşıdığına ve sınırlı düzeyde mekânsal muhakeme yapabildiğine dair hızla büyüyen bir yazın vardır: Roberts vd. (2023) GPT-4'ün dünya coğrafyasını nasıl temsil ettiğini, Cohn (2023) niteliksel mekânsal muhakemeyi (RCC-8), Ji ve Gao (2023) geometri ve mekânsal ilişkilerin metinsel betimlerini değerlendirmiştir. Uygulama tarafında Li ve Ning (2023) ile Zhang vd. (2023) CBS iş akışlarını otonom yürüten sistemler önermiş; Memduhoğlu vd. (2024) ve Memduhoğlu (2025) dil modellerinin coğrafi anlam bilgisini bina işlevi sınıflandırmasında ve kartografik tasarımda kullanmıştır. Bu çalışmalar ortak olarak, modellerin coğrafi olguları çağırmada görece güçlü, kesin metrik hesaplama ve soyut ilişki çıkarımında zayıf olduğunu bildirir. Modeller insan ürünü metinlerden öğrendiğinden insan karar verme yazınından bilinen bilişsel yanlılıkları da yansıtabilir (Jones ve Steinhardt, 2022; Gallegos vd., 2023); Berglund vd. (2023) "A, B'dir" ilişkisinin tersini kuramamayı, Bender vd. (2021) biçimsel örüntülerin anlama olmaksızın yinelenmesini tartışmıştır. Hiyerarşik mekânsal yanılgı bu ailenin mekânsal-coğrafi örneğidir. Fulman vd. (2024) yanılgıyı ABD şehirlerinde göstermiştir. Ancak özgül bir idari il–ilçe hiyerarşisi, Türkçe dil bağlamı, ölçek basamakları ve geometrik çekim mekanizması üzerinden dengeli ve algoritmik bir çift tasarımıyla ölçen bir çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışma ayrıca mekânsal muhakemeyi mutlak doğruluk açısından değil sistematik yanlılık yapısı açısından ele alır.

3. YÖNTEM

Çalışma tasarımı, öncü ve yerel modellerin aynı koşullar altında karşılaştırılabilmesi için tümüyle algoritmik, deterministik ve yeniden üretilebilir biçimde kurgulanmıştır. Tüm geometrik hesaplar EPSG:4326 (WGS84) üzerinde, jeodezik olarak yapılmıştır.

3.1. Veri

İl ve ilçe merkez koordinatları açık kaynaklı GeoNames veri tabanından edinilmiştir (GeoNames 2026). İl merkezleri PPLA, ilçe merkezleri PPLA2, başkent Ankara ise PPLC koduyla seçilerek 81 ilin tamamı ve 836 ilçe kapsanmıştır. Bu sayı, güncel idari bölünüşteki ilçe sayısının altındadır. Başlıca nedeni, büyükşehirlerin merkez ve kentsel ilçelerinin kaynakta ayrı düğümler yerine ana kent düğümüne katılmış olmasıdır (İstanbul için 8, İzmir için 20 ilçe merkezi). Her iki düzeyde de yerleşimin idari merkez noktası kullanılmıştır. İlin ya da ilçenin alansal geometrik merkezi (centroid) hesaba katılmamıştır. Üç ilin kaydı il adıyla değil merkez kent adıyla (Adapazarı, Antakya, İzmit), İstanbul ise noktasız I ile geçmektedir. İstemlerde kaynaktaki yazımlar korunmuştur.

3.2. Görev A: Yön Soruları ve Çift Üretimi

Görev A'da, farklı illere bağlı iki ilçe arasındaki göreli yön sorulmuştur. Çiftler algoritmik olarak iki sınıfa ayrılmıştır:

Kontrol çiftleri: İlçelerin ilgili eksendeki (enlem ya da boylam) gerçek sıralaması ile bağlı oldukları il merkezlerinin sıralaması aynı yöndedir. Üst düzey (il) bilgisi doğru cevaba işaret eder.

Yanılgı potansiyelli çiftler: İlçelerin gerçek sıralaması ile il merkezlerinin sıralaması ters yöndedir. Üst düzey bilgi yanlış cevaba işaret eder. İnsan bilişindeki hiyerarşik çekim bu çiftlerde hataya yol açmalıdır.

Örneklem 154 yanılgı potansiyelli ve 154 kontrol çiftinden oluşmaktadır (toplam 308 çift). Çiftler eksen (enlem/boylam) ve sorulan yön (kuzey/güney/doğu/batı) bakımından dengelidir. Aynı ile bağlı iki ilçe çift olarak seçilmemiştir. Bu 308 çift, toplam 427 benzersiz ilçeyi kapsamıştır.

Örnek bir yanılgı potansiyelli çift, "Hadim (Konya) mı, Akseki (Antalya) mı daha kuzeydedir?" sorusudur. Konya il merkezi, Antalya il merkezinin belirgin biçimde kuzeyinde yer alır. Bu nedenle üst düzey bilgi "Hadim" yanıtına işaret eder. Oysa ilçe düzeyinde Akseki, Hadim'den biraz daha kuzeydedir ve doğru yanıt Akseki'dir (Şekil 1a). Kontrol çiftlerinde ise iki düzeyin sıralaması çakışır ve üst düzey bilgi doğru yanıta yönlendirir.

Tasarımın yapısal bir sonucu vurgulanmalıdır. İl sıralamasının ilçe sıralamasıyla çelişebilmesi için iki ilçenin ilgili eksende birbirine yakın olması gerekir. Dolayısıyla yanılgı çiftleri, kontrol çiftlerine göre kaçınılmaz biçimde daha dar ayrımlıdır. İlçeler arası eksen farkı yanılgı çiftlerinde ortalama 0.36° ve medyan 0.28° iken, kontrol çiftlerinde ortalama 3.70° ve medyan 2.69°'dir. Bu asimetri Stevens–Coupe paradigmasının doğasında vardır. Ancak koşullar arası doğruluk farkının ne kadarının hiyerarşik çekimden, ne kadarının salt ayırt etme zorluğundan geldiği sorusunu doğurur. Çalışma bu iki açıklamayı Bölüm 3.6'da tanımlanan zorluk denetimiyle ayırmaktadır.

Modele gönderilen istemler (prompt) iki dilde şu biçimdedir:

Hangisi daha {yön}dedir? Açıklama yapmadan sadece ilçe adını yaz: {ilçe1} ({il1}) mi, {ilçe2} ({il2}) mi?

Which one is further {direction}? Write only the district name, no explanation: {ilçe1} ({il1}) or {ilçe2} ({il2})?

İlçe adının yanında bağlı olduğu ilin verilmesi bilinçli bir tasarım kararıdır. Stevens–Coupe paradigması, üst düzey birim bilindiğinde alt düzey yargının ondan etkilenip etkilenmediğini ölçer ve öncül çalışmada da (Fulman vd., 2024) şehir adları eyaletleriyle birlikte verilmiştir. İl adının gizlendiği bir koşul farklı bir soruyu (hiyerarşinin kendiliğinden çağrılıp çağrılmadığını) ölçer ve bu örneklemde ölçüm geçerliliğini zedelerdi. 836 ilçe kaydında 28 ilçe adı birden çok ilde yinelenmektedir. Örneklemdeki 427 ilçenin 28'i (%6.6) ve 308 çiftin 34'ü (%11.0) bu adlardan birini taşımaktadır (ör. Ayvacık, Ortaköy, Kale). İl adı olmadan bu maddelerde düşen doğruluğun yanlılığın azalmasından mı sorunun yanıtlanamaz hâle gelmesinden mi kaynaklandığı ayırt edilemezdi. Her çift, her iki dilde de sorulmuştur. Dil başına 5 tekrar yapılmıştır (sıcaklık = 1.0). Çift sırası ile şıkların sunum sırası, tekrarlar arasında sabit tohum değeriyle (seed) rastgele değiştirilmiştir. Böylece model başına Görev A için 308 çift × 2 dil × 5 tekrar = 3.080 sorgu üretilmiştir.

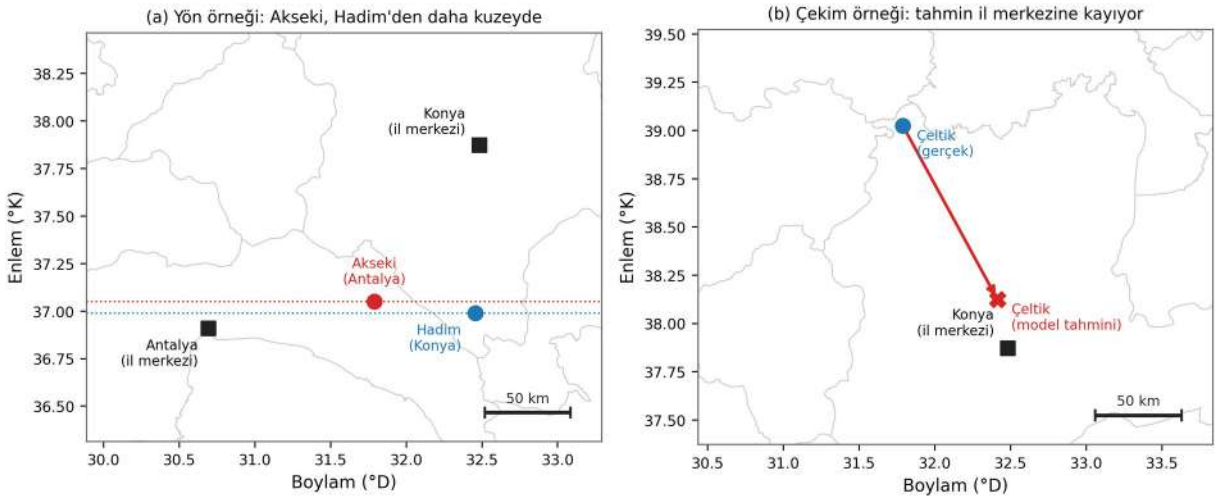
3.3. Görev B: Koordinat Kestirimi ve Çekim Mekanizması

Görev B, yanılgının yalnızca davranışsal düzeyde değil, geometrik mekanizma düzeyinde de incelenmesini sağlamıştır. Görev A'da geçen 427 benzersiz ilçenin her biri için, yalnızca Türkçe ve 3 tekrar olmak üzere koordinat kestirimi istenmiştir:

{ilçe} ({il}) ilçe merkezinin enlem ve boylamını ondalık derece olarak ver. Sadece 'enlem, boylam' yaz.

Her ilçe için hata vektörü, kestirilen koordinat ile gerçek koordinat arasındaki fark olarak hesaplanmıştır. Bu vektörün il merkezi yönündeki bileşeni (çekim skoru) jeodezik olarak ölçülmüştür. Pozitif değer, kestirimin gerçek konuma kıyasla il merkezine doğru kaydığını gösterir. Model başına Görev B için 427 ilçe × 3 tekrar = 1.281 sorgu üretilmiştir. Çekim skorlarının sıfırdan anlamlı biçimde farklı olup olmadığı ve Görev A'daki ilçe düzeyi yanılgı oranıyla ilişkisi sınanmıştır.

Örnek olarak Çeltik (Konya) ilçesi düşünülebilir. Bu ilçe, Konya il merkezine yaklaşık 142 km uzaklıktadır. Buna karşın modellerin ortalama kestirimi, gerçek konumu il merkezine doğru yaklaşık 113 km kaydırmıştır. Böyle bir kayma, çekim skorunu pozitif yapan tipik bir örnektir (Şekil 1b).



Şekil 1. Çalışmadaki örnek çiftlerin konumu. (a) Yön görevi: Konya il merkezi, Antalya il merkezinin kuzeyinde olmasına rağmen Akseki (Antalya) ilçesi, Hadim (Konya) ilçesinden biraz daha kuzeydedir; kesik çizgiler ilçe enlemlerini gösterir. (b) Koordinat görevi: Çeltik (Konya) ilçesinin gerçek konumu, modellerin ortalama kestirimi ve il merkezi; ok, kestirimin il merkezine doğru çekilişini gösterir. Kareler il merkezlerini, daireler ilçelerin gerçek konumunu, çarpı model kestirimini, açık gri çizgiler il sınırlarını gösterir.

3.4. Modeller

Değerlendirme, bir öncü referans modeli ile yerel olarak çalıştırılabilen KDM'leri kapsamıştır. Tüm modeller aynı protokol altında değerlendirilmiştir: örneksiz (zero-shot), akıl yürütme (reasoning)/düşünme kapalı, sıcaklık = 1.0 ve azami token sayısı Görev A için 16, Görev B için 30. Öncü model OpenRouter üzerinden, yerel modeller ise Ollama 0.32.14 ile ve paketin varsayılan 4 bit sürümüyle (Q4_K_M) çalıştırılmıştır. Bu, tüketici donanımında çalıştırma senaryosuna karşılık gelir. Sıcaklık, modelin çıktı dağılımından örnekleme yapılabilmesi için 1.0'da tutulmuştur. Yanılgı, tek bir en olası yanıtla değil yanlış seçeneğe düşen olasılık payıyla ölçülmektedir. Sıcaklık 0 ile yapılan koşularda model her tekrarda aynı yanıtı vereceğinden model içi değişkenlik ölçülemezdi. Yerel koşular tek bir iş istasyonunda (NVIDIA GeForce RTX 5060 Ti, 16 GB VRAM), tek Ollama örneği üzerinde sıralı olarak, 10–16 Haziran 2026 tarihleri arasında yürütülmüştür. Değerlendirilen modeller, indirilen sürüm kimlikleriyle birlikte Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Değerlendirilen modeller ve indirilen sürümler. Yerel modeller Ollama etiketiyle, öncü model OpenRouter kimliğiyle tanımlanmıştır. Parametre sayıları paketin bildirdiği değerlerdir.

Model	Rol	Sürüm kimliği	Parametre
GPT-5.4	Öncü (tavan referansı)	openai/gpt-5.4	Açıklanmadı
Qwen 3.5 2B	Ölçek basamağı	qwen3.5:2b	2 B
Qwen 3.5 4B	Ölçek basamağı	qwen3.5:4b	4 B
Qwen 3.5 9B	Ölçek basamağı	qwen3.5:9b	9 B
Gemma 4 E2B	Ölçek basamağı	gemma4:e2b	2 B
Gemma 4 E4B	Ölçek basamağı	gemma4:e4b	4 B
Gemma 4 12B	Ölçek basamağı	gemma4:12b	12 B
Mistral Small 3.2	Aileler arası	mistral-small3.2	24 B
Phi-4	Aileler arası	phi4	14 B
Granite 4.1 8B	Aileler arası	granite4.1:8b	8 B
Llama 3.1 8B	Dil etkisi (taban)	llama3.1:8b	8 B
Turkish-Llama 8B	Dil etkisi (TR ince ayar)	yerel derleme, COSMOS GGUF	8 B

Toplam 12 model değerlendirilmiştir (bir öncü model ve on bir yerel KDM). Ölçek etkisi her iki aile için 2B–12B aralığında ele alınmıştır. Model ayrıntıları için teknik raporlar (Gemma Team 2026; Abdin vd., 2024; Grattafiori vd., 2024) ile yayımcıların model kartlarına (Qwen Team 2026; IBM Granite Team 2026; Mistral AI 2025; COSMOS 2024) bakılabilir. Yerel modeller Çizelge 1'deki etiketlerle Ollama model kitaplığından (Ollama 2026), öncü model ise OpenRouter üzerinden (OpenRouter 2026) kullanılmıştır. Turkish-Llama, Yıldız Teknik Üniversitesi COSMOS ekibinin Llama 3.1 8B tabanlı Türkçe ince ayarlı sürümünün GGUF paketinden yerel olarak derlenmiştir.

3.5. Koşu Protokolü ve Cevap Ayrıştırma

Örneksiz ve akıl yürütme kapalı koşulunun üç gerekçesi vardır. Ölçüm hedefi, modelin parametrik olarak taşıdığı mekânsal temsildir. İnsan katılımcılara da tek seferlik ve hesapsız yargı sorulur (Stevens ve Coupe, 1978). Açık akıl

yürütme adımları görevi dönüştürür. Model koordinatları anımsayıp farkı yazılı hesapladığında ölçülen şey hiyerarşik temsil değil aritmetik işlemdir ve incelenen yanlılık maskelenir. Son olarak tüketici donanımında çalışan yerel modellerde token bütçesi ve gecikme nedeniyle akıl yürütme çoğunlukla kapalı kullanılır. Buna karşılık bulgular, akıl yürütme açıkken yanılgının ne ölçüde süreceği konusunda bilgi vermez (Bölüm 5). Her yanıt, ham metin ve metaverisiyle birlikte anında diske yazılmıştır.

Serbest-metin yanıtları kurala dayalı bir ayrıştırıcıyla puanlanmıştır. Türkçe büyük/küçük harf dönüşümünün yol açtığı hatalar (İ→i, I→ı) özel olarak ele alınmış, modeller Türkçe karakter kullanmadan yazabildiği için yedek olarak ASCII karşılıklarına indirgeme uygulanmıştır. İlçe adları bulanık eşleştirmeyle (kısmi dizgi benzerliği, eşik 85) tanınmıştır. Hiçbir adla eşleşmeyen ya da her iki ilçe adını da içeren yanıtlar "geçersiz" sayılmış, hiçbir koşulda doğruya yuvarlanmamıştır.

3.6. İstatistiksel Analiz

Doğruluk, model × koşul × dil kırılımında %95 Wilson güven aralıklarıyla raporlanmıştır. Wilson aralığı, uçlara yakın oranlarda olağan simetrik yaklaşımdan daha güvenilirdir. Temel etki ölçüsü, kontrol ile yanılgı koşulu arasındaki doğruluk farkıdır. Bu fark için oranlar farkının %95 güven aralığı (GA) verilmiş, anlamlılık ki-kare bağımsızlık sınamasıyla değerlendirilmiştir. Bir dildeki model kümesi tek sınama ailesi sayılmış ve çoklu karşılaştırma için p değerlerine Holm-Bonferroni düzeltmesi uygulanmıştır. Bu düzeltme, çok sayıda sınama yapıldığında rastlantı eseri anlamlı çıkan sonuçları sınırlamak için p değerlerini sıralar ve her birini giderek gevşeyen bir eşikle karşılaştırır.

Aynı çift beş kez sorulduğundan yanıtlar bağımsız değildir, ancak karşılaştırma çift düzeyinde kümelenmiş standart hatalarla yinelendiğinde anlamlılık örüntüsü değişmemiştir.

Bölüm 3.2'deki zorluk asimetrisi tek bir denetimle ele alınmıştır. Buradaki zorluk, çiftin sorulan eksendeki gerçek farkıdır; fark küçüldükçe iki ilçeyi ayırt etmek güçleşir. Kontrol çiftleri, yanılgı çiftlerinin eksen farkı aralığına (0.05°–1.45°) daraltılarak zorluk bakımından eşleştirilmiş bir altküme kurulmuş ve koşul karşılaştırması bu altkümede yinelenmiştir. Böylece iki koşul, ilçeler arası ayrımın benzer olduğu çiftler üzerinden karşılaştırılmaktadır. Metnin devamında bu küme kısaca eşleştirilmiş altküme olarak anılmaktadır.

Çekim analizinde hata vektörünün il merkezi yönündeki jeodezik izdüşümü, sıfırdan farklılık bakımından t-sınamasıyla değerlendirilmiştir. Metinde verilen t değeri bu sınamanın istatistiğidir; büyüklüğü, ortalamanın sıfırdan uzaklığını ölçüm belirsizliğine oranlar. Aynı izdüşümün Görev A yanılgı hata oranıyla ilişkisi Pearson korelasyonuyla ölçülmüştür.

Çekimin gerçekten ilçenin bağlı olduğu il merkezine yönelip yönelmediği iki sahte (plasebo) hedefle denetlenmiştir. Kenardaki noktaları genel olarak içeri kaydıran bir model de il merkezine izdüşümde pozitif skor üretir; iki açıklama ancak karşılaştırmayla ayrılır. Birinci sahte hedef, örneklenen 427 ilçe merkezinin ağırlık merkezidir (ülke düzeyinde "içeri çekme"). İkincisi, iller rastgele yeniden atanarak her ilçeye verilen başka bir ilin merkezidir: uzaklık dağılımı benzer, hiyerarşi ise yanlıştır. Üç izdüşüm eşli t-sınamasıyla karşılaştırılmış, kendi il merkezine izdüşümün ikisinden de yüksek olması hiyerarşik çekim ölçütü sayılmıştır.

Ayrıca her model için, kendi Görev B kestirimlerinden hesaplanan yön doğruluğu (türetilmiş doğruluk) aynı çiftlerde doğrudan sorulan doğrulukla karşılaştırılmıştır. Bu ölçeğin iki ucu sabittir. Gerçek koordinatlarla yanıtlamak her iki koşulda 1.00, il merkezleriyle yanıtlamak ise koşulların tanımı gereği kontrolde 1.00 ve yanılgıda 0.00 verir.

4. BULGULAR

Bulgular, Türkçe Görev A sonuçları temel alınarak sunulmuş, İngilizce sonuçlar dil etkisi bağlamında (4.3) karşılaştırılmıştır. Tüm doğruluk değerleri geçersiz yanıtlar dışlanarak hesaplanmıştır. Görev A'da geçersiz oranı tüm modellerde eşik değerin (%15) altında kalmıştır (en yüksek: Qwen 3.5 2B, Türkçe, ≈%12.1).

4.1. Hiyerarşik Yanılgı Etkisi

Ham karşılaştırmada modellerin çoğu, kontrol çiftlerinde yanılgı çiftlerine kıyasla anlamlı biçimde daha yüksek doğruluk göstermiştir (Çizelge 2, Şekil 2). Türkçede fark en yüksek GPT-5.4'te (kontrol 0.88, yanılgı 0.67; +0.21, %95 GA 0.17–0.25) ve en büyük yerel model Mistral Small 3.2'de (24B; 0.75 / 0.47; +0.28, %95 GA 0.23–0.33) ölçülmüştür. On iki modelden onunda fark Holm düzeltmesinden sonra da anlamlıdır. Yöntem bölümünde tanıtılan Hadim (Konya) – Akseki (Antalya) çiftinde doğru yanıt Akseki olmasına karşın modeller bu çifti yalnızca %22 oranında doğru bilmiş, çoğu model üst düzey il bilgisine uyarak "Hadim" demiştir.

Bu değerler, çalışmanın ön çözümlemesinde raporlanan ham farklara karşılık gelmektedir. Ancak ham fark tek başına hiyerarşik çekimin kanıtı sayılamaz. Yanılgı çiftleri tasarım gereği çok daha dar ayrımlı olduğundan, yanlılık taşımayan ama koordinat bilgisi gürültülü bir model de bu çiftlerde daha düşük başarı gösterirdi (Bölüm 3.2). Hadim ile Akseki arasındaki eksen farkı yalnızca 0.06°'dir (yaklaşık 7 km). Aynı darlıktaki bir kontrol çifti de zordur: Musabeyli (Kilis) ile Akseki (Antalya) arasındaki fark 0.16°'dir ve üst düzey bilgi doğru yanıta işaret etmesine karşın modeller bu çifti yalnızca %18 oranında doğru bilmiştir. Eşleştirilmiş altkümede dört model anlamlı pozitif fark

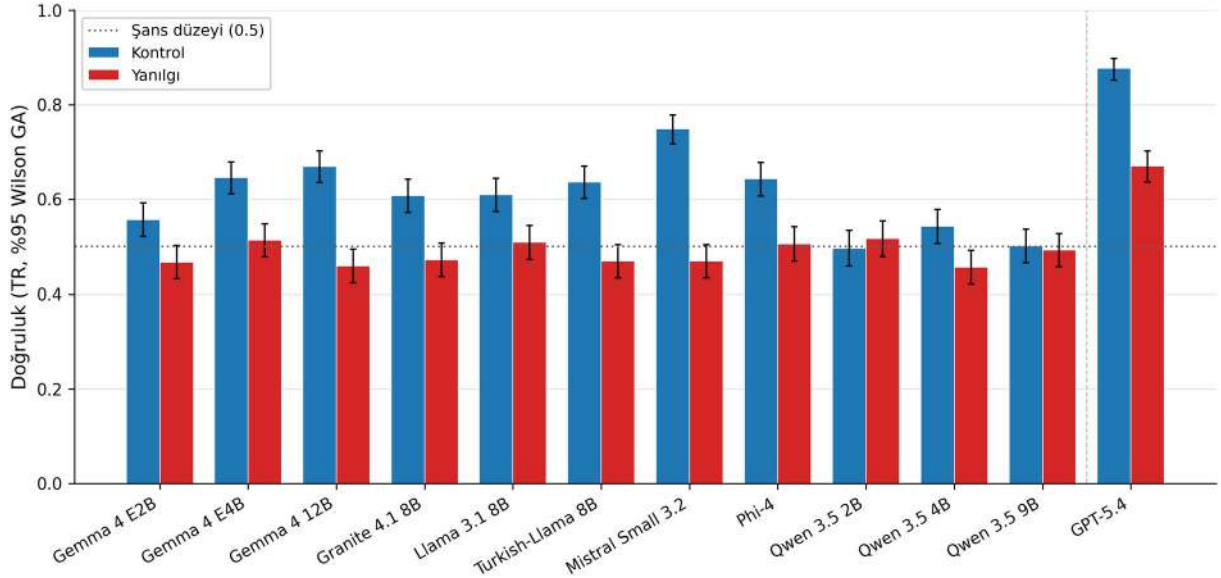
sürdürmektedir: Mistral Small 3.2 (+0.19), Gemma 4 12B (+0.15), Granite 4.1 8B (+0.11) ve Phi-4 (+0.10). Buna karşılık GPT-5.4'ün farkı zorluk eşleştirildiğinde +0.21'den +0.02'ye (p=0.73) düşmektedir. Öncü modelin ham üstünlüğü büyük ölçüde geniş ayrımlı kontrol çiftlerini kolayca bilmesinden kaynaklanmaktadır.

Bulgu şöyle özetlenebilir: ham koşul farkı hiyerarşik yanılgıyı olduğundan büyük göstermektedir, ancak aynı zorluktaki çiftler karşılaştırıldığında orta ve büyük ölçekli birkaç yerel modelde gerçek ve anlamlı bir yanılgı geriye kalmaktadır. Eşleştirilmiş altküme yalnızca 42 kontrol çiftine dayandığından düşük güçlüdür. Bu altkümedeki anlamsızlık, etkinin yokluğu anlamına gelmez.

Çizelge 2. Görev A Türkçe sonuçları, on iki model. n: geçerli yanıt sayısı (model başına 308 çift × 5 tekrar = 1.540 sorgu; kalanı geçersiz yanıttır). Kontrol ve yanılgı sütunları koşul doğruluğunu, fark sütunu kontrol − yanılgı değerini ve %95 güven aralığını verir. p: ki-kare bağımsızlık sınaması, Türkçe model kümesi içinde Holm-Bonferroni düzeltmeli. Eşleşmiş fark: kontrol çiftleri yanılgı çiftlerinin eksen farkı aralığına daraltıldığında elde edilen fark; * bu altkümede p<0.05. Farklar yuvarlanmamış değerlerden hesaplandığından iki sütunun yuvarlanmış farkından 0.01 ayrılabilir. İngilizce sonuçlar Bölüm 4.3'tedir.

Model	n	Kontrol	Yanılgı	Fark (%95 GA)	p	Eşleşmiş fark
Gemma 4 E2B	1.523	0.56	0.47	+0.09 (0.04–0.14)	0.002	+0.06
Gemma 4 E4B	1.540	0.65	0.51	+0.13 (0.08–0.18)	<0.001	+0.05
Gemma 4 12B	1.516	0.67	0.46	+0.21 (0.16–0.26)	<0.001	+0.15*
Granite 4.1 8B	1.500	0.61	0.47	+0.14 (0.09–0.19)	<0.001	+0.11*
Llama 3.1 8B	1.485	0.61	0.51	+0.10 (0.05–0.15)	<0.001	+0.02
Turkish-Llama 8B	1.532	0.64	0.47	+0.17 (0.12–0.22)	<0.001	+0.06
Mistral Small 3.2	1.538	0.75	0.47	+0.28 (0.23–0.33)	<0.001	+0.19*
Phi-4	1.437	0.64	0.51	+0.14 (0.09–0.19)	<0.001	+0.10*
Qwen 3.5 2B	1.353	0.50	0.52	−0.02 (−0.07–0.03)	0.99	−0.04
Qwen 3.5 4B	1.495	0.54	0.46	+0.09 (0.04–0.14)	0.003	+0.06
Qwen 3.5 9B	1.524	0.50	0.49	+0.01 (−0.04–0.06)	0.99	−0.12*
GPT-5.4	1.540	0.88	0.67	+0.21 (0.17–0.25)	<0.001	+0.02

Qwen 3.5 ailesi ham karşılaştırmada da ayrışmaktadır. 9B'de fark yok denecek düzeydedir (+0.01), 2B'de işaret terstir (−0.02) ve yalnızca 4B'de küçük bir fark belirir (+0.09). Aile genelinde doğruluk, koşuldan bağımsız olarak şans düzeyine (0.5) yakın kalmıştır. Eşleştirilmiş altkümede 9B'nin farkı anlamlı biçimde negatiftir (−0.12). Yalnızca 42 kontrol çiftine dayanan bu değer, aile genelindeki şans düzeyi başarımıyla birlikte okunmalıdır.



Şekil 2. Koşul (kontrol ve yanılgı) bazında Türkçe doğruluk, model başına; çubuklar %95 Wilson güven aralığını gösterir. Noktalı çizgi şans düzeyidir (0.5). Değerler ham karşılaştırmaya aittir; zorluk denetimi için Çizelge 2'ye bakınız.

4.2. Ölçek Etkisi

Yanılgı etkisinin model ölçeğiyle ilişkisi iki ailede çarpıcı biçimde farklı çıkmıştır. Gemma 4 ailesinde hem kontrol doğruluğu hem de koşullar arası fark, parametre sayısıyla birlikte tutarlı olarak artmıştır. E2B → E4B → 12B için kontrol doğruluğu 0.56 → 0.65 → 0.67, yanılgı farkı ise +0.09 → +0.13 → +0.21 biçiminde yükselmiştir. Buna

karşılık Qwen 3.5 ailesinde 2B'den 9B'ye kadar ne kontrol doğruluğunda (yaklaşık 0.50–0.55) ne de yanılgı farkında tutarlı bir artış görülmüştür. Etki, ölçekten bağımsız olarak şans düzeyi çevresinde kalmıştır. Dolayısıyla hiyerarşik yanılgı, daha yetkin (büyük) modellerde daha belirgin hâle gelmiştir. Ancak bu eğilim, mimari ve eğitim verisine bağlı olarak ailelere göre değişmiştir. Eşleştirilmiş altkümede de aynı ayrışma sürmekte, Gemma 4 12B anlamlı fark verirken küçük Gemma ve tüm Qwen modelleri vermemektedir (Çizelge 2).

Qwen 3.5'teki bu belirmeyiş mekânsal bilginin yokluğuna indirgenememektedir. Türetilmiş yön doğruluğu Qwen 3.5 9B'de 0.63 iken aynı çiftlerde doğrudan sorulduğunda 0.50'dir (4B'de 0.61'e karşı 0.50). Dahası türetilmiş doğruluk koşullar arasında güçlü biçimde ayrışır. 9B'nin kendi koordinatları kontrol çiftlerinde 0.96, yanılgı çiftlerinde 0.30 doğruluk üretir. Yani il merkezi ikamesine (kontrol 1.00, yanılgı 0.00) belirgin biçimde yaklaşmıştır. Aynı örüntü diğer modellerde de görülür (ör. Gemma 4 12B'de 0.97'ye karşı 0.38). Buna göre Qwen 3.5 hiyerarşik olarak yanlı bir temsil taşımakta, ancak doğrudan karşılaştırmada bu temsile başvurmayıp şans düzeyinde yanıt vermektedir. Görev A'da yanılgının belirmemesi, yanlılığın yokluğunu değil temsile erişilmemesini yansıtmaktadır.

Hiçbir yerel model, GPT-5.4'ün Türkçe genel doğruluğuna (0.77) ulaşamamıştır.

4.3. Dil Etkisi

Genel doğrulukta Türkçe ile İngilizce arasındaki fark çoğu modelde küçük kalmıştır. Ancak hiyerarşik yanılgının şiddeti, birçok modelde Türkçede İngilizceye göre belirgin biçimde daha yüksek olmuştur. Koşullar arası fark Mistral Small 3.2'de Türkçe +0.28 iken İngilizce +0.05, Granite 4.1 8B'de +0.14'e karşı +0.03, Phi-4'te +0.14'e karşı +0.04 düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu üç modelde İngilizce fark Holm düzeltmesinden sonra anlamlı değildir. Bulgu, Türkçe metinlerde Türk illerine ilişkin hiyerarşik çağrışımların görece güçlü kodlanmış olabileceğini düşündürmektedir. İki istisna en yetkin modellerdir. GPT-5.4 (Türkçe +0.21, İngilizce +0.23) ile Gemma 4 12B (Türkçe +0.21, İngilizce +0.33) yanılgıyı İngilizcede en az Türkçedeki kadar güçlü sergilemiştir. Kalan modellerde İngilizce koşul farkı Gemma 4 E2B'de +0.04, Gemma 4 E4B'de +0.10, Llama 3.1 8B'de +0.09, Turkish-Llama 8B'de +0.07, Qwen 3.5 2B'de −0.08, 4B'de +0.01 ve 9B'de −0.02'dir. İngilizcede geçerli yanıt sayısı model başına 1.436 ile 1.540 arasındadır; geçersiz yanıt oranı hiçbir modelde %7'yi aşmamıştır.

Türkçeye ince ayarın etkisi, Turkish-Llama 8B ile temel aldığı Llama 3.1 8B karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İnce ayar, genel Türkçe doğruluğunu pratik olarak değiştirmemiş (0.55'e karşı 0.56), ancak yanılgı farkını artırmıştır (Türkçe +0.17'ye karşı +0.10). Turkish-Llama kontrol çiftlerinde Llama 3.1'den daha iyi (0.64'e karşı 0.61), yanılgı çiftlerinde ise daha kötü sonuç vermiştir (0.47'ye karşı 0.51). Başka bir deyişle Türkçeye ince ayar, modelin il düzeyi bilgisine dayanmasını güçlendirmiştir. Bu bilgi yanlış yöne işaret ettiğinde de hatayı artırmıştır.

4.4. Çekim Mekanizması

Geçerli koordinat üreten modellerde, ilçe koordinat kestirimlerinin hata vektörleri il merkezine doğru sistematik ve anlamlı bir çekim göstermiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). İlçelerin yaklaşık %80'inde, modeller arası ortalama hata vektörü il merkezine doğru yönelmiştir (Şekil 3). Ortalama çekim skoru (pozitif değer, il merkezine doğru kaymayı gösterir) Phi-4'te 43.8 km (t=19.3), Qwen 3.5 9B'de 45.0 km (t=12.0), Gemma 4 12B'de 39.0 km (t=13.1) ve Granite 4.1 8B'de 62.6 km (t=5.4) olarak ölçülmüştür (tümü $p<0.001$). GPT-5.4'te çekim anlamlı olmakla birlikte ihmal edilebilir düzeydedir (ortalama 1.7 km, ortanca 10 m). Bu model ilçe koordinatlarını yüksek doğrulukla bildiğinden çekime konu olacak hata payı küçüktür.

Bu büyüklükler bir referans düzeyine göre okunmalıdır. Örneklenen 427 ilçenin il merkezine ortalama uzaklığı 50.9 km (ortanca 46.0 km) olduğundan, ilçeyi hiç bilmeyip her seferinde il merkezini bildiren bir model yaklaşık 51 km'lik bir skor alırdı. Gözlenen 39–63 km bu referans düzeyiyle aynı mertebededir. Bulgu, ince dereceli bir prototip kayması değil, ilçe düzeyinde bilgi bulunmadığında il merkezine yaslanma olarak yorumlanmalıdır. GPT-5.4'ün 1.7 km'lik skoru, ilçe koordinatı bilindiğinde bu yaslanmanın ortadan kalktığını göstermektedir.

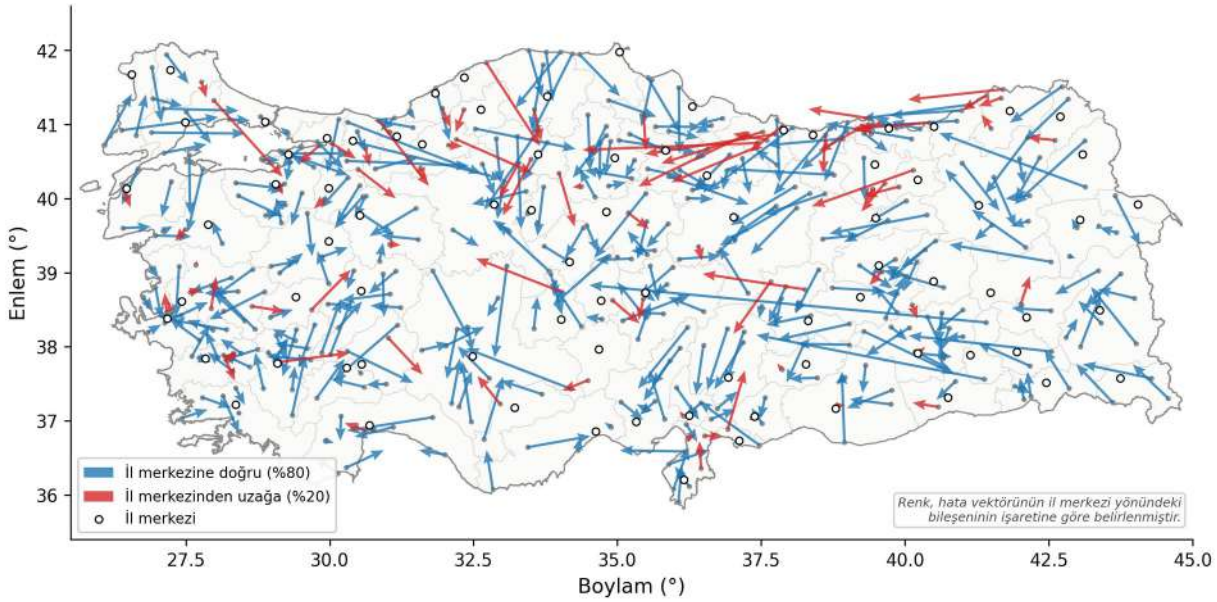
Bölüm 3.6'da tanımlanan iki sahte hedefle yapılan denetimde, geçerli koordinatların tamamına yakınını üreten modellerde kendi il merkezine izdüşüm, hem ilçe merkezlerinin ağırlık merkezine hem de rastgele atanmış başka bir il merkezine izdüşümden yüksektir: Phi-4'te 43.8 km'ye karşı 10.2 ve 10.3 km, Qwen 3.5 9B'de 45.0'a karşı 21.1 ve 7.0 km, Granite 4.1 8B'de 62.6'ya karşı −1.2 ve −25.5 km, Gemma 4 12B'de 39.0'a karşı 24.5 ve 12.1 km (eşli t-sınamasında tümü $p<0.01$). Buna karşılık iki modelde ülke merkezi hedefi kendi il merkezinden daha güçlüdür (Gemma 4 E4B'de 68.4'e karşı 53.3 km, $p=0.22$; Qwen 3.5 4B'de 70.1'e karşı 40.6 km, $p=0.02$). Bu modellerde gözlenen çekimin hiyerarşik değil genel bir merkeze kayma olduğu değerlendirilmelidir. GPT-5.4'te hata payı, iki hedefi ayırt etmeye yetecek kadar büyük değildir (1.7'ye karşı 0.7 km, $p=0.10$).

Bununla birlikte, ilçe düzeyinde çekim skoru ile Görev A yanılgı hata oranı arasında hiçbir modelde anlamlı bir korelasyon bulunamamıştır (tüm Pearson katsayıları sıfıra yakın, $p>0.1$). Yani tahminler il merkezine doğru çekilse de, bu çekimin gücü ilçe bazında yön görevindeki yanılgıyı öngörmemektedir. Bu, iki ölçümün ilişkisiz olduğu anlamına gelmez. Koşul, çekimin büyüklüğüyle değil il merkezleri arasındaki farkın işaretiyle tanımlanır. Nitekim aynı koordinat kestirimleri çift düzeyinde karşılaştırıldığında koşullar arasında büyük bir doğruluk farkı üretmektedir (Bölüm 4.2). Öngörünün ilçe düzeyinde tutmaması, bir ilçenin ne kadar çekildiğinin değil, hangi yöne çekildiğinin belirleyici olmasındandır.

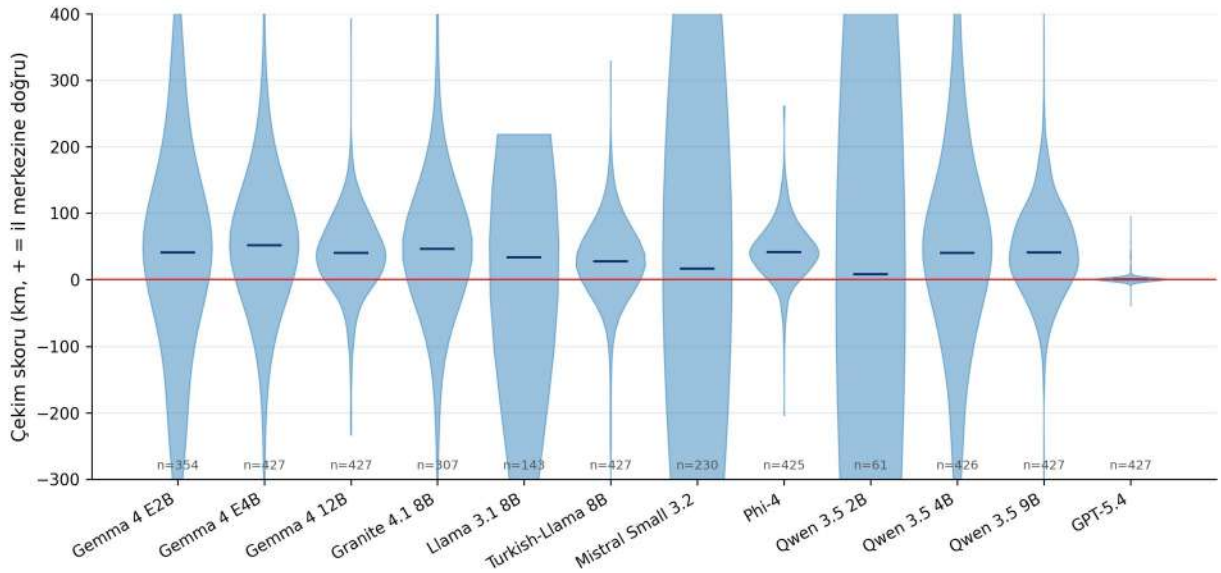
5. TARTIŞMA

Bulgular, hiyerarşik mekânsal yanılgının (Stevens ve Coupe, 1978) dil modellerinin Türkiye il–ilçe hiyerarşisi üzerindeki muhakemesinde de gözlendiğini, ancak etkinin ham koşul karşılaştırmasının gösterdiğinden daha dar olduğunu ortaya koymaktadır. Ham farkın önemli bir bölümü, yanılgı çiftlerinin tasarım gereği çok daha dar ayrımlı olmasından kaynaklanmaktadır. Zorluk eşitlendiğinde etki dört modelde (Mistral Small 3.2, Gemma 4 12B, Granite 4.1 8B, Phi-4) sürmektedir. Öncü model GPT-5.4'te ise kaybolmaktadır. Bu ayrım yalnızca algoritmik ve dengeli bir örneklemle yapılabilmiştir. Çalışmanın katkısı, yanılgıyı yeni bir hiyerarşide yeniden üretmenin ötesinde, ham etkinin ne kadarının gerçekten hiyerarşik olduğunu nicelendirmektir.

Etkinin ayakta kaldığı modellerin orta ve büyük ölçekli yerel modeller olması anlamlıdır. Bu durum, yanılgının düşük yetkinliğin bir belirtisi olmadığını düşündürür. Yanılgı, tersine, coğrafi varlıkları üst düzey kategorilere yeterince güçlü bağlayabilen modellerde ortaya çıkmaktadır. Gemma 4 ailesinde etkinin parametre sayısıyla güçlenmesi bu yorumu desteklemektedir. Qwen 3.5 ailesinin tüm ölçeklerde şans düzeyine yakın kalması ise yanılgının evrensel bir ölçek yasası olmadığını göstermekle birlikte, yanlılığın bu ailede bulunmadığı anlamına gelmemektedir: modelin kendi koordinat kestirimleri güçlü bir hiyerarşik yanlılık taşımakta, buna karşın doğrudan karşılaştırma bu temsile başvurmamaktadır (Bölüm 4.2). Yön görevindeki yanılgı bu nedenle iki koşula bağlıdır: temsilin yanlı olması ve modelin yanıt üretirken o temsile erişmesi.



Şekil 3. İlçe koordinat tahmini hata vektörleri (geçerli tahminlerin model ortalaması). Oklar gerçek konumdan kestirilen konuma yönelir; mavi oklar hatanın il merkezine doğru, kırmızı oklar uzağa yöneldiğini gösterir. Beyaz daireler il merkezlerini, açık gri çokgenler il sınırlarını gösterir.



Şekil 4. Çekim skoru dağılımı (km), model başına; pozitif değer kestirimin il merkezine doğru kaydığını gösterir. Koyu yatay çizgi ortancayı, kırmızı çizgi sıfır (çekim yok) düzeyini gösterir; n, o modelde geçerli koordinat üretilen ilçe sayısıdır. Eksen okunabilirlik için kırpılmıştır.

Dil bulguları, yanılgının birçok modelde Türkçede daha belirgin olması ve Türkçeye ince ayarın (Turkish-Llama) onu artırmasıyla dikkat çekicidir. Hedef dile uyarlama, yerel coğrafyaya ilişkin hiyerarşik çağrışımları güçlendirerek insan benzeri yanlılığı derinleştiriyor olabilir. Ancak bu yorum üç nedenle temkinli tutulmalıdır. Karşılaştırma ham farklara dayanır ve eşleştirilmiş altkümede Turkish-Llama'nın farkı (+0.06) anlamlı değildir. İnce ayar yalnızca dili değil eğitim verisini de değiştirdiğinden, artış Türkçe derlemde il düzeyi bilginin ilçe düzeyinden yoğun olmasından da kaynaklanabilir. İki açıklama bu tasarımla ayrılamaz. Ayrıca Turkish-Llama'nın kontrol doğruluğu taban modelden yüksektir (0.64'e karşı 0.61). Farkın bir bölümü ince ayarın kendisinden değil artan taban yetkinlikten geliyor olabilir. Bulgu bu nedenle tek bir model çiftine dayanan bir gözlem olarak sunulmaktadır.

Mekanizma düzeyinde bulgular, insan mekânsal biliş yazınındaki kategori-düzeltme modeliyle karşılaştırılabilir. Huttenlocher vd. (1991), konum belleğinin iki düzeyde (ince ayrıntılı değer ve kategori) kodlandığını, ince ayrıntılı bilgi belirsizleştikçe yargının kategori prototipine doğru ağırlıklandığını göstermiştir. Görev B'deki yaslanma bu çerçevenin uç bir hâlidir. Ağırlıklandırma sürekli bir kayma üretmek yerine, ilçe düzeyi bilgi bulunmadığında kestirimi doğrudan kategori merkezine taşımaktadır. Çekim büyüklüklerinin il merkezi referans düzeyiyle (ortalama 50.9 km) aynı mertebede olması bunu göstermektedir. Sahte hedef denetimi, ağırlıklandırmanın hedefinin ilçenin bağlı olduğu il olduğunu, genel bir merkeze kayma olmadığını doğrulamaktadır (iki küçük model dışında). Görev A ise kategori bilgisinin ince ayrıntılı bilgiyi bastırdığı ikili karar durumuna karşılık gelir. Çekim skorunun ilçe düzeyinde yön yanılgısıyla ilişkilenmemesi bu okumayla çelişmez. Koşul, çekimin büyüklüğüyle değil yönüyle tanımlanır ve aynı kestirimler çift düzeyinde karşılaştırıldığında koşullar arasında büyük bir doğruluk farkı üretmektedir (Bölüm 4.2).

Sınırlılıklar açıkça belirtilmelidir. En önemlisi, koşul ile ayırt etme zorluğu tasarım gereği iç içe geçmiştir. Eşleştirilmiş altküme yalnızca 42 kontrol çiftine dayandığı için düşük güçlüdür. Etkiyi kesin ayırmak, zorluk bakımından eşleştirilmiş kontrol çiftlerinin tasarım aşamasında üretilmesini gerektirir. Ölçek analizi 2B–12B aralığıyla sınırlıdır. Görev B'de bazı modeller koordinatları farklı biçimlerde ürettiğinden geçerli koordinat sayısı düşmüş (Qwen 3.5 2B'de 61, Llama 3.1 8B'de 143, Mistral Small 3.2'de 230 ilçe) ve bu üç modeldeki negatif skorlar ölçüm gürültüsünü yansıtmaktadır. Güven aralıkları çift başına beş yinelemeyi bağımsız saydığından bir miktar dardır. Veriler tek bir kaynağa dayanmakta ve büyükşehirlerin merkez ilçeleri örnekleme girmemektedir (Bölüm 3.1). Kapsam bakımından üç sınır daha vardır. İstemde il adı verildiğinden bu tasarım, sunulan hiyerarşik bilginin yargıyı çarpıtıp çarpıtmadığını ölçmektedir. Modelin hiyerarşiyi kendiliğinden çağırıp çağırmadığı ölçülmemiştir (Bölüm 3.2). Tüm koşular akıl yürütme kapalı yürütülmüştür. Öncü model tarafı tek bir modelle (GPT-5.4) ve tek bir zaman noktasıyla (Haziran 2026) temsil edildiğinden sonuçlar öncü modeller sınıfına genellenemez.

6. SONUÇ

Bu çalışma, hiyerarşik mekânsal yanılgının dil modellerinin Türkiye il–ilçe hiyerarşisindeki coğrafi muhakemesinde geçerli olup olmadığını, bir öncü model ve on bir yerel KDM üzerinde algoritmik ve dengeli bir çift tasarımıyla ölçmüştür. Ham karşılaştırmada on iki modelin onunda kontrol çiftleri anlamlı biçimde daha yüksek doğruluk üretmiştir. Ancak yanılgı çiftleri tasarım gereği daha dar ayrımlı olduğundan bu farkın önemli bir bölümü ayırt etme

zorluğuyla açıklanmaktadır. Zorluk eşitlendiğinde yanılgı dört yerel modelde (Mistral Small 3.2, Gemma 4 12B, Granite 4.1 8B, Phi-4) sürmüş, GPT-5.4'te kaybolmuştur. Etki Gemma 4 ailesinde ölçekle güçlenmiş, birçok modelde Türkçede İngilizceden belirgin olmuş ve Türkçeye ince ayarla artmıştır. Koordinat görevinde kestirimler il merkezine çekilmiştir. Büyüklük "il merkezini söyle" referans düzeyiyle aynı mertebede kaldığından bulgu, bilgi yokluğunda il merkezine yaslanma olarak yorumlanmıştır ve sahte hedef denetimi bu çekimin çoğu modelde ilçenin bağlı olduğu ile özgü olduğunu göstermiştir. Qwen 3.5'te yanılgının belirmemesi yanlılığın yokluğundan değil, modelin kendi yanlı koordinat temsiline doğrudan karşılaştırmada başvurmamasından kaynaklanmaktadır.

Pratik çıkarım ikilidir: hiyerarşik yanlılık dil modeli temelli coğrafi araçlarda gerçek bir risktir, ancak bu tür kıyaslama kümelerinde raporlanan ham farklar madde zorluğu denetlenmeden yanlılığı olduğundan güçlü gösterebilir. Gelecek çalışmalar zorluk bakımından eşleştirilmiş kontrol çiftlerini tasarım aşamasında üretebilir, il adının gizlendiği bir koşul ekleyebilir ve ölçek basamaklarını daha büyük modellere genişletebilir.

7. TEŞEKKÜR

Bu bildirinin sempozyumda sunumu, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2224-B Yurt İçi Bilimsel Etkinliklere Katılımı Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Deneylerin yürütüldüğü donanım, Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 26082 numaralı proje kapsamında sağlanmıştır. Yazar, öncül çalışmadaki iş birliği için Nir Fulman ve Alexander Zipf'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Abdin, M., Aneja, J., Behl, H., Bubeck, S., Eldan, R., Gunasekar, S., Harrison, M., Hewett, R. J., Javaheripi, M., Kauffmann, P., Lee, J. R., Lee, Y. T., Li, Y., Liu, W., Mendes, C. C. T., Nguyen, A., Price, E., de Rosa, G., Saarikivi, O., Salim, A., Shah, S., Wang, X., Ward, R., Wu, Y., Yu, D., Zhang, C. ve Zhang, Y., 2024. Phi-4 technical report. *arXiv:2412.08905*.

Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A. ve Shmitchell, S., 2021. On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '21)*, Sanal etkinlik, 610–623.

Berglund, L., Tong, M., Kaufmann, M., Balesni, M., Stickland, A. C., Korbak, T. ve Evans, O., 2023. The reversal curse: LLMs trained on "A is B" fail to learn "B is A". *arXiv:2309.12288*.

Cohn, A. G., 2023. An evaluation of ChatGPT-4's qualitative spatial reasoning capabilities in RCC-8. *arXiv:2309.15577*.

COSMOS, 2024. Turkish-Llama-8b-Instruct-v0.1-GGUF model kartı. https://huggingface.co/ytu-ce-cosmos/Turkish-Llama-8b-Instruct-v0.1-GGUF, [Erişim tarihi: 10.06.2026].

Fulman, N., Memduhoğlu, A. ve Zipf, A., 2024. Distortions in judged spatial relations in large language models. *The Professional Geographer*, 76(6): 703–711.

Gallegos, I. O., Rossi, R. A., Barrow, J., Tanjim, M. M., Kim, S., Dernoncourt, F., Yu, T., Zhang, R. ve Ahmed, N. K., 2023. Bias and fairness in large language models: A survey. *arXiv:2309.00770*.

Gemma Team, 2026. Gemma 4 technical report. *arXiv:2607.02770*.

GeoNames, 2026. Geographical database: Turkey (TR.zip). https://download.geonames.org/export/dump/, [Erişim tarihi: 10.06.2026].

Grattafiori, A., Dubey, A., Jauhri, A., Pandey, A., Kadian, A., Al-Dahle, A., Letman, A., Mathur, A., Schelten, A., Vaughan, A. vd., 2024. The Llama 3 herd of models. *arXiv:2407.21783*.

Hirtle, S. C. ve Jonides, J., 1985. Evidence of hierarchies in cognitive maps. *Memory & Cognition*, 13(3): 208–217.

Huttenlocher, J., Hedges, L. V. ve Duncan, S., 1991. Categories and particulars: Prototype effects in estimating spatial location. *Psychological Review*, 98(3): 352–376.

IBM Granite Team, 2026. Granite 4.1 8B model kartı. https://huggingface.co/ibm-granite/granite-4.1-8b, [Erişim tarihi: 02.09.2026].

Ji, Y. ve Gao, S., 2023. Evaluating the effectiveness of large language models in representing textual descriptions of geometry and spatial relations. *Proceedings of the 12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023)*, Leeds, 43:1–43:6.

Jones, E. ve Steinhardt, J., 2022. Capturing failures of large language models via human cognitive biases. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35: 11785–11799.

Li, Z. ve Ning, H., 2023. Autonomous GIS: The next-generation AI-powered GIS. *International Journal of Digital Earth*, 16(2): 4668–4686.

Lu, Z., Li, X., Cai, D., Yi, R., Liu, F., Zhang, X., Lane, N. D. ve Xu, M., 2024. Small language models: Survey, measurements, and insights. *arXiv:2409.15790*.

Maki, R. H., 1981. Categorization and distance effects with spatial linear orders. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7(1): 15–32.

McNamara, T. P., 1986. Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, 18(1): 87–121.

Memduhoğlu, A., Fulman, N. ve Zipf, A., 2024. Enriching building function classification using Large Language Model embeddings of OpenStreetMap Tags. *Earth Science Informatics*, 17: 5403–5418.

Memduhoğlu, A., 2025. Towards AI-assisted mapmaking: Assessing the capabilities of GPT-4o in cartographic design. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1): 35.

Mistral AI, 2025. Mistral-Small-3.2-24B-Instruct-2506 model kartı. https://huggingface.co/mistralai/Mistral-Small-3.2-24B-Instruct-2506, [Erişim tarihi: 02.09.2026].

Ollama, 2026. Model kitaplığı. https://ollama.com/library, [Erişim tarihi: 02.09.2026].

OpenRouter, 2026. GPT-5.4 model sayfası. https://openrouter.ai/openai/gpt-5.4, [Erişim tarihi: 02.09.2026].

Qwen Team, 2026. Qwen3.5 model kartı. https://ollama.com/library/qwen3.5, [Erişim tarihi: 02.09.2026].

Roberts, J., Lüddecke, T., Das, S., Han, K. ve Albanie, S., 2023. GPT4GEO: How a language model sees the world's geography. *arXiv:2306.00020*.

Stevens, A. ve Coupe, P., 1978. Distortions in judged spatial relations. *Cognitive Psychology*, 10(4): 422–437.

Tversky, B., 1992. Distortions in cognitive maps. *Geoforum*, 23(2): 131–138.

Wang, F., Zhang, Z., Zhang, X., Wu, Z., Mo, T., Lu, Q., Wang, W., Li, R., Xu, J., Tang, X., He, Q., Ma, Y., Huang, M. ve Wang, S., 2024. A comprehensive survey of small language models in the era of large language models: Techniques, enhancements, applications, collaboration with LLMs, and trustworthiness. *arXiv:2411.03350*.

Wilton, R. N., 1979. Knowledge of spatial relations: The specification of the information used in making inferences. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31(1): 133–146.

Zhang, Y., Wei, C., Wu, S., He, Z. ve Yu, W., 2023. GeoGPT: Understanding and processing geospatial tasks through an autonomous GPT. *arXiv:2307.07930*.

ARAZİ VE ARSA DÜZENLEMELERİNDE DAĞITIM VE TAHSİS SONUÇLARININ CBS TABANLI KONTROLÜ VE ANALİZİ

İsa TÜTÜNCÜ[1], Volkan YILDIRIM[2], Fatih TERZİ[3], Bura Adem ATASOY[4], Bayram UZUN[5]

[1]Harita Yük. Müh., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, tutuncu.isa61@gmail.com
[2]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, yvolkan@ktu.edu.tr
[3]Arş. Gör. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, fatihterzi@ktu.edu.tr
[4]Arş. Gör. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, bugratasoy@ktu.edu.tr
[5]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, buzun@ktu.edu.tr

ÖZET

Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD), kadastral parsellerin imar planı kararları doğrultusunda yeniden düzenlenmesi ve kentsel gelişme alanlarının oluşturulması açısından önemli bir uygulama aracıdır. AAD kapsamında gerçekleştirilen dağıtım ve tahsis işlemlerinin değerlendirilmesinde, uygulama öncesindeki kadastral parseller ile uygulama sonrasında oluşturulan imar parselleri arasındaki mekânsal ilişkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, dağıtım ve tahsis sonuçlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında bütünleştirilmesine ve parsel bazında kontrol edilmesine yönelik bir yaklaşım ele alınmıştır. Çalışmanın uygulama alanını, Sinop ili Merkez ilçesinde yer alan ve re'sen imar uygulaması tamamlanmış 78.873,72 m² büyüklüğündeki bir düzenleme sahası oluşturmaktadır. Kadastral harita, uygulama imar planı, parselasyon planı ve diğer teknik veriler ile dağıtım cetvelleri, mülkiyet kayıtları ve Düzenleme Ortaklık Payı Oranı (DOPO) hesaplarına ait veriler CBS ortamında ilişkilendirilmiştir. CAD formatındaki kadastral ve parselasyon verileri CBS ortamına aktarılarak sınır çakışmaları, açık uçlar ve poligon boşlukları topolojik kurallarla kontrol edilmiştir. Dağıtım cetvellerinde yer alan malik, pay/paydaş, katılım alanı ve tahsis bilgileri parsel geometrileriyle eşleştirilmiştir. Uygulama öncesi ve sonrası parseller arasında kurulan ilişkiler üzerinden tahsis yönleri, merkezler arası mesafeler ve alan-ağırlıklı merkez kayma (AWCS) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca tahsislerin mümkün olduğunca düzenleme öncesi konumdan, bunun mümkün olmadığı durumlarda ise yakın ve tahsise uygun imar parsellerinden yapılmasına ilişkin durum mekânsal olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, dağıtım cetvellerindeki bilgilerin parsel geometrileriyle birlikte incelenmesine ve kadastral parseller ile tahsis edilen imar parselleri arasındaki ilişkilerin harita üzerinde izlenmesine olanak sağlamıştır. Bu yaklaşımın, AAD uygulamalarında dağıtım ve tahsis sonuçlarının kontrolüne mevcut sayısal verilere ek olarak mekânsal bir değerlendirme boyutu kazandırabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Parsel Bazlı Kontrol, Tahsis Analizi.

ABSTRACT

GIS-BASED CONTROL AND ANALYSIS OF DISTRIBUTION AND ALLOCATION RESULTS IN LAND READJUSTMENT

Land Readjustment (LR) is an important implementation instrument for reorganizing cadastral parcels in accordance with development plan decisions and creating planned urban development areas. The evaluation of distribution and allocation procedures requires consideration of the spatial relationships between cadastral parcels before implementation and zoning parcels created after implementation. This study examines a parcel-based GIS approach for integrating and controlling distribution and allocation results. The study area is a 78,873.72 m² readjustment zone in the Central District of Sinop Province, where an ex officio land readjustment project was completed. Cadastral maps, implementation development plans, subdivision plans, other technical data, distribution tables, ownership records, and development readjustment share ratio (DOPO) calculation records were integrated in a GIS environment. Cadastral and subdivision data in CAD format were transferred to GIS, and boundary overlaps, dangling nodes, and polygon gaps were checked using topological rules. Landowner, shareholding, participation area, and allocation information in the distribution tables were matched with parcel geometries. Based on the relationships established between pre- and post-implementation parcels, allocation directions, centroid-to-centroid distances, and Area-Weighted Centroid Shift (AWCS) values were calculated. Allocation outcomes were also assessed in relation to the regulatory priority of maintaining the pre-readjustment location where possible and using nearby suitable zoning parcels when this was not possible. The results enabled the distribution tables to be examined together with parcel geometries and the relationships between cadastral and allocated zoning parcels to be tracked on maps. The approach may provide an additional spatial assessment dimension for controlling distribution and allocation outcomes in LR applications.

Keywords: Land Readjustment (LR), Geographic Information Systems (GIS), Parcel-Based Control, Allocation Analysis.

1. GİRİŞ

Özellikle gelişmekte olan kentsel alanlarda sosyoekonomik dinamiklerin tetiklediği hızlı nüfus artışı ve bu durumun kentsel gelişim süreçleri üzerinde yarattığı baskı; sağlıklı, düzenli, yeterli donatıya sahip ve altyapısı eksiksiz kent parçalarının oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Söz konusu mekânsal standartların sağlanabilmesi; mevcut yerleşim alanlarının plan kararlarına uygun biçimde yeniden düzenlenmesini ve yol, park, yeşil alan, eğitim tesisi gibi kamusal kullanımların şehre kazandırılmasını gerektirmektedir. Türkiye'de bu mekânsal hedeflerin gerçekleştirilmesinde yasa koyucu tarafından benimsenen öncelikli plan uygulama aracı, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uyarınca yürütülen Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD) uygulamalarıdır (Resmî Gazete, 1985; Uzun vd., 2024). AAD kapsamında, düzensiz kadastral mülkiyet dokusu imar planı kararları doğrultusunda yeniden kurgulanarak yapılaşmaya elverişli imar parsellerine dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm esnasında ihtiyaç duyulan yol, park, yeşil alan ve eğitim tesisi gibi umumi ve kamu hizmet alanları, Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) kesintileri yoluyla karşılanmaktadır (Çelik, 2013; Kalabalık, 2023). Bu yönüyle AAD; plan kararlarının mülkiyet zeminine aktarılmasında, kamu yararı ile mülkiyet hakkı arasında hassas bir denge kurulmasını zorunlu kılan çok boyutlu, teknik ve hukuki bir uygulama sürecidir.

Bu sürecin en hassas ve hukuki ihtilafa en açık aşamalarından birini, düzenlemeye giren kadastral parsellerin uygulama sonrasında oluşan imar parselleriyle ilişkilendirildiği dağıtım ve tahsis işlemleri oluşturmaktadır. Mevcut uygulamalarda parselasyon planları, özet denge cetvelleri ve mülkiyet raporları sayısal ortamda üretilmektedir. Ancak denetim süreçlerinin salt çizim odaklı Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımlarıyla yürütülmesi; parsel geometrileri ile mülkiyet özniteliklerinin bütünleştirilmesini engellemekte ve topolojik-mekânsal sorgulamaları sınırlandırmaktadır (Tecim, 2008; Çabuk vd., 2018; Yomralıoğlu, 1993). Bu sınırlılık, uygulama öncesi ve sonrası parseller arasındaki konumsal hareketliliğin (sirkülasyon), hissedarlık değişimlerinin ve Yönetmeliğin 17. maddesinde düzenlenen "yerinden veya en yakın yerden tahsis" ilkesine dayalı konumsal önceliklerin aynı veri yapısı içinde bütüncül olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir (Resmî Gazete, 2020).

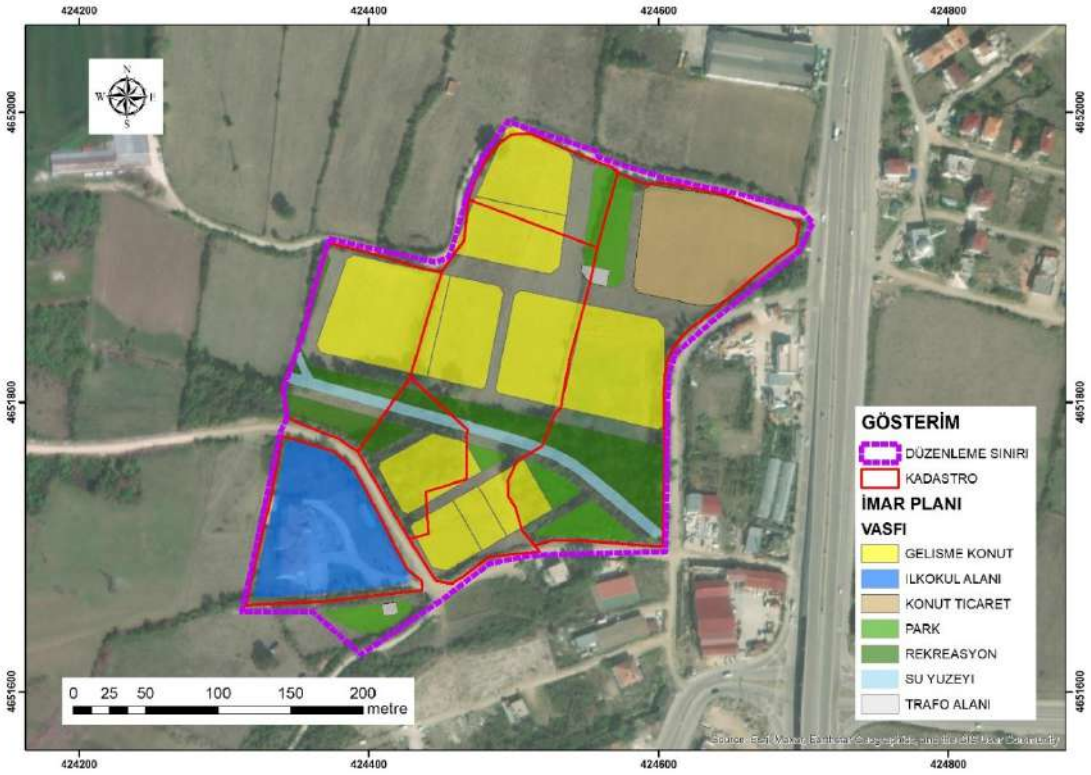
Nitekim geleneksel yöntemlerden kaynaklanan denetim zafiyetleri ve dağıtım ve tahsis aşamasındaki teknik hatalar, parselasyon planlarının hukuki denetiminde önemli bir uyuşmazlık alanı oluşturabilmektedir. Uzun vd. (2022), parselasyon, dağıtım ve tahsis aşamalarındaki uygulayıcı kaynaklı hataların idari yargıda doğrudan iptal nedenleri arasında yer alabildiğini ve güncel mekânsal verilerin karar sürecini destekleyebileceğini göstermektedir. Bu durum, dağıtım sonuçlarının cetvellerdeki matematiksel/sayısal alan dengelerinin yanı sıra parsellerin uygulama öncesi ve sonrası konumlarıyla birlikte mekânsal olarak kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır.

AAD literatüründe değer eşitliği, değer esaslı ve imar hakkı esaslı dağıtım yaklaşımları önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır (Çağdaş, 2019; Uzun vd., 2024). Ayrıca, düzenleme sınırının belirlenmesi ve uygulama başarısının; düzenleme sınırı, parsel konum değişimi, DOP hesabı ve uygun imar parseli üretimi gibi ölçütler üzerinden değerlendirilmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır (Çolak ve Memişoğlu, 2021; Çelik, 2023; Aslan ve Yavuz Özalp, 2026). CBS'nin AAD süreçlerinde kullanımı daha eski çalışmalara kadar uzanmakla birlikte (Yomralıoğlu, 1993), incelenen çalışmalar kapsamında; dağıtım cetvellerindeki hak sahipliği ve tahsis bilgilerinin parsel geometrileriyle ilişkisel olarak bütünleştirildiği, tahsis yönü, merkezler arası mesafe ve alan ağırlıklı konumsal hareketliliğin birlikte ele alındığı parsel bazlı bütüncül kontrol yaklaşımlarının oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir.

Tespit edilen bu yöntemsel eksiklikten hareketle, bu çalışmanın amacı; 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uyarınca gerçekleştirilen AAD uygulamalarında dağıtım ve tahsis sonuçlarını grafik ve sözel verilerle birlikte CBS ortamında ilişkilendirmek, parsel bazlı mekânsal sorgulamalar ve sirkülasyon analizleriyle kontrol etmek ve elde edilen sonuçları harita tabanlı olarak değerlendiren bir yaklaşımı pilot saha üzerinde incelemektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada önerilen CBS tabanlı denetim yaklaşımının uygulanabilirliğini sınamak amacıyla; Sinop ili Merkez ilçesi sınırları içerisinde yer alan, belediyenin 5 yıllık imar programı kapsamında re'sen imar uygulaması tamamlanmış 78.873,72 m² büyüklüğündeki bir düzenleme sahası pilot alan olarak seçilmiştir (Şekil 1). Pilot bölge, yürürlükteki 1/1000 ölçekli revizyon uygulama imar planı kararlarına göre; Ayrık Nizam 2 Kat (A-2), TAKS: 0,30 ve KAKS (Emsal): 0,60 yapılaşma koşullarına sahip gelişme konut alanları ile 3 katlı ve E: 0,90 koşullu ticaret-konut alanlarını barındırmaktadır. Sahada ayrıca ilkokul (E: 1,00, Yençok: 12,50 m), trafo, park, rekreasyon alanı, su yüzeyi ve imar yollarından oluşan geniş bir umumi ve kamu hizmet donatısı yer almaktadır.



Şekil 1. Pilot bölge çalışması kapsamında düzenleme sahası (Tütüncü, 2024)

Uygulamanın denetim altyapısının kurgulanmasında; konumsal (grafik) ve sözel veriler çoklu kurumsal kaynaklardan temin edilerek ortak bir mekânsal veri tabanında bütünleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan grafik veriler; ITRF96 datumu ve 3 derecelik Transverse Mercator (TM) projeksiyon sisteminde (DOM: 36°) üretilmiş kadastro haritası, 1/5000 ölçekli Nazım İmar Planı (NİP), 1/1000 ölçekli Revizyon Uygulama İmar Planı (UİP), parselasyon planı, onaylı düzenleme sınırı, hâlihazır harita ve kadastral ayırma çaplarından oluşmaktadır. Sözel veriler ise Tapu Müdürlüğü mülkiyet kayıtları, takyidat belgeleri, kadastro sıralı mal sahipleri araştırma ve özet formları, tescile esas imar ada dağıtım cetvelleri, özet denge tabloları ve DOPO hesap cetvellerini içermektedir. Öncelikle CAD (*.ncz) formatındaki çizim verileri CBS ortamına aktarılmıştır. Geometrik veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla sınır çakışmaları, açık uçlar ve sahipsiz poligon boşlukları topolojik kurallar işletilerek giderilmiştir. Ardından sözel mülkiyet ve tahsis öznitelikleri, poligon geometrileriyle ilişkisel veri tabanı yapısında eşleştirilmiştir.

Metodolojik çerçeve, yürürlükteki mevzuat hükümleri temel alınarak iki aşamalı bir denetim iş akışı üzerine kurgulanmıştır (Resmî Gazete, 1985; Resmî Gazete, 2020). Ön denetimi kapsayan ilk aşamada; plan kararları, düzenleme sınırının geometrik bütünlüğü, alan kapanmaları ve yasal DOPO üst sınırı alansal ve matematiksel olarak doğrulanmıştır. Dağıtım ve tahsis denetimini içeren ikinci aşamada ise ilişkisel veri tabanı üzerinden kadastral kök parseller ile üretilen imar parselleri eşleştirilmiş, tahsis işlemlerinin mevzuattaki konumsal öncelikleri yön, mesafe ve alan-ağırlıklı merkez kayma (AWCS) tabanlı sirkülasyon analizleriyle incelenmiştir.

2.1 Genel Kontroller

Genel kontroller aşamasında, parselasyon planının yasal, mekânsal ve teknik mevzuata uygunluğu CBS ortamında katman bazlı çakıştırmalar ve alansal analizler üzerinden üç aşamalı bir iş akışıyla irdelenmiştir. Bu sürecin ilk adımında yürürlükteki 1/1000 ölçekli UİP ile üst ölçekli 1/5000 ölçekli NİP arasındaki fonksiyon kararları, ulaşım ağı sürekliliği ve yol genişlikleri CBS ortamında üst üste çakıştırılarak kontrol edilmiştir. Eş zamanlı olarak onaylı düzenleme sınırının; parsel sınırlarını teknik bir gerekçe olmaksızın parçalayıp parçalamadığı, yapı adalarını bütüncül biçimde kapsayıp kapsamadığı ile dere yatağı ve topoğrafik eşikler gibi doğal, yapay ve idari unsurlara uyumu mekânsal sorgulamalarla doğrulanmıştır.

Sonraki aşamada uygulamaya dahil edilen kadastral parsellerin Tapu Müdürlüğü kütüğündeki sözel yüzölçümleri ile CAD/CBS ortamına aktarılan kapalı poligon geometrileri karşılaştırılarak tescilli alan ile grafik alan arasında mevzuattaki yanılma sınırını aşan bir uyumsuzluğun bulunmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca parselasyon planında üretilen imar adaları ve parsellerine ait geometrilerin kapalı poligon yapısı denetlenmiştir. Bu sayede açık poligon uçları, sınır aşımları ya da sahipsiz poligon boşluklarının bulunmadığı ve geometrik kapanmaların tam olduğu ilişkisel veri tabanı üzerinde teyit edilmiştir.

Son adımda düzenleme sahası genelinde kamuya ayrılan donatı alanları (yol, yeşil alan, park, ilkokul alanı vb.) ile tescile tabi ada ve parsel alanları mekânsal katmanlar bazında ayrıştırılmıştır. DOP alınabilecek ve alınamayacak alanların dağıtım cetvelleri ve özet denge tablolarıyla geometrik uyumu incelenmiştir. Uygulamaya ait onaylı DOPO hesap cetvelinde kullanılan alanlar ile CBS ortamında elde edilen alanlar karşılaştırılmış, oran yeniden hesaplanmış ve 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesinde öngörülen %45'lik üst sınırı aşıp aşmadığı doğrulanmıştır (Resmî Gazete, 1985). Bu kontrolün ardından dağıtım ve sirkülasyon analizlerine geçilmiştir.

2.2 Parsel Bazlı Dağıtım ve Sirkülasyon Kontrolleri

Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik'in 17. maddesi uyarınca, tahsislerin mümkün olduğunca düzenleme öncesi parselin bulunduğu yerden yapılıp yapılmadığı incelenmiştir. Düzenleme öncesi konumun umumi veya kamu hizmet alanına denk geldiği durumlarda ise diğer parsellerin yerinden tahsisi sonrasında ve teknik zorunluluklar dikkate alınarak parselin uygulama öncesindeki konumuna en yakın ve tahsise uygun imar parsellerine yönelim değerlendirilmiştir (Resmî Gazete, 2020). Uygulama öncesi kadastral parseller ile tahsis edilen imar parselleri arasında kurulan birebir ve birden-çoğa ilişkiler üzerinden yön ve mesafe vektörleri üretilerek sonrasında hissedarlık oranlarının korunumu ve varsa hisse çözümleri parsel bazında kontrol edilmiştir.

Bu kapsamda, kök parseller ile tahsis edilen imar parsellerinin geometrik merkezleri arasındaki Öklidyen mesafeler hesaplanmıştır. Merkez mesafelerinin basit aritmetik ortalaması tahsis edilen alan büyüklüklerini dikkate almadığından, parsel düzeyindeki konumsal hareketliliği özetlemek amacıyla alan-ağırlıklı merkez kayma göstergesi (AWCS) kullanılmıştır. AWCS, $\Sigma\left(A_i \times d_i\right) / \Sigma A_i$ eşitliğiyle hesaplanmıştır. Burada A_i ilgili imar parseline tahsis edilen alanı, d_i ise kök parsel merkezi ile ilgili imar parseli merkezi arasındaki Öklidyen mesafeyi göstermektedir. Böylece tahsis alanı ile merkez kayma mesafesi birlikte değerlendirilmiş ve küçük alanlı uzak tahsislerle büyük alanlı yakın tahsislerin toplam konumsal hareket üzerindeki etkisi tek bir gösterge üzerinden karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR

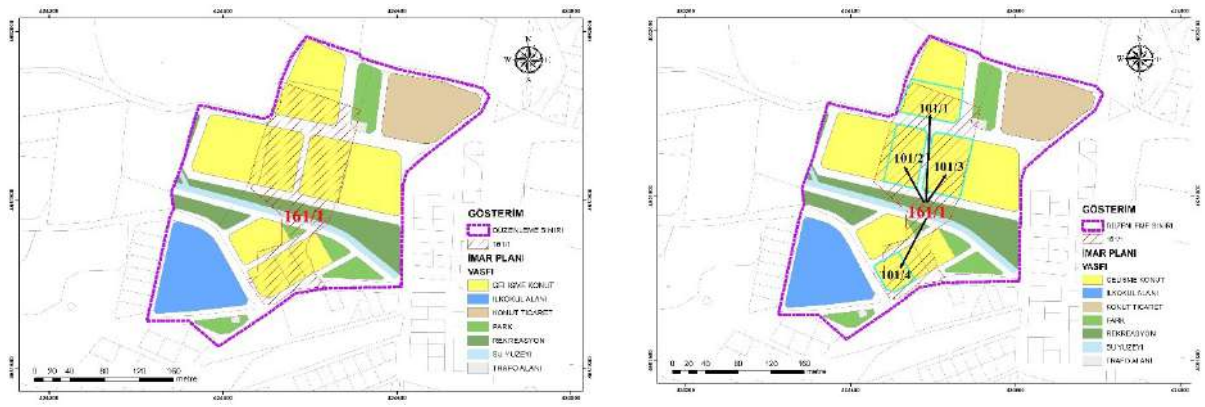
Pilot bölgede yürütülen denetimlerde, uygulamaya 6 adet kadastral parselin (5 özel-tüzel kişilik, 1 kamu mülkiyeti) girdiği tespit edilmiştir. Kadastral veri tabanındaki alan büyüklükleri ile Tapu Müdürlüğü kayıtlarının birbiriyle uyumlu olduğu doğrulanmıştır. Düzenleme sahasında DOP alınacak parsellerin toplam alanı 63.179,77 m², üretilen imar adaları toplam alanı 56.513,84 m² olarak hesaplanmıştır. Onaylı DOPO hesap cetvelindeki değer CBS ortamında elde edilen alan verileriyle yeniden kontrol edilmiştir. DOPO = 0,4469613 (%44,696) olarak doğrulanmış ve 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesindeki %45 üst sınırının altında kaldığı belirlenmiştir. Pilot bölgede gerçekleştirilen kontrol süreci ve doğrulama adımları, Tablo 1 ile özetlenmiştir.

Tablo 1. Pilot Bölgede Gerçekleştirilen Genel Kontrol Süreci ve Doğrulama Adımları

İşlem Adımı	Mevcut Durum / Ölçülen Değer	Kontrol Kriteri	Uyum / Karar	Sonraki Akış Yönü
1. Mülkiyet Verisi ve Alan Doğrulaması	Sahaya giren 6 adet kadastral parsel (5 özel/tüzel, 1 kamu) tespit edildi. Kadastro (grafik) ve Tapu (sözel) kayıtları karşılaştırıldı.	Alan verilerinin birbiriyle tam uyumlu olması.	EVET (Uyumlu)	Alan hesaplamalarına geçilmiştir.
2. Alan Büyüklüklerinin CBS ile Teyidi	DOP alınacak parsel toplam alanı: 63.179,77 m² Üretilen imar adaları toplam alanı: 56.513,84 m²	Grafik verilerden hesaplanan alanların özet cetvellerle geometrik olarak uyuşması.	EVET (Uyumlu)	DOPO doğrulamasına geçilmiştir.
3. DOPO (Düzenleme Ortaklık Payı Oranı) Hesabı	Onaylı DOPO hesabı CBS ortamında yeniden hesaplanmıştır: 0,4469613	CBS hesabı ile onaylı DOPO hesap cetvelinin uyumlu olması.	EVET (Doğrulandı)	Yasal sınır kontrolüne geçilmiştir.
4. Yasal Sınır Denetimi	Hesaplanan nihai DOPO: %44,696	Oranın yasal üst sınırı olan %45'in altında (veya eşit) olması.	EVET (Sınır İçi)	Dağıtım ve tahsis analizlerine geçilmiştir.

CBS ortamında gerçekleştirilen mekânsal çakıştırma ve yön-mesafe (sirkülasyon) analizlerinde kadastral parsellerin imar adalarına tahsis hareketleri incelenmiştir. Genel kontrollerin tamamlanmasıyla birlikte, çalışmanın temelini oluşturan dağıtım ve sirkülasyon analizleri aşamasına geçilmiştir. Geliştirilen CBS tabanlı denetim yaklaşımının parsel bazlı mekânsal sorgulama ve ilişkisel eşleştirme adımlarını somut bir biçimde ortaya koyabilmek amacıyla pilot düzenleme sahasından iki farklı kadastral parsel (161 ada 1 parsel ve 161 ada 2 parsel) örneklem olarak seçilmiştir. Dağıtım sürecinde mevzuatın öngördüğü "yerinden veya en yakın yerden tahsis" ilkesinin, hisse oranlarının ve konumsal önceliklerin nasıl denetlendiği, bu iki örnek parselin düzenleme öncesi ve sonrası durumları üzerinden aşağıda detaylı olarak irdelenmiştir:

- **161 Ada 1 Parsel:** Müşterek mülkiyetteki taşınmazdan DOP kesintisi sonrasında kalan hak edişin, kök parselin düzenleme öncesi konumuyla ilişkili 101 ada 1, 2, 3 ve 4 numaralı imar parsellerine dağıtıldığı belirlenmiştir. Tahsislerin kök parselin bulunduğu imar adasında gerçekleştirilmesi ve müşterek hisse oranlarının korunması, düzenleme öncesi konumdan tahsis önceliğinin bu parsel bakımından sağlandığını göstermektedir (Şekil 2).

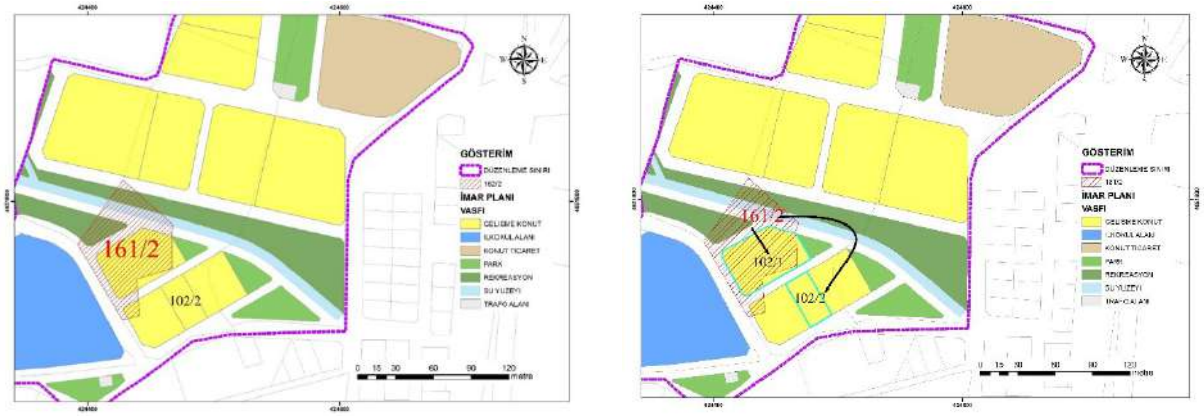


a) 161 Ada 1 parsel numaralı taşınmazın düzenleme öncesi durumu

b) 161 Ada 1 parsel numaralı taşınmazın düzenleme sonrası durumu

Şekil 2. 161 Ada 1 parsel numaralı taşınmazın parsel bazlı dağıtımının kontrolü

- **161 Ada 2 Parsel:** Tahsis alanının kök parselin bitişiğindeki 102 ada 1 ve 2 numaralı imar parsellerinde karşılandığı belirlenmiştir. Bu dağılım, parselin düzenleme öncesi konumuna yakın ve tahsise uygun imar parsellerine yönelimin korunduğunu göstermektedir (Şekil 3).



a) 161 Ada 2 parsel numaralı taşınmazın düzenleme öncesi durumu

b) 161 Ada 2 parsel numaralı taşınmazın düzenleme sonrası durumu

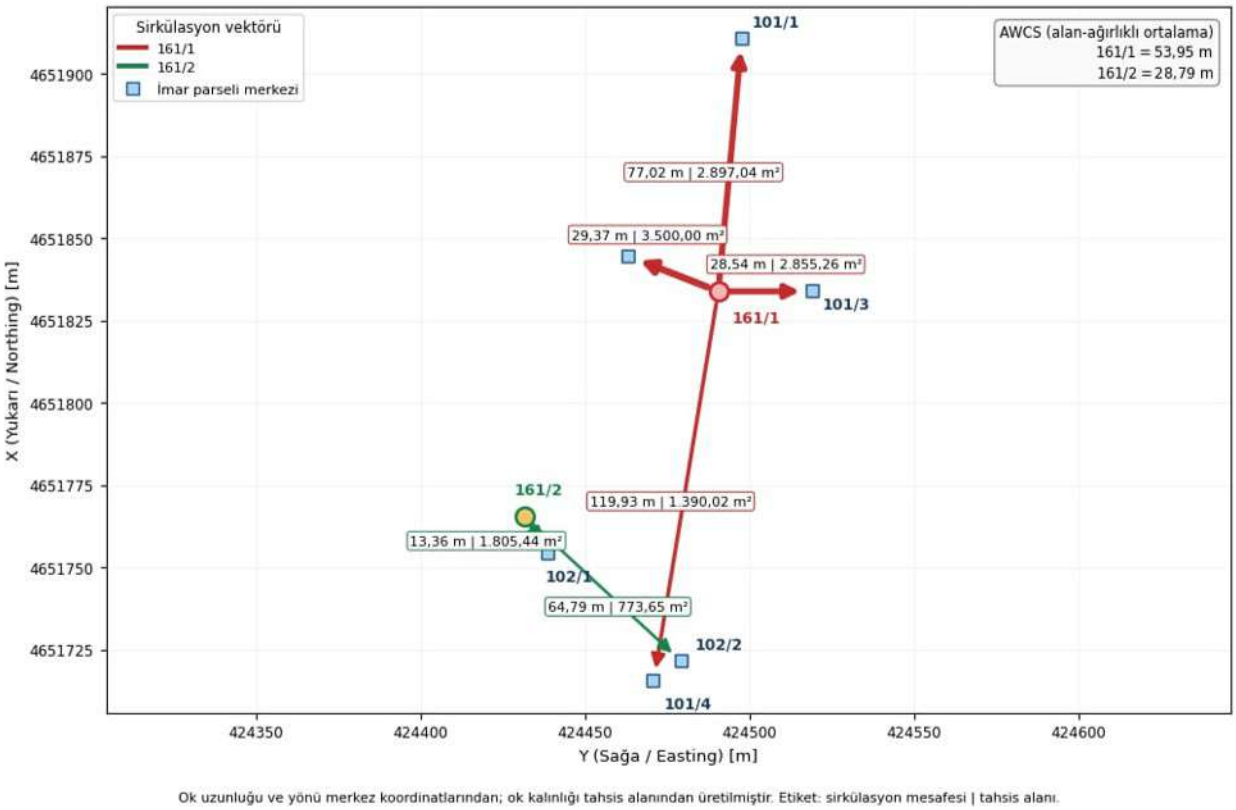
Şekil 3. 161 Ada 2 parsel numaralı taşınmazın parsel bazlı dağıtımının kontrolü

İncelenen parsellerde, Yönetmeliğin 17. maddesinde öngörülen konumsal tahsis öncelikleriyle açık biçimde çelişen bir dağıtım örüntüsü ya da mevcut hissedarlık oranlarını bozan bir işlem tespit edilmemiştir. Parsel ilişki haritaları, bu değerlendirmenin kök ve imar parselleri arasındaki mekânsal bağlantılar üzerinden izlenmesini sağlamıştır.

Yönetmeliğin 17. maddesinde yer alan konumsal tahsis esasları, kök ve imar parsellerinin geometrik merkezleri arasında üretilen yön ve mesafe vektörleri ile değerlendirilmiştir (Şekil 4). Merkezler arası mesafelerin tek başına hukuki uygunluk ölçütü olarak kullanılmamasına özen gösterilmiştir. Tahsis edilen alan büyüklüklerinin konumsal hareket üzerindeki etkisini göstermek amacıyla AWCS göstergesiyle birlikte yorumlanmıştır.

İnceleme sonucunda 161/1 kök parselinden yapılan tahsislerde, 101/4 imar parseline doğru 119,93 m ve 101/1 parseline doğru 77,02 m'lik merkez kaymaları tespit edilmiştir. Buna karşılık 3.500,00 m²'lik tahsis 101/2 parseline 29,37 m, 2.855,26 m²'lik tahsis ise 101/3 parseline 28,54 m merkez kaymasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu iki tahsis toplam 6.355,26 m² ile 161/1 parseline ait toplam tahsis alanının %59,72'sini oluşturmaktadır. Dolayısıyla tahsis alanının çoğunluğunun, diğer tahsislere kıyasla daha kısa merkez mesafelerine sahip 101/2 ve 101/3 parsellerinde yer aldığı görülmektedir. Alan büyüklükleri ile merkez mesafelerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda 161/1 parseli için AWCS değeri 53,95 m olarak hesaplanmıştır. AWCS bu dağılımdaki farklı büyüklük ve mesafelerdeki tahsis hareketlerini alan-ağırlıklı tek bir değer üzerinden özetlemektedir.

161/2 kök parselinde tahsisin 1.805,44 m²'lik ana kısmı, 13,36 m'lik merkez kaymasıyla doğrudan komşu 102/1 parseline aktarılmıştır. 102/2 parseline 773,65 m² tahsis yapılmış ve bu tahsisin merkezler arasındaki kayma mesafesi 64,79 m olarak hesaplanmıştır. Alan-ağırlıklı hesaplama sonucunda 161/2 parseli için AWCS değeri 28,79 m olarak elde edilmiştir. Bu değerler, farklı büyüklük ve mesafelerdeki tahsis hareketlerinin parsel düzeyinde ortak bir gösterge üzerinden özetlenebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Kök parsellerin imar parsellerine tahsisinde konumsal sirkülasyon ve yön-mesafe vektörleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uyarınca yürütülen AAD uygulamalarında dağıtım ve tahsis sonuçlarının grafik ve sözel verileri birlikte ele alan CBS tabanlı bir yaklaşımla kontrol edilmesi pilot bir düzenleme sahası üzerinden değerlendirilmiştir. Topolojik kurallar ve ilişkisel veri yapısı, sınır çakışmaları, açık uçlar ve tanımsız poligon boşlukları gibi geometrik sorunların tescil öncesi aşamada sistematik biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır. Dağıtım cetvellerindeki alan ve hisse bilgilerinin parsel geometrileriyle eşleştirilmesi ise tahsis yönü, merkezler arası mesafe ve parsel hareketliliğinin harita üzerinde birlikte değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Pilot alanda 161/1 ve 161/2 kök parselleri için AWCS değerlerinin sırasıyla 53,95 m ve 28,79 m olarak hesaplanması, tahsis alanı ile konumsal kaymanın birlikte ele alınabildiğini göstermiştir. AWCS bu kapsamda hukuki uygunluğu tek başına belirleyen bir ölçüt olarak kabul edilmeyerek dağıtım sonuçlarındaki konumsal hareketliliği özetleyen tamamlayıcı bir gösterge olarak değerlendirilmiştir.

Ele alınan yaklaşımın, AAD sürecinin idari ve teknik kontrol aşamalarında destekleyici bir araç olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Harita tabanlı gösterimler, askı ilanı sürecinde taşınmaz sahiplerinin uygulama öncesi ve sonrası parsel ilişkilerini daha açık biçimde incelemesine yardımcı olabilir. Aynı veri yapısı, kadastro müdürlüklerinde yürütülen tescil öncesi teknik kontrollerde ve uygulama kararlarının mekânsal gerekçelerinin belgelenmesinde ek bir doğrulama altlığı sağlayabilir. Böylece dağıtım cetvellerinde yer alan sayısal bilgiler ile parsellerin sahadaki konumsal ilişkileri aynı değerlendirme ortamında izlenebilir.

Çalışmanın temel sınırlılığı, yaklaşımın tek bir pilot sahada ve klasik alan esaslı dağıtım kurgusu üzerinden değerlendirilmiş olmasıdır. Gelecekte yapılacak araştırmalarda yaklaşımın farklı mülkiyet desenlerine sahip daha geniş uygulama sahalarında ve değer esaslı modellerde sınanması, açık kaynak kodlu CBS yazılımlarına yönelik kontrol araçlarının geliştirilmesi ve dağıtım kararlarını destekleyecek ilave mekânsal analizlerin sürece dâhil edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aslan, Ö. ve Yavuz Özalp, A. 2026. 3194 Sayılı İmar Kanunu'nun 18. Madde Uygulamalarının Düzenleme Sahası ve Sınırının Belirlenmesi Esasları Kapsamında İncelenmesi: Ağrı İli Örneği. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 28-49.

Çağdaş, V. 2019. İmar hakkı esasına dayalı arazi ve arsa düzenlemesi modeli. *Harita Dergisi*, 161, 57-66.

Çabuk, A., Çabuk, K. M., Aksoy, T., Şimşek, B., Güney, Y., Avdan, U. ve Cömert, R. 2018. *Coğrafi Bilgi Sistemlerine Giriş*. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Çelik, N. 2013. İptale Konu İmar Planı Uygulamalarında Geri Dönüş İşleminin İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri Yaklaşımı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Çelik, Ş. 2023. Arazi ve arsa düzenlemesi sahalarına esas düzenleme sınırlarının coğrafi bilgi teknolojileri ile belirlenmesi: Akçaabat İlçesi Örneği. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Çolak, H. E. ve Memişoğlu, T. 2021. Evaluating success factors in the land readjustment applications: a case study of Trabzon Province, Turkey. *Survey Review*, 53(376), 70-79.

Kalabalık, H. 2023. *İmar Hukuku Dersleri*. Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Resmî Gazete. 1985. 3194 sayılı İmar Kanunu, 9 Mayıs 1985, Sayı: 18749.

Resmî Gazete. 2020. Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik, 22 Şubat 2020, Sayı: 31047.

Tecim, V. 2008. *Coğrafi Bilgi Sistemleri: Harita Tabanlı Bilgi Yönetimi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Basımevi, Ankara.

Tütüncü, İ. 2024. 3194 sayılı imar kanununun 18. madde uygulaması kontrol sürecinin CBS'ye entegre bir şekilde geliştirilmesi ve raporlanması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Uzun, B., Atasoy, B. A. ve Şimşek, N. C. 2022. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) support for subdivision phase of land readjustment: A case study from Turkey. *Land Use Policy*, 120, 106301.

Uzun, B., Yıldırım, V., Çoruhlu, Y. E., Yıldız, O., Terzi, F. ve Atasoy, B. A. 2024. Enhancing Turkish land readjustment via a combination of IPA-based on SWOT and workshops. *Land Use Policy*, 144, 107245.

Yomralıoğlu, T. 1993. A Nominal Asset Value-Based Approach for Land Readjustment and Its Implementation Using Geographical Information Systems. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, Department of Surveying, Newcastle, United Kingdom.

TESCİL HARİCİ ALANLARIN CBS TABANLI ANALİZİ VE GEOMETRİK UYGUNLUK MODELİ

Hüseyin TEK[1], Halil İbrahim İNAN[2],

[1]Harita Yüksek Müh., Bayburt Kadastro Müdürlüğü, 69000, Merkez, Bayburt, htk1244@icloud.com
[2]Doç. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 29100, Bağlarbaşı, Gümüşhane, hibrahim77@hotmail.com

ÖZET

Kadastro sırasında yol, dere, kanal, tarıma elverişli olmayan yer ve benzeri niteliklerle tescil veya tespit harici bırakılan alanların tamamı mülkiyete konu edilebilir nitelikte değildir. Bu çalışmada Bayburt ili için, ilgili kurumların teknik ve hukuki incelemesini hızlandıracak Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı bir karar destek veri seti üretilmiştir. Bayburt Kadastro Müdürlüğünden alınan tescilli parsel, yapı/muhdesat, irtifak ve nitelikleri belirlenmiş tescil harici alan geometrileri; idari birim, köy yerleşik alanı, sit, mera ve toplulaştırma sınırlarıyla bütünleştirilmiştir. OpenStreetMap yol ağına, Google Earth görüntülerinden yapılan gözlemler temelinde tali yollar için 5 m ve ana yollar için 10 m; EU-Hydro su ağına dereler için 30 m ve nehirler için 50 m tampon uygulanmıştır. Tamponlanmış su unsurları ile fiilen kullanılan yollar tescil harici alanlardan çıkarılmış, geniş kadastral yol boşluklarının fiilî yol dışında kalan kesimleri inceleme havuzunda korunmuştur. Kalan geometrilerde Copernicus GLO-30 sayısal yüzey modelinden ortalama eğim ve alan-çevre tabanlı Shape Index hesaplanmıştır. Küresel şekil indeksinin yerel ince uzantıları ayırt edemediği durumlar için -7,5 m ve +7,5 m tamponlardan oluşan morfolojik açma uygulanarak 15 m geniş çekirdekler ile ince artıklar ayrı katmanlara ayrılmıştır. Geniş kesimlerde geometrinin 15×20 m tam hücreleri barındırma kapasitesi değerlendirme yaparken büyük parseller olduğu ve dikkat edilmesi gerektiği gözlemlenmesi için üretilmiştir. Çıktılar nihai tescil veya parselasyon kararı değil, elenen kesimler dâhil bütün alanların Kadastro Müdürlüğünce denetlenmesini sağlayan izlenebilir bir ön değerlendirme ürünüdür.

Anahtar Sözcükler: CBS, idari yoldan tescil, kadastro, şekil indeksi, tescil harici alan

ABSTRACT

GIS-BASED ANALYSIS OF UNREGISTERED LANDS AND GEOMETRIC SUITABILITY MODEL

Not all areas excluded from registration or cadastral determination during cadastral surveys under such classifications as roads, streams, canals, agriculturally unsuitable lands, and similar categories are necessarily eligible to become subject to property rights. In this study, a Geographic Information Systems (GIS)-based decision-support dataset was developed for Bayburt Province to facilitate and accelerate the technical and legal assessment processes conducted by the relevant public authorities. Registered parcels, structures and improvements (muhdesat), easements, and geometries of unregistered cadastral areas with identified land-use characteristics obtained from the Bayburt Cadastral Directorate were integrated with administrative boundaries, village settlement boundaries, protected-area boundaries, pasture boundaries, and land-consolidation boundaries. Based on observations derived from Google Earth imagery, buffer distances of 5 m for secondary roads and 10 m for main roads were applied to the OpenStreetMap road network, while buffers of 30 m for streams and 50 m for rivers were applied to the EU-Hydro hydrographic network. Buffered water features and actively used roads were excluded from the unregistered cadastral areas, whereas portions of broad cadastral road corridors extending beyond the actually used road surface were retained within the assessment pool for further examination. For the remaining geometries, mean slope values were derived from the Copernicus GLO-30 digital elevation dataset, and an area–perimeter-based Shape Index was calculated. Since the global Shape Index may fail to adequately identify narrow local extensions within otherwise large geometries, a morphological opening procedure based on successive −7.5 m and +7.5 m buffers was implemented. This procedure enabled the separation of geometries into 15 m-wide core areas and narrow residual components. In addition, the capacity of the wider sections to accommodate complete 15 × 20 m cells was evaluated as an auxiliary indicator for identifying relatively large candidate areas and highlighting geometries that may require closer examination during subsequent assessments. The resulting outputs are not intended to constitute a final decision regarding land registration or parcel subdivision. Rather, they represent a traceable preliminary assessment dataset that enables the Cadastral Directorate to systematically review the entire process, including both retained candidate areas and the spatial components excluded during the analysis.

Keywords: CBS, Administrative Registration, Cadastre, Shape Index, Unregistered Area

1. GİRİŞ

Arazi üzerindeki hakların tanımlanması ve kayıt altına alınması, vergi, üretim, miras ve mülkiyet güvenliği gereksinimleriyle gelişen kadastro sistemlerinin temel işlevlerinden biridir. Tarihsel örnekler, arazi kaydının hukuki haklarla birlikte mekânsal sınır bilgisini de taşıdığını göstermektedir (Yurdakul, 2017). Modern kadastro yaklaşımında parsel geometrisi, hak sahipliği ve sicil bilgisi birlikte ele alınmakta; Türkiye gibi yazılı hukuk sistemlerinde kadastro ile tapuya tescil süreçleri birbirini tamamlamaktadır (Yomralıoğlu, 2006; Yıldız, 2013).

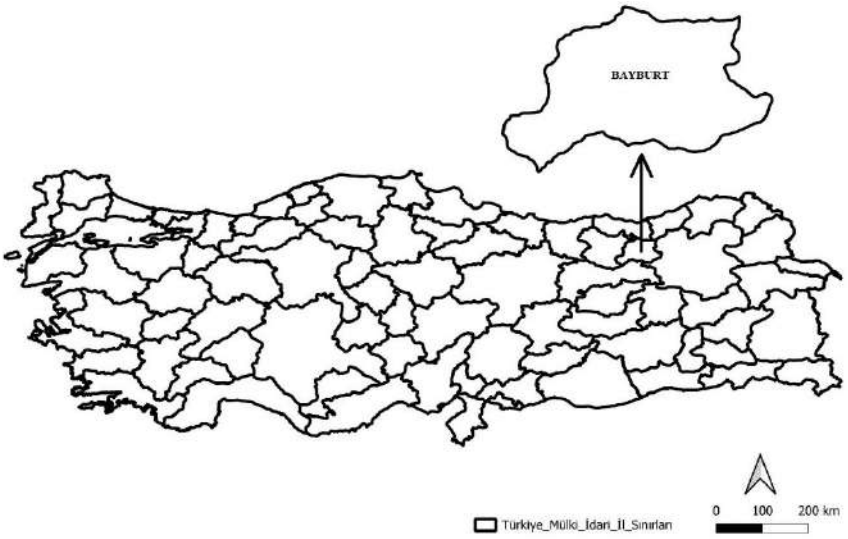
Türkiye'de tesis kadastrosu büyük ölçüde tamamlanmış olsa da farklı dönemlerde uygulanan mevzuat, teknik yöntem ve değerlendirmeler nedeniyle bazı alanlar tapu siciline konu edilmemiştir. Tescil harici alanlar; yol, dere, göl, park ve meydan gibi kamusal kullanımları, mera ve koruma alanlarını, kadastro birimleri arasındaki boşlukları ve geçmişte ekonomik değeri belirlenemeyen kesimleri birlikte içerebilir (Turan, 2013; Kabak, 2018; Günakın, 2019). Bu nedenle "tescil harici alan" kavramı, doğrudan "tescile uygun alan" anlamına gelmez. Alanın geçmişte hangi nitelikle tespit

dışı bırakıldığı, güncel fiilî kullanımı, kamu hizmeti işlevi ve özel mevzuat kapsamı birlikte incelenmelidir (Kabak, 2018; Çepni, 2022).

Tescil dışı alanların hukuki statüsünün belirlenmesi, kırsal üretim ve kamu yatırımları açısından önem taşımaktadır. Ekonomik değeri bulunan Hazine arazilerinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar kullanılabilir alanların belirlenmesine dikkat çekmektedir (Torun, 2016; Kandemir ve Şaşkın, 2019). Arazi toplulaştırması çalışmalarında tescil harici alanların hesaba katılması da kırsal arazi kullanımını geliştirebilir (Samancıoğlu, 2021). Bununla birlikte doğal varlıklar, kamu malları ve özel statülü alanlar ayrılmadan ekonomik değer üzerinden tescil önerisi geliştirilmesi hukuken ve teknik olarak uygun değildir (Çepni, 2022).

Türkiye'de tespit dışı bırakılan alanların kayıt altına alınmasında 3402 sayılı Kadastro Kanunu temel mevzuat kaynaklarından biridir (Resmi Gazete, 1987). İdari Yoldan Tescil (İYT) işlemlerinin teknik ve idari çerçevesi TKGM'nin 2013/11 sayılı genelgesinde düzenlenmiştir (TKGM, 2013). Süreçte Kadastro Müdürlüğü, Milli Emlak, DSİ, tarım, kültür varlıkları ve yerel yönetimler gibi birimlerin görüşlerine gereksinim duyulması; verilerin farklı sistemlerde tutulması ve güncellik düzeylerinin değişmesi işlem süresini uzatabilmektedir. Tek (2025) kapsamında yapılan görüşmeler ile de ortaya konulduğu üzere kadastro güncelleme literatürü, standart veri yapısı ve kurumlar arası eşgüdüm eksikliğinin uygulamayı zorlaştırdığını göstermektedir (Ayduran, 2021; Ayduran ve Uyan, 2022). CBS, çok kaynaklı verileri ortak bir referans sisteminde birleştirerek bu kurumsal kontrollerin izlenebilir biçimde yürütülmesini sağlar (Özçelik, 2015; Yomralıoğlu ve Aydınoğlu, 2014).

Tek (2025) tarafından geliştirilen ilk yaklaşımda ham tescil harici alanlar, kadastro çalışma alanı sınırı ile tescilli geometriler arasındaki farktan üretilmiştir. Bu bildiride ise Bayburt Kadastro Müdürlüğünce pafta, ölçü krokisi, arşiv kaydı ve güncel görüntüler kullanılarak niteliği belirlenen tescil harici geometriler doğrudan başlangıç verisi olarak alınmıştır. Çalışmanın amacı, tescile karar vermek değil; su ve yol işlevi devam eden kesimleri ayıran, her parçaya idari ve kurumsal çakışma bilgisini ekleyen, biçimsel-topoğrafik özellikleri hesaplayan ve geniş alanlarda örnek parsel üretilebilirliğini gösteren bir inceleme veri seti hazırlamaktır. Bu yerel iş akışı, TKGM'nin 2025'te başlattığı ulusal proje ile ortak bir envanter ve önceliklendirme hedefi taşısa da kullanılan eşikler, ayrıntı düzeyi ve üretilen karar destek katmanları bakımından farklılaşmaktadır (TKGM, 2026). Çalışma alanının Türkiye içindeki konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bayburt ili çalışma alanının Türkiye içindeki konumu (Tek, 2025).

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı ve Veri Kaynakları

Çalışma alanı Bayburt ilindeki kesinleşmiş kadastro çalışma alanlarıdır. Analizler metre tabanlı ortak koordinat sisteminde QGIS 3.34 ortamında yürütülmüştür. Bayburt Kadastro Müdürlüğünden tescilli parsel, yapı/muhdesat, irtifak ve yol, kanal, tarıma elverişli olmayan yer (TEOY) gibi nitelikleri belirlenmiş tescil harici alan verileri alınmıştır. Her geometri bulunduğu il, ilçe ve köy/mahalle birimiyle konumsal olarak ilişkilendirilmiştir. Köy yerleşik alanı İl Özel İdaresinden, sit alanları kültür varlıklarını koruma biriminden, mera ve toplulaştırma sınırları ilgili tarım birimlerinden temin edilmiştir. Fiilî yol ağı OpenStreetMap'ten, dere ve nehir ağı EU-Hydro River Network Database'den, 30 m çözünürlüklü sayısal yüzey modeli ise OpenTopography üzerinden Copernicus GLO-30 ürününden alınmıştır (Copernicus Land Monitoring Service, 2020; European Space Agency, 2024; OpenStreetMap Contributors, 2026). Kullanılan veri grupları ve analizdeki işlevleri Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan veri grupları ve analizdeki işlevleri.

Veri grubu	Kaynak	Analizdeki işlev
Tescilli parsel, yapı/muhdesat ve irtifak	Bayburt Kadastro Müdürlüğü	Mevcut haklarla çakışmanın ve kadastral komşuluğun kontrolü
Nitelikli tescil harici alan ve kadastral yollar	Bayburt Kadastro Müdürlüğü	Başlangıç geometrisi; TEOY, yol, kanal ve benzeri niteliklerin korunması
İl, ilçe ve köy/mahalle sınırları	Bayburt Kadastro Müdürlüğü	Her parçaya idari kimlik atanması
Köy yerleşik alanı, sit, mera ve toplulaştırma	İl Özel İdaresi ve ilgili kurumlar	Geometrinin sınırlarda bölünmesi ve görüş gerektiren durumların işaretlenmesi
Ana ve tali yol ağı	OpenStreetMap	Fiilen kullanılan yol koridorlarının yardımcı kontrolü
Dere, nehir ve göl	EU-Hydro ve mevcut göl verisi	Su işlevi nedeniyle mülkiyet incelemesi dışında tutulacak kesimlerin belirlenmesi
Copernicus GLO-30	ESA / OpenTopography	30 m çözünürlüklü yüzey modelinden ortalama eğim hesabı

2.2 Konumsal Analiz İş Akışı

Girdi katmanlarında geometri geçerliliği, tekrarlı kayıt ve tescilli geometrilerle çakışma kontrolleri yapıldıktan sonra aşağıdaki sıra uygulanmıştır. Bütün ara çıktılar kaynak tescil harici alan kimliğiyle ilişkilendirilmiş, hiçbir aşamada hukuki tescil kararı otomatikleştirilmemiştir. Uygulanan işlem sırası Şekil 2'de gösterilmiştir.

1. Nitelikli tescil harici alanların hazırlanması → 2. Yol-su tamponlarının oluşturulması → 3. Fiilî yol-su kesimlerinin çıkarılması

↓

4. Kurumsal ve idari sınırlarda bölme → 5. Alan, çevre, SI ve eğim hesabı → 6. Morfolojik açma, ızgara testi

Şekil 2. Güncellenmiş konumsal analiz iş akışı.

2.3 Yol ve Su Unsurlarının Ayrılması

Google Earth uydu görüntüleri üzerinde yapılan incelemede tali yollar için 5 m, ana yollar için 10 m, dereler için 30 m ve nehirler için 50 m yakınlık değerleri çalışma parametresi olarak kabul edilmiştir. Bu değerler mevzuattan türetilmiş çekme mesafeleri değil, Bayburt örneğinde kamu işlevi devam eden dar koridorları erken aşamada ayırmak için kullanılan varsayımsal tampon uzaklıklarıdır. Dere ve nehir tamponları göl poligonlarıyla birleştirilmiş ve birleşik su katmanı başlangıç tescil harici alanlarından fark işlemiyle çıkarılmıştır.

Kadastral yol geometrileri ile tamponlanmış OpenStreetMap yol ağı kesiştirilerek güncel ulaşım iziyle çakışan kesimler belirlenmiştir. Bu kesişimler fiilen yol olarak kullanılan bölümleri temsil ettiğinden su unsurları çıkarılmış tescil harici alan katmanından ayrıca düşülmüştür. Böylece geniş çizilmiş kadastral yol geometrilerinin fiilî yol izi dışında kalan bölümleri inceleme havuzunda tutulmuştur. OpenStreetMap resmî kadastral verinin yerine kullanılmamış, yolun güncel konumu ve sürekliliği için yardımcı kontrol katmanı olarak değerlendirilmiştir. Analizde kullanılan sayısal parametreler ve karar anlamları Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Analizde kullanılan sayısal parametreler ve karar anlamları.

İşlem	Değer	Karar anlamı
Tali yol tamponu	5 m	Fiilî tali yol yakınlığının yardımcı ayrımı
Ana yol tamponu	10 m	Fiilî ana yol yakınlığının yardımcı ayrımı
Dere tamponu	30 m	Dere koridorunun ön değerlendirmede kapsam dışı bırakılması
Nehir tamponu	50 m	Nehir koridorunun ön değerlendirmede kapsam dışı bırakılması
Morfolojik asgari genişlik	15 m	-7,5 m / +7,5 m açma ile geniş çekirdek ve ince artık ayrımı
Izgara hücresi	15×20 m = 300 m²	Geometri içine tam yerleşebilen örnek hücre kapasitesi

2.4 Kurumsal Sınırlarla Bölme ve Öznitelik Üretimi

Yol ve su ayrımından sonra kalan geometriler il, ilçe ve köy/mahalle sınırlarıyla kesiştirilmiş; her parçaya TH_ID, il, ilçe, köy/mahalle ve kaynak nitelik bilgileri atanmıştır. Aynı geometriler mera, toplulaştırma, sit ve köy yerleşik alan sınırlarında bölünmüştür. Bu işlem söz konusu alanları otomatik olarak elememektedir. Örneğin mera sınırıyla çakışan bir parça "mera" olarak işaretlenmekte; tescil sürecine alınması hâlinde ilgili kurum görüşünün, taşınmaz niteliğinin ve gerekirse sicilde belirtme gereksiniminin değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Sit ve yerleşik alan çakışmaları da aynı mantıkla ayrı özniteliklerde tutulmuştur. Böylece Kadastro Müdürlüğüne yalnızca geometri değil, her parçanın hangi kurum veya mevzuat incelemesine yönlendirilmesi gerektiğini gösteren bir veri seti sunulmuştur.

2.5 Biçimsel Uygunluk, Eğim ve Morfolojik Açma

Tescile konu olabilecek aday geometrilerin biçimsel özellikleri Shape Index (SI) ile değerlendirilmiştir. SI, arazi toplulaştırma ve kadastro parsellerinin alan-çevre ilişkisini alan büyüklüğünden bağımsız olarak inceleyen yerleşik bir göstergedir (Akkaya Aslan vd., 2007; Demetriou vd., 2013; Kırmıkıl ve Arıcı, 2013; Arslan vd., 2021).

$$SI = P / \left(2\sqrt{\left(\pi A\right)}\right) \quad (1)$$

Burada P geometri çevresini, A alanını ifade eder. Aynı alana sahip daire referans alındığından teorik minimum 1'dir; değerin yükselmesi geometrinin uzadığını veya sınır düzensizliğinin arttığını gösterir. Ortalama eğim, 30 m çözünürlüklü Copernicus GLO-30 yüzey modelinden zonal istatistikle hesaplanmıştır. Bu veri yerel topoğrafik ayrıntıları sınırlı ölçüde temsil ettiğinden eğim tek başına dışlama ölçütü yapılmamış, Kadastro Müdürlüğü incelemesini destekleyen tanımlayıcı bir öznitelik olarak kullanılmıştır.

Uygulamada bazı geometrilerin SI değeri 1'e yakın olduğu hâlde yerel olarak ince-uzun uzantılar ve tarla aralarında ulaşım için kullanılan tonçlar içerdiği görülmüştür. Küresel bir alan-çevre oranı bu yerel boğazları her zaman ayıramadığından her geometriye önce -7,5 m, sonra +7,5 m tampon uygulanmıştır. Geri dönen geometri kaynak alanla kesiştirilerek 15 m geniş çekirdek; kaynak geometri ile çekirdek arasındaki fark ise ince artık olarak kaydedilmiştir. Bu aşamada alan eşiği kullanılmamış, geniş çekirdeği bulunmayan geometriler dâhil bütün ince artıklar Kadastro Müdürlüğünün ayrıca değerlendirebilmesi için korunmuştur.

2.6 Izgara Testi

Geniş çekirdeklerin geometrik kapasitesini sınamak için 15×20 m boyutunda, 300 m² alanlı dikdörtgen hücreler kullanılmıştır. Her geometrinin köşe koordinatlarından temel bileşenler analiziyle baskın eksen hesaplanmış; 15×20 m ve 20×15 m yerleşimler denenerek daha fazla tam hücre üreten yön seçilmiştir. Hücrenin en az %99,95'i kaynak geometri içinde değilse hücre kabul edilmemiştir. Bu test, Plansız Alanlar İmar Yönetmeliğindeki ölçülerin yerine geçmemekte; yalnızca konumdan bağımsız varsayımsal dikdörtgenlerin alana yerleşebilme kapasitesini göstermektedir. Karar destek katmanında tutulan başlıca çıktı alanları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Karar destek katmanında tutulan başlıca çıktı alanları.

Alan grubu	Başlıca öznitelikler	İnceleme amacı
Kimlik ve konum	TH_ID, parça kimliği, il, ilçe, köy/mahalle	Kaynak geometri ve yetkili birim ilişkisinin izlenmesi
Kurumsal durum	MERA, TOPLULAŞTIRMA, KULTUR_SIT, YERLESIK	Görüş veya özel mevzuat incelemesi gerektiren durumların belirlenmesi
Geometri ve topoğrafya	ALAN_M2, CEVRE_M, SI, EGIM_ORT, MIN_GENIS	Biçim, büyüklük, genişlik ve eğim özelliklerinin karşılaştırılması
Izgara kapasitesi	IZGARA_ADET, KULLAN_M2, KALAN_M2, KULLAN_ORAN	15×20 m tam hücrelerin yerleşme kapasitesinin ölçülmesi
Örnek parsel kontrolü	ALAN_M2,YOL_CEP_M, KAD_CEP_M	Yol cephesi, kadastral komşuluk, alan ve kompaktlık denetimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

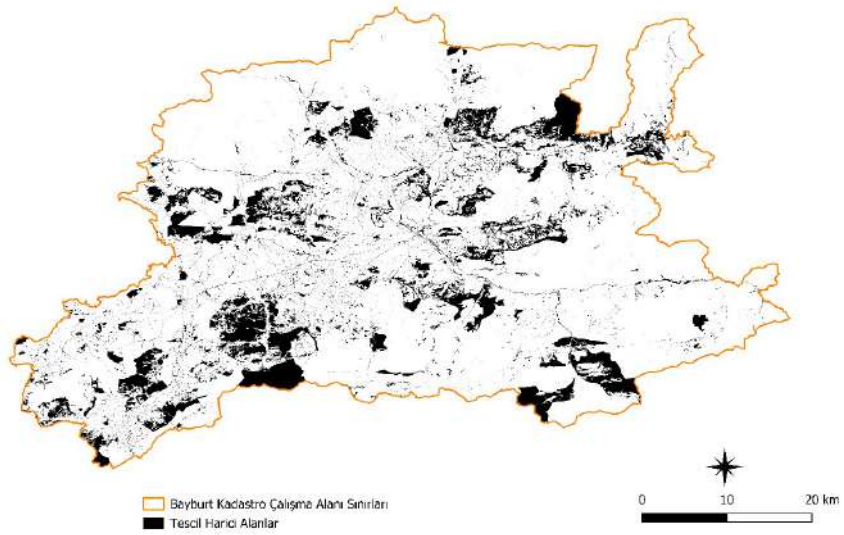
3.1 Önceki Çalışmanın Nicel Bulguları ve Güncellenen Başlangıç Verisi

Tek (2025) çalışmasında Bayburt kadastro çalışma alanı 3.637,35 km² olarak hesaplanmış; tescilli parsel, yapı/muhdesat ve irtifak geometrilerinin farkı alınarak 605,77 km² ham tescil harici alan elde edilmiştir. Bu değer çalışma alanının yaklaşık %16,65'ine karşılık gelmekle birlikte yol, dere, nehir ve küçük parsel aralıklarını da içerdiğinden doğrudan tescil edilebilir alan olarak yorumlanmamıştır. Önceki çalışmadaki 5 m tampon senaryosu alanı 500,38 km²'ye, çok katmanlı tampon senaryosu 416,127 km²'ye düşürmüştür. Ham geometriye göre azalma sırasıyla %17,40 ve %31,31'dir. Bu nicel sonuçlar güncel kurumsal envanterin alanı değil, mekânsal ön elemenin inceleme

hacmini nasıl daralttığını gösteren yöntemsel karşılaştırma değerleridir. Önceki çalışmada raporlanan alan değişimleri Çizelge 4'te sunulmuştur. Yine aynı çalışma ile elde edilen tescil harici alanların Bayburt ili içindeki dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Tek (2025) kapsamında raporlanan alan değişimi ve güncel çalışmadaki yorumu.

Aşama	Alan	Ham alana göre değişim	Güncel çalışmadaki karşılığı
Kadastro çalışma alanı	3.637,35 km²	-	Çalışma alanı sınırı
Fark analiziyle ham THA	605,77 km²	Çalışma alanının %16,65'i	Kurumsal olarak niteliklendirilmiş THA başlangıç verisiyle değiştirilmiştir
5 m tampon sonrası	500,38 km²	-%17,40	Yol sınıfına göre 5 m ve 10 m ayrı tamponlar uygulanmıştır
Çok katmanlı tampon sonrası	416,127 km²	-%31,31	Dere 30 m, nehir 50 m ve göl poligonlarıyla su ayrımı yapılmıştır



Şekil 3. Tek (2025) kapsamında fark analiziyle belirlenen tescil harici alanların Bayburt ili içindeki dağılımı.

3.2 Yol, Su ve Kurumsal Katmanların Birlikte Değerlendirilmesi

Güncellenen uygulamanın temel farkı, araştırmacı tarafından üretilmiş boşluk geometrisi yerine Kadastro Müdürlüğünün niteliklendirdiği tescil harici alanların kullanılmasıdır. Analiz projesinde su unsurları çıkarılmış THA, kadastral yollar, kadastral-fiilî yol kesişimi ve su-yol alanları çıkarılmış THA katmanlarının ayrı tutulması işlem zincirini denetlenebilir hâle getirmiştir. Fiilî yol kesişimlerinin çıkarılması, geniş kadastral yol koridorlarının güncel yol dışında kalan kesimlerini görünür kılmıştır. Bu alanlar doğrudan tescil önerisi olarak değil, pafta, arşiv, görüntü ve zemin kontrolüne yönlendirilecek adaylar olarak değerlendirilmiştir.

Mera, sit, toplulaştırma ve köy yerleşik alan sınırlarında bölme yapılması, tek bir tescil harici poligon içindeki farklı idari durumların ayrı kayıtlara dönüşmesini sağlamıştır. Özellikle mera veya sit alanıyla çakışma, geometrinin otomatik elenmesi yerine ilgili kurum incelemesinin öznitelik tablosunda açıkça gösterilmesine imkân vermektedir. Böylece karar destek katmanı, geometrik uygunluğu hukuki uygunlukla özdeşleştirmeden hangi parçanın hangi kurum tarafından değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.3 Şekil İndeksi ile Yerel Genişlik Kontrolünün Birlikte Kullanılması

SI, farklı büyüklükteki geometrilerin biçimsel düzensizliğini ortak ölçekte karşılaştırmaya uygundur; ancak geometri içindeki kısa bir dar boğazın veya ince uzantının etkisi toplam alan ve çevre içinde zayıf kalabilir. Bu çalışmada gözlenen, SI değeri 1'e yakın bazı alanların yine de ince-uzun ve işlevsiz kesimler taşıması bu sınırlılığı somutlaştırmıştır. On beş metre morfolojik açma, geniş çekirdek ile ince artığı doğrudan geometri üzerinden ayırarak SI'yi tamamlamıştır. İnce artıkların silinmemesi ayrıca önemlidir: çalışma bütün tescil harici alanların izlenmesini amaçladığından düşük öncelikli parçalar da sonraki kadastro ve zemin incelemesi için veri setinde kalmıştır.

3.4 Izgara Kapasitesi

Sabit 15×20 m hücrelerin baskın geometri eksenine döndürülmesi, düzensiz sınırlar içinde konumdan bağımsız tam dikdörtgenlerin ne ölçüde yerleşebileceğini göstermiştir. Sınırda kırpılan parçaların kabul edilmemesi, yalnızca alan toplamına dayalı iyimser parsel sayısı tahminini sınırlandırmıştır.

3.5 TKGM Ulusal Projesi ile Metodolojik Karşılaştırma

TKGM'nin 2025 başlangıçlı ulusal projesi, 81 ilde tescil dışı alanların sayısallaştırılmasını, imar planları ve coğrafi analizlerle önceliklendirilmesini ve yaklaşık 10.000 km² alanın ekonomiye, sosyal konuta ve yatırımlara kazandırılmasını hedeflemektedir. TKGM, 6 Ağustos 2026 itibarıyla ülke genelindeki geometrilerin sayısallaştırıldığını, imar ve uzaklık analizlerinin tamamlandığını ve 30 bin dönüm birinci öncelikli alanın tescil edildiğini bildirmektedir (TKGM, 2026). Bayburt modeli bu kurumsal hedefle aynı soruna yönelmekte, ancak tescil kararı üretmek yerine yerel teknik incelemeyi ayrıntılandırmaktadır. Ulusal proje ile Bayburt modeli arasındaki metodolojik farklılıklar Çizelge 5'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5. TKGM ulusal projesi ile Bayburt karar destek modelinin metodolojik farkları.

Karşılaştırma ölçütü	TKGM ulusal projesi	Bayburt modeli ve farklılığın gerekçesi
Ölçek	81 il ve ulusal envanter	Bayburt ili; yerel veri ayrıntısı ve kadastro kontrol iş akışı hedeflenmiştir
Başlangıç verisi	Ülke genelinde sayısallaştırılmış tescil harici geometriler	Kadastro Müdürlüğünce pafta, kroki, arşiv ve görüntülerle niteliklendirilmiş THA
Analiz odağı	İmar entegrasyonu, şehirlere uzaklık ve tescil önceliği	Yol-su ayrımı, kurumsal sınırlar, eğim, SI, 15 m genişlik ve 15×20 m kapasite testi
Çıktı	Öncelikli alanların tescil sürecine aktarılması	Elenen parçaları da koruyan, kurum görüşü ve saha kontrolüne yönelik izlenebilir veri seti
Karar yetkisi	Ulusal proje kapsamında yetkili idari süreç	CBS çıktısı karar vermez; Kadastro Müdürlüğü ve ilgili kurumlar teknik-hukuki incelemeyi tamamlar

3.6 Doğrulama, Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Çıktıların doğrulanması iki aşamalıdır. Masa başı kontrolde pafta, ölçü krokisi, arşiv kaydı, güncel uydu/ortofoto ve kurum katmanları birlikte incelenmelidir. Gerekli alanlarda zemin kontrolü yapılarak fiilî yol-su kullanımı, yapılaşma, doğal sınırlar ve kamu hizmeti durumu doğrulanmalıdır. Katmanların üretim tarihi, ölçeği ve güncelliği farklı olabileceğinden veri kaynağı ve sürümü her sonuç kaydında saklanmalıdır. Kadastral verilerin üretim ve güncelleme koşullarının geometrik yorumu etkileyebileceği daha önce de vurgulanmıştır (Ayduran, 2021; Ayduran ve Uyan, 2022).

Bu çalışmada kullanılan Copernicus GLO-30 ürünü 30 m çözünürlüklü bir yüzey modelidir; dar parsellerde yerel eğim değişimini sınırlı temsil eder. Harita Genel Müdürlüğünden talep edilen 5 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli çalışma takvimine yetişmediğinden analize dâhil edilememiştir. Bu veri sağlandığında eğim ve doğal kırıkların daha ayrıntılı hesaplanması mümkündür. Benzer biçimde DSİ'nin kanal, dere, taşkın veya planlanan boru hattı geometrilerini işlem öncesinde sağlaması, bu koridorların sonradan kontrol edilmesi yerine başlangıçta ayrılmasını sağlayacaktır. CORINE arazi örtüsü veya daha ayrıntılı zemin/topografya verileri temin edildiğinde, mevcut aday alanlardan arazi kullanımına uyumlu ve istenen büyüklüklerde örnek parseller üretilebilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bayburt Kadastro Müdürlüğünün niteliklendirilmiş tescil harici alan verisini başlangıç girdisi olarak kullanmak, önceki fark analizi yaklaşımındaki "boşluk tespiti" aşamasını kurumsal bir envanterle değiştirmiştir. Yol ve su tamponlarının sıralı fark analizleriyle uygulanması, kamu işlevi devam eden koridorları ayırırken geniş kadastral yol geometrilerinin fiilî yol dışında kalan bölümlerini ayrıca incelemeye açmıştır. İdari birim, mera, sit, toplulaştırma ve köy yerleşik alan sınırlarında yapılan bölme ise her parçanın konumu ve kurum görüşü gereksinimini aynı kayıtta görünür hâle getirmiştir.

Shape Index ile 15 m morfolojik açmanın birlikte kullanılması, toplam alan-çevre oranı düzenli görünen geometrilerdeki yerel ince uzantıların ayrılmasını sağlamıştır. Geniş çekirdeklerdeki 15×20 m tam hücre testi ile alanların düzenli parçalara ayrılabilme kapasitesini göstermiştir. İnce artıklar ile kontrol koşullarını karşılamayan örnekler silinmemiş, bütün sonuçlar Kadastro Müdürlüğünün incelemesine bırakılmıştır. Bu tercih, çalışmanın amacının tescile karar vermek değil, tescil sürecinde hangi alanın neden ve hangi kurumca inceleneceğini açıklayan bir karar destek veri seti üretmek olmasıyla uyumludur.

TKGM'nin ulusal projesi ile ortak yön, tescil harici alanların sayısal envanter ve coğrafi analizle önceliklendirilmesidir. Bayburt modelinin katkısı; yerel yol-su ayrımını, kurum yetki/ilgi sınırlarını, biçimsel genişlik kontrolünü ve örnek parsel üretimini aynı izlenebilir zincirde birleştirmesidir. Modelin idari uygulamaya aktarılabilmesi için güncel kurum verileri, saha doğrulaması ve yetkili birim görüşleri zorunludur. Daha yüksek çözünürlüklü yükseklik verisi ile arazi örtüsü verisi sağlandığında eşikler yeniden kalibre edilmeli ve üretilen örnek geometriler farklı kırsal koşullarda test edilmelidir.

5. TEŞEKKÜR

Bu bildiri, Doç. Dr. Halil İbrahim İNAN danışmanlığında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanan "Tescil Harici Alanların ve Kullanım Potansiyellerinin Konumsal Veri Analizi Teknikleri ile Tespiti" başlıklı yüksek lisans tezi geliştirilerek üretilmiştir. Veri ve görüş desteği sağlayan ilgili kamu kurum ve kuruluşlarına ve güncel tescil/tespit harici alan verilerinin temininde katkı sağlayan Bayburt Kadastro Müdürlüğü personeline teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akkaya Aslan, T., Gündoğdu, K.S. ve Arıcı, İ., 2007. Some metric indices for the assessment of land consolidation projects. Pakistan Journal of Biological Sciences, 10(9): 1390-1397. https://doi.org/10.3923/pjbs.2007.1390.1397

Arslan, F., Değirmenci, H., Akkaya Aslan, Ş.T. ve Jürgenson, E., 2021. A new approach to measure parcel shapes for land consolidation. KSU Journal of Agriculture and Nature, 24(5): 1059-1067. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.774846

Ayduran, E., 2021. Kadastro güncelleme çalışmalarında yaşanılan sorunlar, eksiklikler ve giderilmesinde alternatif öneriler. Yüksek lisans tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

Ayduran, E. ve Uyan, M., 2022. Kadastro güncelleme çalışmalarında yaşanılan sorunlar, eksiklikler ve giderilmesinde alternatif öneriler. Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 4(1): 12-17. https://doi.org/10.51765/tayod.994580

Copernicus Land Monitoring Service, 2020. EU-Hydro River Network Database 2006-2012 (vector), Europe, version 1.3. https://doi.org/10.2909/393359a7-7ebd-4a52-80ac-1a18d5f3db9c

Çepni, M., 2022. Tescil dışı alanların arsa düzenlemelerinde değerlendirilmesi. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 9(2): 127-136.

Demetriou, D., See, L. ve Stillwell, J., 2013. A parcel shape index for use in land consolidation planning. Transactions in GIS, 17(6): 861-882. https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2012.01371.x

European Space Agency, 2024. Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. https://doi.org/10.5069/G9028PQB

Günakın, Z., 2019. Türkiye'de tescil dışı kalmış yerlerin tesciline yönelik çalışmalar, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri: Çorum örneği. Yüksek lisans tezi. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

Kabak, M., 2018. Umumi hizmet alanlarında mülkiyet ve kullanım analizi: Konya ilinden seçilmiş taşınmazların değerlendirilmesi. Yayımlanmamış dönem projesi. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Kandemir, İ. ve Şaşkın, Ö., 2019. Türkiye'deki THA'ların kadastro boyutu ve ekonomiye kazandırılmasının önemi. 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 25-27 Nisan 2019, Ankara, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, ss. 1-8.

Kırmıkıl, M. ve Arıcı, İ., 2013. The use of landscape metrics to assess parcel conditions pre- and post-land consolidation. Journal of Food, Agriculture & Environment, 11(2): 985-989.

OpenStreetMap Contributors, 2026. OpenStreetMap. https://www.openstreetmap.org, [Erişim tarihi: 13.09.2026].

Özçelik, E.A., Nişancı, R., Demir, O. ve İnan, H.İ., 2015. The requirements of conceptual data model toward to land management of special agricultural crop-lands in Turkey. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 33(2): 220-232.

Resmi Gazete, 1987. 3402 Sayılı Kadastro Kanunu. Tarih: 09.07.1987, Sayı: 19512.

Samancıoğlu, F., 2021. Arazi toplulaştırma projelerinin kırsal kalkınma içerikli yapılmasının gerekliliği üzerine bir çalışma. Yüksek lisans tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

Tek, H., 2025. Tescil Harici Alanların ve Kullanım Potansiyellerinin Konumsal Veri Analizi Teknikleri ile Tespiti. Yüksek lisans tezi. Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gümüşhane. 99 sayfa.

TKGM, 2013. 2013/11 İdari Yoldan Tescil Genelgesi. Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Ankara.

TKGM, 2026. Tescil Harici Alanların Tescillerinin Yapılması. Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü. https://www.tkgm.gov.tr/projeler/gelecek-odakli-projeler/tescil-harici-alanlarin-tescillerinin-yapilmasi, [Erişim tarihi: 13.09.2026].

Torun, S., 2016. Hazineye ait tarım arazileri satılıyor. Denetişim Dergisi, (15): 103-108.

Turan, K., 2013. Devletin hüküm ve tasarrufu altındaki tescil dışı alanların hukuki durumları ve bu alanların imar uygulamalarındaki yeri. Yayımlanmamış dönem projesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Anabilim Dalı, Ankara.

Yıldız, O., 2013. Türkiye Kadastrosunun Mevcut Durumu ve Çok Amaçlı Kadastroya Yönelik Yeni Yaklaşımlar. Doktora tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon. 364 sayfa.

Yomralıoğlu, T., 2006. Dünya'da Kadastral Eğilimler ve Türkiye. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Kadastro Kongresi, 22-24 Mayıs 2006, Ankara, ss. 15-25.

Yomralıoğlu, T. ve Aydınoğlu, A.Ç., 2014. Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ve belediyeler için coğrafi veri altyapısı. Yeni (6360) Büyükşehir Yasası ve Arazi Yönetimi IV. Çalıştayı, 12-13 Mayıs 2014, Trabzon, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Yurdakul, Ö., 2017. Türkiye Kadastrosunun İkinci Kadastro Açısından Değerlendirilmesi ve Konya İli Bozkır İlçesi Sarıoğlan Mahallesi Örneği. 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 3-6 Mayıs 2017, Ankara, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.

AKILLI ŞEHİRLER KAPSAMINDA ENGELLİ BİREYLER İÇİN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK ASANSÖRLÜ ÜST GEÇİTLERİN TESPİTİ: TRABZON ÖRNEĞİ

Yarensu PEKER[1], Buse AYTAÇ[2], Zeynep Nur DERELİOĞLU[3],

[1]Harita Teknikeri, Avrasya Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Harita ve Kadastro Programı, 61080, Ortahisar, Trabzon, pyarensu@gmail.com
[2] Öğrenci, Avrasya Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Harita ve Kadastro Programı, 61080, Ortahisar, Trabzon, buse.aytac@hotmail.com
[3]Öğr. Gör., Avrasya Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Harita ve Kadastro Programı, 61080, Ortahisar, Trabzon
zeynepnur.kavuran@avrasya.edu.tr

ÖZET

Günümüzde kentleşmenin hızlanmasıyla birlikte akıllı şehir yaklaşımı ve bu yaklaşımın temel bileşenlerinden biri olan akıllı ulaşım sistemleri (AUS), sürdürülebilir, güvenli ve erişilebilir kentsel yaşamın sağlanmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Bununla birlikte, mevcut kentsel ulaşım altyapıları özellikle hareket kısıtlılığı bulunan bireyler açısından erişilebilirlik sorunlarını tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Bu sorunun en yaygın örneklerinden biri, yalnızca sağlıklı bireyler gözetilerek tasarlanmış merdivenli üst geçitlerdir; bu tür yapıların engelli, hamile ve yaşlı bireyler tarafından da kullanılabilir hâle getirilmesi, kentsel erişilebilirliğin sağlanması açısından bir zorunluluk hâline gelmiştir.

Bu çalışma, Trabzon kent merkezinde yer alan yaya üst geçitlerinin erişilebilirlik durumlarını Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir yöntemle analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında üst geçitler yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılarak tespit edilmiş, yapısal özellikleri ve asansör varlığı gibi öznitelik bilgileri ArcGIS ortamında oluşturulan veri tabanına işlenmiştir. Elde edilen mekânsal veriler üzerinden üç boyutlu (3B) ortama aktarılmış ve analiz sonuçlarının daha etkin değerlendirilebilmesi için web tabanlı bir CBS uygulaması tasarlanmıştır. Geliştirilen sistem, üst geçitlere ilişkin erişilebilirlik bilgilerinin mekânsal olarak sorgulanabilmesine olanak sağlayarak karar vericiler ve planlamacılar için veri temelli bir analiz altyapısı sunmaktadır. Çalışmanın, erişilebilirlik odaklı kentsel planlama süreçlerine katkı sağlayarak daha kapsayıcı ve sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesine destek olması hedeflenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Akıllı Şehir, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Erişilebilirlik, Yaya Üst Geçit, Trabzon

DETECTION OF ELEVATOR-EQUIPPED PEDESTRIAN OVERPASSES FOR INDIVIDUALS WITH DISABILITIES USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS WITHIN THE SCOPE OF SMART CITIES: THE CASE OF TRABZON

ABSTRACT

With the acceleration of urbanization today, the smart city approach and one of its core components, Intelligent Transportation Systems (ITS), play a significant role in ensuring sustainable, safe, and accessible urban living. However, existing urban transportation infrastructures fail to fully eliminate accessibility challenges, particularly for individuals with limited mobility. One of the most common examples of this problem is pedestrian overpasses designed solely with stairs, catering only to able-bodied individuals; making such structures usable for individuals with disabilities, pregnant women, and elderly people has therefore become a necessity for ensuring urban accessibility.

This study aims to analyze the accessibility status of pedestrian overpasses located in the city center of Trabzon using a Geographic Information Systems (GIS)-based method. Within the scope of the study, overpasses were identified using high-resolution satellite imagery, and attribute information such as structural characteristics and the presence of elevators was processed into a database created in the ArcGIS environment. The obtained spatial data were transferred into a three-dimensional (3D) environment for visualization, and a web-based GIS application was designed to enable more effective evaluation of the analysis results. The developed system allows accessibility information regarding overpasses to be queried spatially, providing decision-makers and planners with a data-driven analytical infrastructure. The study is expected to contribute to accessibility-focused urban planning processes and support the development of more inclusive and sustainable transportation policies.

Keywords: Smart City, Geographic Information Systems (GIS), Accessibility, Pedestrian Overpass, Trabzon

1. GİRİŞ VE ANA BÖLÜMLER

Şehirlerin hızla büyümesi ve nüfusun artışı geleneksel ulaşım sistemini yetersiz kılmakta, bu durum "Akıllı Şehir" kavramını ortaya koymaktadır (Townsend, 2013). Akıllı şehirler; veri analitiği, yapay zekâ ve bilgi iletişim teknolojileri gibi ileri bileşenleri kullanarak kentsel yaşam kalitesini en faydalı hale getirmeyi amaçlamaktadır(Nam & Pardo, 2011). Bilişim ve iletişim altyapısını ana kaldıraç olarak kullanan bu model, insan-çevre etkileşiminde maksimum verimliliği yakalamayı hedeflemektedir (Batty vd., 2012). Asıl amacı, ileri teknolojiyle donatılmış altyapı sistemlerinin rehberliğinde, kendi kendine yetebilen akıllı yaşam alanları ve modern alanlar üretmektir.

Akıllı şehir çalışmalarında yaşlı, hamile ve engelli bireyler gibi dezavantajlı kesimlere emniyetli ve engelsiz erişim imkânları sağlamak öncelikli hale gelmiştir (Ateş & Erinsel Önder, 2019). Şehir içi hareketlilikte bu kitlenin önüne çıkan en büyük fiziki bariyerlerin başında, yaya geçiş sistemlerinin (alt ve üst geçitlerin) evrensel erişilebilirlik kriterlerini uygun tasarlanmaması gelmektedir (Yumrutaş & Çınar Sarısoy, 2021). Taşıt trafiğinin kesintisiz akışını

korumak ve yaya emniyetini tesis etmek üzere hayata geçirilen üst geçit yapıları inşa edilmekte; asansör, rampa ya da mekanik yürüyen sistemlerden yoksun bırakılmaktadır. Özellikle Trabzon gibi topografik eğimin yüksek ve yapılaşmanın yoğun olduğu kentlerde, yaya üst geçitlerinin erişilebilirlik kriterlerini yeterince karşılamaması, ihtiyaçlı bireylerin kentsel hareketlilikte bağımsız ve güvenli erişimini zorlaştırabilmektedir. Ulaşım ağlarının günümüzde çok boyutlu ve veri temelli bir yapıya dönüşmesiyle birlikte, yaya üst geçitleri gibi altyapı bileşenlerinin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamında dijital olarak modellenmesi ve erişilebilirlik özellikleriyle birlikte analiz edilmesi, akıllı navigasyon ve mekânsal karar destek sistemleri açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Deng & Fei, 2008).



Şekil 1. Adacık Köyü Yol Ayrımı



Şekil 2. Boztepe Mahallesi Yahyaoğlu Cami Önü (Merdivenli)



Şekil 3. Akçaabat Merkez Belediye Önü İbrahim Seyis



Şekil 4. KTÜ-C Kapısı (Asansörlü)

Şekil 1. ve Şekil 2. görsellerinde Trabzon iline ait örnek merdivenli üst geçitler, Şekil 3. ve Şekil 4. ise asansörlü üst geçitler yer almaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Trabzon kent merkezinde yer alan yaya üst geçitlerinin erişilebilirlik durumlarını Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bütüncül bir yaklaşımla incelemektir. Araştırma kapsamında, uydu görüntüleri üzerinden konumları belirlenen üst geçitlerin asansör varlığı gibi öznitelik bilgileri ArcGIS yazılımı ortamında veri tabanına işlenmiş ve web tabanlı ortama aktarılmıştır. Çalışmanın özgünlüğü; uydu verileri ile yerinde tespit edilen verilerin CBS çatısı altında birleştirilerek, kullanıcıların web ortamında sorgulayabileceği ve analiz edebileceği etkileşimli bir platform tasarlanmış olmasında yatmaktadır. Geliştirilen bu web tabanlı uygulama, başta hareket kabiliyeti kısıtlı bireyler olmak üzere tüm vatandaşların yaşamını kolaylaştırmayı ve gelecekteki erişilebilirlik odaklı akıllı ulaşım yatırımlarına mekânsal bir altlık sunmayı hedeflemektedir.

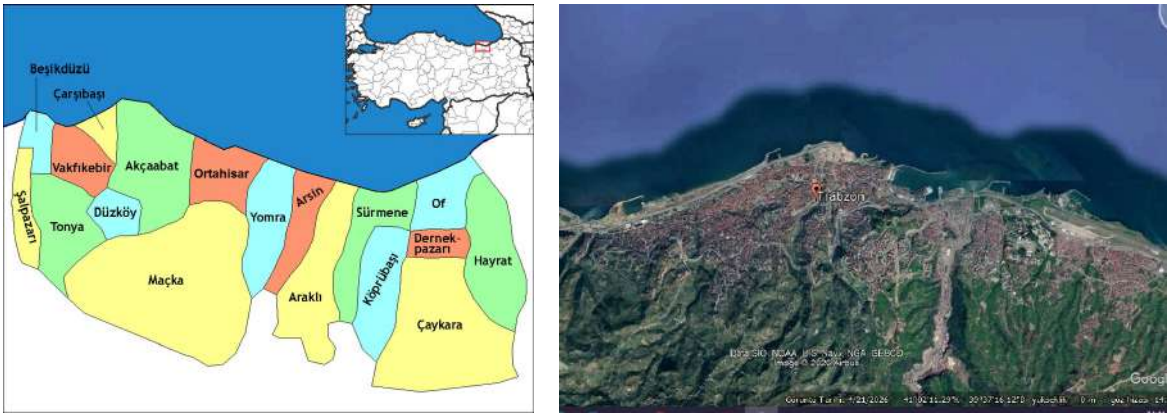
1.2 Çalışma Alanı

Uygulama sahası olarak, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin turistik ve coğrafi öneme sahip illerinin başında gelen Trabzon ili seçilmiştir. Gelişmiş coğrafi yapısı bakımından Trabzon tipik bir sahil kenti morfolojisine sahiptir. Kentin yönetsel, ticari ve kültürel kalbi niteliğindeki Ortahisar başta olmak üzere tüm ilçeleri barındıran bu çalışma alanı, bölge genelinde demografik yoğunluğun ve taşıt sirkülasyonunun en üst seviyeye ulaştığı hatları kapsamaktadır (T.C. Trabzon Valiliği, t.y.).

Kentin topografik karakteri, sahilden iç kesimlere yani kuzeyden güneye doğru hızla yükselen eğimli bir yüzey formundan oluşmaktadır. Kentsel hareketliliğin ana omurgasını teşkil eden Karadeniz Sahil Yolu üzerindeki karayolu akışının bölünmeden, kesintisiz sürdürülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu topografik yapı sahadaki ulaştırma ağları kent içi seyahatler için hayati bir işlev görmektedir. Taşıt trafiğinin yoğun olduğu güzergâhlarda yayaların can güvenliğini korumak adına inşa edilen üst geçitler, kentsel altyapının vazgeçilmez birer bileşeni haline gelmiştir (Zorlu vd.,2010).

Bununla birlikte, Trabzon'un sahip olduğu engebeli dik arazi yapısı; özellikle engelliler, yaşlılar ve çocuklar gibi hareket kısıtlılığı bulunan kişilerin şehir içi hareketliliği kısıtlayan bir bariyer üretmektedir (Odabaş-Uslu & Güneş, 2017). Araştırma sınırlarına tüm ilçelerin dahil edilmesindeki temel motivasyon; bölge genelinde yer alan yaya üst geçitlerinin mekanik ve fiziki erişilebilirlik donanımları (asansör, yürüyen merdiven ya da rampa yapıları) bakımından güncel durum tespitlerinin yapılarak mekânsal envanterlerinin çıkarılmasıdır. Bu envanterin oluşturulması, kentin akıllı, sürdürülebilir ve engelsiz bir kimliğe kavuşması adına öncelikli bir ihtiyaçtır. Özetle bu çalışma; tüm Trabzon genelindeki yaya üst geçitlerinin mevcut konumsal verilerini ve erişilebilirlik parametrelerini analiz ederek, mevcut

sorunların CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı platformlarda sorgulanıp modellenebilmesi noktasında kapsamlı bir pilot bölge referansı sunmaktadır.



Şekil 5. Çalışma alanı (Google Earth Pro, 2026)

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Akıllı Kentler ve Akıllı Ulaşım Entegrasyonu

Akıllı şehir yaklaşımı, teknolojik inovasyonlar aracılığıyla kentsel kaynakların etkin yönetimini ve vatandaşların yaşam kalitesini artırmayı hedefleyen dinamik bir paradigmadır (Nam & Pardo, 2011). Altyapı, enerji, yönetişim ve mobilite gibi çok katmanlı bir yapıya sahip olan akıllı kentlerin en temel yapı taşlarından birini Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) oluşturmaktadır (Batty vd., 2012). Günümüzde kentsel nüfusun hızla artması, geleneksel ulaşım planlama yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmuş ve sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde AUS'un yaygınlaştırılmasını bir seçenek olmaktan çıkarıp zorunluluk haline getirmektedir (Şengül & Yüksel Altıntaş, 2020).

2.2. Kentsel Erişilebilirlik ve Dezavantajlı Gruplar

Sürdürülebilir bir akıllı ulaşım sisteminin başarısı, kentsel mekânın toplumun tüm kesimleri için ne derece "erişilebilir" olduğu ile doğrudan ilişkilidir. Kentsel erişilebilirlik; engelli, yaşlı, çocuk ve hamile bireyler gibi hareket kabiliyeti kısıtlı dezavantajlı grupların, kentsel hizmetlere ve kamusal alanlara bağımsız, güvenli ve engelsiz bir şekilde ulaşabilmesini tanımlamaktadır (5378 Sayılı Engelliler Hakkında Kanun, 2005). Ancak kentsel altyapıların tarihsel süreçte çoğunlukla yalnızca sağlıklı bireylerin fizyolojik özellikleri referans alınarak tasarlanması, dezavantajlı bireylerin sosyal ve ekonomik hayata katılımının önünde ciddi bir bariyer oluşturmaktadır (Odabaş-Uslu & Güneş, 2017). Akıllı şehir vizyonu, teknolojik gelişmeleri kapsayıcı kentsel tasarım ilkeleriyle birleştirerek bu mekânsal eşitsizlikleri ortadan kaldırmayı ve herkes için eşit hareket özgürlüğü sağlamayı hedeflemektedir (Townsend, 2013).

2.3. CBS, 3B Kent Modelleme ve Web Tabanlı Uygulamalar

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), kentsel altyapı verilerinin toplanması, depolanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesinde en güçlü araçlardan biridir. ArcGIS gibi gelişmiş CBS yazılımları, mekânsal verilere öznitelik bilgileri (asansör varlığı, rampa eğimi, basamak yüksekliği vb.) eklenerek kentsel erişilebilirlik analizlerinin yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Literatürde, iki boyutlu haritalama tekniklerinin ötesine geçilerek kent mobilyalarının ve altyapılarının katı (3B) modellerinin üretilmesi, kentsel mekânın gerçekçi bir şekilde analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır (Deng & Fei, 2008). Ayrıca, üretilen bu dinamik verilerin web tabanlı CBS platformları üzerinden sorgulanabilir bir şekilde kullanıcıya sunulması, dezavantajlı bireylerin seyahat öncesinde rota planlaması yapabilmelerini sağlamakta ve akıllı şehirlerin "katılımcı" ve "şeffaf" yönetim anlayışını desteklemektedir.

3. YÖNTEM

3.1 Uydu görüntülerinin elde edilmesi

Mevcut çalışma, Trabzon il merkezinde konumlanan yaya üst geçitlerinin uzaktan algılama verileri ve CBS analitik araçları yardımıyla belirlenmesini ve mekânsal envanterlerinin dijital ortama aktarılmasını hedeflemektedir. Yöntem süreci; veri temini, görsel yorumlama, konumsal referanslama ve öznitelik verilerinin yapılandırılması aşamalarından oluşmaktadır.

3.1.1 Veri Kaynakları ve Altlık Bilgileri

Yaya üst geçitlerinin morfolojik yapılarından ötürü, konumsal tespitlerin yüksek doğrulukla yapılabilmesi amacıyla yüksek çözünürlüklü kentsel görüntü altyapısından faydalanılmaktadır. Çalışma kapsamında, üst geçitlerin konumsal tespiti hem yerinde fotoğraflarının çekimi hem de Karayolları Müdürlüğünden alınan bilgiler dâhilinde üst geçitlerin isimleri ve konumları belirlenmiştir. Görsel doğrulaması Google Earth Pro yazılımı ile sağlanan yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve Noktasal ölçekte detay gerektiren üst geçitlerin belirlenmesinde ise ArcGIS BaseMap

servislerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, makro ölçekli uydu verileri ile mikro ölçekli kentsel görüntülerin birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır.

Burada teknik bir ayrımın netleştirilmesi gerekmektedir: Google Earth Pro ve ArcGIS BaseMap gibi servis sağlayıcılar, çözünürlük ve kapsama alanına bağlı olarak farklı yakınlaştırma seviyelerinde uydu görüntüsü (satellite imagery) ile hava fotoğrafı (aerial photography) kaynaklarını hibrit biçimde sunabilmektedir. Belirli bir yakınlaştırma eşiğinden sonra hava fotoğrafı karolarının (tile) çağrılması bu servislerde yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada, kent geneli ölçeğindeki ön tespitlerde Google Earth Pro üzerinden erişilen uydu görüntüleri, üst geçitlerin asansör/rampa gibi ayrıntı düzeyinde doğrulanmasını gerektiren noktasal tespitlerde ise ArcGIS BaseMap servisinin sunduğu yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları kullanılmaktadır. Bu yüzden iki veri kaynağı birbirinin yerine değil, farklı ölçeklerde birbirini tamamlayıcı biçimde tercih edilmektedir.

3.1.2. Görsel Yorumlama ve Ön Tespit

Elde edilen raster veriler ve altlık haritalar, CBS ortamında görsel yorumlama yöntemi ile değerlendirilmiştir. Trabzon il merkezindeki ana ulaşım aksları boyunca, üst geçitlerin kendilerine has geometrik yapıları, gölge unsurları ve çevre bağlantıları analiz edilerek ön tespit işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, spektral çözünürlüğün yanı sıra yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip altlık haritalar sayesinde yaya üst geçitleri net bir şekilde ayırt edilmiş ve çalışma alanındaki tüm hedef yapılar belirlenmektedir.

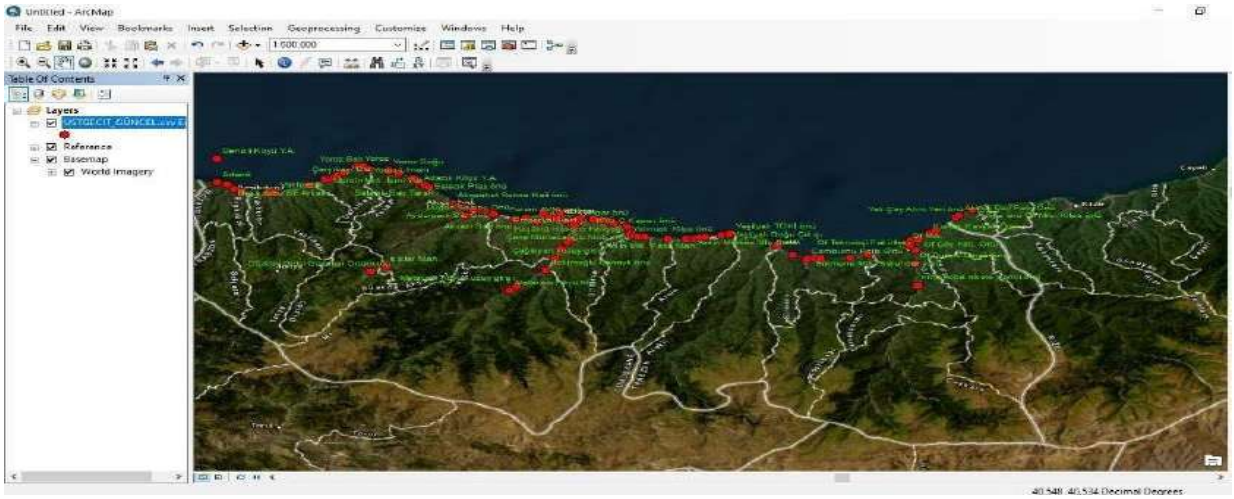
3.1.3. Mekânsal Konumlandırma ve Veri Tabanı Oluşturma

Görsel analizler sonucunda tespiti tamamlanan yaya üst geçitlerinin merkez noktaları referans alınarak yaklaşık coğrafi koordinat bilgileri üretilmiştir Elde edilen mekânsal veriler, ilgili öznitelik bilgileriyle birlikte CBS ortamında bütünleştirilmiş ve analiz edilebilir bir veri yapısına dönüştürülmüştür. Hazırlanan envanter veri tabanı, platformlar arası veri aktarıla bilirliği için Excel ortamında düzenlenmiş, virgülle ayrılmış değerler formatında (.CSV) kaydedilerek dijital ortama aktarılmıştır.

3.2. Süreç ve Metodoloji

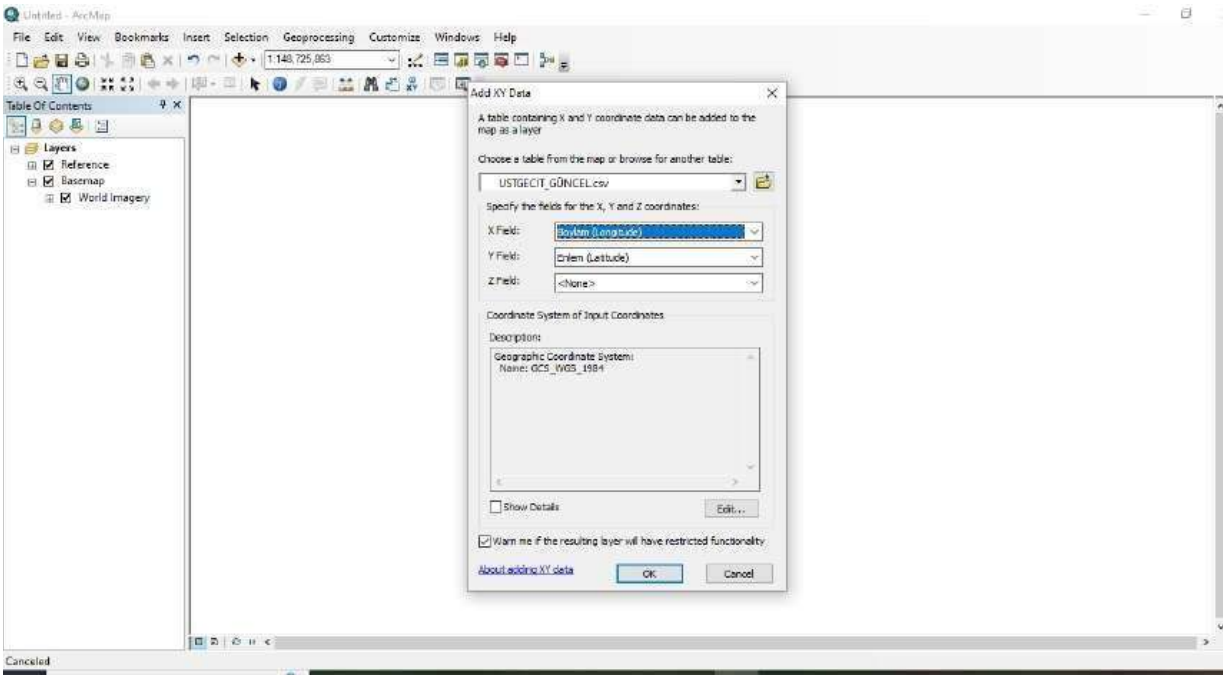
Coğrafi veri işleme süreci dört ana aşamadan oluşmaktadır.

- Veri hazırlama ve koordinat referanslandırma
- Mekânsal bütünleştirme,
- Öznitelik doğrulama ve
- Görsel doğrulama aşamalarını kapsamaktadır**.**

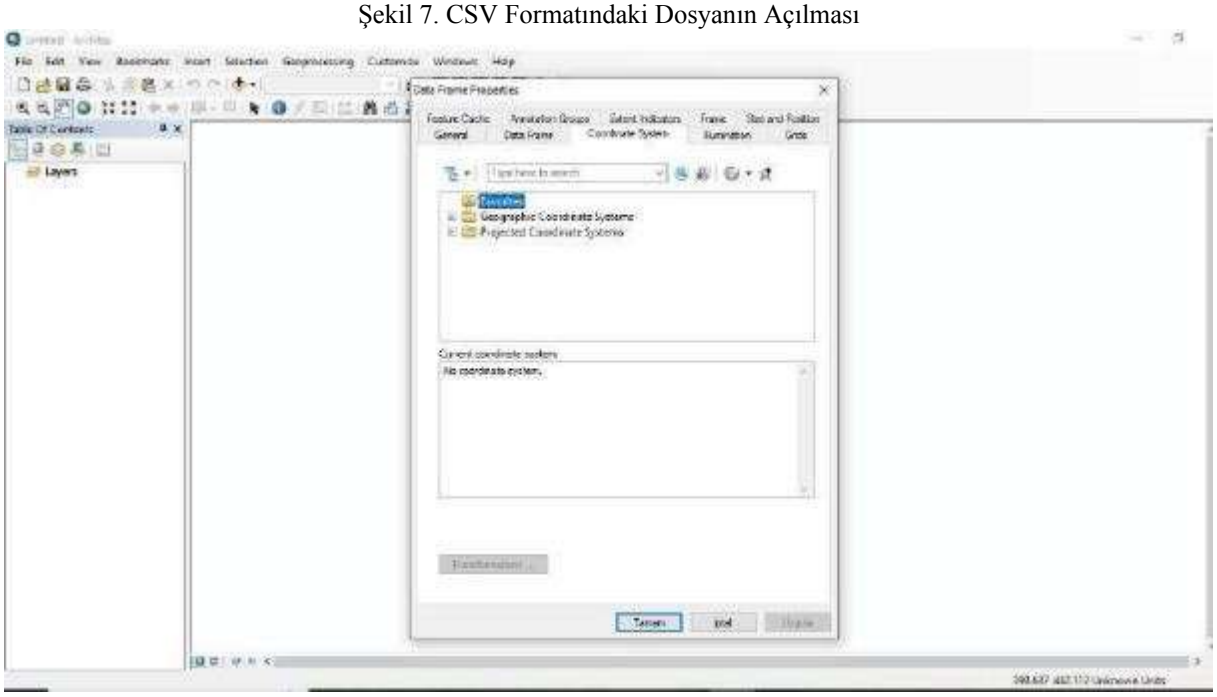


Şekil 6. Referans Noktanın Belirlenmesi

Saha ve uygulamalar kullanılarak elde edilen çalışmalardan üst geçit verileri, platformlar arası aktarılabilirliği sağlamak amacıyla önce Excel ortamında düzenlenmiştir. Ardından virgülle ayrılmış değerler formatında (.CSV) kaydedilmiştir. Bu dosya, doğru koordinat sisteminin atanmasını sağlayan bir referans noktası tanımlanarak ArcMap yazılımına aktarılmıştır (Şekil 6, Şekil 7).



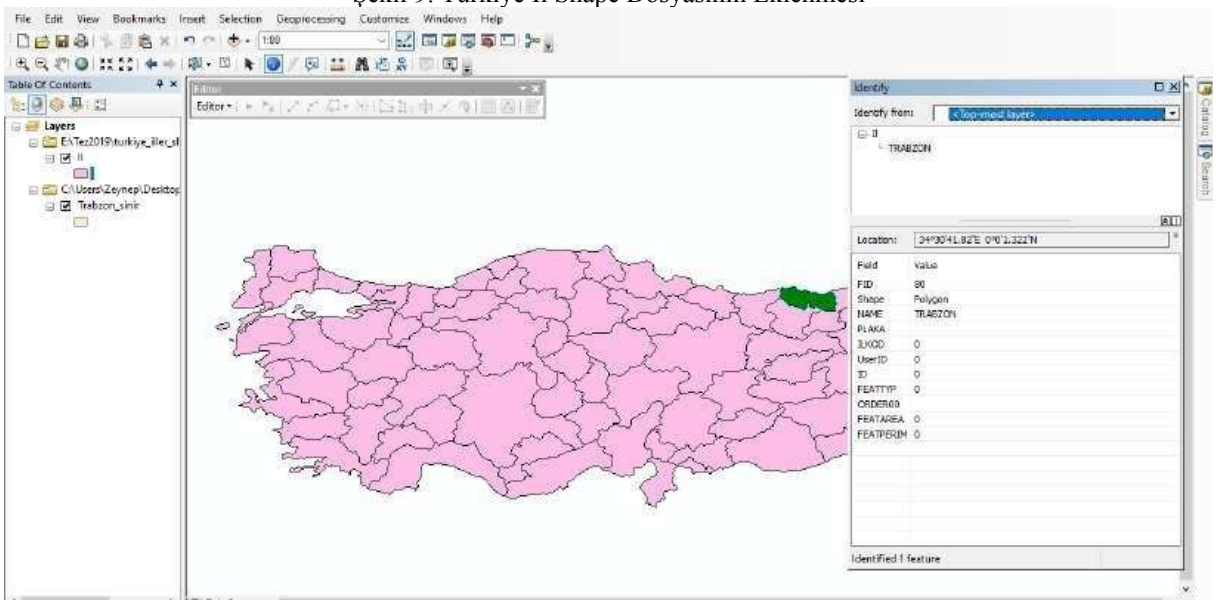
Şekil 7. CSV Formatındaki Dosyanın Açılması



Şekil 8. Basemap Haritasının Eklenmesi



Şekil 9. Türkiye İl Shape Dosyasının Eklenmesi



Şekil 10. Basemap ve Shape Dosyasının Çakıştırılması



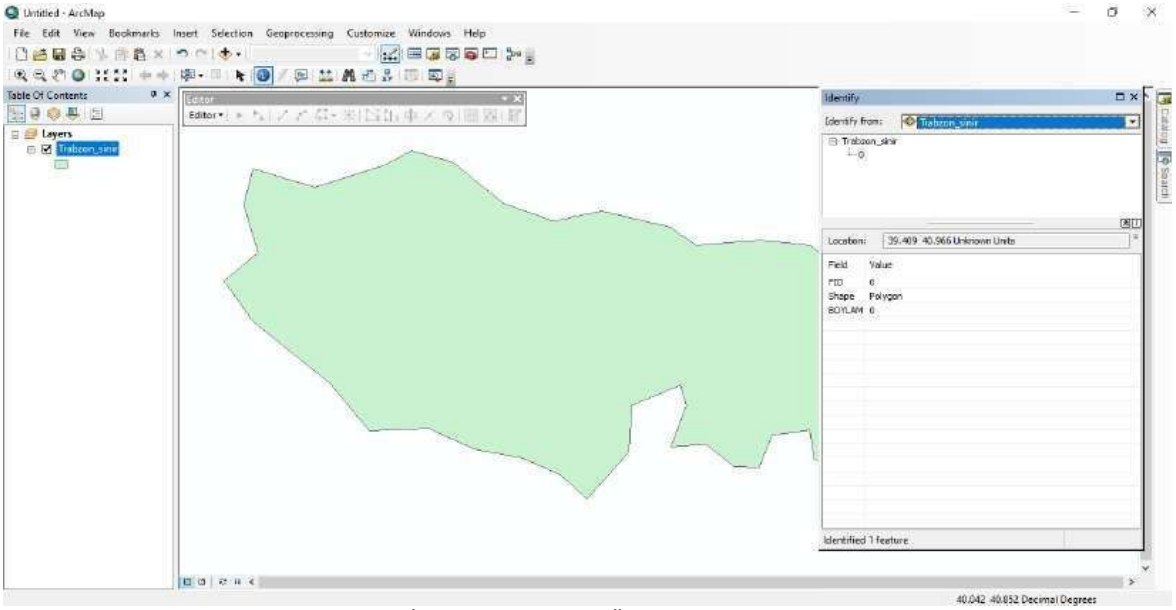
Şekil 11. Trabzon İl Sınırları İçinde Yer Alan Üst Geçitlerin Yazılımında Gösterilmesi



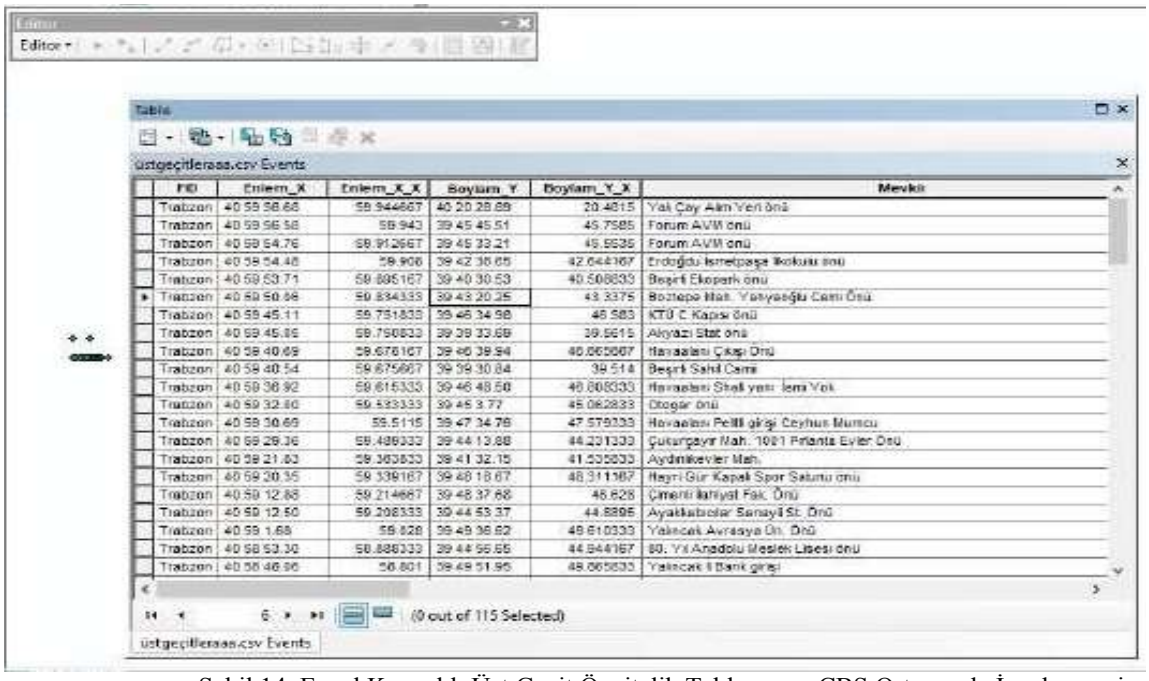
Şekil 12. Trabzon İlinin Verisinin İl Shape Dosyasından Kesilerek Gösterilmesi

CBS ortamındaki katman yönetiminin ilk adımı olarak güncel uydu verilerini içeren bir Basemap altlığı ve Türkiye İl Shapefile dosyası çalışma alanına eklenmiştir. iki katmanın tam bir coğrafi uyum içinde çakıştığı doğrulanmıştır (Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10). Çalışmanın Trabzon ili özelinde yürütülmesi nedeniyle, analiz dışı alanları elemek amacıyla Clip (Kesme) fonksiyonu uygulanarak çalışma alanı yalnızca Trabzon il sınırlarını kapsayacak şekilde sınırlandırılmıştır (Şekil 11, Şekil 12).

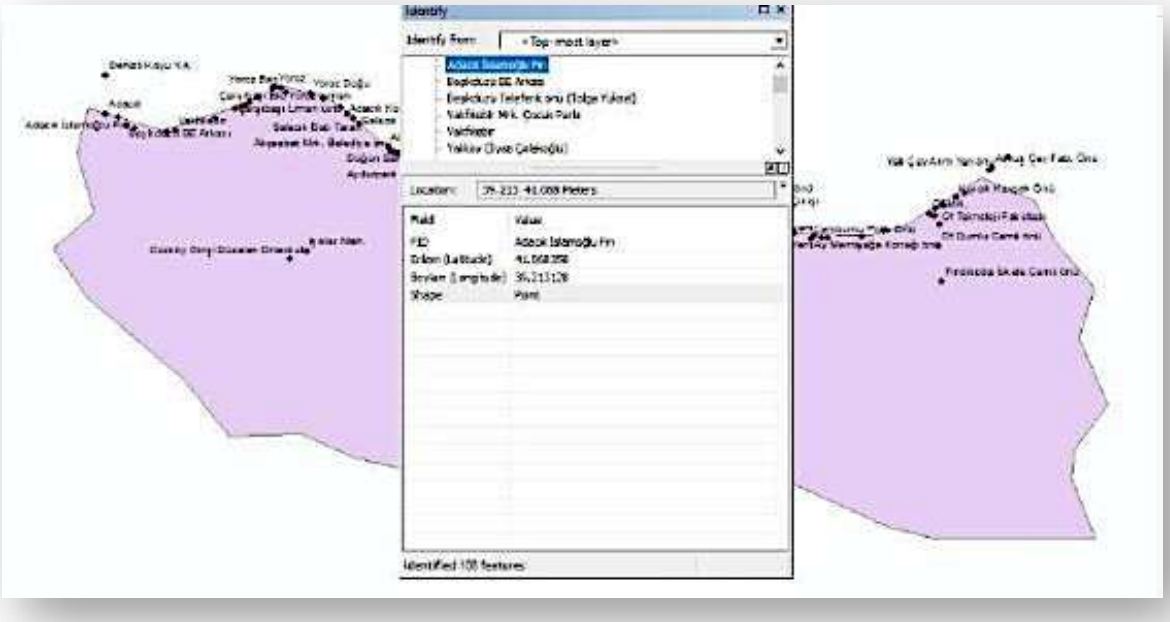
Sınırlandırılan çalışma alanına ait üst geçit noktalarının enlem ve boylam değerleri, ArcMap öznitelik tablosu üzerinden kontrol edilmiştir (Şekil 13, Şekil 14). Mekânsal tutarlılığın sağlanması amacıyla, üst geçit noktalarını içeren veri katmanı ile idari sınır Shapefile'ı aynı projeksiyon ve koordinat referans sistemine (CRS) dönüştürülmüş, ardından öznitelik sorgulamalarıyla (ad, tür, konum) veri tabanının doğruluğu teyit edilmiştir (Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17).



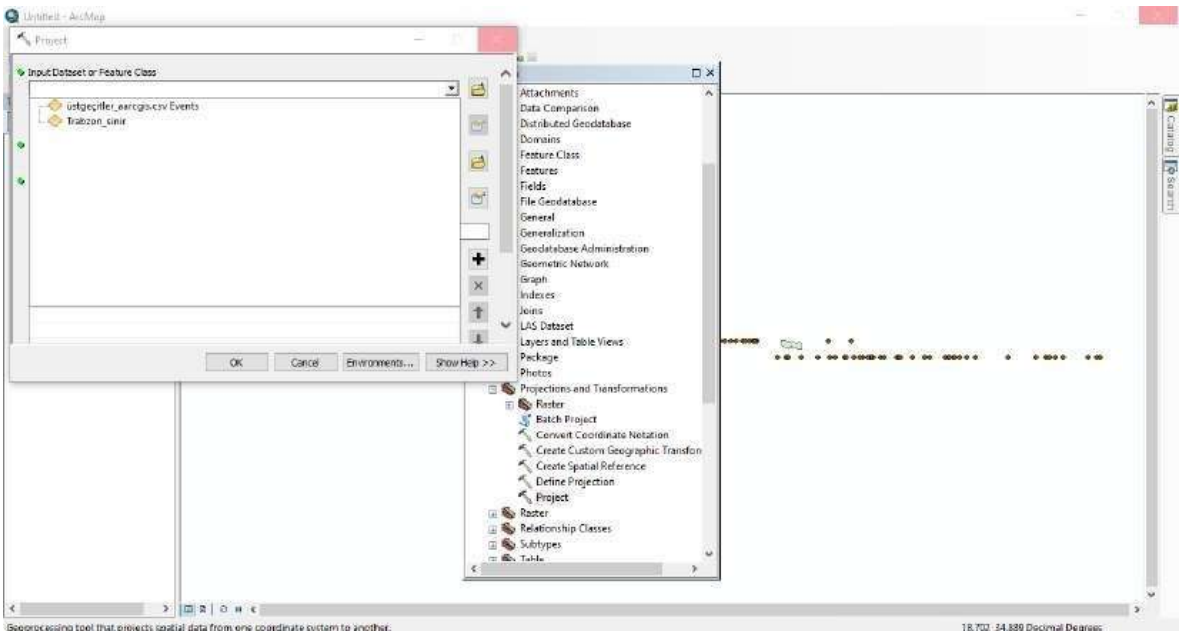
Şekil 13. Trabzon İline Ait Verilerin Öznitelik Veri Girişi ve Kontrolü



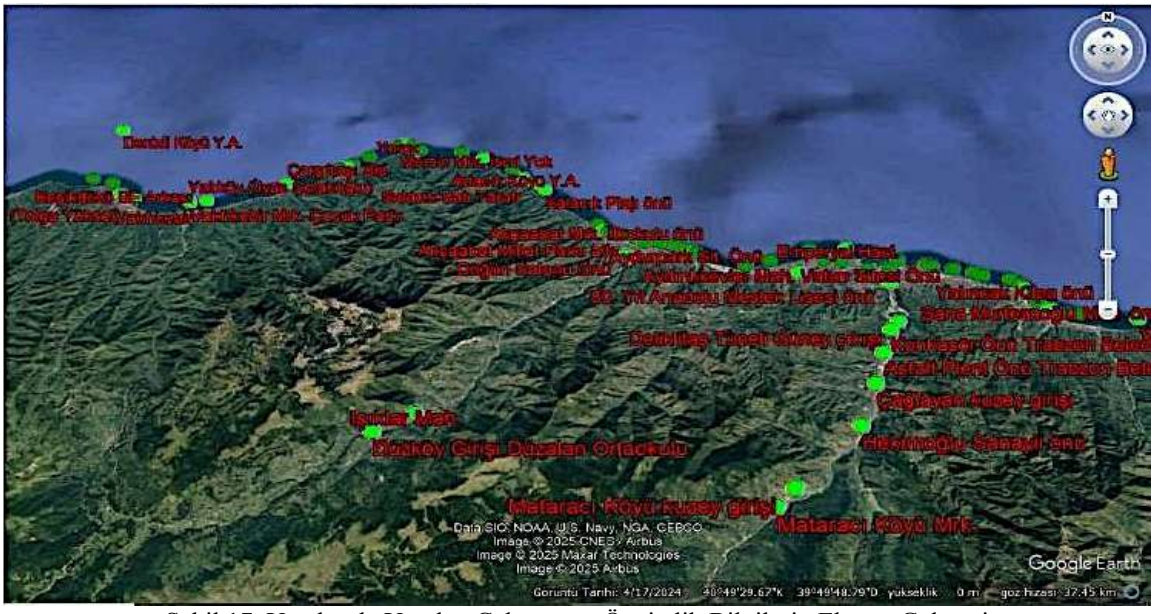
Şekil 14. Excel Kaynaklı Üst Geçit Öznitelik Tablosunun CBS Ortamında İncelenmesi



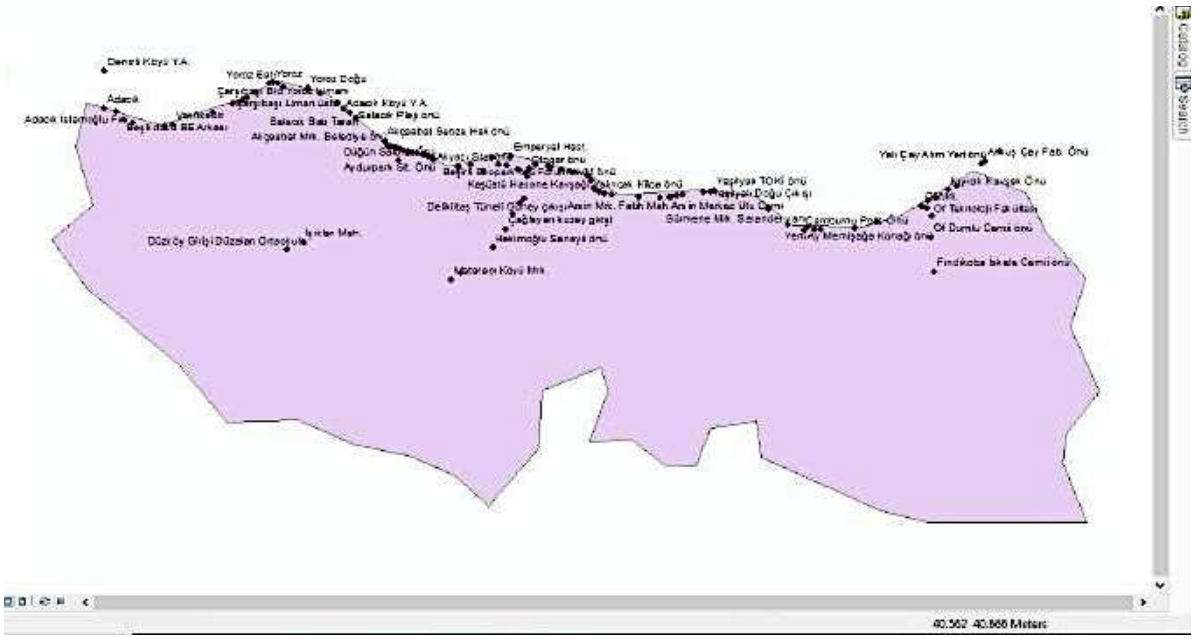
Şekil 15. Katmanlar için Projeksiyon ve Koordinat Dönüşüm İşlemi



Şekil 16. Tüm Verilerin Aynı Koordinat Sisteminde Oluşturulması



Şekil 17. Yazılımda Yapılan Çalışmanın Öznitelik Bilgilerin Ekrana Gelmesi



Şekil 18. Basemap Üzerinde Üst Geçitlere Ait Verilerin Gösterilmesi



Şekil 19. Basemap üzerinde de üst geçitlere ait verilerin yakından gösterilmesi



Şekil 20. Google Earth yazılımında üst geçitlerin konumlarının gösterilmesi

Üretilen vektörel katmanın mekânsal doğruluğu, verilerin Basemap altlığı üzerinde genel ve yakın ölçekte görselleştirilmesiyle (Şekil 18, Şekil 19) ve Google Earth Pro'daki yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri üzerinde yapılan üç boyutlu görsel kontrolle sınanmıştır. Bu kontrol sonucunda üst geçit koordinatlarının mimari yapılarla tam olarak örtüştüğü doğrulanmış, konumlandırma doğruluğu sağlamlaştırılmıştır (Şekil 20).

4. BULGULAR

Uzaktan algılama teknikleri, GPS tabanlı saha doğrulamaları ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında yürütülen mekânsal analizler neticesinde, Trabzon ili sınırları genelinde büyük bir kısmının ana ulaşım aksları ve kıyı şeridi boyunca yoğunlaştığı toplam 113 adet yaya üst geçidi tespit edilerek haritalandırılmıştır. Elde edilen ham veriler, yapıların fiziksel özellikleri ve yerinde yapılan gözlemler doğrultusunda tasnif edilmiştir. Üst geçitlerin erişilebilirlik durumlarına göre dağılımı yapısal ve mekânsal ölçütler doğrultusunda gruplandırılmaktadır.

Tablo 1. Trabzon İli Sınırları İçindeki Yaya Üst Geçitlerinin Erişilebilirlik Durumlarına Göre Dağılımı

Erişilebilirlik Sınıfı / Yapısal Durumu	Üst Geçit Sayısı (Adet)	Oran (%)
Asansörlü ve Rampalı (Tam Erişilebilir)	4	%3,54
Sadece Rampalı (Kısmi Erişilebilir)	5	%4,42
Sadece Asansörlü (Kısıtlı Erişilebilir)	4	%3,54
Sadece Merdivenli (Ek Donanımsız)	100	%88,50
TOPLAM	113	%100,00

ArcGIS yazılımında oluşturulan veri tabanında, her bir üst geçide ait mekânsal veriler "Geçidin Cinsi" öznitelik başlığı altında sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, özellikle hareket kısıtlılığı bulunan engelli, yaşlı ve hamile bireylerin kentsel hareketliliğini doğrudan etkileyen yapısal kriterlere dayanmaktadır.

Sınıflandırma sürecinde her bir üst geçidin asansör ve rampa varlığı öncelikli olarak Karayolları Müdürlüğü'nden temin edilen kayıtlar ve yerinde çekilen fotoğraflarla doğrudan doğrulanmaktadır. Bununla birlikte yerinde tespitin mümkün olmadığı sınırlı sayıdaki noktada ise ArcGIS BaseMap servisinden elde edilen yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları üzerinden görsel yorumlama yöntemiyle teyit edilmiştir. Bu çok kaynaklı doğrulama yaklaşımı, dört erişilebilirlik sınıfının (Tam Erişilebilir, Kısmi Erişilebilir, Kısıtlı Erişilebilir, Sadece Merdivenli) güvenilir biçimde oluşturulmasını sağlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, akıllı şehir yaklaşımı için de engelli bireylerin kentsel hareketliliğini artırmak açısından önemli bir veri tabanı oluşturmaktadır. Bu nedenle, belediyeler ve diğer yerel kurumlar, oluşturulan haritalar ve veri tabanını kullanarak engellilere yönelik altyapı projelerini öncelikli olarak sunabilmektedirler. Ayrıca, web tabanlı CBS uygulamasının sürdürülebilir şekilde güncellenmesi, vatandaşlardan gelen geri bildirimler ile birlikte dinamik veri akışını sağlayarak daha doğru sonuçlar üretecektir. Trabzon ili yol ağında bulunan 113 yaya üst geçidinin mevcut durumunu "akıllı şehir" ve "evrensel tasarım" prensipleri çerçevesinde analiz ederek, engelli bireylerin kentsel hareketliliğine dair kapsamlı bir veri tabanı oluşturmaktadır.

Yapılan veri derleme süreci sonucunda, yapısal modernleşmeye rağmen, erişilebilirlik unsuru barındıran (asansörlü ve/veya rampalı) üst geçitlerin toplam stok içinde yalnızca %11,50 düzeyinde kalması ve bunların da yalnızca %3,54'ünün (4 adet) hem asansöre hem rampaya sahip olarak tam erişilebilir nitelikte bulunması, kentin yaya altyapısının engelli ve yaşlı bireyler için hâlâ büyük oranda "fiziksel bariyer" teşkil ettiğini kanıtlamaktadır.

Trabzon örneğinde geliştirilen süreç ve veri tabanı yapısının farklı kentlerde uygulanabilir olması, erişilebilir kentsel ulaşım planlaması açısından ölçeklenebilir bir model potansiyeli sunmaktadır. Bu yaklaşımın diğer kentlere uyarlanması, erişilebilirlik odaklı ulaşım planlamasında veri temelli karar alma süreçlerinin yaygınlaşmasına katkı sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, kentsel mekânda fiziksel erişilebilirliğin iyileştirilmesi yalnızca teknik bir düzenleme süreci olarak değil, aynı zamanda kent hakkı ve toplumsal eşitlik ilkeleri çerçevesinde ele alınması gereken bütüncül bir planlama yaklaşımıdır.

6. TEŞEKKÜR

"Bu çalışma, [1919b012327570] nolu ve 'Akıllı Şehirler Kapsamında Engelli Bireylere Yönelik Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Asansörlü Üst Geçitlerin Tespit Edilmesi: Trabzon Örneği]' başlıklı Tübitak [2209-A] Projesi kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz."

KAYNAKLAR

Ateş, M., & Erinsel Önder, D. (2019). 'Akıllı Şehir' kavramı ve dönüşen anlamı bağlamında eleştiriler. Megaron, 14(1), 41–50. https://doi.org/10.5505/MEGARON.2018.45087. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics, 214, 481–518. https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Deng, M., & Fei, L. (2008). Research on modeling the overpasses for mapping and navigation. In Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: The Built Environment and its Dynamics (Vol. 7144, pp. 851–859). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.812842. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

European Commission. (2017). Smart Cities – European Innovation Partnership. https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. In Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference: Digital Government Innovation in Challenging Times (pp. 282–291). ACM. https://doi.org/10.1145/2037556.2037602. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Odabaş-Uslu, A., & Güneş, M. (2017). Engelsiz kentler - Herkes için erişilebilir kentler. Uluslararası Peyzaj Mimarlığı Araştırma Dergisi, 1(2), 30-36. https://www.researchgate.net/publication/326507607_Engelsiz_Kentler-_Herkes_Icin_Erisilebilir_Kentler. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Özmen, T., Özmen, E., Taşkın, S., & Bulut, S. (2022). Akıllı ulaşım uygulamaları özelinde Manisa ili incelemesi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 5(1), 1–21. https://doi.org/10.51513/jitsa.1028202. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Şengül, R., & Yüksel Altıntaş, H. (2020). Akıllı kentin bir bileşeni olarak akıllı ulaşım uygulamalarının incelenmesi: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi örneği. International Journal of Cultural and Social Studies, 6(2), 487–502. https://doi.org/10.46442/intjcss.716124. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

T.C. Trabzon Valiliği. (t.y.). Coğrafi özellikleri. https://www.trabzon.gov.tr/cografi-ozellikleri. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Townsend, A. M. (2013). Smart cities: Big data, civic hackers, and the quest for a new utopia. W. W. Norton & Company.

Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (2024). Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları, 2024. https://www.tuik.gov.tr/. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Yumrutaş, H. İ., & Çınar Sarısoy, Ş. (2021). Comparison of overpass/underpass in the light of various parameters: Karabuk-Safranbolu case study. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(3), 681–695. https://doi.org/10.35414/akufemubid.889442. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

Zorlu, T., Aydıntan, E., & Engin, E. (2010). Kent kimliği: Tanjant ve Karadeniz Sahil Yollarının Trabzon kent kimliğine etkileri. Mimarlık Dergisi, 352, 54-59. https://mimarlikdergisi.com/index.cfm?DergiSayi=366&RecID=2331&sayfa=mimarlik. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

5378 Sayılı Engelliler Hakkında Kanun. (2005, 7 Temmuz). Resmî Gazete (Sayı: 25868). https://www.aile.gov.tr/eyhgm/mevzuat/ulusal-mevzuat/kanunlar/engelliler-hakkinda-kanun/. Erişim tarihi: 6 Eylül 2026.

SENTİNEL-2 DERİN SÜPER-ÇÖZÜNÜRLÜK ÜRÜNÜNÜN (S2DR3) RADYOMETRİK TUTARLILIĞININ FARKLI ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ: ADANA ÖRNEĞİNDE SU, ORMAN, ŞEHİR VE TARIM ALANLARI ÜZERİNE KARŞILAŞTIRMALI BİR ANALİZ

Fatih Fehmi ŞİMŞEK[1], Melih ALTAY [2], Mustafa ÜSTÜNER[3], Kaan KALKAN[4], Gökhan KURT[4]

1 TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye, fehmi.simsek@tubitak.gov.tr
2 Hacettepe Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, melihaltay17@hacettepe.edu.tr
3 Samsun Üniversitesi Özdemir Bayraktar Havacılık Ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İklim Bilimi Ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, mustafa.ustuner@samsun.edu.tr
4 TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye, kaan.kalkan@tubitak.gov.tr, gokhan.kurt@tubitak.gov.tr

ÖZET

Derin öğrenme tabanlı tek-görüntü süper-çözünürlük yöntemleri, Sentinel-2 görüntülerinin etkin uzamsal çözünürlüğünü 10 m'den 1 m'ye yükselterek çevresel izleme ve hassas tarım uygulamaları için yeni olanaklar sunmaktadır. Ancak bu ürünlerin radyometrik tutarlılığının farklı arazi örtüsü türlerinde tutarlı kalıp kalmadığı kritik bir doğrulama sorusudur. Bu çalışmada, GAMMA Earth tarafından geliştirilen S2DR3 (Sentinel-2 Deep Resolution 3.0) ürününün spektral-radyometrik tutarlılığı, indirgeme-tabanlı (downsampling consistency) bir protokol ile dört arazi örtüsü sınıfında (su, orman, şehir, tarım) değerlendirilmiştir. Çalışma alanları Türkiye'nin güneyinde, Adana ili ve çevresinde seçilmiştir: açık su, kapalı orman ve yoğun kentsel doku Sentinel-2 MGRS T36SXG paftasından (22 Ağustos 2025); büyük-parselli (homojen) tarım alanı ise Çukurova ovasını kapsayan T36SYF paftasından (25 Ağustos 2025) elde edilmiş ve her kesitin 10 spektral bandı analize dâhil edilmiştir. 1 m S2DR3 ürünü 10×10 blok ortalaması ile 10 m'ye indirgenerek, geçerli pikseller üzerinde belirlilik katsayısı (R^2), regresyon eğimi, sistematik sapma (bias) ve kök ortalama kare hata (RMSE) hesaplanmıştır. Sonuçlar belirgin bir ayrım ortaya koymuştur: uzamsal-spektral olarak görece homojen yüzeylerde açık su, kapalı orman ve büyük-parselli tarım S2DR3, 1:1 çizgisine son derece yakın, neredeyse sapmasız bir uyum sergilemiştir (su: ortalama $R^2 = 0{,}980$; orman: $R^2 = 0{,}943$; tarım: $R^2 = 0{,}967$; RMSE ≈ 0,012–0,015 yansıma; $|\text{sapma}| \leq 0{,}0011$). Buna karşılık, yalnızca uzamsal olarak ileri derecede heterojen kentsel dokuda (şehir: $R^2 = -2{,}14$) piksel-bazlı uyum tümüyle bozulmuş, RMSE bir büyüklük mertebesi artarak ≈ 0,17 değerine ulaşmıştır. Şehir saçılımının yönsüz (izotropik) bir bulut biçimine dönüşmesi, bu bozulmanın sistematik bir radyometrik önyargıdan ziyade, alt-piksel düzeyindeki geometrik eş-kayıt hatasının yüksek uzamsal-frekanslı sahne içeriğiyle etkileşiminden kaynaklandığını göstermektedir. Önemlisi, büyük ve homojen parsellerden oluşan tarım alanının su ve ormanla aynı düzeyde hatta en düşük RMSE ile yüksek tutarlılık sergilemesi, piksel-bazlı tutarlılığın belirleyicisinin arazi örtüsü sınıfının kendisi değil, sahnenin uzamsal homojenliği olduğunu doğrudan ortaya koymaktadır. Bant ölçeğinde, homojen sınıflarda dahi en düşük başarım kısa dalga kızılötesi (B11, B12) ve kırmızı-kenar (B05–B07) bantlarında görülmüştür. Bulgular, piksel-bazlı R^2'nin süper-çözünürlük ürünlerinin heterojen peyzajlardaki doğrulamasında tek başına yetersiz ve yanıltıcı olabileceğini; eş-kayda duyarsız ve yapısal ölçütlerle (ör. SSIM, pencere-temelli korelasyon, nesne-tabanlı karşılaştırma) tamamlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sentinel-2; süper-çözünürlük; S2DR3; derin öğrenme; radyometrik tutarlılık; arazi örtüsü; uzamsal homojenlik; eş-kayıt; Adana; Çukurova.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE RADIOMETRIC CONSISTENCY OF A SENTINEL-2 DEEP SUPER-RESOLUTION PRODUCT (S2DR3) ACROSS DIFFERENT LAND-COVER CLASSES: A COMPARATIVE ANALYSIS OVER WATER, FOREST, URBAN AND AGRICULTURAL AREAS IN ADANA, TÜRKİYE

Deep-learning single-image super-resolution (SISR) methods raise the effective spatial resolution of Sentinel-2 imagery from 10 m to 1 m, opening new possibilities for environmental monitoring and precision agriculture. Whether the radiometric fidelity of such products remains consistent across land-cover types, however, is a critical validation question. Here, the spectral–radiometric consistency of the S2DR3 (Sentinel-2 Deep Resolution 3.0) product developed by GAMMA Earth was evaluated against the source Sentinel-2 L2A image using a downsampling-consistency protocol over four land-cover classes (water, forest, urban, agriculture) in Adana, southern Türkiye. Water, forest and dense urban subsets were taken from Sentinel-2 MGRS tile T36SXG (22 August 2025), while a large-parcel (homogeneous) agricultural subset was taken from tile T36SYF over the Çukurova plain (25 August 2025); ten spectral bands of each cloud-free scene were used. The 1 m S2DR3 product was aggregated to 10 m by 10×10 block averaging, and R^2, regression slope, systematic bias and RMSE were computed over valid pixels. The results revealed a clear separation: over relatively homogeneous surfaces open water, closed forest and large-parcel agriculture S2DR3 showed near-unbiased agreement very close to the 1:1 line (water: mean $R^2 = 0.980$; forest: $R^2 = 0.943$; agriculture: $R^2 = 0.967$; RMSE ≈ 0.012–0.015 reflectance), whereas only over the spatially highly heterogeneous urban fabric ($R^2 = -2.14$) the pixel-wise agreement

collapsed and RMSE increased by an order of magnitude to ≈ 0.17. The urban scatter degenerating into an isotropic cloud indicates that this collapse stems not from a systematic radiometric bias but from the interaction of sub-pixel geometric mis-registration with high spatial-frequency scene content. Crucially, the large-parcel agricultural area matched water and forest — indeed with the lowest RMSE of all classes — directly showing that the determinant of pixel-wise consistency is the spatial homogeneity of the scene rather than the land-cover class itself. The findings show that pixel-wise R^2 alone can be insufficient and misleading for validating super-resolution products over heterogeneous landscapes and must be complemented by registration-tolerant and structural metrics (e.g., SSIM, windowed correlation, object-based comparison).

Keywords: Sentinel-2; super-resolution; S2DR3; deep learning; radiometric consistency; land cover; spatial homogeneity; co-registration; Adana; Çukurova.

1. GİRİŞ

Sentinel-2 ikiz uydu takımı, 10–60 m arasında değişen uzamsal çözünürlükte, 13 spektral bantta ve yüksek zamansal sıklıkta görüntü sağlayarak arazi örtüsü sınıflandırması, bitki örtüsü izleme, su kaynakları yönetimi ve kentsel analiz gibi pek çok uygulamanın temel veri kaynağı hâline gelmiştir (Drusch ve ark., 2012). Bununla birlikte, 10 m'lik en yüksek çözünürlüğü dahi parsel sınırları, bina kenarları ve dar su yolları gibi ince yapısal ayrıntıların ayırt edilmesi için çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, son yıllarda derin öğrenme tabanlı tek-görüntü süper-çözünürlük (single-image super-resolution, SISR) yöntemleri hızla yaygınlaşmıştır (Dong ve ark., 2016; Ledig ve ark., 2017; Wang ve ark., 2021).

Lanaras ve arkadaşları (2018), tüm Sentinel-2 bantlarını ortak ve küresel olarak uygulanabilir tek bir derin sinir ağıyla 10 m'ye yükselten öncü bir çalışma ortaya koymuş ve klasik keskinleştirme (pan-sharpening) yöntemlerine kıyasla belirgin üstünlük göstermiştir. Bu çizgiyi ileri taşıyan GAMMA Earth tarafından geliştirilen S2DR3 (Sentinel-2 Deep Resolution 3.0) modeli, tek bir Sentinel-2 L2A (veya L1C) sahnesinin tüm spektral bantlarını özgün 10, 20 ve 60 m çözünürlüklerinden hedef 1 m/piksel çözünürlüğe yükseltmekte ve toprak ile bitki örtüsünün ince spektral değişimlerini koruyacak biçimde, spektral tutarlılık gözetilerek optimize edilmektedir (Akhtman, 2024). Model, hassas tarımda parsel sınırlarının yüksek doğrulukla çıkarımı gibi pratik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Olvera-Rincón ve ark., 2025).

Süper-çözünürlük ürünlerinin değerlendirilmesinde iki temel boyut öne çıkar: (i) yapısal/uzamsal yeniden yapılandırma doğruluğu genellikle yüksek çözünürlüklü yer gerçeği görüntüsüne karşı RMSE, PSNR ve SSIM ile ölçülür; ve (ii) spektral-radyometrik tutarlılık özgün ve yükseltilmiş pikseller arasındaki ilişkinin korunması, çoğunlukla R^2 (belirlilik katsayısı) ile değerlendirilir. İkinci boyut özellikle önemlidir; çünkü süper-çözünürlük modelinin *özgün spektral veriye sistematik bozulma veya önyargı katmaması* beklenir. Bu amaçla, ölçek-tutarlılığı (consistency / Wald protokolü; Wald ve ark., 1997) ilkesine dayanan indirgeme-tabanlı doğrulama yaygın olarak kullanılır: yükseltilmiş ürün, kaynak çözünürlüğüne geri indirgendiğinde özgün görüntüyü yeniden üretebilmelidir.

Mevcut literatürde S2DR3'ün spektral tutarlılığına ilişkin değerlendirmeler çoğunlukla tek bir arazi türü (ör. tek bir tarım parseli) üzerinde ya da bütünleşik (sınıf-ayrımı yapılmayan) sahne ölçeğinde sunulmuştur. Oysa süper-çözünürlük modellerinin başarımının sahnenin uzamsal frekans içeriğine ve dokusal homojenliğine güçlü biçimde bağlı olabileceği bilinmektedir; modelin başarılı ve başarısız doku yeniden yapılandırma örnekleri bizzat ürün geliştiricileri tarafından da bildirilmiştir (Akhtman, 2024). Bu durum, *radyometrik tutarlılığın sahnenin uzamsal homojenliğine göre nasıl değiştiğinin* sistematik biçimde sınanmasını gerekli kılmaktadır. Bu amaçla çalışmada, homojenlik açısından bir gradyan oluşturacak biçimde dört kesit seçilmiştir: yüksek düzeyde homojen açık su ve kapalı orman, homojen (büyük-parselli) bir tarım alanı ve ileri derecede heterojen bir kentsel doku.

Bu çalışmanın amacı, S2DR3 süper-çözünürlük ürününün radyometrik tutarlılığını, kontrollü ve karşılaştırılabilir bir indirgeme-tabanlı protokol kullanarak dört temsil edici arazi örtüsü sınıfında (su, orman, şehir, tarım) bant bazında nicel olarak değerlendirmektir. Çalışmada üç araştırma sorusu ele alınmaktadır: (1) S2DR3 ürünü kaynak Sentinel-2 radyometrisini hangi arazi örtüsü sınıflarında ve hangi homojenlik koşullarında ne ölçüde korumaktadır? (2) Tutarlılık ölçütleri spektral bantlar arasında nasıl değişmektedir? (3) Gözlenen başarım örüntüleri, modelin içsel spektral davranışıyla mı yoksa geometrik eş-kayıt ve sahne homojenliği gibi dış etkenlerle mi açıklanabilir? Bu sorulara verilen yanıtlar, süper-çözünürlük ürünlerinin operasyonel kullanımına ve doğrulama protokollerinin tasarımına doğrudan katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

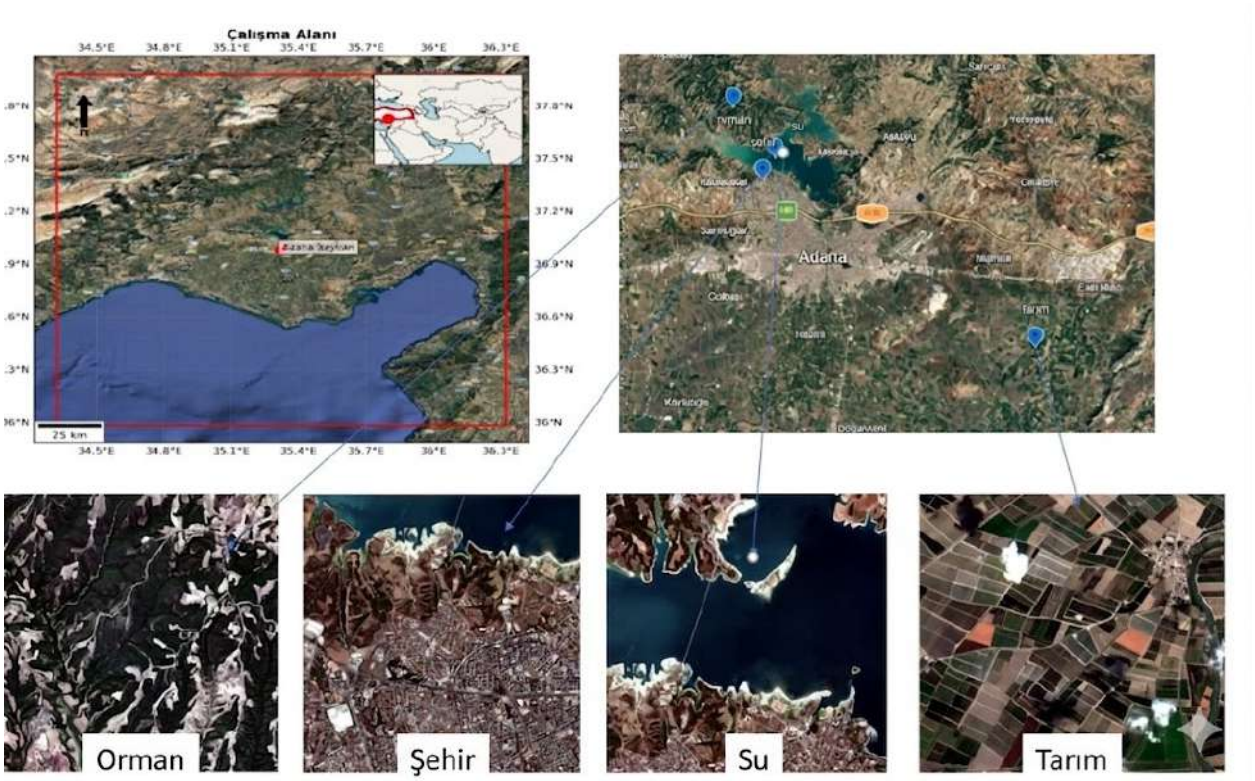
2.1. Çalışma Alanı ve Veri Seti

Çalışma alanları, Türkiye'nin güneyinde Adana ili ve çevresinde, arazi örtüsü ve uzamsal homojenlik açısından birbirini tamamlayacak biçimde seçilmiştir. Açık su yüzeyi, kapalı orman örtüsü ve yoğun yapılı kentsel doku kesitleri, Toros Dağları'nın iç bölgeye geçiş kuşağında yer alan Sentinel-2 MGRS T36SXG paftasından (yaklaşık 37,5°–37,9° K, 34,8°–35,3° D); büyük ve homojen parsellerden oluşan tarım kesiti ise Çukurova ovasını kapsayan

T36SYF paftasından (yaklaşık 36,6°–37,0° K, 35,2°–36,4° D) seçilmiştir. Çukurova, geniş ve düzgün geometrili sulu tarım parselleriyle ülkenin en homojen tarımsal peyzajlarından biridir; bu nedenle 'homojen tarım' örneği için temsil gücü yüksektir. Çalışma alanının ve dört kesitin konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.

Su, orman ve şehir kesitleri 22 Ağustos 2025; tarım kesiti ise 25 Ağustos 2025 tarihli bulutsuz Sentinel-2 L2A (Level-2A, yüzey yansıması) sahnelerinden türetilmiştir. İki tarih, aynı fenolojik ve atmosferik pencereye düşecek biçimde yalnızca üç gün arayla seçilmiştir. Her sahneden, görünür ve kızılötesi bölgede yer alan 10 spektral bant analize dâhil edilmiştir: B02 (mavi), B03 (yeşil), B04 (kırmızı), B05–B07 (kırmızı-kenar), B08 (yakın kızılötesi, NIR), B8A (dar NIR), B11 ve B12 (kısa dalga kızılötesi, SWIR).

Aynı sahnelerden, GAMMA Earth S2DR3 modeli kullanılarak üretilmiş 1 m/piksel süper-çözünürlüklü eşlenik ürünler elde edilmiştir. Model, hedef konum çevresinde yaklaşık 4×4 km'lik bir kapsama alanını işlemektedir; buna karşılık gelen her kesit 10 m ölçekte yaklaşık 420 × 420 piksel (≈ 4,2 × 4,2 km) boyutundadır. Süper-çözünürlüğün görsel etkisi (10 m kaynak ile 1 m S2DR3 arasındaki keskinlik farkı) dört sınıf için Şekil 3'te örneklenmiştir. Veri setinin özeti Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanlarının coğrafi konumu ve dört arazi örtüsü kesitinin dağılımı.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan dört arazi örtüsü kesitine ait veri seti özeti. Su, orman ve şehir T36SXG paftasından (22.08.2025); tarım ise Çukurova ovasındaki T36SYF paftasından (25.08.2025) türetilmiştir.

Arazi örtüsü	Pafta / Tarih	Boyut (10 m, piksel)	Geçerli piksel sayısı
Su	T36SXG / 22.08.2025	420 × 420	176.400
Orman	T36SXG / 22.08.2025	420 × 418	175.560
Şehir	T36SXG / 22.08.2025	420 × 420	176.400
Tarım	T36SYF / 25.08.2025	420 × 422	177.240

2.2. S2DR3 Süper-Çözünürlük Modeli

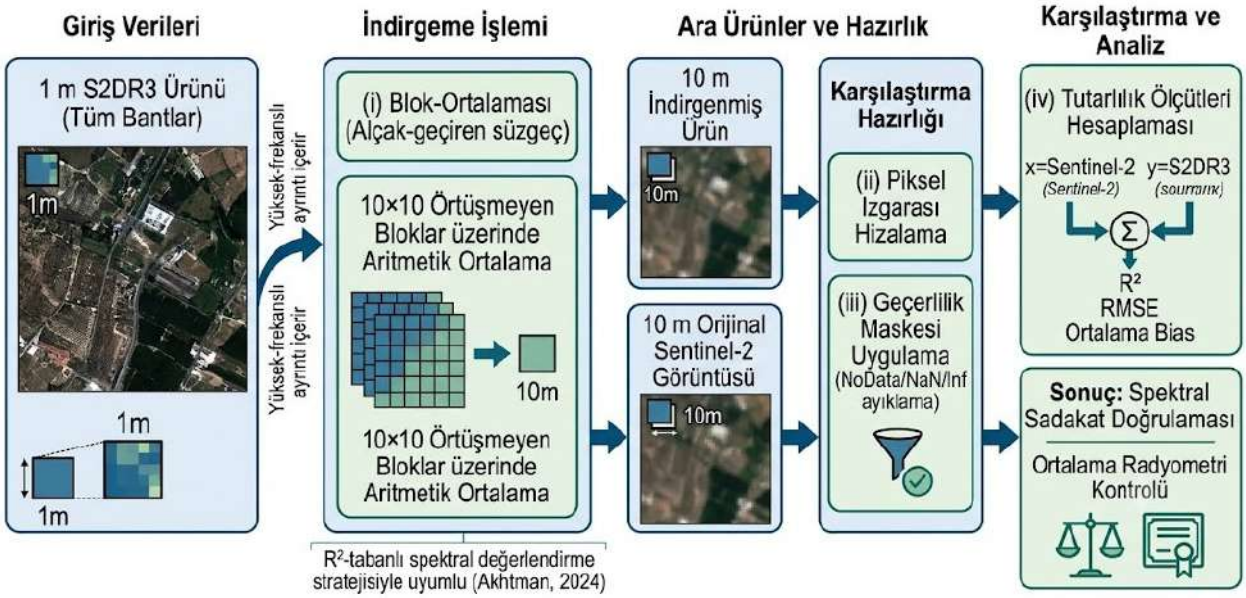
S2DR3, tek bir Sentinel-2 sahnesini girdi olarak alan, evrişimsel/derin üretici mimariye dayalı bir tek-görüntü süper-çözünürlük modelidir. Model, 10, 20 ve 60 m çözünürlüklü bantların tümünü ortak biçimde 1 m/piksel hedef çözünürlüğe yükseltir ve çıktı olarak coğrafi referanslı, çok bantlı bir GeoTIFF üretir. Modelin tasarımındaki temel ölçüt, yükseltme sırasında spektral bilgiyi bozmadan ince uzamsal yapıların (≈ 3 m'ye kadar) yeniden yapılandırılmasıdır (Akhtman, 2024). Bu çalışmada model bir 'kara kutu' olarak ele alınmış; iç ağırlıkları değiştirilmeden, yalnızca çıktısının kaynak veriyle radyometrik tutarlılığı sınanmıştır.

2.3. İndirgeme-Tabanlı Tutarlılık Protokolü

Süper-çözünürlük ürününün spektral tutarlılığını doğrulamak için ölçek-tutarlılığı (Wald ve ark., 1997) ilkesine dayalı bir protokol uygulanmıştır. Buna göre, gerçek bir yer-gerçeği 1 m görüntüsü bulunmadığından, S2DR3 ürünü kaynak çözünürlüğe geri indirgendiğinde özgün Sentinel-2 görüntüsünü yeniden üretmelidir. İşlem adımları şöyledir (Şekil 2): (i) 1 m S2DR3 ürünü, her bant için örtüşmeyen 10 × 10 piksellik bloklar üzerinde aritmetik ortalama alınarak 10 m'ye indirgenir (blok-ortalaması); (ii) elde edilen indirgenmiş ürün, kaynak Sentinel-2 görüntüsüyle aynı piksel ızgarasında hizalanır; (iii) NoData değerleri ve sonlu olmayan (NaN/Inf) pikseller, tüm bantlarda ortak bir geçerlilik maskesiyle ayıklanır; (iv) kalan geçerli pikseller üzerinde, her bant için kaynak (x = Sentinel-2) ile indirgenmiş ürün (y = S2DR3) eşleştirilerek tutarlılık ölçütleri hesaplanır.

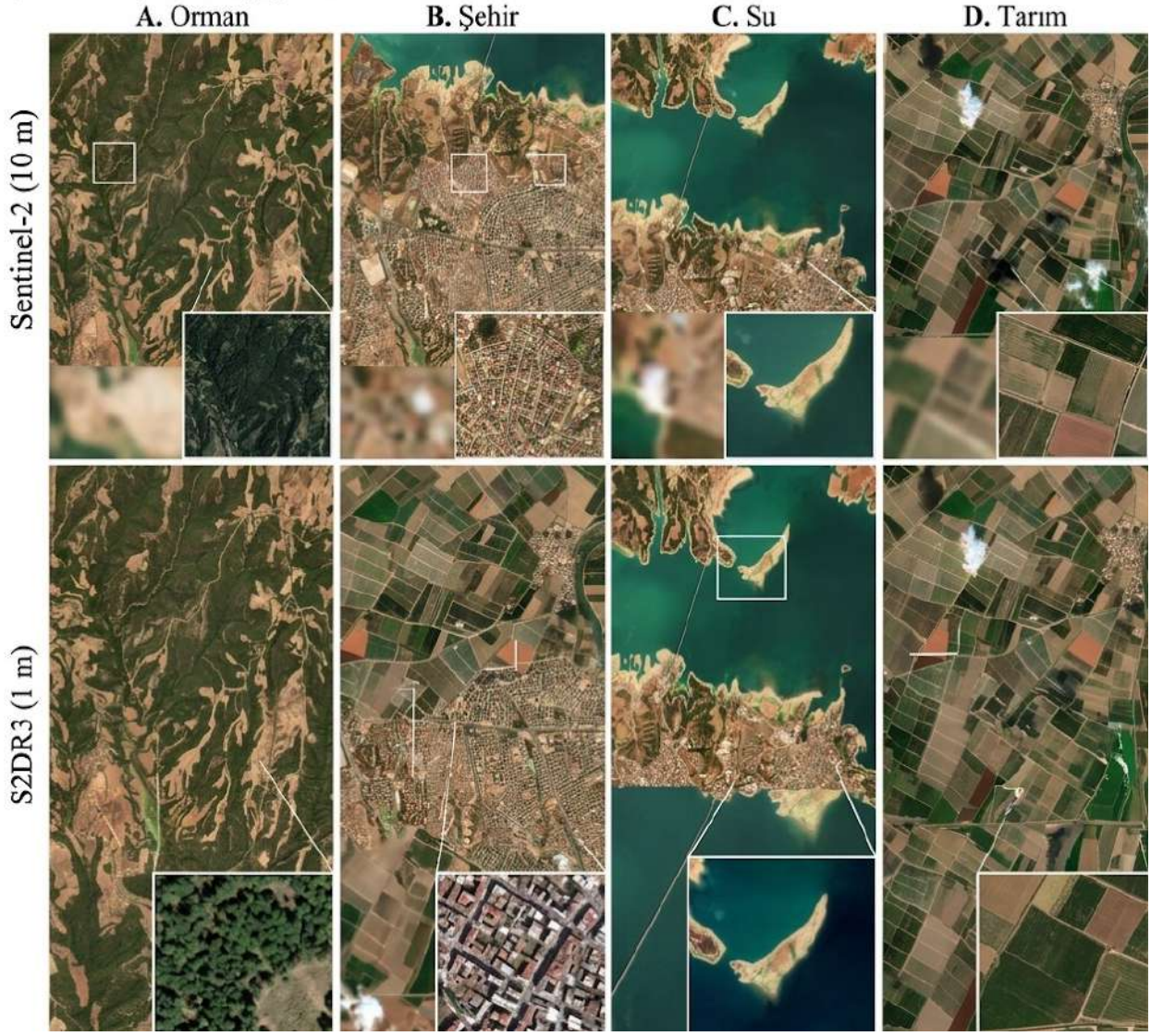
Blok-ortalaması ile indirgeme, bir alçak-geçiren süzgeç gibi davranarak süper-çözünürlük ürününün eklediği yüksek-frekanslı ayrıntıyı bastırır; böylece karşılaştırma, modelin kaynak çözünürlükteki ortalama radyometriyi koruyup korumadığına odaklanır. Bu yaklaşım, ürün geliştiricilerinin de benimsediği R^2-tabanlı spektral değerlendirme stratejisiyle uyumludur (Akhtman, 2024).

Şekil 2 — İndirgeme-tabanlı radyometrik tutarlılık doğrulama iş akışı şeması
(Wald ve ark., 1997'ye dayalı Ölçek-Tutarlılığı İlkesi)



Şekil 2. Çalışmada uygulanan indirgeme-tabanlı radyometrik tutarlılık doğrulama iş akışı.

Şekil 3. Sentinel-2 (10 m) ile S2DR3 (1 m) ürünlerinin dört arazi örtüsü sınıfı için görsel karşılaştırması ve yakınlaştırılmış bölümler. Üst satır: Sentinel-2 10 m, Alt satır: S2DR3 1 m gerçek renkli (RGB) kesitler. Her için ana görüntü ile birlikte, sağ alt köşede seçilmiş bir çalışma alanının yakınlaştırılmış bir detayı (kutucukla işaretlenmiş) gösterilmektedir.



Şekil 3. Sentinel-2 (10 m) ile S2DR3 (1 m) ürünlerinin dört arazi örtüsü sınıfı için görsel karşılaştırması. Her sınıf için, seçilmiş bir alt-bölgenin yakınlaştırılmış detayı ana görüntüyle birlikte (sağ alt köşede, kutucukla işaretli biçimde) sunularak 10 m ile 1 m çıktılar arasındaki uzamsal ayrıntı farkının doğrudan incelenmesine olanak tanınmıştır.

2.4. İstatistiksel Ölçütler

Her bant için, kaynak Sentinel-2 yansıma değerleri (x) ile indirgenmiş S2DR3 değerleri (y) arasındaki ilişki dört tamamlayıcı ölçütle nicelenmiştir. Belirlilik katsayısı (R^2), gözlemlenen değişkenliğin ne kadarının açıklandığını ölçer ve idealde 1'e yaklaşır:

$$R^2 = 1 - [\ \Sigma(y_i - x_i)^2 / \Sigma(x_i - \bar{x})^2\ ] \quad (1)$$

R^2'nin negatif değer alabileceği vurgulanmalıdır: bu durum, ürünün tahminlerinin kaynak ortalamasını sabit kestiren naif bir modelden dahi daha kötü olduğunu, yani piksel-bazlı uyumun tümüyle ortadan kalktığını gösterir. Doğrusal regresyon eğimi (slope) ve kesişimi (intercept), $y = a \cdot x + b$ ilişkisinden en küçük kareler ile kestirilir; eğimin 1'e, kesişimin 0'a yakın olması ideal uyuma işaret eder. Sistematik sapma (bias), ortalama farkı verir:

$$\text{bias} = (1/n)\ \Sigma\ (y_i - x_i) \quad (2)$$

Kök ortalama kare hata (RMSE) ise toplam hatanın büyüklüğünü yansıma birimi (0–1 ölçeği) cinsinden özetler:

$$\text{RMSE} = \sqrt{[\ (1/n)\ \Sigma\ (y_i - x_i)^2\ ]} \quad (3)$$

Sapma ve RMSE, raporlamada tutarlılık için tam yansıma ölçeğine (0–1) dönüştürülerek sunulmuştur. Bant ölçütlerinin yanı sıra, her arazi örtüsü sınıfı için on bandın ortalaması alınarak özet ölçütler hesaplanmıştır.

2.5. Yazılım ve Uygulama

Tüm işlemler Python 3 ortamında gerçekleştirilmiştir. Raster okuma/yazma için rasterio ve GDAL; sayısal işlemler için NumPy; istatistiksel ölçütler için scikit-learn (r2_score, mean_squared_error) ve NumPy polyfit; görselleştirme için Matplotlib kullanılmıştır (Pedregosa ve ark., 2011; Gillies ve ark., 2013–). Geçerli piksel sayısının yüksek olması nedeniyle saçılım grafikleri, görsel okunabilirliği korumak amacıyla bant başına en çok 15.000 noktadan oluşan rastgele bir alt-örnek üzerinde çizilmiş; ancak tüm istatistiksel ölçütler geçerli piksellerin tamamı kullanılarak hesaplanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Genel Eğilim: Homojen Yüzeyler ile Heterojen Kentsel Doku Arasındaki Keskin Ayrım

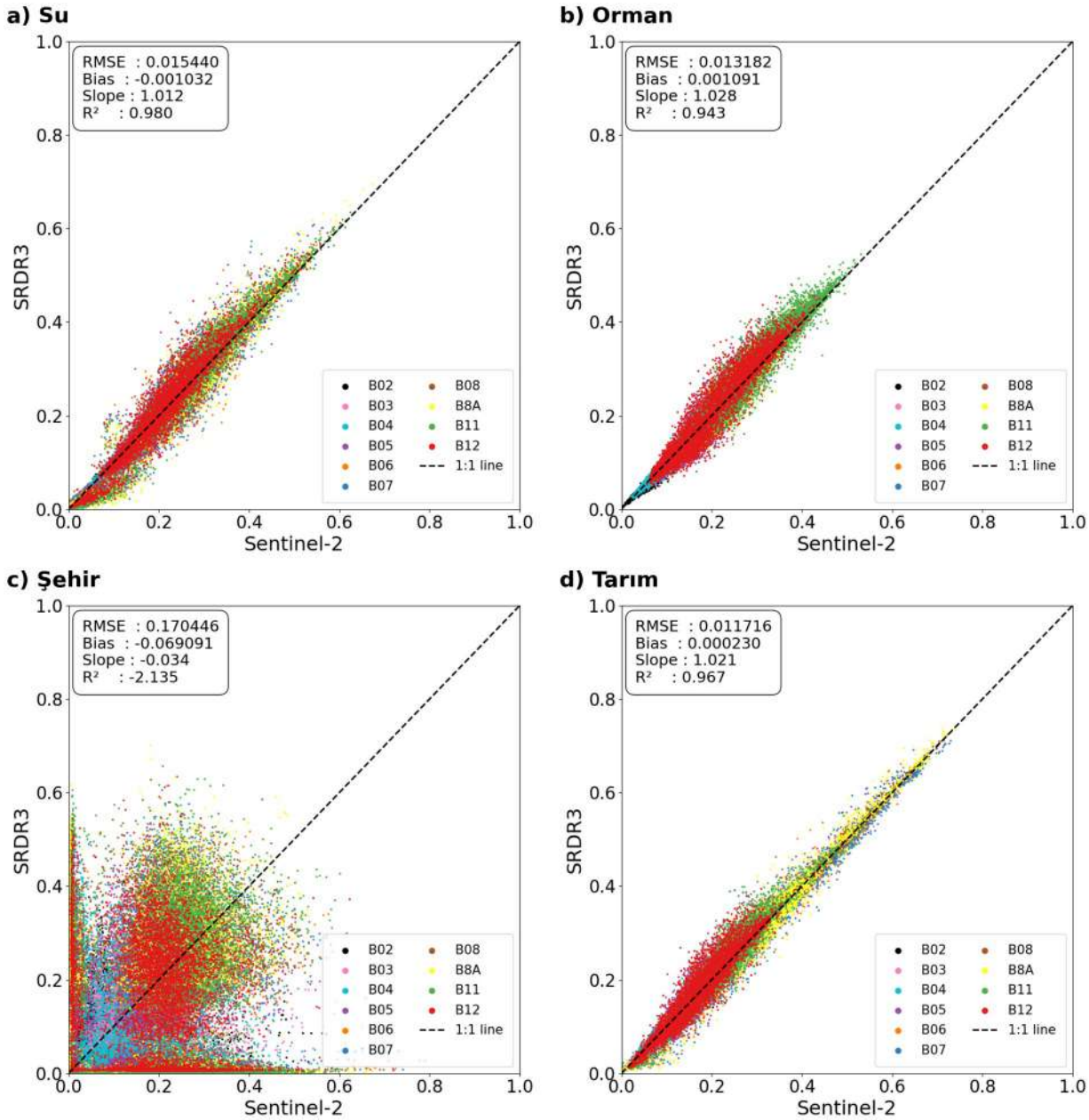
Dört arazi örtüsü sınıfına ait ortalama tutarlılık ölçütleri Çizelge 2'de ve görsel özeti Şekil 8'deki ısı haritasında sunulmuştur. Sonuçlar net bir ayrım ortaya koymaktadır. Uzamsal ve spektral olarak görece homojen üç yüzeyde su, orman ve büyük-parselli tarım S2DR3, kaynak Sentinel-2 radyometrisini yüksek doğrulukla korumuştur (ortalama R^2 sırasıyla 0,980, 0,943 ve 0,967; RMSE 0,015, 0,013 ve 0,012 yansıma; sapma mutlak değerce ≤ 0,0011). Dikkat çekici biçimde, Çukurova'dan seçilen homojen tarım alanı tüm sınıflar içinde en düşük RMSE değerini (0,0117) ve sıfıra en yakın sapmayı (0,0002) vermiştir. Buna karşılık, yalnızca uzamsal olarak ileri derecede heterojen tek yüzeyde yoğun kentsel doku (şehir) piksel-bazlı uyum tümüyle çökmüş; ortalama R^2 negatife düşmüş (−2,14), RMSE yaklaşık bir büyüklük mertebesi artarak 0,17 düzeyine ulaşmış ve regresyon eğimi 1'den uzaklaşarak 0'a (hatta negatife) yaklaşmıştır. Böylece tutarlılığın belirleyicisinin arazi örtüsü etiketinden çok sahnenin uzamsal homojenliği olduğu daha ilk bakışta görülmektedir.

Çizelge 2. Dört arazi örtüsü sınıfı için on bandın ortalaması alınarak elde edilen tutarlılık ölçütleri. RMSE ve sapma yansıma (0–1) birimindedir.

Arazi örtüsü	Ortalama R^2	Ortalama Eğim	Ortalama RMSE	Ortalama Sapma
Su	0,9797	1,0122	0,0154	−0,0010
Orman	0,9431	1,0277	0,0132	0,0011
Şehir	−2,1352	−0,0336	0,1704	−0,0691
Tarım	0,9666	1,0210	0,0117	0,0002

3.2. Saçılım Yapısı

Dört sınıfa ait birleşik saçılım grafikleri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Su (a), orman (b) ve tarım (d) için noktalar 1:1 çizgisi etrafında dar bir bant oluşturmakta, regresyon doğrusu ile 1:1 çizgisi neredeyse çakışmaktadır. Yalnızca şehir (c) için noktalar, 1:1 çizgisiyle hiçbir hizalanma göstermeyen, eksenler boyunca geniş biçimde yayılan yönsüz (izotropik) bir bulut hâline gelmiştir. Bu bulutun simetrisi dikkat çekicidir: noktalar yalnızca sistematik biçimde aşağı/yukarı kaymamakta, korelasyon tümüyle dağılmaktadır. Homojen tarımın (d) su ve orman kadar dar bir dağılım vermesi, bu morfolojik farkın arazi örtüsü türünden değil, sahnenin uzamsal homojenliğinden kaynaklandığını görsel olarak da doğrulamaktadır. Bu fark, Bölüm 4'te tartışılan tanısal yorumun temelini oluşturur.



Şekil 4. Dört arazi örtüsü sınıfı için Sentinel-2 (x) ile indirgenmiş S2DR3 (y) değerlerinin bant-renkli saçılım grafikleri: (a) su, (b) orman, (c) şehir, (d) tarım. Kesikli çizgi 1:1 doğrusudur; grafiklerdeki 'SRDR3' ekseni S2DR3 ürününü ifade eder. Üç homojen yüzeyde (su, orman, tarım) dar ve 1:1'e yakın bir dağılım, yalnızca heterojen kentsel dokuda ise korelasyonu kaybolmuş izotropik bir bulut gözlenmektedir.

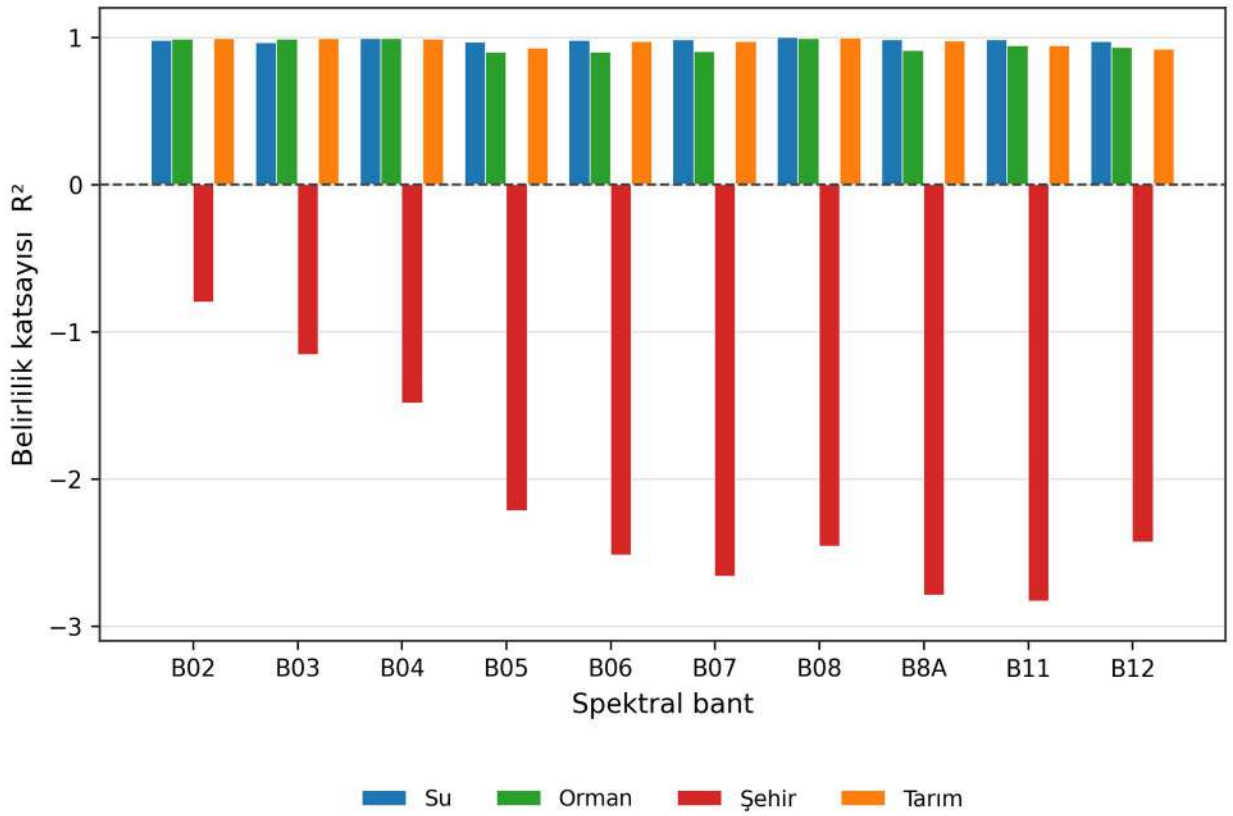
3.3. Bant Ölçeğindeki Örüntüler

Bant-bazlı R^2 ve RMSE değerleri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da, sayısal değerler ise Çizelge 3 ve Çizelge 4'te sunulmuştur. Su, orman ve tarım sınıflarında tüm bantlar yüksek R^2 (≈ 0,90–0,99) ve düşük RMSE (≈ 0,005–0,022) sergilemiştir. Bu sınıflarda dahi en düşük başarım, atmosferik etkilere ve özgün 20 m çözünürlüğe sahip olmaları nedeniyle kırmızı-kenar (B05–B07) ve SWIR (B11, B12) bantlarında görülmüştür (ör. ormanda B05 için R^2 = 0,898; tarımda B12 için R^2 = 0,917).

Şehir sınıfında ise hata, dalga boyuyla sistematik biçimde artmaktadır: en küçük bozulma görünür bantlarda (B02–B04) görülürken, kırmızı-kenardan SWIR'e doğru R^2 giderek daha negatif, RMSE giderek daha yüksek değerler almıştır. En kötü uyum B11 bandında (R^2 = −2,83) gözlenmiştir. Sapma değerleri de şehir sınıfında büyük ve negatiftir; bu da indirgenmiş S2DR3 değerlerinin ortalamada kaynaktan belirgin biçimde düşük kaldığını göstermektedir (Şekil 7). Buna karşılık homojen üç sınıfta sapma tüm bantlarda sıfıra çok yakın kalmıştır.

Çizelge 3. Bant-bazlı belirlilik katsayısı (R^2) değerleri.

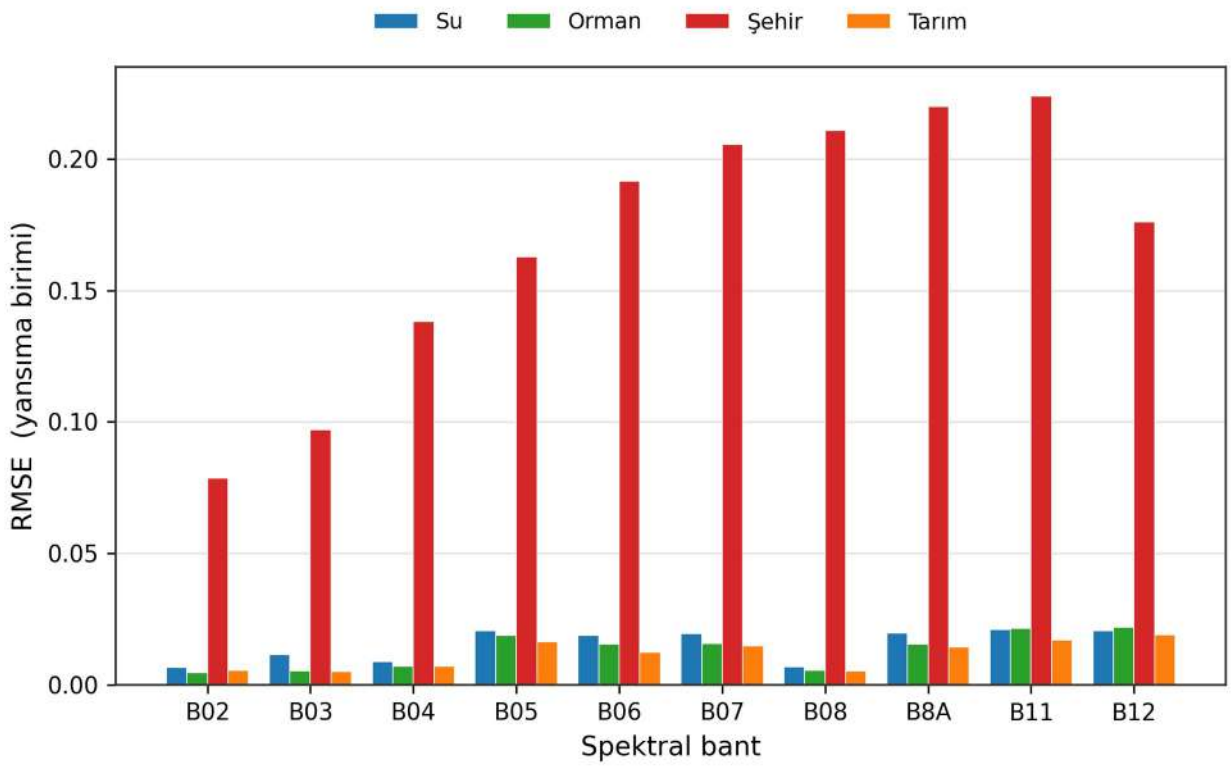
Bant	Su	Orman	Şehir	Tarım
B02	0,980	0,986	−0,799	0,990
B03	0,963	0,987	−1,158	0,991
B04	0,991	0,989	−1,487	0,988
B05	0,967	0,898	−2,218	0,928
B06	0,981	0,898	−2,516	0,970
B07	0,982	0,901	−2,663	0,970
B08	0,998	0,989	−2,457	0,996
B8A	0,984	0,908	−2,794	0,973
B11	0,981	0,943	−2,834	0,941
B12	0,970	0,930	−2,427	0,917



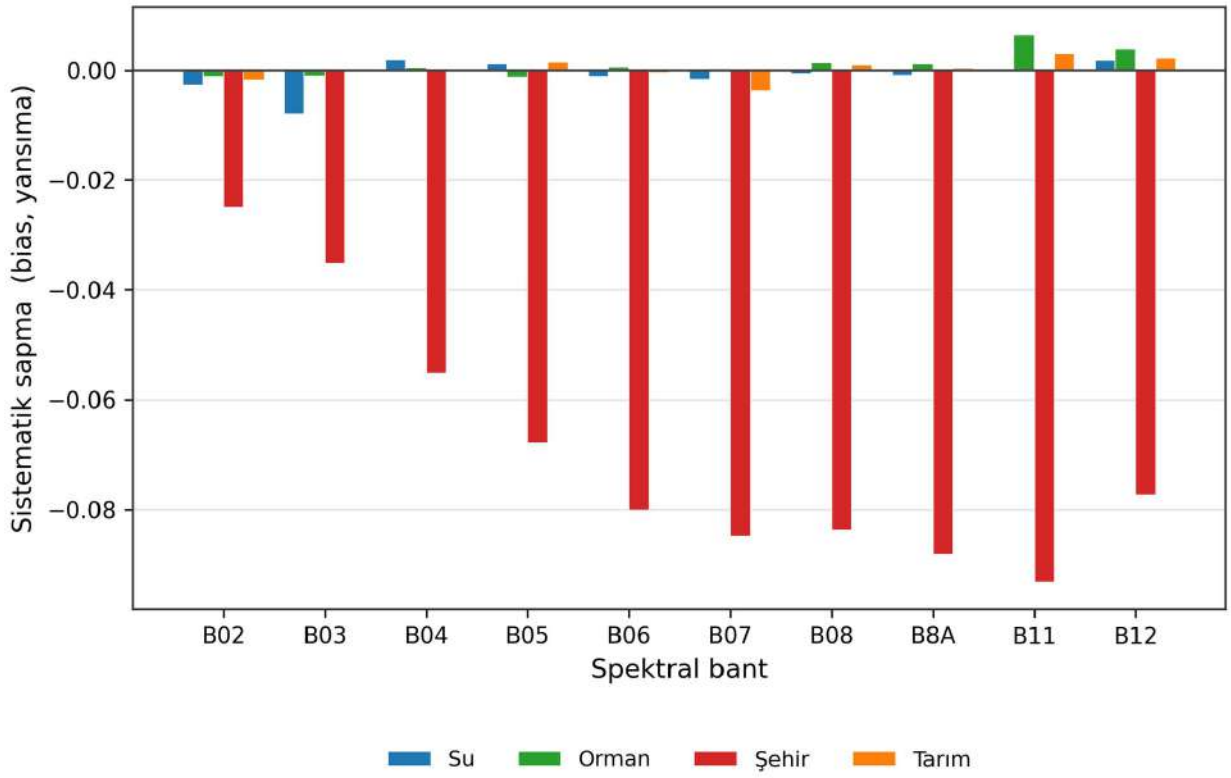
Şekil 5. Spektral bant ve arazi örtüsü sınıfına göre belirlilik katsayısı (R^2). Kesikli çizgi $R^2 = 0$ düzeyini gösterir. Su, orman ve tarımda tüm bantlar 1'e yakınken, yalnızca şehir sınıfı negatif değerler almaktadır.

Çizelge 4. Bant-bazlı kök ortalama kare hata (RMSE, yansıma birimi) değerleri.

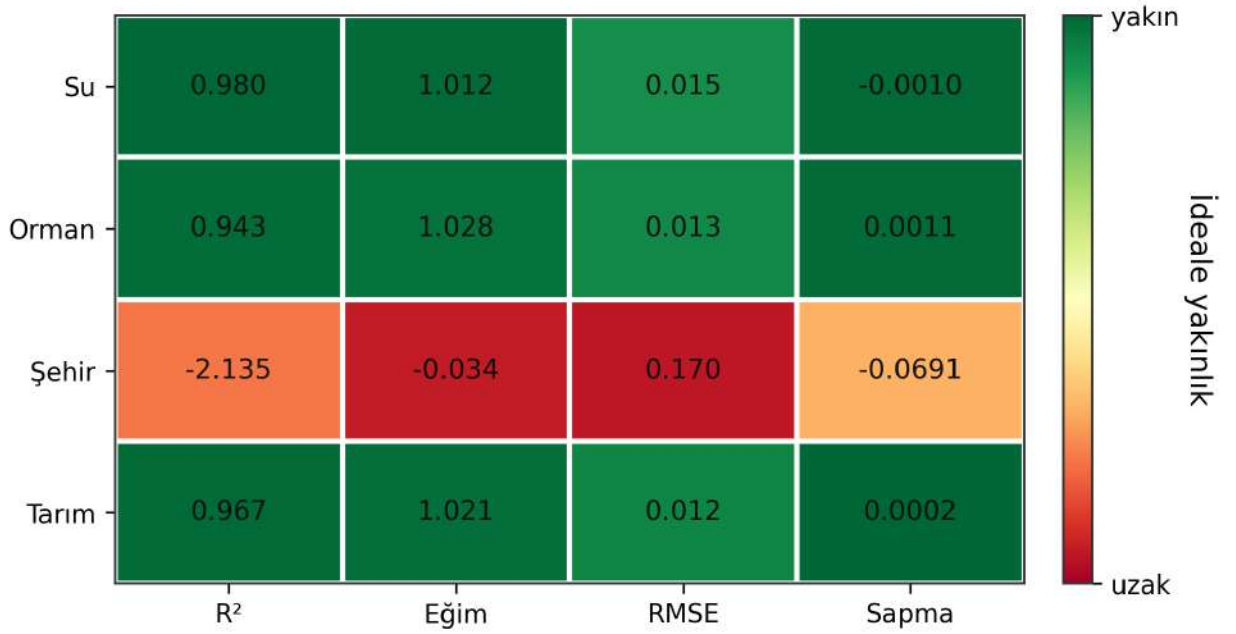
Bant	Su	Orman	Şehir	Tarım
B02	0,0067	0,0047	0,0785	0,0056
B03	0,0116	0,0054	0,0970	0,0051
B04	0,0088	0,0070	0,1383	0,0070
B05	0,0205	0,0189	0,1628	0,0164
B06	0,0188	0,0155	0,1916	0,0124
B07	0,0195	0,0157	0,2055	0,0148
B08	0,0069	0,0055	0,2108	0,0053
B8A	0,0197	0,0156	0,2199	0,0144
B11	0,0211	0,0215	0,2239	0,0170
B12	0,0206	0,0219	0,1762	0,0192



Şekil 6. Spektral bant ve arazi örtüsü sınıfına göre RMSE (yansıma birimi). Yalnızca şehir sınıfında hata büyüklüğü, diğer üç sınıfa kıyasla yaklaşık bir büyüklük mertebesi daha yüksektir ve dalga boyuyla artma eğilimindedir.



Şekil 7. Spektral bant ve arazi örtüsü sınıfına göre sistematik sapma (bias, yansıma birimi). Su, orman ve tarımda sapma tüm bantlarda sıfıra yakınken, yalnızca şehirde kırmızı-kenar ve SWIR bantlarında belirgin negatif sapma birikmektedir.



Şekil 8. Arazi örtüsü sınıflarına göre ortalama tutarlılık ölçütlerinin ısı haritası. Renk, her ölçütün ideal değere (R^2 için yüksek, eğim için 1, RMSE ve sapma için 0) yakınlığını kodlar; yeşil ideale yakınlığı, kırmızı uzaklığı gösterir. Su, orman ve tarım üç ölçütte de yeşil bölgede yer alırken yalnızca şehir kırmızıya kaymaktadır.

4. TARTIŞMA

4.1. Tutarlılığın Belirleyicisi: Arazi Örtüsü Değil, Uzamsal Homojenlik

Çalışmanın en belirgin bulgusu, S2DR3'ün radyometrik tutarlılığını arazi örtüsü sınıfının kendisinin değil, sahnenin uzamsal homojenliğinin belirlediğidir. Su, orman ve büyük-parselli tarım gibi homojen yüzeylerde elde edilen yüksek R^2 ve sıfıra yakın sapma değerleri, S2DR3'ün ürün geliştiricilerinin spektral tutarlılık hedefiyle (Akhtman, 2024) tutarlı biçimde, kaynak çözünürlükteki ortalama radyometriyi koruduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgu kritik bir kontrol içermektedir: tarım, bitki örtüsü içeren ve yönetilen bir yüzey olmasına karşın, büyük ve düzgün parsellerden oluşan (Çukurova) bir alandan seçildiğinde su ve ormanla aynı düzeyde hatta en düşük RMSE ile tutarlılık vermiştir. Dolayısıyla 'tarım' sınıfının kendisinde özünde sorunlu bir yan yoktur; belirleyici olan parsel ölçeği, sınır keskinliği ve dokusal homojenliktir. Bu sonuç, su kütlelerinin izlenmesi, orman/biyokütle uygulamaları ve geniş-parselli tarımda S2DR3'ün güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu noktada, Şekil 3'te tarım kesiti için görsel olarak izlenebilen belirgin radyometrik/dokusal farkla (S2DR3 çıktısının kaynak görüntüye kıyasla gözle görülür biçimde farklı görünmesi) Çizelge 2'de bildirilen yüksek sayısal tutarlılık (R^2 = 0,967; RMSE = 0,0117) arasında görünürde bir çelişki bulunduğu vurgulanmalıdır. Bu çelişki yalnızca görünürdedir ve iki ölçümün farklı düzeylerde yapılmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 2'deki ölçütler, 1 m S2DR3 çıktısının 10×10 blok-ortalaması ile 10 m'ye indirgenmiş hâli üzerinden hesaplanmakta; bu indirgeme, Bölüm 2.3'te belirtildiği gibi bir alçak-geçiren süzgeç gibi davranarak süper-çözünürlük modelinin eklediği yüksek-frekanslı dokusal/görsel ayrıntıyı bastırmakta ve karşılaştırmayı yalnızca kaynak çözünürlükteki ortalama radyometriye odaklamaktadır. Buna karşılık Şekil 3, hiçbir indirgeme uygulanmamış ham 1 m S2DR3 çıktısını göstermektedir; model, tarım parselleri gibi yönetilen yüzeylerde beklenen ince dokusal ayrıntıyı (sıra izleri, parsel içi bitki örtüsü değişkenliği, toprak-bitki karışım desenleri) 'üretici' (generative) biçimde yeniden kurduğundan, 1 m çıktı 10 m kaynaktan görsel olarak belirgin biçimde zenginleşmiş görünebilir. Ayrıca Şekil 3'teki her panel, görsel okunabilirlik için bağımsız olarak kontrast/parlaklık germesine (stretch) tabi tutulmuştur; bu da iki görüntü arasındaki algısal farkı olduğundan daha büyük gösterebilir. Dolayısıyla Şekil 3'teki görsel farklılık, modelin -beklendiği ve amaçlandığı üzere- kaynak çözünürlükte yakalanamayan gerçekçi ince yapıyı eklediğinin bir kanıtı olarak okunmalı; Çizelge 2'deki yüksek sayısal tutarlılık ise bu ince yapının, kaynak görüntünün blok-ortalamasına indirgendiğinde geri kazanılan kaba-ölçek radyometriyi bozmadığını göstermektedir. Diğer bir deyişle, görsel zenginleşme ile radyometrik tutarlılık burada birbiriyle çelişmemekte, aksine iyi bir süper-çözünürlük modelinden beklenen iki tamamlayıcı özelliği yansıtmaktadır.

4.2. Negatif R^2'nin Yorumu: Eş-Kayıt ve Uzamsal Frekans Etkileşimi

Baştan belirtmek gerekirse, bu çöküşün en olası nedeni S2DR3 modelinin şehir sınıfında spektral olarak başarısız olması değildir: yoğun kentsel dokunun barındırdığı çok sayıda keskin kenar ve küçük nesne, alt-piksel düzeyindeki (optik görüntüler arası) küçük bir geometrik eş-kayıt kaymasının etkisini büyütmektedir; bu çıkarımın dayanağı aşağıda ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Nitekim, şehir sınıfında gözlenen negatif R^2 değerleri ilk bakışta modelin bu

sınıfta 'başarısız' olduğunu düşündürebilir. Ancak ölçütlerin birlikte okunması daha incelikli ve fiziksel olarak daha tutarlı bir açıklamaya işaret etmektedir. Negatif R^2'ye eşlik eden üç gözlem belirleyicidir: (i) regresyon eğiminin 1'den uzaklaşıp 0'a (hatta negatife) yaklaşması; (ii) saçılımın sistematik bir kayma yerine yönsüz/izotropik bir buluta dönüşmesi (Şekil 4c); ve (iii) bu sınıfın ayırt edici özelliğinin yüksek uzamsal-frekans içeriği (keskin bina kenarları, sokak dokusu, küçük ve düzensiz nesneler) olmasıdır.

Bu örüntü, klasik bir radyometrik önyargıdan çok, alt-piksel düzeyindeki geometrik eş-kayıt (co-registration) hatasının yüksek-frekanslı sahne içeriğiyle etkileşiminin imzasıdır (Stumpf ve ark., 2018). Homojen bölgelerde komşu pikseller birbirine neredeyse özdeş olduğundan, bir-iki piksel kesirlik bir hizalama kayması karşılaştırmayı pratikte etkilemez; bu nedenle su, orman ve geniş-parselli tarım yüksek R^2 korur. Buna karşılık heterojen kentsel dokuda, aynı küçük kayma yapısal olarak ilgisiz piksel çiftlerini (ör. bir bina çatısını komşu sokakla) eşleştirir; bu da korelasyonu tümüyle yok ederek R^2'yi negatife sürükler ve RMSE'yi şişirir model spektral olarak sağlam olsa dahi. İzotropik bulut morfolojisi, tam olarak bu 'eş-kayıt kaynaklı korelasyon yıkımının' beklenen görsel imzasıdır; sistematik bir önyargı olsaydı, bulutun 1:1 çizgisine paralel ama kaymış bir bant biçiminde kalması beklenirdi.

Çalışmanın tasarımı, bu mekanizma için bir tür doğal deney sağlamaktadır: aynı uzaktan algılama ürünü ve aynı protokol altında, yalnızca sahnenin homojenliği değiştiğinde sonuç tümüyle değişmektedir. Homojen bir tarım alanı su/orman düzeyinde tutarlılık verirken, heterojen kentsel doku çökmektedir. Bu, gözlenen başarısızlığın kaynağının modelin spektral davranışı değil, sahne yapısı–eş-kayıt etkileşimi olduğunu güçlü biçimde desteklemektedir. Destekleyici ikinci bir mekanizma, blok-ortalaması indirgemesinin kenar bölgelerindeki davranışıdır: keskin sınırlar içeren 10×10 bloklarda, kaynak ile süper-çözünürlük ürünü arasındaki en küçük bir uzamsal kayma, blok ortalamalarında orantısız büyük farklara yol açar. Üçüncü olarak, modelin yüksek-frekanslı dokuyu 'üretici' (generative) biçimde yeniden kurması, heterojen bölgelerde indirgeme sonrası dahi tam olarak kaynakla örtüşmeyen yapay ayrıntı bırakabilir (Akhtman, 2024).

4.3. Bant Bağımlılığı

Tüm sınıflarda hatanın görünür bantlardan SWIR'e doğru artması, iki etkenle açıklanabilir. Birincisi, B05–B07, B8A, B11 ve B12 bantları özgün olarak 20 m çözünürlükte kaydedilmektedir; dolayısıyla bu bantların 1 m'ye yükseltilmesi, 10 m'lik görünür bantlara kıyasla daha büyük bir ölçek artışı gerektirir ve doğası gereği daha az kısıtlıdır. İkincisi, SWIR bölgesi toprak nemi, malzeme bileşimi ve gölge etkilerine duyarlıdır; heterojen yüzeylerde bu duyarlılık, eş-kayıt hatasının etkisini daha da büyütür. Bu nedenle, homojen sınıflarda (su, orman, tarım) dahi en düşük R^2 değerleri kırmızı-kenar ve SWIR bantlarında görülmüştür.

4.4. Doğrulama Ölçütlerine İlişkin Çıkarımlar

Bulgular, süper-çözünürlük doğrulamasına yönelik önemli bir yöntemsel uyarı taşımaktadır: piksel-bazlı R^2 (ve buna bağlı RMSE), heterojen peyzajlarda ürün kalitesini tek başına temsil edemez ve modeli haksız biçimde cezalandırabilir. Çünkü bu ölçütler, radyometrik bozulmaya olduğu kadar — belki ondan daha fazla — alt-piksel eş-kayıt hatasına ve sahne homojenliğine duyarlıdır. Bu nedenle, gelecekteki doğrulama protokollerinde piksel-bazlı ölçütlerin; (i) yapısal benzerlik indeksi (SSIM; Wang ve ark., 2004), (ii) kayan-pencere/yerel korelasyon, (iii) nesne-tabanlı (parsel/bina bazlı) karşılaştırma ve (iv) açık bir alt-piksel eş-kayıt düzeltmesi/duyarlılık analizi ile birlikte raporlanması önerilir. Böyle bir çoklu-ölçüt yaklaşımı, 'modelin spektral tutarlılığı' ile 'geometrik hizalama kalitesi' katkılarının birbirinden ayrıştırılmasını sağlayacaktır.

4.5. Literatürle Karşılaştırma

Su, orman ve geniş-parselli tarım için elde edilen yüksek tutarlılık değerleri, S2DR3 ve benzeri tek-görüntü süper-çözünürlük (SISR) modellerinin homojen yüzeylerde yüksek spektral tutarlılık bildiren çalışmalarıyla (Akhtman, 2022, 2024; Olvera-Rincón ve ark., 2025; Lanaras ve ark., 2018) yönsel olarak uyumludur; bu uyumu sözel düzeyde bırakmamak amacıyla, elde edilebilen sayısal değerler Çizelge 5'te doğrudan karşılaştırılmıştır. GAMMA Earth'ün S2DR3'ün önceki sürümü olan S2DR2 için bildirdiği genel ortalama doğrulama ölçütleri (RMSE ≈ 0,015 yansıma; R^2 ≈ 0,80; Akhtman, 2022) bu çalışmada homojen sınıflar için elde edilen RMSE aralığıyla (0,012–0,015) hemen hemen örtüşmekte; buna karşılık bildirilen R^2 ≈ 0,80 değeri, muhtemelen homojen ve heterojen sahnelerin bir arada değerlendirildiği karma bir örneklem ortalaması olması nedeniyle, bu çalışmanın homojen sınıflarda elde ettiği R^2 değerlerinin (0,94–0,98) altında, ancak şehir sınıfının negatif R^2 değerinin (−2,14) çok üzerinde kalmaktadır bu da S2DR2/S2DR3 ailesinin genel/karma doğrulama ortalamalarının, sahne homojenliğine göre ayrıştırılmış bir değerlendirmede gizli kalan büyük bir değişkenliği maskeleyebileceğini düşündürmektedir. Farklı bir süper-çözünürlük görevi olmakla birlikte, Sentinel-2'nin 20 m ve 60 m bantlarını 10 m'ye yükselten DSen2 modeli (Lanaras ve ark., 2018), sentetik-çözünürlük (Wald protokolü) doğrulamasında 20 m bantlar için ortalama RMSE ≈ 0,0035 (SRE ≈ 36,0 dB, SAM ≈ 0,78°) ve 60 m bantlar için ortalama RMSE ≈ 0,0032 (SRE ≈ 32,8 dB, SAM ≈ 0,41°) bildirmiştir; bu değerler, çok daha mütevazı bir yükseltme oranında (2× ve 6×, S2DR3'ün 10×'ine karşın) ve tam eğitilebilir gerçek-çözünürlük kaybı altında elde edilmiş olduğundan, doğrudan eşdeğer değildir, ancak S2DR3'ün homojen sınıflardaki RMSE değerlerinin (0,012–0,015) aynı büyüklük mertebesinde -yaklaşık 3-5 kat daha yüksek

ancak yine de yansıma ölçeğinde küçük- kaldığını göstermesi bakımından yararlı bir karşılaştırma ölçütü sunmaktadır. Özellikle, tek bir görece homojen tarım parseli üzerinde yürütülen ve olumlu sonuç bildiren çalışmalar (ör. Olvera-Rincón ve ark., 2025), bu çalışmadaki Çukurova homojen tarım bulgusuyla örtüşmektedir. Öte yandan bu çalışma, homojenlik açısından bir gradyan tasarlayarak, bütünleşik sahne ölçeğinde gizlenen güçlü bir uzamsal-homojenlik bağımlılığını -ve özellikle şehir sınıfında gözlenen negatif R^2 değerinin, literatürde bugüne dek ayrı biçimde raporlanmamış olan büyüklükte bir çöküşü- ortaya çıkarmaktadır. Bulgular ışığında, çok-parselli, küçük ve keskin sınırlı tarım mozaiklerinin kentsel dokuya benzer biçimde piksel-bazlı tutarlılıkta düşüş göstermesinin beklenebileceği öngörülmektedir; bu öngörünün doğrudan sınanması gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Çizelge 5. Bu çalışmada elde edilen tutarlılık ölçütlerinin, ilgili literatürde bildirilen sayısal değerlerle karşılaştırılması.

Kaynak	Yöntem / Görev	Bildirilen Ölçüt(ler)	Bu Çalışmadaki Karşılık
Bu çalışma (homojen sınıflar: su, orman, tarım)	S2DR3, 10 m→1 m→10 m indirgeme-tutarlılığı	R^2 = 0,94–0,98; RMSE = 0,012–0,015	—
Bu çalışma (şehir sınıfı)	S2DR3, 10 m→1 m→10 m indirgeme-tutarlılığı	R^2 = −2,14; RMSE ≈ 0,17	—
Akhtman (2022) — S2DR2	S2DR2, genel/karma doğrulama örneklemi	RMSE ≈ 0,015; R^2 ≈ 0,80; PSNR ≈ 25 dB; SSIM ≈ 0,85	Homojen sınıf RMSE'siyle örtüşür; R^2 homojen sınıflarımızın altında, şehir sınıfımızın belirgin biçimde üzerindedir
Lanaras ve ark. (2018) — DSen2, 20 m→10 m	Sentetik-çözünürlük (Wald) doğrulaması, 2× yükseltme	RMSE ≈ 0,0035; SRE ≈ 36,0 dB; SAM ≈ 0,78°	Farklı görev/oran (2× vs. 10×); RMSE aynı büyüklük mertebesinde, homojen sınıflarımızdan ≈3–5 kat düşük
Lanaras ve ark. (2018) — DSen2, 60 m→10 m	Sentetik-çözünürlük (Wald) doğrulaması, 6× yükseltme	RMSE ≈ 0,0032; SRE ≈ 32,8 dB; SAM ≈ 0,41°	Farklı görev/oran (6× vs. 10×); RMSE aynı büyüklük mertebesinde, homojen sınıflarımızdan ≈3–5 kat düşük

5. SINIRLILIKLAR

Bu çalışmanın sonuçları, aşağıdaki sınırlılıklar göz önünde bulundurularak yorumlanmalıdır. Birincisi, analiz her arazi örtüsü için tek bir kesite ve iki komşu tarihli (22 ve 25 Ağustos 2025) sahneye dayanmaktadır; bulguların mevsimsel, coğrafi ve atmosferik koşullar arasında genellenebilirliği, çok-zamanlı ve çok-bölgeli örneklemlerle sınanmalıdır. İkincisi, gerçek bir 1 m yer-gerçeği görüntüsü bulunmadığından, değerlendirme dolaylı bir indirgeme-tabanlı tutarlılık protokolüyle yapılmıştır; bu protokol uzamsal-spektral tutarlılığı ölçer, ancak yükseltilen ince ayrıntının mutlak konumsal doğruluğunu bağımsız biçimde doğrulamaz. Üçüncüsü ve en önemlisi, Bölüm 4.2'de tartışıldığı gibi, kentsel dokudaki negatif R^2 büyük olasılıkla geometrik eş-kayıt hatasıyla iç içe geçmiştir; mevcut tasarım, modelin içsel spektral hatasını eş-kayıt kaynaklı hatadan nicel olarak ayrıştıracak bir alt-piksel hizalama analizi içermemektedir. Dördüncüsü, homojenlik bu çalışmada nitel olarak (sınıf seçimiyle) ele alınmıştır; gelecekte yerel varyans, yarı-değişkenlik (semivariogram) veya kenar yoğunluğu gibi nicel homojenlik ölçütlerinin tutarlılıkla ilişkilendirilmesi, gözlenen örüntüyü daha kesin biçimde temellendirebilir. Beşincisi, indirgeme yöntemi olarak yalnızca blok-ortalaması kullanılmıştır; ağırlıklı/PSF-tabanlı indirgeme yöntemleri sonuçları bir miktar değiştirebilir. Bu sınırlılıklar, sonuçların geçerliliğini ortadan kaldırmamakta; aksine, gözlenen örüntülerin daha güçlü biçimde nedensel olarak çözümlenebilmesi için izlenmesi gereken yol haritasını tanımlamaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, GAMMA Earth S2DR3 süper-çözünürlük ürününün radyometrik tutarlılığı, indirgeme-tabanlı bir protokol ile Adana ve çevresinden seçilen dört arazi örtüsü sınıfında bant bazında değerlendirilmiştir. Bulgular üç ana sonuca işaret etmektedir. (1) S2DR3, uzamsal-spektral olarak homojen yüzeylerde su, orman ve büyük-parselli (Çukurova) tarım kaynak Sentinel-2 radyometrisini yüksek doğruluk ve ihmal edilebilir sapma ile korumaktadır ($R^2 \geq 0,94$; tarım en düşük RMSE'ye sahiptir). (2) Yalnızca uzamsal olarak ileri derecede heterojen kentsel dokuda piksel-bazlı uyum çökmekte (negatif R^2) ve hata bir büyüklük mertebesi artmaktadır; bu çöküş, saçılım morfolojisi ve ölçüt örüntüleri temelinde, büyük olasılıkla alt-piksel eş-kayıt hatasının yüksek-frekanslı sahne içeriğiyle etkileşiminden kaynaklanmaktadır. (3) Tutarlılığın belirleyicisi arazi örtüsü sınıfı değil, sahnenin uzamsal homojenliğidir; nitekim homojen tarım, su ve orman düzeyinde başarım göstermiştir.

Uygulayıcılara yönelik öneriler şunlardır: S2DR3 ürünleri, homojen yüzeylerin baskın olduğu su, orman/biyokütle ve geniş-parselli tarım uygulamalarında güvenle kullanılabilir; heterojen kentsel dokular ile küçük ve keskin sınırlı tarım mozaiklerinde ise piksel-bazlı doğrulamaya temkinli yaklaşılmalı, sonuçlar mutlaka eş-kayda duyarsız ve yapısal ölçütlerle (SSIM, yerel korelasyon, nesne-tabanlı karşılaştırma) ve açık bir alt-piksel hizalama analiziyle desteklenmelidir. Gelecek çalışmalar, çok-zamanlı ve çok-bölgeli örneklemler ile eş-kayıt-düzeltmeli karşılaştırmaları birleştirerek ve homojenliği nicel ölçütlerle ifade ederek, modelin içsel spektral hatasını geometrik hizalama hatasından ayrıştırmaya odaklanmalıdır.

KAYNAKLAR

Akhtman, Y. (2022). Sentinel-2 Deep Resolution 2.0 (S2DR2): Effective 12-band 10× single-image super-resolution for Sentinel-2. GAMMA Earth Teknik Raporu / Medium. https://medium.com/@ya_71389/sentinel-2-deep-resolution-2-0-c3d530d9bdf8

Akhtman, Y. (2024). Sentinel-2 Deep Resolution 3.0 (S2DR3): Effective 12-band 10× single-image super-resolution for Sentinel-2. GAMMA Earth Teknik Raporu / Medium. https://medium.com/@ya_71389/sentinel-2-deep-resolution-3-0-c71a601a2253

Dong, C., Loy, C. C., He, K., & Tang, X. (2016). Image super-resolution using deep convolutional networks. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 38(2), 295–307.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36.

Galliani, S., Lanaras, C., Marmanis, D., Baltsavias, E., & Schindler, K. (2017). Learned spectral super-resolution. arXiv:1703.09470.

Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., ... & Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. Remote Sensing, 9(6), 584.

Gillies, S. ve ark. (2013–). Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers. https://rasterio.readthedocs.io

Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Galliani, S., Baltsavias, E., & Schindler, K. (2018). Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 305–319.

Ledig, C., Theis, L., Huszár, F., Caballero, J., Cunningham, A., Acosta, A., ... & Shi, W. (2017). Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network. CVPR, 4681–4690.

Müller-Wilm, U., Louis, J., Richter, R., Gascon, F., & Niezette, M. (2013). Sentinel-2 Level-2A prototype processor: Architecture, algorithms and first results. ESA Living Planet Symposium.

Olvera-Rincón, F., Salgado-Velázquez, S., Lagunes-Espinoza, L. del C., Ortiz-García, C. F., Rincón-Ramírez, J. A., & Ramos-Hernández, E. (2025). Integración del modelo Gamma Earth S2DR3 para la mejora superresolutiva de imágenes Sentinel-2 en agricultura digital.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.

Stumpf, A., Michéa, D., & Malet, J.-P. (2018). Improved co-registration of Sentinel-2 and Landsat-8 imagery for Earth surface motion measurements. Remote Sensing, 10(2), 160.

Wald, L., Ranchin, T., & Mangolini, M. (1997). Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63(6), 691–699.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600–612.

Wang, Z., Chen, J., & Hoi, S. C. H. (2021). Deep learning for image super-resolution: A survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 43(10), 3365–3387.

MAKARNALIK BUĞDAYDA VERİM VE STABİLİTEYE DAYALI SELEKSİYON İÇİN ÇOKLU SENSÖRLÜ YÜKSEK VERİMLİ FENOTİPLEME

Remzi ÖZKAN [1], Merve BAYHAN[2], Yunus AKTAR[3], Shawn C. KEFAUVER[4],

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Hakkâri Üniversitesi, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 30000, Yüksekova, Hakkâri, rmziozkan@hakkari.edu.tr
[2]Dr., Dicle Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 21280, Sur, Diyarbakır, merve.bayhan@dicle.edu.tr
[3]YL Öğr., Dicle Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 21280, Sur, Diyarbakır, aktaryunus@gmail.com
[4]Doç. Dr., Barselona Üniversitesi, Bitki Fizyolojisi Bölümü, 08028, Les Corts, Barselona, sckefauver@ub.edu

ÖZET

İklim değişikliğine dayanıklı buğday çeşitleri geliştirmek için sadece yüksek verimli genotipleri seçmek yeterli değildir. Aynı zamanda bu genotiplerin farklı çevre koşullarında verimini koruyabilmesi, yani verim stabilitesinin de yüksek olması gerekir. Bu durum, özellikle yağışların düzensizleştiği ve sıcaklıkların arttığı günümüz koşullarında daha da önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, 62 adet makarnalık buğday çeşidi incelenmiştir. Denemeler, İspanya'da Akdeniz iklimine sahip iki farklı lokasyonda yürütülmüştür. Çeşitler hem sulu hem de yağışa dayalı koşullarda değerlendirilmiştir. Araştırmada, genotiplerin seçimini kolaylaştırmak amacıyla verim ve verim stabilitesine dayalı bir sınıflandırma sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemde genotipler, verim düzeyleri ve farklı çevrelerde gösterdikleri stabiliteye göre gruplandırılmıştır. Düşük verime veya düşük stabiliteye sahip genotipler, seleksiyon açısından uygun olmayan materyaller olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada sezon boyunca yüksek verimli fenotipleme yöntemleri kullanılmıştır. Bunun için yer sensörlerinden elde edilen RGB ve multispektral vejetasyon indeksleri ile İHA'dan elde edilen RGB, multispektral ve termal-kızılötesi veriler kullanılmıştır. Başaklanma ve tane dolum dönemlerinde alınan bu veriler, bitkilerin gelişim durumunu, yeşil kalma süresini ve yaşlanma sürecini değerlendirmek için kullanılmıştır. Ayrıca bu veriler Random Forest modelleriyle analiz edilerek verim ve stabilite tahminleri yapılmıştır.

Verim tahmin modellerine su miktarı ve referans evapotranspirasyon gibi çevresel faktörler de eklenmiştir. Bu sayede güçlü tahmin sonuçları elde edilmiştir. Verim tahminlerinde R^2 değerinin 0.31'in üzerinde, hata oranının ise %15.8'in altında olduğu belirlenmiştir. Stabilite tahminleri ise vejetasyon indekslerinin stabilitesine dayandırılmıştır. Bu tahminlerin başarısı orta düzeyde olmasına rağmen, önceki çalışmalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Çalışmanın önemli sonuçlarından biri, seçilecek genotiplerin erken dönemde güçlü gelişim göstermesi gerektiğidir. Orta veya yüksek verime ve stabiliteye sahip genotipler, sezon başında daha güçlü bir bitki gelişimi göstermiştir. Ancak bu genotipler tane dolumunun sonunda daha düşük yeşil kalma eğilimi sergilemiştir. Buna karşılık düşük verimli veya düşük stabiliteli genotipler, sezon başında zayıf gelişmiş ancak daha uzun süre yeşil kalma, yani "stay-green" özelliği göstermiştir.

Bu çalışma, buğday ıslahında sadece uzun süre yeşil kalan genotiplerin değil, erken dönemde güçlü gelişen ve tane dolum döneminde uygun zamanda yaşlanma gösteren genotiplerin daha önemli olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma, buğday seleksiyonunda yalnızca yüksek verime odaklanmak yerine, verim ve stabilitenin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Buğday, verim stabilitesi, iklim dayanıklılığı, yüksek verimli fenotipleme, makine öğrenimi

ABSTRACT

MULTI-SENSOR HIGH-THROUGHPUT PHENOTYPING FOR YIELD AND STABILITY-BASED SELECTION IN DURUM WHEAT

Developing wheat varieties that are resilient to climate change requires more than just the selection of high-yielding genotypes. These genotypes must also maintain their yield performance across different environmental conditions; in other words, they should exhibit high yield stability. This issue has become increasingly important under current conditions, where precipitation patterns are becoming increasingly irregular and temperatures are rising.

In this study, we evaluated 62 post-Green Revolution durum wheat cultivars. The experiments were conducted at two different Mediterranean locations in Spain. The cultivars were assessed under both irrigated and rainfed conditions. To facilitate genotype selection, a classification system based on the grain yield and yield stability was developed. Within this system, genotypes were grouped according to their yield performance and stability across different environments. Genotypes with low yield or stability were considered unsuitable for selection.

High-throughput phenotyping approaches were used during the growing season. RGB and multispectral vegetation indices obtained from ground-based sensors, together with UAV-derived RGB, multispectral, and thermal-infrared data, were used. Data collected at the anthesis and grain-filling stages were used to evaluate plant growth status, green retention, and senescence dynamics. In addition, these data were analyzed using Random Forest models to predict yield and yield stability.

Environmental factors, such as water input and reference evapotranspiration, were also incorporated into the yield prediction models. Consequently, robust prediction outcomes were obtained. For yield prediction, the R^2 value was above 0.31, whereas the error rate remained below 15.8%. Stability predictions were based on the vegetation indices. Although the predictive performance for stability was moderate, it was superior to that reported in previous studies.

One of the key findings of this study was that the genotypes selected for breeding should exhibit strong early season vigor. Genotypes with moderate or high yield and stability showed stronger plant development at the beginning of the season. However, these genotypes displayed lower green retention toward the end of grain filling period. In contrast, genotypes with low yield or low stability showed weaker early development but maintained greenness for a longer period, indicating a "stay-green" phenotype.

Overall, this study demonstrates that in wheat breeding, genotypes with strong early vigor and timely senescence during grain filling may be more valuable than genotypes that simply remain green for a longer period. The findings also highlight the need to evaluate yield and yield stability together, rather than focusing solely on yield maximization in wheat selection.

Keywords: Wheat, yield stability, climate resilience, high-throughput phenotyping, machine learning

UZAKTAN ALGILAMA KULLANILARAK KIZILÇAM (PİNUS BRUTİA TEN.) ORİJİN PERFORMANSININ BELİRLEYİCİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Alper Ahmet ÖZBEY[1], Gordana KAPLAN[2]

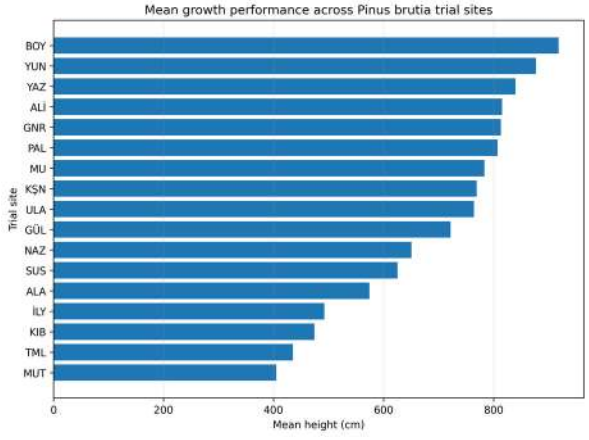
[1]Dr., Southwest Anatolia Forest Research Institute, 07010 Antalya, Türkiye, alperahmetozbey@ogm.gov.tr
[2]Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, 26555 Eskişehir, Türkiye, gkaplan@eskisehir.edu.tr

ÖZET

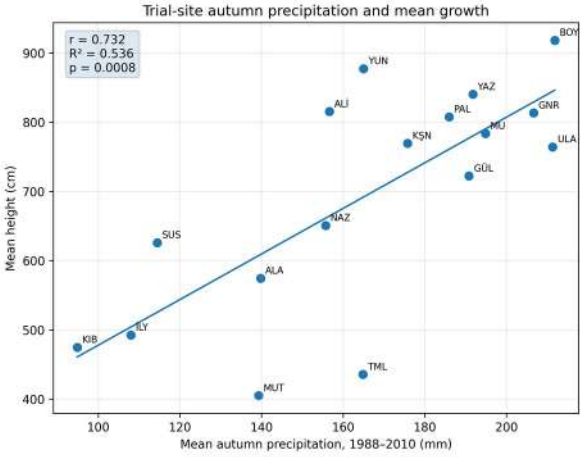
Kızılçam (Pinus brutia Ten.), Türkiye'nin özellikle Akdeniz kuşağındaki doğal ormanlarının ve ağaçlandırma çalışmalarının temel türlerinden biridir. Türün geniş ekolojik yayılışı, farklı kaynak popülasyonlarının kuraklık, sıcaklık ve mevsimsel yağış rejimlerine farklı uyum özellikleri geliştirebilmesine olanak vermektedir. Bu nedenle uygun orijin seçimi yalnızca büyüme ve verim açısından değil, iklim değişikliği altında gelecekteki ağaçlandırmaların dayanıklılığı açısından da önem taşımaktadır. Uzun süreli orijin denemeleri bu farklılıkları değerlendirmek için benzersiz bir kaynak sunmakla birlikte, klasik arazi ölçümleri çoğu zaman orijinlerin geldiği çevre ile dikildikleri deneme alanlarının iklimsel bağlamını birlikte değerlendirmemektedir. Bu çalışmanın amacı, uzaktan algılama destekli iklim ve topoğrafya ürünlerini kullanarak kızılçam orijinlerinin kaynak çevrelerini ve deneme alanlarının yetişme ortamlarını karakterize etmek; 20. yıl boy performansındaki farklılıkların deneme alanı iklimi, orijin iklimi ve orijin-deneme alanı çevresel farkları ile ne ölçüde açıklanabildiğini ortaya koymaktır.

Çalışmada 47 orijin ve 17 deneme alanına ait toplam 772 orijin-deneme gözlemi değerlendirilmiştir. Büyüme değişkeni olarak 20. yıl ortalama boy değerleri kullanılmıştır. Çevresel karakterizasyon Google Earth Engine ortamında yürütülmüş; 1988-2010 dönemi için CHIRPS uydu-istasyon birleşik yağış ürünü (Funk vd., 2015), CHIRTS-daily uydu destekli sıcaklık veri seti (Verdin vd., 2020) ve SRTM radar tabanlı sayısal yükseklik modeli (Farr vd., 2007) kullanılmıştır. İlkbahar (Mart-Mayıs), yaz (Haziran-Ağustos) ve sonbahar (Eylül-Kasım) dönemleri için ortalama yağış ve sıcaklık değişkenleri türetilmiş; günlük ortalama sıcaklıklardan 5 °C taban sıcaklığı kullanılarak büyüme derece günleri (GDD) hesaplanmıştır. İstatistiksel analizlerde önce deneme alanı ortalama boyları ile deneme alanı çevresel değişkenleri arasındaki ilişkiler, ardından her orijinin tüm denemelerdeki ortalama performansı ile kaynak alan iklimi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca orijinlerin deneme alanı kalitesinden bağımsız olarak ne ölçüde güçlü kaldığını değerlendirmek için deneme içi sıralamalar ve ilk beşte yer alma sıklıkları hesaplanmıştır.

Deneme alanları arasında 20. yıl ortalama boyu 404,9-918,2 cm arasında değişmiş ve belirgin bir yetişme ortamı etkisi görülmüştür (Şekil 1). Test edilen deneme alanı değişkenleri içinde en güçlü ilişki sonbahar yağışı için elde edilmiştir. Deneme alanının 1988-2010 ortalama sonbahar yağışı ile ortalama boy arasında güçlü ve pozitif bir ilişki bulunmuştur ($r=0,732$; $R^2=0,536$; $p=0,0008$; Şekil 2). Buna karşılık ilkbahar yağışının ilişkisi daha zayıf ve istatistiksel olarak sınırda kalmış ($r=0,445$; $p=0,073$), yaz yağışı ise anlamlı olmamıştır ($r=0,208$; $p=0,424$). İlkbahar, yaz ve sonbahar yağışlarının birlikte kullanıldığı model toplam varyansın %54,3'ünü açıklamış; model içerisinde bağımsız olarak anlamlı kalan mevsim sonbahar olmuştur. Deneme alanı sıcaklık ve GDD değişkenleri tek başlarına anlamlı ilişkiler göstermemiştir. Bu sonuç, 20 yıllık büyüme performansında özellikle sonbahar nemliliğinin deneme alanı verimliliğinin güçlü bir göstergesi olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 1. Kızılçam deneme alanlarında 20. yıl ortalama boy performansı.



Şekil 2. Deneme alanı sonbahar yağışı ile 20. yıl ortalama boyu arasındaki ilişki.

Orijin kaynak iklimi açısından farklı fakat daha zayıf bir desen ortaya çıkmıştır. Orijinlerin ortalama büyüme performansı yaz yağışı ile negatif ($r=-0,353$; $p=0,0149$), sonbahar yağışı ile pozitif ($r=0,337$; $p=0,0205$) ilişki göstermiştir. Üç mevsim yağışının birlikte kullanıldığı orijin modeli performans varyansının %26,3'ünü açıklamış ($R^2=0,263$; $p=0,004$); modelde yaz yağışı negatif ($p=0,016$), sonbahar yağışı ise pozitif ($p=0,009$) katkı vermiştir. İlkbahar ve sonbahar sıcaklığı ile GDD için daha düşük ancak anlamlı pozitif ilişkiler elde edilmiştir (r yaklaşık 0,29-0,30; p yaklaşık 0,04-0,05). Buna göre yüksek performanslı orijinler genel olarak daha kuru yazlara, daha yağışlı sonbaharlara ve görece elverişli termal koşullara sahip Akdeniz kaynak çevreleri ile ilişkilidir. Orijin-deneme alanı iklimsel farkları ise deneme alanının kendi iklimine kıyasla daha sınırlı açıklayıcılık göstermiştir.

Deneme içi sıralamalar, bazı orijinlerin iyi deneme alanlarından yararlanmanın ötesinde farklı çevrelerde de istikrarlı biçimde üst sıralarda kaldığını göstermiştir. ANYV (Anamur), CETB (Çetibeli), KARG (Kargı) ve AKDE (Yeşilovacık) orijinleri altı farklı deneme alanında ilk beşte yer alarak en güçlü genel performans grubunu oluşturmuştur. Bulgular birlikte değerlendirildiğinde, kızılçamın 20 yıllık boy gelişiminde dikim alanının iklimsel uygunluğunun kaynak orijin ikliminden daha güçlü bir belirleyici olduğu; özellikle sonbahar yağışının deneme alanı performansıyla belirgin biçimde ilişkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kaynak çevrenin kuru yaz-yağışlı sonbahar örüntüsü de orijin performansında anlamlı bir uyum sinyali taşımaktadır. Sonuçlar, uzun dönemli ormancılık denemelerinin uydu ve diğer uzaktan algılama tabanlı çevresel veri setleri ile yeniden analiz edilmesinin, iklim uyumlu orijin seçimi ve gelecekteki ağaçlandırma stratejileri için güçlü bir karar desteği sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: iklim-büyüme ilişkisi, kızılçam, orijin denemeleri, uzaktan algılama

ABSTRACT

ASSESSING CLIMATIC DRIVERS OF PINUS BRUTIA TEN. PROVENANCE PERFORMANCE USING REMOTE SENSING

Turkish red pine (Pinus brutia Ten.) is one of the principal forest and afforestation species of the Mediterranean region of Türkiye. Its broad ecological distribution implies substantial variation among source populations in their adaptation to seasonal drought, temperature regimes, and water availability. Identifying provenances that combine high productivity with broad environmental tolerance is therefore increasingly important under climate change. Long-term provenance trials provide a unique experimental basis for this purpose; however, traditional field analyses rarely integrate the climatic context of both provenance origins and planting sites. This study used remote sensing-supported climate and terrain products to characterize provenance source environments and common-garden trial sites and to test whether 20-year height performance could be explained by trial-site climate, origin climate, and origin-to-trial environmental differences.

The analysis included 772 provenance-by-trial observations representing 47 provenances and 17 trial sites. The 20-year mean height was linked to environmental variables derived from Google Earth Engine for 1988-2010. Precipitation was obtained from CHIRPS (Funk et al., 2015), temperature from CHIRTS-daily (Verdin et al., 2020), and elevation from the radar-derived SRTM digital elevation model (Farr et al., 2007). Seasonal precipitation and temperature were summarized for spring (March-May), summer (June-August), and autumn (September-November), while growing degree days (GDD) were calculated using a 5 °C base temperature. Trial-level analyses examined relationships between mean site performance and planting-site environment. Provenance-level analyses evaluated mean performance across trials in relation to origin climate, while within-trial rankings were used to identify provenances that remained strong after accounting for differences in overall trial quality.

Mean height varied markedly among trial sites, from 404.9 to 918.2 cm. Among the tested site variables, autumn precipitation showed the strongest association with growth ($r = 0.732$, $R^2 = 0.536$, $p = 0.0008$). A three-season precipitation model explained 54.3% of the variation among trial means, with autumn precipitation remaining the only independently significant seasonal term. Trial-site temperature and GDD variables showed weak, non-significant individual relationships. Origin climate exhibited a weaker but ecologically coherent signal. Mean provenance performance was negatively related to summer precipitation at origin ($r=-0.353$, $p=0.0149$) and positively related to autumn precipitation ($r=0.337$, $p=0.0205$). A three-season origin precipitation model explained 26.3% of the variation in provenance mean performance ($R^2=0.263$, $p=0.004$), with significant negative summer and positive autumn precipitation effects. Modest positive associations were also detected for spring and autumn temperature and GDD. Within-trial rankings identified ANYV, CETB, KARG, and AKDE as particularly robust provenances, each appearing among the top five performers in six trial sites.

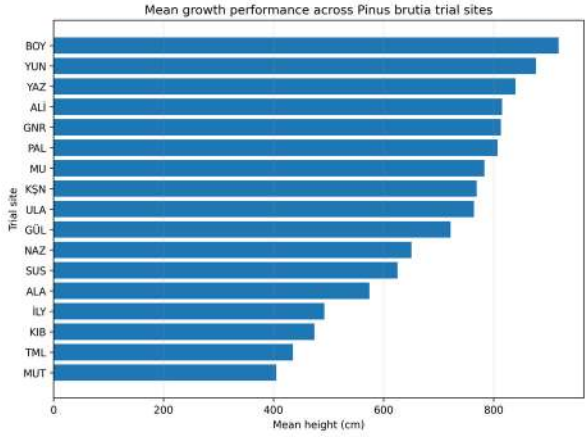


Figure 1. Mean 20-year height performance across Pinus brutia trial sites.

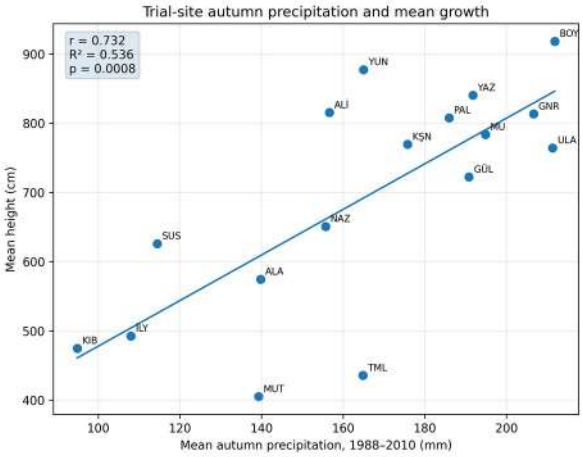


Figure 2. Relationship between trial-site autumn precipitation and mean 20-year height.

Overall, planting-site climate explained growth differences more strongly than provenance-source climate or simple origin-to-trial climatic mismatch. Autumn moisture availability emerged as the dominant site-level climatic signal. In contrast, successful provenance origins were characterized by a dry-summer, wetter-autumn Mediterranean climate and generally favorable thermal conditions. The results demonstrate the value of integrating long-term forestry experiments with satellite- and remote-sensing-based environmental data to support climate-informed provenance selection and future afforestation planning.

Keywords: climate-growth relationships, Pinus brutia, provenance trials, remote sensing

KAYNAKLAR / REFERENCES

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45, RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18-27.

Örtel, E., Çalıkoğlu, M., Çetinay, Ş., Altun, Z.G., Cengiz, Y., Boza, A., Türker, H.A., Kahraman, T., Gökdemir, Ş., Tosun, S., Arslan,M., Özpay, Z., Karatay, H., Karzaoğlu, C. (2010) Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) Orijin Denemelerinin 20. Yıl Sonuçları. Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Müdürlüğü, Teknik Bülten, 35, Antalya

Verdin, A., Funk, C., Peterson, P., et al. (2020). Development and validation of the CHIRTS-daily quasi-global high-resolution daily temperature data set. Scientific Data, 7, 303. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00643-7.

POTANSİYEL HEYELAN RİSKİ TAŞIYAN FINDIK ALANLARININ MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TESPİTİ

Fatih KADI

Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, fatihkadi@ktu.edu.tr

ÖZET

Özellikle yamaç eğim değerinin yüksek seviyelerde olduğu engebeli alanlarda plansız bir şekilde gerçekleştirilen zirai faaliyetler, heyelan afetini önemli ölçüde tetiklemektedir. Çünkü fındık, çay ve benzeri zirai ürünlere ait kök sistemleri, ağaçların kök sistemlerine kıyasla daha sığ ve zayıf bir yapıya sahiptir. Bu durum, söz konusu tarım alanlarında toprağın tutulma kapasitesini azaltarak yamaç stabilitesini olumsuz etkilemekte ve heyelan oluşma olasılığını artırmaktadır. Bu çalışma, heyelan afetine maruz kalmış fındık alanlarının belirlenmesini, bu alanların heyelan oluşumunu etkileyen çevresel faktörler açısından değerlendirilmesini ve potansiyel heyelan tehlikesi taşıyan fındık alanlarının makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışma alanına ait heyelan envanter haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ile İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) tarafından sağlanan dijital veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Heyelan oluşumunu etkileyen temel çevresel faktörler olan eğim, yükseklik, bakı, eğrisellik ve topoğrafik ıslaklık indeksi, çalışma alanına ait 5 m mekânsal çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli'nden türetilmiştir. Ayrıca heyelan oluşumunu etkileyen diğer önemli çevresel faktörlerden yola ve akarsuya uzaklık katmanları OpenStreetMap (OSM) verilerinden, litoloji haritası ise MTA tarafından yayımlanan 1:100.000 ölçekli jeoloji haritalarından elde edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında heyelan envanter haritası ile çalışma alanı sınırları içerisinde yer alan fındık alanları çakıştırılarak geçmişte heyelan meydana gelmiş fındık alanları belirlenmiş ve bu alanlar, heyelan oluşumunu etkileyen çevresel faktörler açısından analiz edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise heyelanlı ve heyelansız fındık alanlarından elde edilen örnekler kullanılarak makine öğrenmesi modeli eğitilmiş, oluşturulan model fındık alanlarına uygulanarak gelecekte heyelan oluşma potansiyeli yüksek olan fındık alanları belirlenmiştir. Bu irdelemeler sayesinde çalışma sahasındaki potansiyel heyelan riski taşıyan fındık alanlarının tespit edilmesi ve bu alanların heyelan afetine karşı daha dirençli hâle getirilmesi mümkün olacaktır.

Anahtar Sözcükler: fındık alanları, heyelan, makine öğrenmesi algoritmaları

ABSTRACT

MACHINE LEARNING-BASED DETECTION OF POTENTIAL LANDSLIDE-PRONE HAZELNUT ORCHARDS

Especially in rugged terrains with steep slopes, unplanned agricultural activities significantly trigger landslide occurrences. This is because the root systems of agricultural crops such as hazelnut and tea are shallower and weaker than those of forest trees. Consequently, the soil reinforcement capacity in these agricultural areas is reduced, adversely affecting slope stability and increasing the likelihood of landslides. This study aims to identify hazelnut orchards affected by landslides, evaluate these areas in terms of the environmental factors influencing landslide occurrence, and detect potential landslide-prone hazelnut orchards using machine learning algorithms. To achieve this objective, a landslide inventory map of the study area was generated using digital datasets provided by the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) and the Provincial Disaster and Emergency Directorate (AFAD). The primary environmental factors affecting landslide occurrence, including slope, elevation, aspect, curvature, and the Topographic Wetness Index (TWI), were derived from a Digital Elevation Model (DEM) with a spatial resolution of 5 m. In addition, the distance-to-road and distance-to-stream layers were generated from OpenStreetMap (OSM) data, while the lithology map was obtained from the 1:100,000-scale geological maps published by MTA. In the first stage of the study, the landslide inventory map was overlaid with the hazelnut orchard boundaries within the study area to identify orchards that had previously experienced landslides. These orchards were then analyzed in terms of the environmental factors influencing landslide occurrence. In the second stage, a machine learning model was trained using samples collected from both landslide-affected and non-landslide hazelnut orchards. The trained model was subsequently applied to all hazelnut orchards in the study area to identify those with a high potential for future landslide occurrence. The findings of this study will facilitate the identification of potential landslide-prone hazelnut orchards within the study area and contribute to improving their resilience against future landslide hazards.

Keywords: hazelnut orchard, landslide, machine learning algorithms

1. GİRİŞ

Heyelan afeti günümüzde toprak, taş veya bu tür malzemelerin karışımından oluşan bir zeminin ya da çeşitli kayaların bir yüzey üzerinde hareket etmesi olarak kabul görmektedir (Erguvanlı, 1982). Günümüzde bu afet türünü tetikleyen birçok unsur bulunmakta olup, şiddetli ve ani yağışlar, gelişigüzel bir şekilde yamaç eğiminin yüksek olduğu bölgelerde inşa edilen yapılar, depremler, birçok amaç içeren kontrolsüz patlatmalar ve kazılar, plansız gerçekleştirilen tarımsal faaliyetler ve doğal bitki örtüsünün tahribatı gibi uygulamalar ilgili bölgenin heyelan afetine olan eğilimini arttırmaktadır.

Güncel literatürde bir bölgedeki heyelan riskinin hangi alanlarda yüksek hangi alanlarda ise düşük olduğunu tahmin etmeyi amaçlayan, başka bir deyişle potansiyel heyelan riski taşıyan alanların belirlenmesini konu edinen birçok bilimsel çalışma bulunmakta olup bu tür çalışmalar kendi içlerinde amaçlarına ve yöntemlerine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. (1) Eker ve Aydın (2016); Kadı vd. (2019); Yıldırım ve Kadı (2020); Zare vd. (2021); Buğday ve Akay (2023); Kadı ve Yılmaz (2024) ve Küçüker (2024) yaptıkları çalışmalarda orman yollarının, (2) Liu vd. (2022); Ramiz vd. (2023); Beigh vd. (2024); Khan vd. (2024); Lin vd. (2024); Taşkaya vd. (2025) karayolların, (3) Jurko vd. (2009); Öz ve Günek (2021); Aiswarya vd. (2023); Amatya vd. (2024); Demirbilek ve Turoğlu (2024) ve Hallal vd. (2024) havza bölgelerinin, (4) Biswakarma vd. (2023); Pyakurel vd. (2023); Kadı (2024); Priyadarshi ve Bera (2024) binaların, (5) Devkota vd. (2013); Long vd. (2021); Li vd. (2022) ve Jiang vd. (2024) dağlık alanların, (6) Ilanloo (2011); Ersoy vd. (2020); Taher vd. (2023) ve Aydın ve Raja (2024) göl ve baraj çevresinin, (7) Vassallo vd. (2019); Minglei vd. (2022); Hao vd. (2023) ve Zhang vd. (2024) tünel çevresinin heyelan afeti açısından risk durumlarını incelemişlerdir.

Özellikle yamaç eğiminin yüksek ve değişken olduğu engebeli arazilerde plansız bir şekilde yürütülen tarımsal faaliyetler, heyelan afetini tetikleyen faaliyetlerin başında gelmektedir. Günümüzde birçok ormanlık sahalar yanlış arazi kullanım planlamalarından kaynaklı tarım alanlarına dönüştürülmüştür. Bu durum mevcut doğal örtünün tahrip edilmesine, toprak yüzeyinin açılmasına ve şiddetli yağışlarla toprağın kısa sürede suya doygun hale gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca çay, fındık ve benzeri tarımsal arazilerin kökleri, ağaçların kökleri kadar derin değildir. Dolayısıyla bu tür tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü alandaki fındık, çay ve benzeri tarım sahalarına ait köklerinin ağaç köklerine kıyasla toprak tutma kabiliyetlerinin zayıf olması, bu tür alanların heyelan afetine olan eğilimlerini arttırmaktadır.

Yukarıda sıralı bir şekilde heyelan afetini konu edinen bilimsel çalışmalar amaçlarına göre çeşitli kategorilere ayrılmıştır. Bu kategorilerde verilen güncel literatür özetinde de görüldüğü üzere ülkemizdeki ve dünyadaki tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü tarım alanlarının heyelan afeti ile olan ilişkisinin irdelendiği bilimsel çalışmalar yetersizdir.

Bu çalışmanın amacı heyelan afetine maruz kalmış fındık alanlarının heyelan afetini etkileyen tetikleyici faktörler (yükseklik, eğim, bakı, litoloji, eğrisellik, topoğrafik ıslaklık indeksi, akarsuya uzaklık ve yola uzaklık) dikkate alınarak irdelenmesi, potansiyel heyelan riski taşıyan tarım alanların makine öğrenmesi algoritması kullanılarak tespit edilmesidir. Bu sayede can ve mal kayıplarının minimum seviyelerde tutabilmek amacıyla tarımsal faaliyetler sekteye uğramadan gerekli önleyici tedbirlerin alınmasının yolu bu çalışmayla açılabilecektir.

1.1 İş Akış Çizelgesi

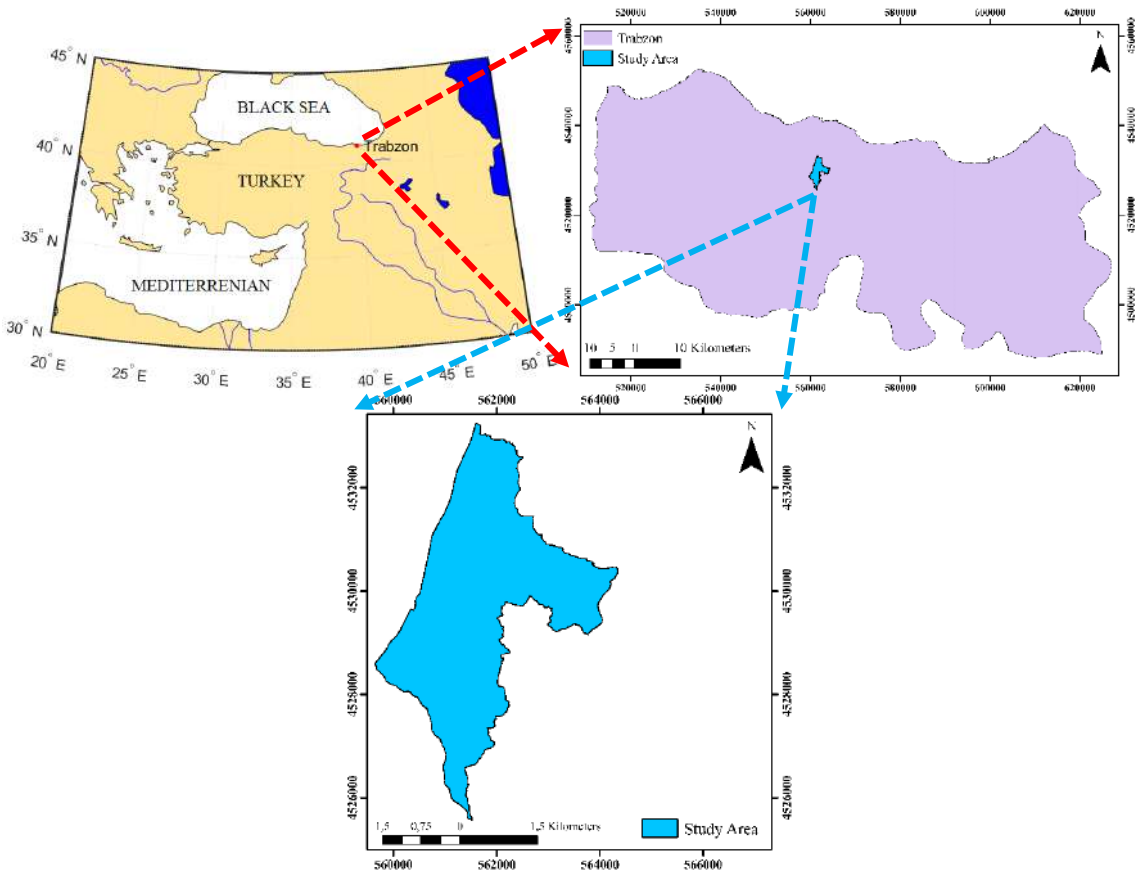
Bu çalışmada uygulanılan iş akış çizelgesi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İş akış çizelgesi

1.2 Çalışma Sahası

Çalışma sahası Trabzon ili, Ortahisar ilçesine bağlı Çağlayan Mahallesi olarak seçilmiştir. Söz konusu çalışma sahası 12,74 km^2'lik bir yüzölçüm değerine sahiptir. Bölgedeki yükselti değerleri 76 – 1022 m arasında değişmekte olup en yüksek yamaç eğim değeri ise 72°'dir (Şekil 2).

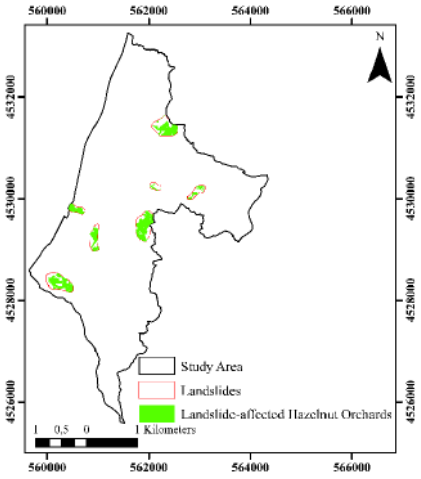


Şekil 2. Çalışma Sahası

1.3 Veriler

1.3.1 Heyelan Envanter Haritasının Üretimi

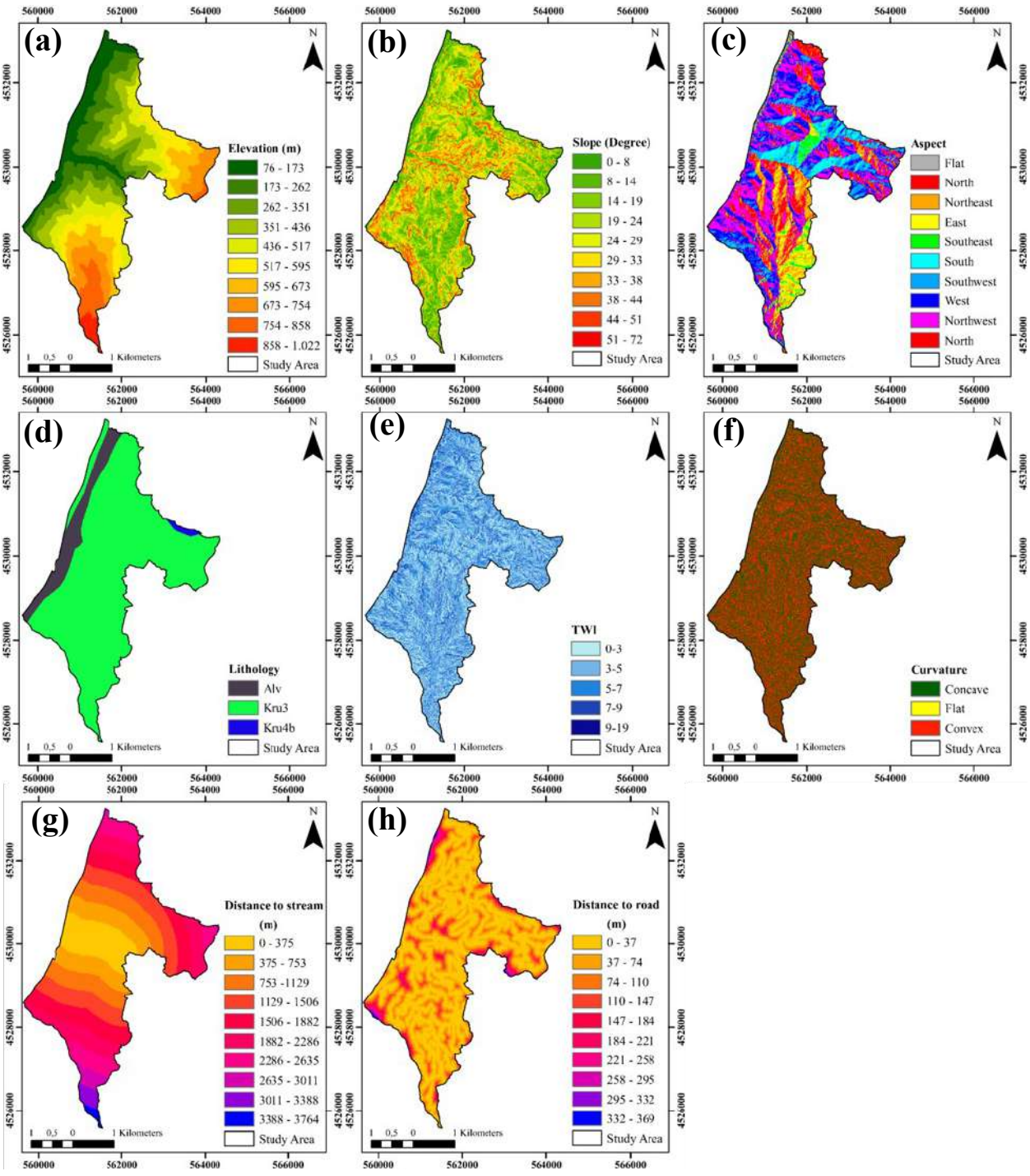
Bu çalışmada, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü ile İl Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan alınan hem dijital hem de yazılı kayıtlardan yararlanılarak 1:25000 ölçeğinde heyelan envanter haritası üretilmiştir. Çalışma sahası sınırları içinde toplamda 0.59 km^2 lik yüzölçümüne sahip 7 heyelan sahası yer almaktadır. Bu yedi heyelan sahasının 1'i alansal aktif akma, 2'si pasif ve diğer 4'ü aktif heyelan kategorisine girmektedir. Heyelan afetine maruz kalmış fındık alanlarının toplam yüzölçüm değeri ise 0.37 km^2'dir (Şekil 3).



Şekil 3. Heyelan envanter haritası ve heyelanlı fındık alanları

1.3.2 Tetikleyici Faktörlerin Üretimi

Buna ek olarak fındık alanlarının heyelan afeti yönünden irdelenmesinde kullanılan tetikleyici faktörlerde bu çalışma kapsamında ArcGIS yazılımı kullanılarak üretilmiştir. Bu bağlamda üretilen sekiz farklı tetikleyici faktör aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4).



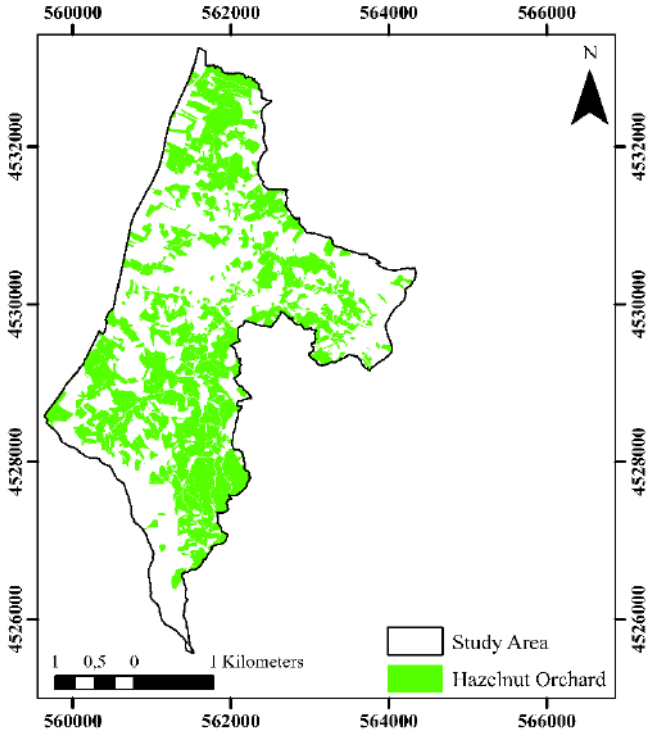
Şekil 4. Tetikleyici faktörler (a:yükseklik, b:eğim, c:bakı, d:litoloji, e:topoğrafik ıslaklık indeksi, f: eğrisellik, g: akarsuya yakınlık, h: yola yakınlık)

Eğim, heyelan afetini tetikleyen, heyelana yönelik bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan önemli bir tetikleyici faktördür (Ceylan Demirel ve Hastaoğlu, 2022; Berber, 2025). Yamaç eğimi yüksek bir değere sahip olan topoğrafik yapıların yer çekim kuvvetinin etkisi nedeniyle kütle hareketlerine olan eğilimleri diğer bölgelere kıyasla daha fazladır. Bu çalışmada SYM kullanılarak üretilen eğim faktörü toplamda 10 alt gruba bölünmüş olup çalışma sahası sınırları içindeki en yüksek yamaç eğim değerinin ise 72° olduğu görülmüştür. Yükseklik faktörü arazinin potansiyel yerçekimi enerjisini doğrudan etkileyen ve literatürde sıklıkla kullanılan bir diğer önemli faktördür (Güneş ve Kömüşcü, 2025) . Bu çalışmada, üretilen yükseklik faktörü toplam 10 alt sınıfa ayrılmış olup çalışma sahasındaki en düşük - en yüksek yükseklik değerleri sırasıyla 76 ve 1022 metredir. Bakı heyelan afetini tetikleyen bir diğer faktördür. Heyelanların büyük bir kısmı belirli ve benzer yönelimlere sahip bölgelerde meydana gelmektedir. Her bir yönelime sahip bölgelerin gerek güneş ışığına gerekse çeşitli iklimsel olaylara olan eğilimleri farklıdır. Dolayısıyla her bir farklı yönelime sahip arazilerin heyelan afetine olan eğilimleri de farklı olmaktadır (Yılmaz, 2023). Bu çalışmada, bakı haritası toplam dokuz alt sınıfa ayrılmıştır. Bu çalışmada kullanılan bir diğer faktör ise litolojidir. Farklı yapılara sahip

litolojik malzemelerin su geçirgenliği ve kayma dayanımları farklılık göstermektedir. Dolayısıyla her farklı litolojik birimin heyelan afetine olan eğilimleri farklıdır (Dağ ve Bulut 2012). Bu çalışmada litoloji haritası, 1:25000 ölçekli jeoloji haritasından ArcGIS yazılımı kullanılarak üretilmiştir. Çalışma alanına ait litoloji haritası toplamda 3 farklı toprak tipini içermektedir (Alv, Kru3, Kru4b). Eğrilik de heyelan afetini tetikleyen faktörlerden birisidir. Bu faktör türü eğim açısı veya bakı değişim oranı olarak da tanımlanmakta olup, toplamda üç farklı alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar her bir pikselin aldığı pozitif (dışbükey), sıfır (düz) ve negatif (içbükey) değerlere göre değişkenlik göstermektedir (Kadı, 2024). Heyelan afetini etkileyen bir diğer faktör ise topoğrafik ıslaklık indeksidir. Bu indeks değeri toprağın doymuş akış kaynak alanlarının konumu ve miktarı üzerindeki etkisini ölçmektedir. Akarsu bölgesine yakın yerlerde bu indeks değeri artış göstermektedir (Pourghasemi vd., 2012; Berber, 2025). Bu çalışmada, SYM üzerinden üretilen bu indeks faktörü toplamda beş farklı alt sınıfa ayrılmıştır. Yola uzaklık faktörü, heyelan afetini tetikleyen faktörlerden bir diğeridir. Gelişigüzel tasarlanmış yol ağları, yamaç stabilitesini bozmakta, yer altı sularının doğal denge düzeyini değiştirmekte ve dolayısıyla ilgili bölgeyi heyelan afetine daha eğilimli bir bölge haline getirmektedir. Bu çalışmada kullanılan yol ağları, Open Street Map (OSM) verileri ve 1:25.000 ölçekli haritalardan türetilmiş olup toplamda on farklı alt sınıfa ayrılmıştır. Her bir raster veri yapısına sahip pikselin yol ağına olan uzaklıkları ArcGIS programı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen yola olan uzaklık faktörü dikkate alındığında çalışma sahası sınırları içinde yer alan yol ağına en uzak mesafenin 370 m olduğu görülmektedir. Heyelan afetini tetikleyen son faktör ise drenaja uzaklıktır. Bir bölgeden geçen akarsular zamanla geçtikleri bölgede bulunan şevleri ciddi bir şekilde aşındırmaktadır. Dolayısıyla şevlerde oluşabilecek aşınmalar, şev stabilitesini bozmakta ve ilgili bölgeyi heyelan afetine eğilimli hale getirmektedir. Drenaja uzaklık faktörü ArcGIS'in hidrolojik analiz modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Bu bağlamda çalışma sahası sınırları içindeki maksimum drenaja olan uzaklık 3765 metredir (Şekil 4).

1.3.3 Fındık Alanlarının Tespiti ve Haritalanması

Çalışma sahası sınırları içindeki mevcut fındık alanlarının belirlenmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda çalışma sahası olarak seçilen bölgeye ait kadastral harita temin edilerek bölgedeki fındık alanları tespit edilmiştir. Bu tespit işlemleri sonucunda bölgedeki fındık alanlarının toplam yüzölçüm değeri 5.70 km^2'dir (Şekil 5).



Şekil 5. Fındık alanları

1.4 YÖNTEM

1.4.1 Lojistik Regresyon Yöntemi (LR)

Lojistik Regresyon (LR), heyelan duyarlık haritalarının üretim aşamasında sıklıkla kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir (Ankah vd. 2025; Sharma vd. 2025; Zhu vd. 2025; Hamal vd. 2026). Bu yöntem bir bölgedeki heyelan

oluşumunu tetikleyen faktörler arasındaki korelasyonu modelleyip benzer faktörlere sahip diğer bölgelerdeki heyelan meydana gelme olasılığını tahmin etmeyi amaçlamaktadır.

$$z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n \quad (1)$$

Bu eşitlikte z, 0 ve 1 aralığında değer alan bağımlı değişkeni, β_0, bağımsız değişkenlerin 0 değerini aldığı durumdaki bağımlı değişken sabitini, $\beta_1, \ldots, \beta_n$, bağımsız değişkenlere ait regresyon katsayılarını ve son olarak $X_1, \ldots, X_n$, ise bağımsız değişken değerini temsil etmektedir (Kavzoğlu vd. 2012).

Bu yöntemin kullanımındaki amaç, en az sayıdaki değişkeni kullanarak en iyi uyuma sahip, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyonu kurabilecek bir model tasarlamaktır. Bu modeldeki bağımlı değişken, heyelan afetinin mevcut olması ya da olmaması durumunu gösteren ikili bir değişkendir (Akgün, 2007; Kavzoğlu vd. 2012).

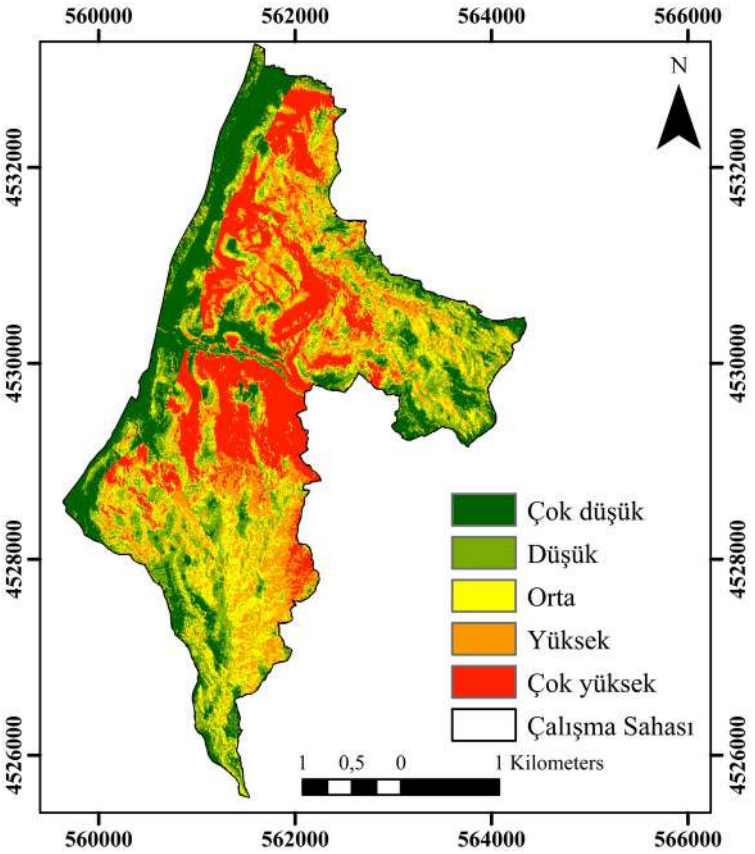
2. SONUÇLAR

Çalışma sahasına ait heyelan duyarlık haritasının üretiminden önce heyelan afetini etkileyen tetikleyici faktörler arasında korelasyon olup olmadığını denetlemek için çoklu doğrusallık (multicollinearity) analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında VIF ve TOL değerlerine ilişkin veriler Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1 incelendiğinde faktörlere ait TOL değerlerinin 0,1'den büyük olduğu, VIF değerlerinin ise 10'dan düşük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu değerler, heyelan duyarlık haritasının üretiminde kullanılan faktörler arasında çoklu doğrusallık probleminin bulunmadığını göstermiştir.

Çizelge 1. Faktörlere ait VIF ve TOL değerleri

Faktörler	VIF	TOL
Yükseklik	1,78942	0,55884
Eğim	1,28754	0,77667
Bakı	1,06337	0,94041
Litoloji	1,04954	0,95280
TWI	1,39221	0,71828
Eğrisellik	1,24763	0,80152
Akarsuya Yakınlık	1,42036	0,70405
Yola Yakınlık	1,57445	0,63514

Çalışma sonucu üretilen heyelan duyarlık haritası aşağıda sunulmuştur (Şekil 6).



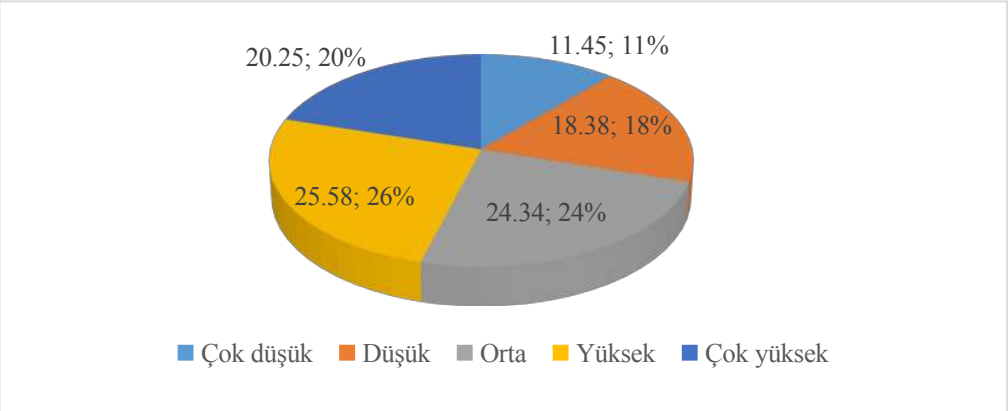
Şekil 6. Heyelan duyarlık haritası

Üretilen heyelan duyarlık haritası beş alt sınıfa bölünmüştür. Bu sınıfların alansal dağılımları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Sınıfların alansal dağılımları

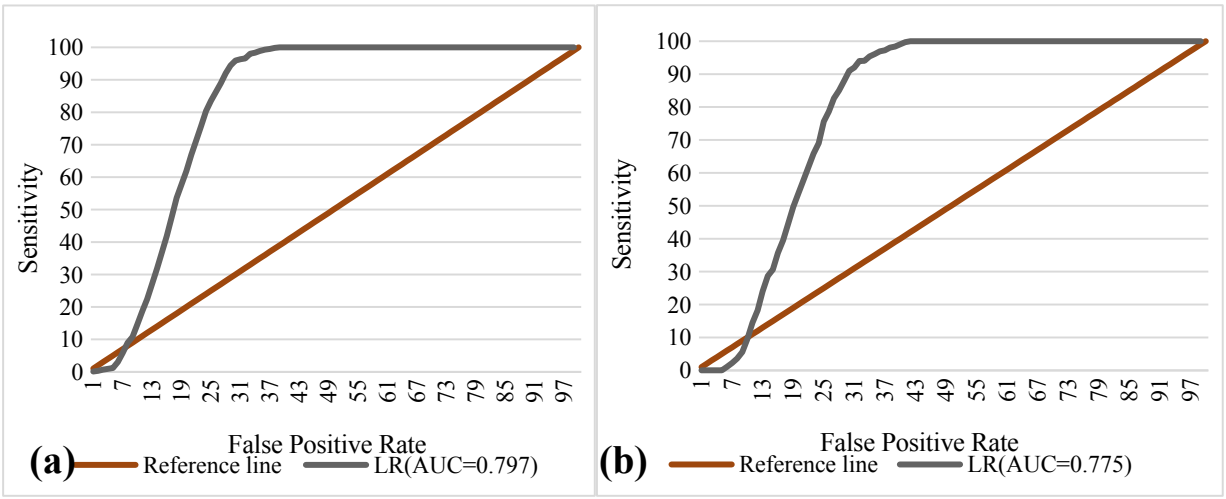
Sınıflar	Alan (km^2)	Yüzdelik (%)
Çok düşük	1,92	15,12
Düşük	1,98	15,52
Orta	2,34	18,36
Yüksek	2,58	20,25
Çok Yüksek	3,92	30,75

Daha sonra mevcut fındık alanları üretilen heyelan duyarlık haritası ile çakıştırılarak heyelan afeti açısından risk durumları irdelenmiştir. Bu bağlamda mevcut fındık alanlarının risk durumlarını gösterir grafik aşağıdaki gibidir (Şekil 7).



Şekil 7. Mevcut fındık alanlarının üretilen heyelan duyarlık haritasına göre risk durumları

Modelin performansını değerlendirmek için üretilen ROC eğrileri Şekil 8'de sunulmuştur. LR modelinin başarı ve tahmin oranı AUC değerleri sırasıyla 0.797, 0.775 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler LR modelinin iyi performans verdiğini göstermiştir.



Şekil 8. Duyarlık modeline ait ROC eğrileri ve AUC değerleri (a: Başarı oranı, b: Tahmin oranı)

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan 5 m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli verisinin teminindeki katkılarından dolayı Harita Genel Müdürlüğüne, çalışma sahasına ait kadastral altlık verilerinin sağlanmasındaki desteklerinden dolayı ilgili Kadastro Müdürlüğüne, heyelan envanter verilerinin temininde sağladıkları katkılardan dolayı Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığına (AFAD) teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Aiswarya, L., Kaivalyam, R. ve Joseph, A., 2023. Performance of qualitative and quantitative models in creating landslide susceptibility map of chaliyar river basin. *International Journal of Environment and Climate Change*, (13) 1860-1875. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102842.

Akgün, A., 2007. Ayvalık ve Yakın Çevresinin Erozyon ve Heyelan Duyarlılığının Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı İncelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Amatya, P., Emberson, R. ve Kirschbaum, D., 2024. Multitemporal landslide inventory and susceptibility map for the Arun River Basin, *Nepal.Geoscience Data Journal*,11, 669–679. https://doi.org/10.1002/gdj3.240.

Ankah, M.L.Y., Frimpong, R.A., Odum, E.K. et al., 2025. Landslide susceptibility mapping using GIS-based logistic regression model in Sekondi- Takoradi Metropolitan Area of Ghana. *Discov Appl Sci* 7, 1009. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07147-2

Aydın, O. ve Raja, N., 2024. Bulanık mantık yöntemiyle sera gölü çevresinin heyelan duyarlılık analizi. *Afet Ve Risk Dergisi,*7(2), 441-456. https://doi.org/10.35341/afet.1439973.

Beigh, I.H., Bukhari, S.K. ve Patil, A.S., 2024. GIS-based landslide susceptibility assessment using a statistical approach: a case study of srinagar-bandipora Highway, Kashmir Himalaya India. In: Chatterjee, U., Lalmalsawmzauva, K., Biswas, B., Pal, S.C. (eds)Landslidesin the Himalayan Region. *Disaster Risk Reduction*. *Springer, Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4680-4_12.

Berber, S., 2025. Tortum-Narman (Erzurum) bölgesinin kanıt ağırlığı yaklaşımı kullanılarak heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi. *Geomatik*, 10(2), 144-156. https://doi.org/10.29128/geomatik.1589807.

Biswakarma, P., Joshi, V., Abdo, H. G., Almohamad, H., Abdullah Al Dughairi, A. ve Al-Mutiry, M., 2023. An integrated quantitative and qualitative approach for landslide susceptibility mapping in West Sikkim district, Indian Himalaya. *Geomatics,Natural Hazards and Risk*,14(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2273781.

Bugday, E. ve Akay, A., 2023. Determination of the forest road alignment in landslide-prone areas based on landslide susceptibility map generated by machine learning approaches. *COFE-FETEC* Forest Operations, Flagstaff, Arizona, United States.

Ceylan Demirel, Ş. ve Hastaoğlu, K.Ö., 2022. CBS tabanlı ahp yöntemi kullanılarak oluşturulan Sivas Koyulhisar heyelan duyarlılık haritalarının güvenilirliğinin araştırılması. *Afet Ve Risk Dergisi*, 5(2), 715-730. https://doi.org/10.35341/afet.1071728.

Dağ, S. ve Bulut, F., 2012. Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*,36(1), 35-62.

Demirbilek, S. ve Turoğlu, H., 2024. Frekans oranı yöntemi kullanılarak arsuz çayı havzası heyelan duyarlılık analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi* (13), 23-39. https://doi.org/10.46453/jader.1496249.

Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., et al., 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Nat Hazards*, 65, 135–165. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0347-6.

Eker, R. ve Aydın, A., 2016. Landslide susceptibility assessment of forest roads. *European Journal of Forest Engineering*, 2, 54-60.

Ersoy, H., Karahan, M. ve Öztürk, H.H., 2020. Baraj rezervuarlarında heyelanlardan kaynaklanacak itki dalga özelliklerinin ampirik ilişkilerle değerlendirilmesi: Borçka Barajı Örneği. *Doğal Afetler Ve Çevre Dergisi*, 6(2), 248-257. https://doi.org/10.21324/dacd.621377.

Güneş, B. ve Kömüşcü, A.Ü., 2025. Coğrafi bilgi sistemleri (cbs) tabanlı ahs yöntemi ile Erzincan-Sivas Karayolu ve çevresinin heyelan duyarlılık analizi. *Doğal Afetler Ve Çevre Dergisi*, 11(1), 89-103. https://doi.org/10.21324/dacd.1478173.

Hallal, N., Hamidatou, M., Medjnoun, A., et al., 2024. GIS-based statistical and limit equilibrium models in the assessment of slope stability and landslide susceptibility: the case study of the Aomar Miocene basin, Bouira, Algeria. *Environ Earth Sci*, 83, 578. https://doi.org/10.1007/s12665-024-11879-6.

Hamal, S., Dhakal, S., Shahi, B. et al., 2026. Assessing landslide susceptibility using frequency ratio and logistic regression models in the Khudi Watershed. Geosci. Lett. 13, 19. https://doi.org/10.1186/s40562-026-00467-0

Hao, Y., Liu, C., Zhang, W., et al., 2023. Landslide risk evaluation: rainfall and blast-induced potential soil landsides in an expressway area underneath a railway tunnel, Guangzhou, China. *Bull Eng Geol Environ* 82, 420. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03449-0.

Ilanloo, M., 2011. A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 19. 668-676. 10.1016/j.sbspro.2011.05.184.

Jiang, J., Wang, Q., Luan, S., Gao, M., Liang, H., Zheng, J., Yuan, W. ve Ji, X., 2024. Landslide susceptibility prediction and mapping in Taihang mountainous area based on optimized machine learning model with genetic algorithm.Earth Science Informatics. 1-21. https://doi.org/10.1007/s12145-024-01470-9.

Jurko, J., Paudits, P. ve Vlcko, J., 2009. Landslide susceptibility map of Liptovska kotlina basin using GIS.

Kadı, F., 2024. Statistical-based models for the production of landslide susceptibility maps and general risk analyses: a case study in Maçka, Turkey. *Acta Geophys*. https://doi.org/10.1007/s11600-024-01380-w

Kadı, F., Yıldırım, F. ve Saralıoglu, E., 2019. Risk analysis of forest roads using landslide susceptibility maps and generation of the optimum forest road route: a case study in Macka, Turkey. *Geocarto International*, 36(14), 1612–1629. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1659424.

Kadı, F. ve Yılmaz, O.S., 2024. Determination of alternative forest road routes using produced landslide susceptibility maps: A case study of Tonya (Trabzon), Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2), 147-164. https://doi.org/10.26833/ijeg.1355615.

Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ. ve Şahin, E.K., 2012. Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesinde Kullanılan Faktörlerin Etkilerinin Araştırılması: Düzköy Örneği", *4. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZALCBS'2012*), 16-19 Ekim 2012, Zonguldak.. http://www.gyte.edu.tr/Files/UserFiles/80/jeodezi/yayinlar/pdf/heyelanTUFUAB.pdf

Khan, I., Bahuguna, H., Kainthola, A. ve Pandey, V.H.R., 2024. GIS-based multi-temporal analysis of landslide susceptibility mapping along the ramban-banihal road section of national highway-44, Jammu and Kashmir. In: Sajjad, H., et al. Landslide Risk Assessment and Mitigation in India. LRAMI 2022. Springer Proceedings inEarth and Environmental Sciences. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5485-4_9.

Küçüker, D.M., 2024. Analyzing landslide susceptibility of forest roads by analytical hierarchy process (AHP) in of forest planning unit of Turkiye. *Nat Hazards*. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06882-w.

Li, L., Chen, X., Zhang, J., Sun, D. ve Liu, R., 2022. Landslide Susceptibility-oriented suitability evaluation of construction land in mountainous areas. *Forests*, 13, 1621. https://doi.org/10.3390/f13101621.

Lin, K., Jiapaer, G., Yu, T., Zhang, L., Liang, H., Chen, B. ve Ju, T., 2024. Identification of potential landslides in the gaizi valley section of the karakorum highway coupled with ts-ınsar and landslide susceptibility analysis. *Remote Sens.* 16, 3653. https://doi.org/10.3390/rs16193653.

Liu, Y., Zhao, L., Bao, A., Li, J. ve Yan, X., 2022. Chinese high resolution satellite data and gıs-based assessment of landslide susceptibility along highway g30 in guozigou valley using logistic regression and maxent model. *Remote Sens*. 14, 3620. https://doi.org/10.3390/rs14153620.

Long, D., Cong, N., Cuong, N., Nguyen, B. ve Vo, D.P., 2021. An assessment of terrain quality and selection model in developing landslide susceptibility map – a case study in mountainous areas of quang ngai province, Vietnam. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_75.

Minglei, S., Hongwei, L., Yongquan, Z., Xinqiang, G., Huan, L. ve Zhengguo, Z., 2022. Deformation and failure mode analysis of the tunnel structure based on the tunnel-related landslides cases. *Frontiers in Earth Science*, 10, 906884. 10.3389/feart.2022.906884.

Öz, T. ve Günek, H., 2021. Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi. *lnternational Journal of Geography and Geography Education.* 396-412. https://doi.org/10.32003/igge.931516

Pourghasemi, H.R., Mohammady, M. ve Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005.

Priyadarshi, S. ve Bera, S., 2024. Exposure assessment of building to rain-fall triggered landslides in mountainous settlement: A Study from Sikkim Himalaya. 10.13140/RG.2.2.29040.06401.

Pyakurel, A., Gautam, D. ve Dahal, B.K., 2023. Mapping earthquake ınduced landslides using machine learning: a case of dolakha district in post gorkha earthquake context.

Ramiz, M., Siddiqui, M.A., Salman, M.S. et al., 2023. Landslide susceptibility mapping along Rishikesh–Badrinath national highway (Uttarakhand) by applying multi-criteria decision-making (MCDM) approach. *Environ Earth Sci*, 82, 591. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11268-5.

Sharma, P., Chandel, V.B.S., Kahlon, S. et al., 2025. Assessing landslide susceptibility in the Upper Ravi river catchment, Himachal Pradesh, India: a comprehensive analysis using the logistic regression model. *Geoenviron Disasters* 12, 26. https://doi.org/10.1186/s40677-025-00327-7

Taher, T. M., Omar, R. C., Wahab, W.A., Roslan, R., Solemon, B. ve Jaapar, A.R., 2023. Application of geographical ınformation system in landslide hazard analysis. ın: mohd sidek, l., salih, g.h.a., ahmed, a.n., escuder-bueno, ı., basri, h. (eds) proceedings of the 2nd ınternational conference on dam safety management and engineering. ICDSME2023.Water Resources Development and Management. Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-99-3708-0_12.

Taşkaya, S., Aksu, O., Doğan, S. ve Kurt, M., 2025. Production of highway landslide susceptibility map with machine learning techniques: a local study from Türkiye, Artvin-Ardanuç Road Line. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 11(2). https://doi.org/10.22399/ijcesen.1792.

Vassallo, R., Mishra, M., Santarsiero, G. et al., 2019. Modeling of landslide–tunnel ınteraction: the varco d'ızzo case study. *Geotech Geol Eng*, 37, 5507–5531. https://doi.org/10.1007/s10706-019-01020-x.

Yıldırım, F. ve Kadı, F., 2020. Production of optimum forest roads and comparison of these routes with current forest roads: a case study in Maçka, Turkey. *Geocarto International*, 37(8), 2175–2197. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1818852.

Yılmaz, O.S., 2023. Frekans oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler Köyü örneği. *Geomatik*, 8(1), 42-54. https://doi.org/10.29128/geomatik.1108735.

Zare, N., Hosseini, S.A.O., Hafizi, M.K., Najafi, A., Majnounian, B. ve Geertsema, M.A., 2021. Comparison of an adaptive neuro-fuzzy and frequency ratio model to landslide-susceptibility mapping along forest road networks. *Forests* 12, 1087. https://doi.org/10.3390/f12081087.

Zhang, W., Somerville, I., Paneiro, G., Nong, X., Chwala, M. ve Yang, W., 2024. Design and construction of tunnels and tunnelling: Understanding the importance of geological conditions, landslide susceptibility and risk assessment. *Geological Journal*, 59(9), 2365–2370. https://doi.org/10.1002/gj.5041

Zhu, Y., Peng, S., Lin, Z., Huang, B., Li, T., Zhang, R. ve Jin, R., 2025. Landslide susceptibility assessment and attribution analysis in Yunnan Province based on weighted information value-logistic regression model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2525428

KONYA KAPALI HAVZASI'NDA KARASAL YÜZEY–ATMOSFER ETKİLEŞİMLERİNİN, DÜŞEY TERMOFİZİKSEL DİNAMİKLERİN VE BİYOFİZİKSEL TAMPONLAMANIN ERA5-LAND VE MODIS VERİLERİYLE İNCELENMESİ (2000–2025)

Seda TERZİ TÜRK[*1], *Emine TANIR KAYIKÇI*[2], *Esra TUNÇ GÖRMÜŞ*[3]

1Öğr. Gör., İstanbul Topkapı Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 34020, Kazlıçeşme, İstanbul, sedaterzi@topkapi.edu.tr
2Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, etanir@ktu.edu.tr
3Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, etuncgormus@ceng.ktu.edu.tr

ÖZET

Yarı kurak kapalı havzalar, iklim değişikliği ve antropojenik arazi kullanımı baskılarına karşı hidrolojik ve termofiziksel açıdan hassas karasal sistemlerdir. Bu çalışmada, Konya Kapalı Havzası'nda (KKH) 2000–2025 dönemini kapsayan 26 yıllık zaman serisi boyunca karasal yüzey–atmosfer etkileşimleri, düşey toprak termofiziksel davranışı ve biyofiziksel tamponlama örüntüleri incelenmiştir. ERA5-Land reanalizinden atmosferik ve yüzey sıcaklıkları, dört katmanlı toprak sıcaklığı ve hacimsel nem profili (L1: 0–7 cm, L2: 7–28 cm, L3: 28–100 cm, L4: 100–289 cm) ile hidro-meteorolojik değişkenler; Terra/MODIS MOD09A1 yüzey yansıtma verilerinden ise Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (EVI) ve Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (NDWI) türetilmiştir. Mann–Kendall ve Sen eğimi analizleri, yüzeyden yaklaşık 3 m derinliğe kadar anlamlı bir ısınma sinyali göstermiştir (Tskin: +0,845 °C/10 yıl, p=0,001; T2m: +0,782 °C/10 yıl, p<0,001; L1–L4: +0,627 ila +0,567 °C/10 yıl, tümü p<0,001). Yıllık yağış (+4,10 mm/10 yıl; p=0,758) ve buharlaşma (+13,82 mm/10 yıl; p=0,172) anlamlı monoton trend göstermemiştir. MODIS serisinde NDVI (+0,023/10 yıl; p<0,001) ve EVI (+0,017/10 yıl; p=0,007) artarken NDWI'de anlamlı trend bulunmamıştır. Çapraz korelasyon ve genlik analizleri, yüzey sıcaklık dalgasının L4 katmanında %54 oranında sönümlendiğini (D=0,460) ve iki aylık (yaklaşık 61 gün) gecikme sergilediğini göstermiştir. Yaz döneminde termal gradyan (Tskin−T2m) ile NDVI (r=−0,578), EVI (r=−0,532) ve NDWI (r=−0,593) arasında anlamlı negatif ilişkiler belirlenmiştir (p<0,001). Yoğun vejetasyon koşullarında nemli toprak sınıfının ortalama termal gradyanı (2,26 °C), kuru toprak sınıfından (3,04 °C) 0,775 °C daha düşük bulunmuş ve grup farkı iki tamamlayıcı testte de anlamlı bulunmuştur (p<0,01). Bulgular, KKH'de güçlü düşey ısınma sinyaline eşlik eden derinlik-bağımlı termal ataleti ve yaz yüzey aşırı ısınmasının vejetasyon–toprak nemi koşullarıyla birlikte değiştiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Biyofiziksel tamponlama, ERA5-Land, faz gecikmesi, Konya Kapalı Havzası, MODIS.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LAND SURFACE–ATMOSPHERE INTERACTIONS, VERTICAL THERMOPHYSICAL DYNAMICS, AND BIOPHYSICAL BUFFERING IN THE KONYA CLOSED BASIN USING ERA5-LAND AND MODIS DATA (2000–2025)

Semi-arid closed basins are hydro-climatically and thermophysically sensitive to climate change and anthropogenic land-use pressure. This study investigates land surface–atmosphere interactions, vertical soil thermophysical behavior, and biophysical buffering patterns in the Konya Closed Basin (KCB) over 2000–2025. ERA5-Land provided atmospheric and skin temperatures, four-layer soil temperature and volumetric moisture profiles (L1: 0–7 cm, L2: 7–28 cm, L3: 28–100 cm, L4: 100–289 cm), and hydro-meteorological variables, whereas NDVI, EVI, and NDWI were derived from Terra/MODIS MOD09A1 surface reflectance. Mann–Kendall and Sen's slope analyses indicated significant warming from the land surface to nearly 3 m depth (Tskin: +0.845 °C decade−1, p=0.001; T2m: +0.782 °C decade−1, p<0.001; L1–L4: +0.627 to +0.567 °C decade−1, all p<0.001). Annual precipitation (+4.10 mm decade−1; p=0.758) and evaporation (+13.82 mm decade−1; p=0.172) showed no significant monotonic trend. In the MODIS series, NDVI (+0.023 decade−1; p<0.001) and EVI (+0.017 decade−1; p=0.007) increased significantly, whereas NDWI showed no significant trend. Cross-correlation and amplitude analyses showed that the annual surface thermal wave was damped by 54% in L4 (D=0.460) and lagged by two months (approximately 61 days). During summer, the surface–air thermal gradient (Tskin−T2m) was negatively correlated with NDVI (r=−0.578), EVI (r=−0.532), and NDWI (r=−0.593), with p<0.001 for all relationships. Under dense-vegetation conditions, mean ΔT was 2.26 °C for moist-soil months and 3.04 °C for dry-soil months, a difference of 0.775 °C that was significant in two complementary tests (p<0.01). The results highlight a robust vertical warming signal, depth-dependent subsurface thermal inertia, and systematic covariation of summer surface overheating with vegetation and soil-moisture conditions.

Keywords: Biophysical buffering, ERA5-Land, Konya Closed Basin, MODIS, phase lag.

1. GİRİŞ

Karasal yüzey ile alt atmosfer arasındaki enerji ve nem akıları, su ve enerji döngülerini ve yakın yüzey iklimini doğrudan etkileyen temel etkileşim mekanizmalarıdır (Seneviratne vd., 2010). Topografik kapalılıkları, sınırlı su rezervleri ve dış drenaj ağından yoksun hidrolojik yapıları nedeniyle yarı kurak kapalı havzalar, iklim değişikliği ile antropojenik arazi kullanımı baskılarının birlikte izlenebildiği hassas karasal sistemlerdir. Konya Kapalı Havzası (KKH), Türkiye tarımı açısından taşıdığı önem, sulamanın büyük ölçüde yeraltı suyuna dayanması ve su talebi yüksek ürün desenlerinin yaygınlaşması nedeniyle iklim-su-tarım etkileşimlerinin birlikte değerlendirilmesi açısından dikkat çekmektedir (Yılmaz vd., 2021; Yoloğlu vd., 2026). Yılmaz vd. (2021), son kırk yılda havzadaki arazi kullanımı, ürün

deseni, yeraltı ve yüzey suları ile göl ekosistemlerindeki değişimleri birlikte değerlendirerek tarımsal su çekiminin bölgesel hidro-ekolojik yapı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Güncel hidrojeolojik modelleme sonuçları da mevcut sulama ve ürün deseni koşullarında yeraltı suyu seviyelerindeki düşüşün sürdürülebilir olmadığını ve iklim değişikliği altında su yönetimi baskısının artacağını göstermektedir (Yoloğlu vd., 2026).

Havzada sıcaklık, yağış, toprak nemi, evapotranspirasyon ve vejetasyon dinamikleri farklı uzaktan algılama ve hidro-klimatolojik yaklaşımlarla ayrı ayrı ya da belirli bileşenler üzerinden incelenmiştir. Gokmen vd. (2012), Konya Havzası'nda toprak nemi bilgisini yüzey enerji dengesi yaklaşımına entegre ederek su stresi koşullarında evapotranspirasyon kestirimini geliştirmiş; sulanan alanlar ile kuru çevre alanları arasındaki enerji ve su akısı farklılığını ortaya koymuştur. Thakur vd. (2012), Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektroradyometresi (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) verilerinden elde edilen Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) zaman serilerini yağış, sıcaklık ve yeraltı suyu düzeyiyle birlikte değerlendirerek havzadaki sulak alanların ekolojik durumunu izlemiştir. Orhan vd. (2019), Landsat tabanlı yüzey sıcaklığı ve meteorolojik gözlemler üzerinden 1984–2011 dönemindeki yüzey ısınmasını ve kuraklık sinyalini incelemiştir. Ateşoğlu (2021) ise 2000–2018 döneminde uzun süreli NDVI eğilimleri üzerinden yeşillenme ve arazi bozulumu örüntülerini analiz etmiş ve iyileşme eğiliminin büyük ölçüde tarım alanlarında yoğunlaştığını göstermiştir. Meteorolojik, hidrolojik ve yeraltı suyu kuraklığını çoklu indislerle birlikte değerlendiren çalışmalar da havzadaki su stresinin yalnızca yağış değişkenliğiyle açıklanamayacağını göstermektedir (Kartal ve Nones, 2024). Daha yakın tarihli bir araştırmada MODIS tabanlı vejetasyon, yüzey sıcaklığı ve evapotranspirasyon göstergeleri; yağış ve toprak nemi verileriyle birlikte kullanılarak 2001–2024 döneminde tarımsal kuraklık ve kırılganlık mekânsal olarak değerlendirilmiştir (Ghasempour vd., 2025).

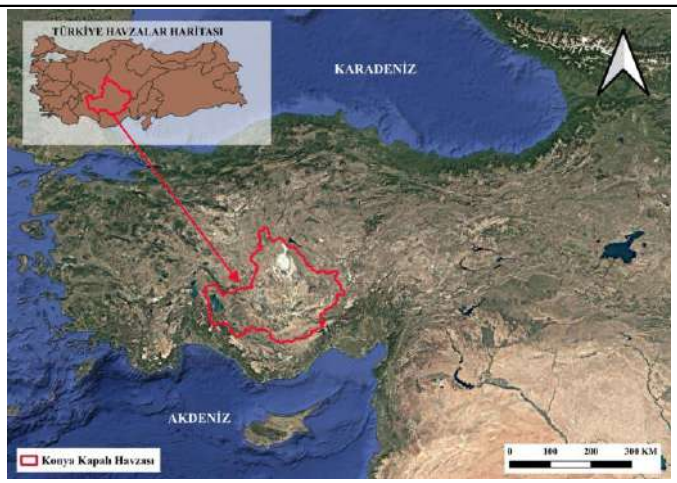
Bu çalışmalar KKH'de uzaktan algılama ve hidro-klimatolojik verilerin güçlü bir araştırma altyapısı oluşturduğunu göstermesine karşın, çalışmaların önemli bir bölümü kuraklık, yüzey sıcaklığı, evapotranspirasyon, sulak alan değişimi veya vejetasyon eğilimi gibi belirli bir süreç üzerinde yoğunlaşmaktadır. Buna karşılık, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) tarafından geliştirilen ERA5-Land kara yüzeyi reanalizi ile MODIS gibi uzun süreli ve birbirini tamamlayan veri kaynaklarının birlikte kullanımı, yüzey enerji dengesi ve karasal ısınma örüntülerinin değerlendirilmesinde farklı bölgelerde etkili sonuçlar vermiştir. ERA5-Land'ın kara yüzeyi sıcaklığı MODIS gözlemleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiş (Muñoz-Sabater vd., 2021); Liu vd. (2021), Atmosferik Kızılötesi Sondajlayıcı (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS), MODIS ve ERA5-Land verileriyle 2003–2017 dönemindeki küresel yüzey sıcaklığı değişimlerini karşılaştırmış; Wang vd. (2022) ise MODIS ve ERA5-Land sıcaklık serilerinin bölgesel ve küresel ısınma eğilimlerini büyük ölçüde tutarlı biçimde temsil ettiğini göstermiştir. Bu örnekler, uydu gözlemleri ile kara yüzeyi reanalizlerinin birlikte kullanımının yüzey süreçlerinin uzun dönemli izlenmesi açısından tamamlayıcı bir çerçeve sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada atmosferik koşullar ve yüzey enerji bileşenleri; 289 cm derinliğe kadar uzanan dört katmanlı toprak sıcaklığı ve nem profili; MODIS tabanlı NDVI, Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (EVI) ve Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (NDWI) göstergeleri 2000–2025 dönemi için aynı analitik çerçevede değerlendirilmiştir. Böylece yalnızca uzun dönemli ısınma ve yeşillenme eğilimleri değil, yüzeydeki yıllık termal dalganın toprak profili boyunca genlik sönümlenmesi ve faz gecikmesi ile yaz döneminde vejetasyon–toprak nemi koşullarının yüzey–hava termal gradyanıyla ilişkisi de birlikte nicel olarak incelenmiştir. Çalışmanın özgün katkısı, hidroklimatolojik eğilim analizini yüzey–derin toprak arasındaki düşey termofiziksel davranış ve uydu tabanlı biyofiziksel göstergelerle bütünleştirerek, Konya Kapalı Havzası'ndaki kara yüzeyi–atmosfer etkileşimlerini yalnızca zamansal eğilimler üzerinden değil, aynı zamanda düşey ısı iletimi ve biyofiziksel termal tamponlama boyutlarıyla birlikte değerlendirmesidir. Bu bütünleşik yaklaşım, atmosfer–yüzey–toprak profili–vejetasyon bileşenleri arasındaki ilişkilerin ortak bir uzun dönem veri çerçevesinde ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Çalışmanın amacı; (i) KKH'nin 26 yıllık karasal klimatolojik rejimini ve uzun dönemli eğilimlerini belirlemek, (ii) yüzeyden derin toprağa doğru termal sinyalin iletimini Çapraz Korelasyon Fonksiyonu (CCF) ve periyodik ısı iletimi yaklaşımıyla çözümlemek ve (iii) yaz döneminde vejetasyon ile toprak neminin birlikte değiştiği koşullarda yüzey–hava termal gradyanındaki farklılaşmayı ortaya koymaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Konya Kapalı Havzası (KKH), Türkiye'nin Orta Anadolu Bölgesi'nde 36°51′–39°29′ kuzey enlemleri ile 31°36′–34°52′ doğu boylamları arasında yer alan endoreik bir havzadır. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) resmî havza tanımlamasına göre yaklaşık 50.000 km² yüzey alanına sahip olan havza; kuzeyde Sakarya ve Kızılırmak, doğuda Kızılırmak ve Seyhan, güneyde Doğu Akdeniz, batıda ise Antalya ve Akarçay havzalarıyla çevrilidir. Resmî envanterde KKH için 16 alt havza ve 234 göl tanımlanmaktadır (SYGM, t.y.). Kapalı drenaj yapısı, geniş tarımsal düzlükleri ve yüzey suyu olanaklarının sınırlılığı, havzanın hidrolojik işleyişinde yeraltı suyunu kritik bir bileşen hâline getirmektedir (Yılmaz vd., 2021; Yoloğlu vd., 2026). KKH'nin çalışma alanı olarak seçilmesinin temel nedeni, iklim, toprak, vejetasyon ve su kullanımı arasındaki etkileşimlerin aynı kapalı sistem içinde belirgin biçimde gözlenebilmesidir.



Şekil 1. Konya Kapalı Havzası'nın Türkiye'deki konumu ve çalışma alanı sınırı.

2.2. Veri Kaynakları

2.2.1. ERA5-Land Reanaliz Veri Seti

ERA5-Land, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) tarafından kara yüzeyi süreçlerini yüksek mekânsal çözünürlükte temsil etmek amacıyla geliştirilen bir reanaliz veri setidir (Muñoz-Sabater vd., 2021). Bu çalışmada 2000–2025 dönemi için 0,1° mekânsal çözünürlükte 2 m hava sıcaklığı (T2m), yüzey sıcaklığı (Tskin), 2 m çiy noktası sıcaklığı (Tdew), yüzey basıncı, kar derinliği, dört katmanlı toprak sıcaklığı ve hacimsel toprak su içeriği ERA5-Land MONTHLY_BY_HOUR koleksiyonunda her ay için günün 24 saatini temsil eden aylık saatlik ortalama rasterlar aritmetik olarak ortalanarak tek bir aylık ortalama raster elde edilmiş; ardından bu rasterlar Konya Kapalı Havzası sınırları içinde alansal olarak ortalanarak her değişken için aylık havza ortalama değerleri hesaplanmıştır. Toplam yağış, toplam buharlaşma ve net güneş radyasyonu ise birikimli değişkenlerin doğru aylık toplamlarını temsil eden MONTHLY_AGGR koleksiyonundaki *_sum bantlarından elde edilmiştir. Sıcaklıklar Kelvin'den °C'ye, yüzey basıncı Pa'dan hPa'ya, yağış m'den mm'ye dönüştürülmüş; ERA5-Land işaret konvansiyonu nedeniyle buharlaşmanın işareti ters çevrilerek mm/ay olarak ifade edilmiştir. Net güneş radyasyonu aylık toplam enerjinin (J/m²) ilgili ayın toplam saniyesine bölünmesiyle W/m²'ye dönüştürülmüştür. Toprak katmanları L1: 0–7 cm, L2: 7–28 cm, L3: 28–100 cm ve L4: 100–289 cm derinliklerini temsil etmektedir.

2.2.2. MODIS Veri Seti

Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektroradyometresi (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) verileri, bitki örtüsü ve yüzey nem koşullarının uzun dönemli değişimini izlemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada üç indeks de Terra/MODIS MOD09A1 V061 8 günlük, 500 m yüzey yansıtma ürününden hesaplanmıştır (Vermote, 2021). Yansıtma bantlarına 0,0001 ölçek katsayısı uygulanmış; kırmızı, yakın kızılötesi, mavi ve kısa dalga kızılötesi spektral yansıma değerlerinden NDVI, EVI ve çalışmada NDWI olarak adlandırılan NIR–SWIR tabanlı indeks türetilmiştir. Her ay içindeki 8 günlük indeks görüntülerinin medyanı alınmış ve ardından havza ortalaması hesaplanmıştır. Kullanılan indeks tanımları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan MODIS tabanlı biyofiziksel indeksler ve formülleri.

Bitki İndeksi Tanımı / Kaynak	İndeks	Formül
Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (Huete vd., 2002; Vermote, 2021)	NDVI	$(\rho2 - \rho1) / (\rho2 + \rho1)$
Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (Huete vd., 2002; Vermote, 2021)	EVI	$2{,}5(\rho2 - \rho1) / (\rho2 + 6\rho1 - 7{,}5\rho3 + 1)$
NIR–SWIR tabanlı Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (Vermote, 2021)	NDWI	$(\rho2 - \rho6) / (\rho2 + \rho6)$

ERA5-Land ve MODIS verileri, SYGM resmî KKH sınırının Google Earth Engine (GEE) ortamına aktarılan varlığı kullanılarak havza ile sınırlandırılmıştır. ERA5-Land için havza ortalaması ee.Reducer.mean() ile yaklaşık 11,1 km örnekleme ölçeğinde, MODIS için 500 m ölçekte hesaplanmıştır. Aylık zaman serilerinin düzenlenmesi, istatistiksel analizler, termofiziksel hesaplamalar ile grafik ve çizelge üretimi Python ortamında yürütülmüştür.

2.3. Analiz Yöntemleri

2.3.1. Klimatolojik Analiz

Klimatolojik analiz kapsamında 2000–2025 dönemine ait aylık zaman serileri kullanılmıştır. Sıcaklık, basınç, radyasyon, toprak nemi, kar ve biyofiziksel indeksler için uzun yıllar aylık ortalamaları aynı takvim ayına karşılık gelen gözlemlerin aritmetik ortalamasıyla hesaplanmıştır. Yağış ve buharlaşma aylık toplam büyüklükler olduğundan, mevsimsel ve yıllık klimatolojide ilgili aylık toplamlar önce yıl bazında toplanmış, daha sonra dönem ortalamaları alınmıştır. Meteorolojik mevsimler Kış (Aralık–Ocak–Şubat), İlkbahar (Mart–Nisan–Mayıs), Yaz (Haziran–Temmuz–Ağustos) ve Sonbahar (Eylül–Ekim–Kasım) olarak tanımlanmıştır. Bir m ayına ait uzun yıllar ortalaması Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır.

$$\bar{x}_{\mathrm{m}} = (1/N)\, \Sigma_{\gamma=1}{}^{\mathrm{N}}\, x_{\gamma,\,\mathrm{m}} \tag{1}$$

Burada $x_{\gamma,m}$, y yılının m ayındaki gözlem değerini; N=26 analiz dönemindeki toplam yıl sayısını; $\bar{x}_m$ ise m ayının 2000–2025 uzun yıllar ortalamasını ifade etmektedir.

2.3.2. Trend Analizi

Uzun dönemli zaman serilerindeki monoton eğilimlerin belirlenmesinde parametrik olmayan Mann-Kendall (MK) trend testi ile eğilim büyüklüğünün tahmininde Sen eğimi (Sen's slope) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Mann (1945) tarafından önerilen ve Kendall (1975) tarafından geliştirilen Mann-Kendall testi, verilerin belirli bir dağılıma uyma koşulu gerektirmemesi ve aykırı değerlere karşı görece dayanıklı olması nedeniyle hidroklimatolojik zaman serilerinin eğilim analizlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hirsch vd., 1982; Hamed ve Rao, 1998). Testin sıfır hipotezi (H_0), zaman serisinde monoton bir eğilim bulunmadığını; alternatif hipotezi (H_1) ise artan veya azalan yönde monoton bir eğilimin bulunduğunu ifade eder.
Mann-Kendall testinde kullanılan S istatistiği, zaman serisindeki gözlem çiftleri arasındaki farkların işaretlerine dayalı olarak tanımlanır:

$$S = \sum_{\mathrm{i}=1}{}^{\mathrm{n}-1} \sum_{\mathrm{j}=\mathrm{i}+1}{}^{\mathrm{n}} sgn(x_{\mathrm{j}} - x_{\mathrm{i}}) \tag{2}$$

Burada x_i ve x_j, sırasıyla i ve j zamanlarındaki gözlemleri; n ise toplam gözlem sayısını göstermektedir. sgn işaret fonksiyonu, iki gözlem arasındaki farkın pozitif, sıfır veya negatif olmasına göre sırasıyla +1, 0 ve −1 değerini alır. Buna göre pozitif S değeri artan, negatif S değeri ise azalan bir eğilime karşılık gelir. Test istatistiğinin anlamlılığı standartlaştırılmış Z değeri ve buna karşılık gelen p değeri üzerinden değerlendirilir. İstatistiksel değerlendirmelerde $p<0,05$ anlamlılık ölçütü esas alınmıştır.
Eğilimin yönünün ve sıralı ilişki gücünün ifade edilmesinde Kendall sıra korelasyon katsayısı (τ) kullanılır. Bunun yanında, eğilimin büyüklüğünün belirlenmesinde Sen (1968) tarafından geliştirilen Sen eğimi tahmincisi kullanılmaktadır. Sen eğimi, zaman serisindeki tüm gözlem çiftleri için elde edilen eğimlerin medyanına dayanır:

$$Q_{\mathrm{ij}} = (x_{\mathrm{j}} - x_{\mathrm{i}}) \,/\, (j - i),\ \ j > i \tag{3}$$

$$\beta = median(Q_{\mathrm{ij}}) \tag{4}$$

Pozitif β değeri artan, negatif β değeri ise azalan bir eğilimi gösterir. Sen eğimi, aykırı gözlemlerden daha az etkilenmesi nedeniyle uzun dönemli çevresel zaman serilerinde eğilim büyüklüğünün belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Sen, 1968).

2.3.3. Düşey Termofiziksel Analiz

Toprak sıcaklığındaki zamansal değişimler, yüzeydeki periyodik sıcaklık zorlamasının toprak profiline iletilmesiyle derinliğe bağlı olarak genlik kaybı ve faz gecikmesi gösterir. Tek boyutlu periyodik ısı iletimi yaklaşımında yüzey sıcaklık sinyalinin genliği derinlikle üstel biçimde azalırken, sıcaklık dalgasının fazı giderek gecikir; bu iki özellik toprak termal difüzivitesinin belirlenmesinde temel göstergeler arasında yer almaktadır (Horton vd., 1983; Gao vd., 2008; Beardsmore vd., 2020).
Farklı sıcaklık serileri arasındaki gecikmeli ilişkinin değerlendirilmesinde Çapraz Korelasyon Fonksiyonu (Cross-Correlation Function, CCF) kullanılabilir. CCF, bir referans zaman serisi ile diğer seri arasındaki korelasyonun farklı zaman kaymalarında nasıl değiştiğini gösterir ve en yüksek korelasyonun elde edildiği gecikme, iki seri arasındaki

baskın zamansal gecikmenin belirlenmesinde kullanılabilir (Box vd., 2015). Referans seri x_t ile karşılaştırılan y_t serisi arasındaki k gecikmesine ait çapraz korelasyon katsayısı genel olarak aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$r_{xy}(k) = \Sigma[(x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})] / \sqrt{\{\Sigma(x_t - \bar{x})^2 \cdot \Sigma(y_{t+k} - \bar{y})^2\}} \quad (5)$$

Periyodik sıcaklık dalgasının genliği literatürde maksimum ve minimum sıcaklık farkının yarısı olarak ifade edilmektedir. Belirli bir z derinliğindeki genliğin yüzey genliğine oranı ise termal dalganın derinlikle sönümlenmesini ifade eden boyutsuz oran olarak kullanılmaktadır (Horton vd., 1983; Gao vd., 2008):

$$D = A(z) / A_0 \quad (6)$$

Periyodik tek boyutlu ısı iletimi yaklaşımında sıcaklık dalgasının genliğinin derinlikte üstel olarak azaldığı kabul edilmekte ve bu ilişki literatürde $A(z) = A_0 \exp(-z/d)$ biçiminde ifade edilmektedir. Buna bağlı olarak sönümlenme derinliği $d = -z/\ln(D)$ bağıntısıyla verilmektedir. Yıllık termal dalganın açısal frekansı $\omega = 2\pi/P$ olmak üzere, etkin termal difüzivite ile sönümlenme derinliği arasındaki ilişki $\alpha = \omega d^2/2$ biçimindedir. Bu yaklaşım, sıcaklık genliğindeki azalma ve faz gecikmesinden yararlanarak sahada görünür ya da etkin termal difüzivitenin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Horton vd., 1983; Beardsmore vd., 2020).

$$d = -z / ln(D) \qquad \alpha = \omega d^2 / 2 \quad (7)$$

2.3.4. Yaz Dönemi Biyofiziksel Tamponlama Analizi

Kara yüzeyi ile atmosfer arasındaki enerji alışverişi, net radyasyonun duyulur ısı, gizli ısı ve toprak ısı akısı bileşenleri arasında paylaşılmasıyla şekillenir. Vejetasyon ve toprak nemi, evapotranspirasyon ve yüzey enerji bölüşümü üzerinde etkili olduğundan yüzey sıcaklığının yakın yüzey hava sıcaklığına göre davranışını da değiştirebilir (Bonan, 2008; Seneviratne vd., 2010). Özellikle suyun yeterli olduğu koşullarda artan evapotranspirasyonun yüzey sıcaklığını düşürücü etkisi, termal uzaktan algılama ve bitki-su stresi çalışmalarının temel fiziksel dayanaklarından biridir (Maes ve Steppe, 2012).

Bu çalışmada yüzey ile 2 m hava sıcaklığı arasındaki termal fark, yaz dönemi biyofiziksel koşullarla ilişkili bir gösterge olarak ele alınmış ve $\Delta T = Tskin - T2m$ şeklinde tanımlanmıştır. Pozitif ΔT değerleri yüzeyin 2 m hava sıcaklığından daha sıcak olduğu koşulları, daha düşük ΔT değerleri ise yüzey-hava termal farkının azaldığı durumları ifade etmektedir.

$$\Delta T = Tskin - T2m \quad (8)$$

NDVI, EVI ve NDWI ile ΔT arasındaki doğrusal ilişkiler Pearson korelasyon katsayısı ve basit doğrusal regresyon ile değerlendirilmiş; korelasyon katsayısının işareti ilişkinin yönünü, R^2 değeri ise doğrusal modelin açıkladığı varyans oranını göstermek üzere raporlanmıştır.

Vejetasyon yoğunluğu ile üst toprak neminin birlikte değiştiği koşullardaki termal farklılaşmayı incelemek amacıyla NDVI ve ERA5-Land L1 toprak nemi dağılımlarının 33. ve 67. yüzdelikleri eşik olarak kullanılmıştır. Alt %33'lük dilim sırasıyla seyrek vejetasyon ve kuru toprak, üst %33'lük dilim ise yoğun vejetasyon ve nemli toprak koşullarını temsil edecek biçimde sınıflandırılmış; orta dilimdeki gözlemler uç koşulların karşılaştırmasına dahil edilmemiştir. Bu sınıflandırmayla seyrek-kuru, seyrek-nemli, yoğun-kuru ve yoğun-nemli olmak üzere dört birleşik grup oluşturulmuştur.

Biyofiziksel termal tamponlama, yoğun vejetasyon koşullarında kuru ve nemli toprak gruplarına ait ortalama ΔT değerleri arasındaki fark üzerinden değerlendirilmiştir:

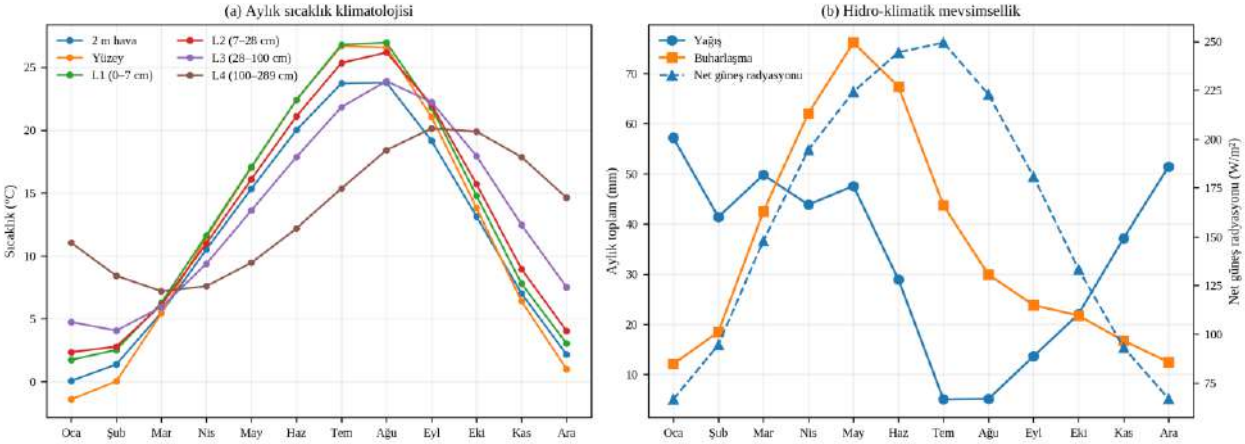
$$B = \Delta T(yoğun + kuru) - \Delta T(yoğun + nemli) \quad (9)$$

Pozitif B değeri, yoğun vejetasyon koşullarında nemli toprak grubunun kuru toprak grubuna göre daha düşük yüzey-hava termal gradyanıyla birlikte gözlendiğini göstermektedir. Gruplar arasındaki farkın istatistiksel değerlendirilmesinde eşit varyans varsayımı gerektirmeyen Welch t-testi (Welch, 1947) ile dağılım varsayımı gerektirmeyen Mann-Whitney U testi (Mann ve Whitney, 1947) birlikte kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Konya Kapalı Havzası'nın Uzun Dönem Klimatolojik Rejimi

2000–2025 döneminde havza genelinde yıllık ortalama T2m 11,82 °C, Tskin 12,55 °C ve net güneş radyasyonu 159,90 W/m² olarak hesaplanmıştır. ERA5-Land verilerine göre yıllık toplam yağış ortalaması 402,81 mm, yıllık toplam buharlaşma ortalaması ise 426,81 mm'dir. Mevsimsel ortalamalarda T2m kışın 1,21 °C'den yazın 22,50 °C'ye, Tskin −0,12 °C'den 25,23 °C'ye yükselirken, L4 sıcaklığı kışın 11,37 °C ve yazın 15,32 °C düzeyinde kalmış; derinlikle mevsimsel sıcaklık salınımı belirgin biçimde daralmıştır. L1 toprak nemi kışın 0,306 m³/m³'ten yazın 0,135 m³/m³'e gerilerken L4 nemi 0,208–0,215 m³/m³ aralığında daha kararlı bir davranış göstermiştir. Yağış Temmuz–Ağustos'ta yaklaşık 5 mm/ay düzeyine inerken, net güneş radyasyonu Temmuz'da en yüksek değerine ulaşmış; buharlaşma ise ilkbahar sonu–yaz başında maksimuma çıkmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Konya Kapalı Havzası için 2000–2025 aylık klimatolojisi: (a) atmosfer, yüzey ve L1–L4 sıcaklıkları; (b) aylık toplam yağış ve buharlaşma ile aylık ortalama net güneş radyasyonu.

3.2. Uzun Dönem Trendleri

3.2.1. Atmosferik ve Toprak Sıcaklığı Trendleri

T2m için on yıllık Sen eğimi +0,782 °C (p<0,001), Tskin için +0,845 °C (p=0,001) ve Tdew için +0,627 °C (p=0,003) olarak hesaplanmıştır. Toprak sıcaklığı trendleri L1'den L4'e sırasıyla +0,627, +0,595, +0,584 ve +0,567 °C/10 yıl olup tüm katmanlarda p<0,001 düzeyinde anlamlıdır (Çizelge 2; Şekil 3). Böylece ısınma sinyali yüzeyde en güçlü olmakla birlikte yaklaşık 3 m derinliğe kadar anlamlılığını korumaktadır.

3.2.2. Hidrolojik Değişkenlerin Trendleri

Yıllık toplam yağışta +4,10 mm/10 yıl (p=0,758) ve toplam buharlaşmada +13,82 mm/10 yıl (p=0,172) yönünde pozitif, ancak istatistiksel olarak anlamlı olmayan eğilimler belirlenmiştir. Net güneş radyasyonu (+0,83 W/m²/10 yıl; p=0,481), L1–L4 toprak nemi ve kar derinliği serilerinde de anlamlı monoton trend yoktur (Çizelge 2).

3.2.3. Biyofiziksel İndeks Trendleri

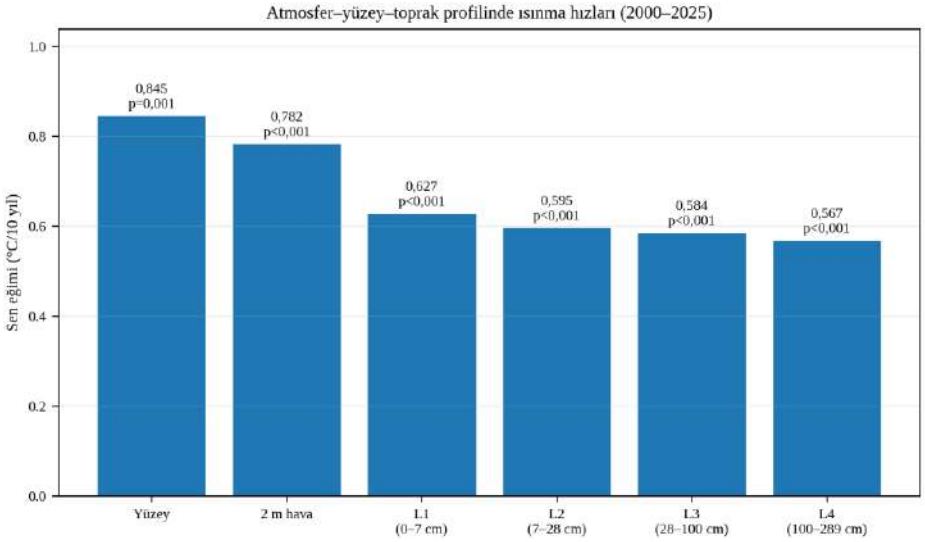
MODIS serisinde NDVI +0,023/10 yıl (p<0,001) ve EVI +0,017/10 yıl (p=0,007) ile anlamlı artış gösterirken, NDWI'de −0,0009/10 yıl düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir eğilim belirlenmiştir (p=0,944). Böylece uzun dönemli değişim, vejetasyon göstergelerinde artış yönünde belirginleşirken NDWI için benzer bir eğilim saptanmamıştır.

Çizelge 2. ERA5-Land ve MODIS yıllık Mann–Kendall ve Sen eğimi sonuçları (2000–2025).

Değişken	MK Z	τ	Sen /10 yıl	%95 GA	p	Anl.
T2m (°C)	3,66	0,514	0,78	0,460–1,020	<0,001	***
Tskin (°C)	3,26	0,458	0,84	0,390–1,237	0,001	**
Tdew (°C)	3,00	0,422	0,63	0,241–1,032	0,003	**
Yüzey basıncı (hPa)	1,85	0,262	0,23	−0,034–0,499	0,064	ns
Net güneş radyasyonu (W/m²)	0,70	0,102	0,83	−1,270–2,709	0,481	ns
Tsoil L1 (°C)	3,31	0,465	0,63	0,358–0,868	<0,001	***
Tsoil L2 (°C)	3,48	0,489	0,59	0,389–0,864	<0,001	***

Değişken	MK Z	τ	Sen /10 yıl	%95 GA	p	Anl.
Tsoil L3 (°C)	3,62	0,508	0,58	0,318–0,889	<0,001	***
Tsoil L4 (°C)	3,31	0,465	0,57	0,280–0,816	<0,001	***
Toprak nemi L1 (m³/m³)	-0,84	-0,120	-0,0027	−0,0090–0,0032	0,402	ns
Toprak nemi L2 (m³/m³)	-1,10	-0,157	-0,0033	−0,0106–0,0032	0,270	ns
Toprak nemi L3 (m³/m³)	-0,22	-0,034	-0,0021	−0,0119–0,0083	0,826	ns
Toprak nemi L4 (m³/m³)	0,35	0,052	0,0007	−0,0031–0,0045	0,724	ns
Kar derinliği (m)	-1,63	-0,231	-0,0035	−0,0101–0,0015	0,103	ns
Yağış (mm)	0,31	0,046	4,10	−25,03–25,06	0,758	ns
Buharlaşma (mm)	1,37	0,194	13,82	−6,22–32,14	0,172	ns
NDVI	3,76	0,540	0,0234	0,0100–0,0359	<0,001	***
EVI	2,69	0,387	0,0172	0,0053–0,0267	0,007	**
NDWI	-0,07	-0,013	-0,0009	−0,0169–0,0178	0,944	ns

Not: *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05; ns: istatistiksel olarak anlamlı değil.

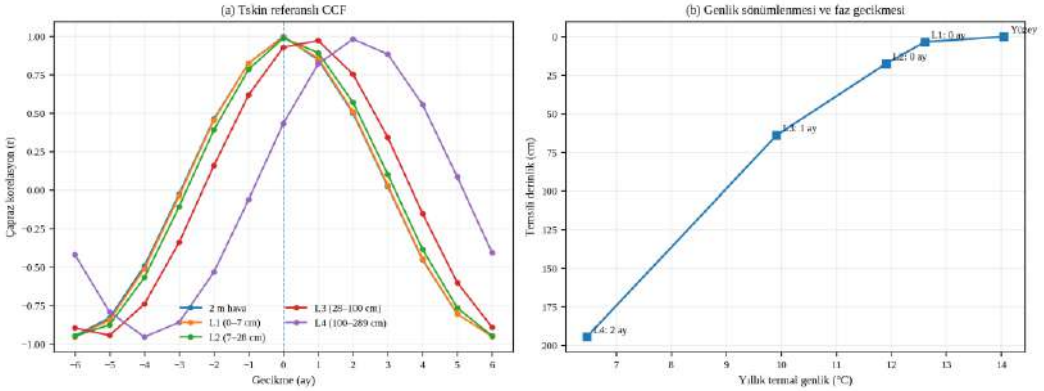


Şekil 3. Atmosfer–yüzey–toprak profilinde Sen eğimiyle belirlenen ısınma hızları. Değerler °C/10 yıl cinsindedir.

3.3. Düşey Termofiziksel Davranış

3.3.1. CCF ve Faz Gecikmesi

CCF analizi, Tskin ile T2m ve sığ toprak katmanlarının güçlü eşzamanlı ilişkisini göstermiştir. T2m için rmax=0,999, L1 için rmax=0,994 ve L2 için rmax=0,989 olup maksimum korelasyon aylık çözünürlükte sıfır gecikmede gerçekleşmiştir. L3'te maksimum korelasyon +1 ayda rmax=0,972'ye, L4'te +2 ayda rmax=0,982'ye ulaşmıştır (Şekil 4; Çizelge 3). Bu sonuçlar, yüzeydeki yıllık termal sinyalin derinlikle belirgin bir faz gecikmesi kazandığını; L4 düzeyinde aylık zaman çözünürlüğünde yaklaşık 61 günlük gecikme ortaya çıktığını göstermektedir.



Şekil 4. Düşey termofiziksel davranış: (a) Tskin referanslı çapraz korelasyon fonksiyonları; (b) yüzeyden L4'e yıllık termal genliğin sönümlenmesi ve CCF tabanlı optimum faz gecikmeleri.

3.3.2. Genlik Sönümlenmesi ve Termal Difüzivite

Termal genlik yüzeyde 14,05 °C iken L1'de 12,61 °C, L2'de 11,91 °C, L3'te 9,91 °C ve L4'te 6,46 °C'ye düşmektedir. Buna göre L4'te yüzey genliğinin yalnızca %46'sı korunmakta, yıllık termal dalganın yaklaşık %54'ü sönümlenmektedir. Etkin sönümlenme derinliği L1'den L4'e 32,4 cm'den 250,4 cm'ye, türetilen etkin/görünür termal difüzivite ise 0,010'dan 0,624 mm²/s'ye yükselmektedir (Çizelge 3). Yıllık maksimum sıcaklık yüzeyde Temmuz, L1–L3'te Ağustos ve L4'te Eylül ayında gerçekleşmektedir. CCF'de L1–L2 için sıfır aylık gecikmeye karşın maksimum ayın Ağustos'a kayması, CCF'nin tüm yıllık döngünün benzerliğini, maksimum ay ölçütünün ise tepe noktasının takvimsel ötelenmesini temsil etmesinden kaynaklanmaktadır.

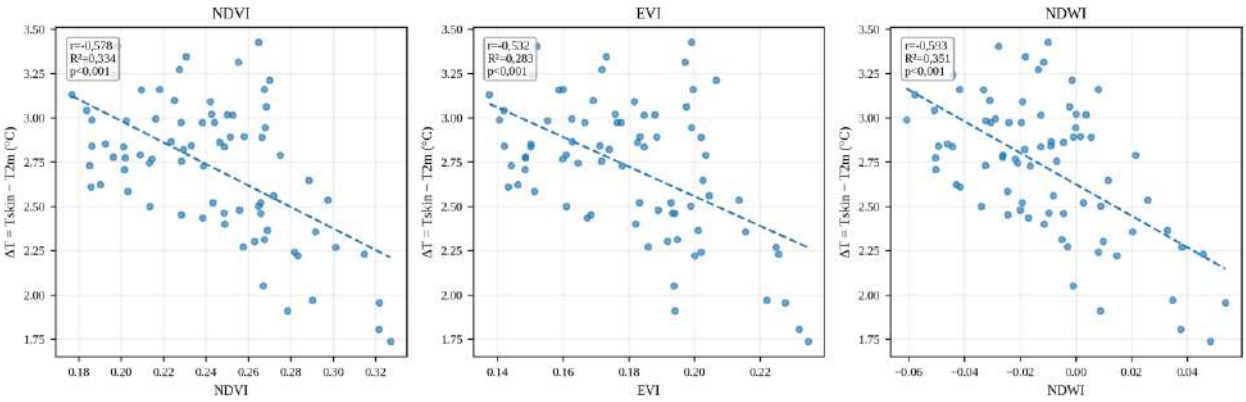
Çizelge 3. Düşey toprak profilinde CCF, faz gecikmesi, genlik sönümlenmesi ve etkin termal difüzivite göstergeleri.

Katman	z (m)	A (°C)	D	Maks. ay	Lag (ay)	rmax	d (cm)	α (mm²/s)
Yüzey (Tskin)	0,000	14,05	1,000	Temmuz	0	–	–	–
L1 (0–7 cm)	0,035	12,61	0,898	Ağustos	0	0,994	32,4	0,010
L2 (7–28 cm)	0,175	11,91	0,848	Ağustos	0	0,989	105,8	0,112
L3 (28–100 cm)	0,640	9,91	0,706	Ağustos	1	0,972	183,5	0,335
L4 (100–289 cm)	1,945	6,46	0,460	Eylül	2	0,982	250,4	0,624

3.4. Yaz Dönemi Biyofiziksel Tamponlama

3.4.1. Biyofiziksel İndeksler ve Termal Gradyan

Haziran–Temmuz–Ağustos dönemindeki 78 aylık havza ortalaması gözlemde ΔT'nin ortalaması 2,73 °C'dir. ΔT ile üç biyofiziksel indeks arasında tutarlı negatif ilişkiler elde edilmiştir: NDVI için r=−0,578 (R^2=0,334), EVI için r=−0,532 (R^2=0,283) ve NDWI için r=−0,593 (R^2=0,351); tüm ilişkiler p<0,001 düzeyinde anlamlıdır (Şekil 5). Bu bulgu, yaz aylarında daha yüksek vejetasyon/nem indeksi değerlerinin daha düşük yüzey–hava termal gradyanıyla birlikte gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5. Yaz döneminde yüzey–hava termal gradyanı (ΔT=Tskin−T2m) ile (a) NDVI, (b) EVI ve (c) NDWI arasındaki ilişkiler (n=78). Kesikli çizgiler doğrusal regresyonu göstermektedir.

3.4.2. Toprak Nemi–Vejetasyon Sinerjisi

Toprak nemi–vejetasyon sınıflaması bu ilişkiyi daha ayrıntılı göstermektedir (Çizelge 4). Yoğun vejetasyon koşullarında kuru toprak sınıfında ortalama ΔT 3,04 °C (n=5), nemli toprak sınıfında 2,26 °C (n=18) olup iki grup arasındaki fark 0,775 °C'dir. Fark hem Welch t-testinde (p=0,0047) hem de Mann–Whitney U testinde (p=0,0017) anlamlıdır. Seyrek vejetasyon koşullarında kuru ve nemli sınıfların ortalama ΔT değerleri sırasıyla 2,94 ve 2,68 °C olarak hesaplanmıştır. Yoğun vejetasyon koşullarında nemli toprak grubunda daha düşük ΔT değerleri belirlenmiş; bu durum, yaz döneminde vejetasyon–toprak nemi birlikteliği ile yüzey–hava termal gradyanı arasında belirgin bir farklılaşma bulunduğunu ortaya koymuştur.

Çizelge 4. Yaz dönemi vejetasyon–L1 toprak nemi sınıflarına göre yüzey–hava termal gradyanı.

Vejetasyon sınıfı	Toprak nemi sınıfı	Ort. ΔT (°C)	Std. sapma	n
Seyrek (alt %33)	Kuru (alt %33)	2,94	0,26	14
Seyrek (alt %33)	Nemli (üst %33)	2,68	0,26	2
Yoğun (üst %33)	Kuru (alt %33)	3,04	0,36	5
Yoğun (üst %33)	Nemli (üst %33)	2,26	0,32	18

4. SONUÇ

Bu çalışma, Konya Kapalı Havzası'nda 2000–2025 dönemine ait ERA5-Land ve MODIS zaman serilerini bütünleşik bir çerçevede değerlendirerek atmosfer, kara yüzeyi, düşey toprak profili ve biyofiziksel göstergelerdeki uzun dönemli değişimi ortaya koymuştur. Havza genelinde yıllık ortalama 2 m hava sıcaklığı 11,82 °C, yüzey sıcaklığı 12,55 °C, yıllık toplam yağış 402,81 mm ve yıllık toplam buharlaşma 426,81 mm olarak belirlenmiştir. Mann–Kendall ve Sen eğimi sonuçları, Tskin (+0,845 °C/10 yıl) ve T2m (+0,782 °C/10 yıl) başta olmak üzere tüm toprak sıcaklığı katmanlarında istatistiksel olarak anlamlı bir ısınma eğilimi bulunduğunu göstermiştir. Toprak sıcaklığı eğimlerinin L1'den L4'e +0,627'den +0,567 °C/10 yıla azalması, ısınma sinyalinin derinlikle zayıflamakla birlikte yaklaşık 3 m derinliğe kadar izlenebildiğini göstermektedir. Buna karşılık yağış, buharlaşma ve toprak nemi serilerinde istatistiksel olarak anlamlı monoton eğilim belirlenmemiş; MODIS serisinde NDVI ve EVI anlamlı artış gösterirken NDWI'de anlamlı bir trend saptanmamıştır.

Düşey termofiziksel analiz, yüzeyde oluşan yıllık sıcaklık dalgasının toprak profili boyunca belirgin bir termal atalet kazandığını nicel olarak ortaya koymuştur. Tskin ile L1 ve L2 arasındaki maksimum korelasyon aylık ölçekte eşzamanlı gerçekleşirken, L3'te bir ay, L4'te iki ay gecikme belirlenmiştir. Yüzeyde 14,05 °C olan yıllık termal genlik L4'te 6,46 °C'ye düşmüş; böylece yüzey termal dalgasının yaklaşık %54'ünün en derin katmana ulaşana kadar sönümlendiği belirlenmiştir. Etkin sönümlenme derinliği ve etkin termal difüzivite göstergelerindeki düzenli derinlik değişimi, KKH toprak profilinin yüzeydeki mevsimsel sıcaklık zorlamasına karşı belirgin bir düşey termofiziksel filtreleme davranışı sergilediğini göstermektedir.

Yaz dönemi biyofiziksel analizleri, yüzey–hava termal gradyanının vejetasyon ve yüzey nem koşullarıyla sistematik biçimde birlikte değiştiğini göstermiştir. ΔT ile NDVI, EVI ve NDWI arasındaki korelasyonların tamamı negatif ve istatistiksel olarak anlamlıdır. Yoğun vejetasyon koşullarında ortalama ΔT, kuru toprak sınıfında 3,04 °C iken nemli toprak sınıfında 2,26 °C olarak belirlenmiş ve 0,775 °C'lik fark hem Welch t-testi hem de Mann–Whitney U testi ile anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç, yaz döneminde vejetasyon ve üst toprak neminin birlikte yüksek olduğu koşullarda yüzey ile yakın atmosfer arasındaki termal farkın daha düşük değerlere ulaştığını nicel olarak ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel özgün katkısı, KKH'de uzun dönemli klimatolojik ve trend analizlerini yüzeyden 289 cm derinliğe uzanan düşey termofiziksel davranış ve MODIS tabanlı biyofiziksel göstergelerle aynı analitik çerçevede birleştirmesidir. ERA5-Land'in çok katmanlı toprak değişkenleri ile MODIS yüzey yansıtma göstergelerinin birlikte kullanılması; atmosfer–yüzey–toprak profili–vejetasyon bağlantılarının yalnızca yatay ve zamansal değişim üzerinden değil, düşey ısı iletimi ve yaz dönemi termal tamponlama boyutlarıyla da değerlendirilmesini sağlamıştır. Elde edilen bulgular, yarı kurak kapalı havzalarda iklimsel ısınmanın toprak profiline aktarımının ve biyofiziksel yüzey koşullarıyla ilişkili termal farklılaşmanın birlikte incelenmesine yönelik bütünleşik ve tekrarlanabilir bir yaklaşım sunmakta; KKH'de kara yüzeyi–atmosfer etkileşimlerinin uzun dönemli izlenmesi için nicel bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

Ateşoğlu, A., 2021. Konya Kapalı Havzası uzun dönem bitki örtüsü indeksi verilerinin izlenmesi ve eğilim analizi. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 36(2): 346–356.

Beardsmore, G., Egan, S. ve Sandiford, M., 2020. A Fourier spectral method to measure the thermal diffusivity of soil. Geotechnical Testing Journal, 43(3): 565–587. https://doi.org/10.1520/GTJ20180300.

Bonan, G.B., 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 320(5882): 1444–1449. https://doi.org/10.1126/science.1155121.

Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. ve Ljung, G.M., 2015. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5. basım, Wiley, Hoboken.

Gao, Z., Lenschow, D.H., Horton, R., Zhou, M., Wang, L. ve Wen, J., 2008. Comparison of two soil temperature algorithms for a bare ground site on the Loess Plateau in China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113: D18105. https://doi.org/10.1029/2008JD010285.

Ghasempour, F., Yamaç, S.S., Sekertekin, A., Iban, M.C. ve Kutoglu, S.H., 2025. Spatiotemporal agricultural drought assessment and mapping its vulnerability in a semi-arid region exhibiting aridification trends. Agriculture, 15(19): 2060.

Gokmen, M., Vekerdy, Z., Verhoef, A., Verhoef, W., Batelaan, O. ve van der Tol, C., 2012. Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. Remote Sensing of Environment, 121: 261–274.

Hamed, K.H. ve Rao, A.R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 204(1–4): 182–196.

Hirsch, R.M., Slack, J.R. ve Smith, R.A., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. Water Resources Research, 18(1): 107–121. https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107.

Horton, R., Wierenga, P.J. ve Nielsen, D.R., 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. Soil Science Society of America Journal, 47(1): 25–32. https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010005x.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. ve Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1–2): 195–213.

Kartal, V. ve Nones, M., 2024. Assessment of meteorological, hydrological and groundwater drought in the Konya closed basin, Türkiye. Environmental Earth Sciences, 83: 285.

Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods. 4. basım, Charles Griffin, London. 202 sayfa.

Liu, J., Hagan, D.F.T. ve Liu, Y., 2021. Global land surface temperature change (2003–2017) and its relationship with climate drivers: AIRS, MODIS, and ERA5-Land based analysis. Remote Sensing, 13(1): 44.

Maes, W.H. ve Steppe, K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: A review. Journal of Experimental Botany, 63(13): 4671–4712. https://doi.org/10.1093/jxb/ers165.

Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3): 245–259.

Mann, H.B. ve Whitney, D.R., 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. The Annals of Mathematical Statistics, 18(1): 50–60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N.J., Zsoter, E., Buontempo, C. ve Thépaut, J.-N., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 13: 4349–4383.

Orhan, O., Dadaser-Celik, F. ve Ekercin, S., 2019. Investigating land surface temperature changes using Landsat-5 data and real-time infrared thermometer measurements at Konya Closed Basin in Turkey. International Journal of Engineering and Geosciences, 4(1): 16–27.

Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324): 1379–1389.

Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B. ve Teuling, A.J., 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 99(3–4): 125–161.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM), t.y. Konya Kapalı Havzası. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=135 [Erişim tarihi: 12.09.2026].

Thakur, J.K., Srivastava, P.K., Singh, S.K. ve Vekerdy, Z., 2012. Ecological monitoring of wetlands in semi-arid region of Konya Closed Basin, Turkey. Regional Environmental Change, 12(1): 133–144.

Vermote, E., 2021. MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m SIN Grid V061 [Veri seti]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.061.

Wang, Y.-R., Hessen, D.O., Samset, B.H. ve Stordal, F., 2022. Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. Remote Sensing of Environment, 280: 113181.

Welch, B.L., 1947. The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. Biometrika, 34(1–2): 28–35. https://doi.org/10.1093/biomet/34.1-2.28.

Yılmaz, G., Çolak, M.A., Özgencil, İ.K., Metin, M., Korkmaz, M., Ertuğrul, S., Soyluer, M., Bucak, T., Tavşanoğlu, Ü.N., Özkan, K., Akyürek, Z., Beklioğlu, M. ve Jeppesen, E., 2021. Decadal changes in size, salinity, waterbirds, and fish in lakes of the Konya Closed Basin, Turkey, associated with climate change and increasing water abstraction for agriculture. Inland Waters, 11(4): 538–555.

Yoloğlu, O.C., Çetinkaya, İ.D. ve Copty, N.K., 2026. Groundwater sustainability for irrigation in the semi-arid Konya Closed Basin, Türkiye, under climate change scenarios. Hydrogeology Journal, 34: 1563–1580.

ORMANLIK ALANLARDA FARKLI LİDAR ALGILAYICILARININ KARŞILAŞTIRILMASI; ANTALYA/TAŞAĞIL ÖRNEĞİ

Göktuğ Yaşar Çukurlu[1], Furkan Veziro[2], Namık Kemal Sönmez[3], Nusret Demir[4]*

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, 07058, Antalya, goktugcukurlu0@gmail.com
[2]Yüksek Lisans Öğrencisi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, 07058, Antalya, furkanveziro@gmail.com
[3]Prof.Dr., Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, 07058, Antalya, nksonmez@akdeniz.edu.tr
[4]Doç.Dr., Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, 07058, Antalya, nusretdemir@akdeniz.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Antalya ili Taşağıl bölgesindeki ormanlık bir alanda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, İnsansız Hava Aracı (İHA) LiDAR'ı, gezici el LiDAR'ı (HMLS) ve uydu tabanlı LiDAR (GEDI) sistemlerinden elde edilen verilerle ormanlık alanlarda hesaplanan ağaç yükseklikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma alanında 2024–2025 yılları arasında farklı zamanlarda toplanan İHA LiDAR verileri, İteratif En Yakın Nokta (ICP) yöntemiyle birleştirilmiş ve CSF algoritmasıyla sınıflandırılarak yüksek çözünürlüklü bir Sayısal Arazi Modeli (SAM/DTM) üretilmiştir. Bu işlemlerin ardından Antalya/Taşağıl bölgesi için GEDI LiDAR verisi temin edilmiş ve yüksek çözünürlüklü İHA LiDAR verisiyle ilişkisi incelenmiştir. Yapılan analizde yaklaşık -0,6 düzeyinde (negatif yönde) bir korelasyon gözlenmiştir. Bu değerin, Antalya/Taşağıl bölgesinin eğimli topoğrafyası ve seyrek vejetasyon yapısından kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Bu çıkarımı test etmek amacıyla, 2025 yılında Muğla ili Fethiye ilçesindeki Kadyanda Antik Kenti çevresinde toplanan İHA LiDAR verileri kullanılmıştır. Bu bölge, Antalya/Taşağıl'a kıyasla daha düşük eğimli bir arazi yapısına ve daha yoğun ormanlık örtüye sahiptir. Kadyanda bölgesine ait GEDI LiDAR verileriyle aynı analizler tekrarlandığında yaklaşık 0,90 düzeyinde bir korelasyon elde edilmiştir. Bu bulgular, GEDI LiDAR verilerinin düşük eğimli ve sık ormanlık alanlarda daha başarılı sonuçlar verdiğini ve uygun koşullar altında güvenilir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, 2025 yılı Kasım ayında gerçekleştirilen saha ziyaretinde İHA LiDAR'ın yanı sıra gezici el LiDAR'ı ile taramalar yapılmış ve elde edilen veriler İHA LiDAR verisiyle karşılaştırılmıştır. Daha geniş tarama alanına sahip İHA LiDAR verisi, gezici el LiDAR'ı ile taranan alanın sınırlarına göre kırpıldıktan sonra yapılan korelasyon analizinde iki veri seti arasında %98 uyum tespit edilmiştir

Anahtar Sözcükler: GEDI LiDAR, İHA LiDAR, Kanopi Yükseklik Modeli, Nokta Bulutu, Orman Envanteri

ABSTRACT

COMPARING DIFFERENT LiDAR SENSORS in FOREST AREAS: A CASE STUDY of ANTALYA/TASAGIL

This study was conducted in a forested area in the Taşağıl region of Antalya province. Tree heights calculated from forested areas using data acquired by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) LiDAR, handheld mobile LiDAR (HMLS), and satellite-based LiDAR (GEDI) systems were compared. UAV LiDAR data collected at different times between 2024 and 2025 in the study area were co-registered using the Iterative Closest Point (ICP) method and classified using the CSF algorithm to produce a high-resolution Digital Terrain Model (DTM). Following these procedures, GEDI LiDAR data for the Antalya/Taşağıl region were obtained, and their relationship with the high-resolution UAV LiDAR data was examined. This analysis revealed a correlation of approximately −0.7. This value was considered to potentially stem from the steep topography and sparse vegetation structure characteristic of the Antalya/Taşağıl region. To test this inference, UAV LiDAR data collected in 2025 around the Kadyanda Ancient City in the Fethiye district of Muğla province were used. Compared to Antalya/Taşağıl, this region has a lower-slope terrain structure and denser forest cover. When the same analyses were repeated using GEDI LiDAR data for the Kadyanda region, a correlation of approximately 0.90 was obtained. These findings indicate that GEDI LiDAR data perform better in low-slope, densely forested areas, and can be reliably used under such conditions. Additionally, during a field visit conducted in November 2025, scans obtained using handheld mobile LiDAR alongside UAV LiDAR were compared with the UAV LiDAR data. After clipping the UAV LiDAR data—which covered a wider scanning area—to the boundaries of the area scanned by the handheld mobile LiDAR, the correlation analysis showed 98% agreement between the two datasets.

Keywords: Canopy Height Model, Forest Inventory, GEDI LiDAR, Point Cloud, UAV LiDAR

1. GİRİŞ

Orman ekosistemleri; hammadde tedarikinin yanı sıra karbon depolama, biyolojik çeşitliliğin korunması, besin döngüsü ile su ve enerji dengesinin sürdürülmesi gibi çok yönlü ekosistem hizmetleriyle insan refahına doğrudan katkı sağlamaktadır (Lee vd., 2010). Küresel iklim ve karbon döngüsünün dengelenmesinde en kritik doğal kaynakların başında orman alanları gelmektedir (Kayet, 2021). Bu ekosistemleri karakterize eden üç boyutlu yapının, kanopi parametrelerinin ve toprak üstü biyokütle yoğunluğunun hassas, doğru ve güncel biçimde belirlenmesi; ekolojik

süreçleri anlamak, ormancılık uygulamalarını optimize etmek ve iklim değişikliğiyle mücadelede sürdürülebilir yönetim politikaları geliştirmek açısından temel bir gerekliliktir (García vd., 2018; Kaushal ve Baishya, 2021).

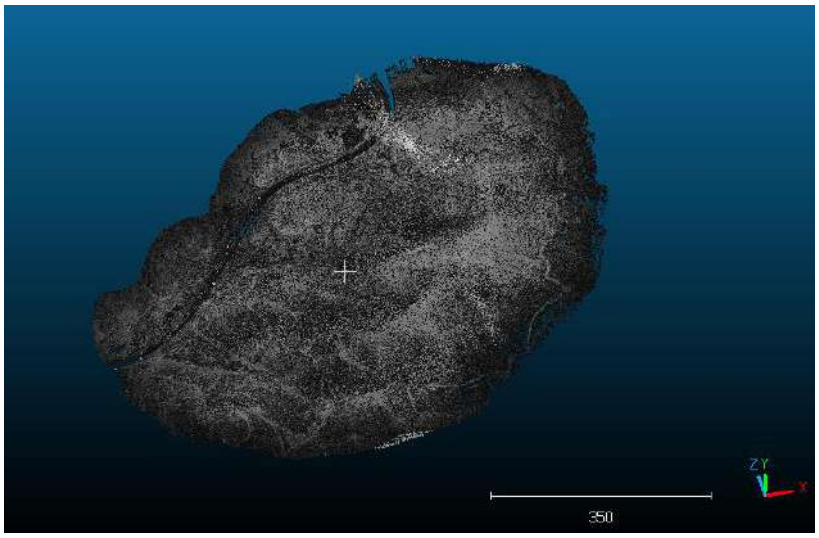
Buna karşın geleneksel orman envanteri yöntemleri; yüksek maliyet, yoğun iş gücü ve uzun arazi süreçleri gerektiren operasyonlardır (Eraslan, 1982; Kalıpsız, 1984). Bu operasyonel kısıtlar sebebiyle envanter çalışmalarında uzaktan algılama teknikleri yaygın biçimde tercih edilmektedir (Asan, 2017; Ganivet ve Bloomberg, 2019; Ozkan vd., 2022). Bu doğrultuda, aktif uzaktan algılama teknolojilerinden biri olan LiDAR (Light Detection and Ranging), meşcere yapısının üç boyutlu morfolojisini geniş alanlar genelinde yüksek doğrulukla ortaya koymada kayda değer avantajlar sunmaktadır (Hermosilla vd., 2014).

Gelişen lazer tarama sistemleri, ormancılık araştırmalarında giderek daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Vatandaşlar vd., 2022). Günümüzde LiDAR sistemleri; İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı havadan lazer tarama, yersel (mobil) lazer tarama ve uzay konuşlu küresel platformlar (GEDI) olmak üzere farklı uzamsal ölçeklerde araştırma olanağı tanır. İHA-LiDAR sistemleri, özellikle sık örtülü meşcerelerde lazer darbelerinin tepe çatısından alt tabakalara yeterince nüfuz edememesi ve zemin/gövde seviyesindeki nokta sıklığının azalması sebebiyle ayrıntılı envanter parametrelerinin çıkarılmasında tek başına yetersiz kalabilmektedir. Ağaç gövdeleri arasında hareket edebilen ve farklı bakı açılarından veri toplayabilen mobil/yersel LiDAR sistemleri ise kanopi altı bileşenlerin hassas haritalanmasında yüksek performans sergilemektedir (Gollob vd., 2020; Vatandaşlar ve Zeybek, 2020; 2021). Öte yandan uzay tabanlı LiDAR sistemleri, bölgesel ve küresel ölçekli analizler için geniş alanlarda kanopi yüksekliği verisi üretme kapasitesine sahiptir (Çukurlu vd., 2025). Bu doğrultuda, farklı platformlardan sağlanan LiDAR verilerinin entegrasyonu ve ölçekler arası kalibrasyonu, geniş coğrafyalarda üretilecek modellerin güvenilirliğini artırmak adına önemli bir potansiyel taşımaktadır.

İHA-LiDAR platformları yerel ölçekte yüksek tepe çatısı detayları sunarken, yersel LiDAR sensörleri gövde düzeyinde referans doğrulukta veriler sağlamakta; uzay konuşlu GEDI verileri ise geniş ölçekli biyokütle kestirimlerine zemin hazırlamaktadır. Bu çalışmanın temel amacı; İHA-LiDAR, yersel mobil LiDAR ve GEDI LiDAR verilerini karşılaştırarak, meşcere parametrelerinin belirlenmesindeki performanslarını ve platformlar arası uyumu değerlendirmektir. Bu doğrultuda Antalya/Taşağıl bölgesinde 2024 ve 2025 yıllarının farklı periyotlarında İHA-LiDAR uçuşları gerçekleştirilerek orman yapısı haritalanmıştır. Sensörler arası kalibrasyon sürecinde, sahadan elde edilen İHA ve yersel LiDAR verileri ortak bir uzamsal çözünürlüğe indirgenmiş; platformlar arasındaki nokta yoğunluğu farklılıklarını gidermek amacıyla her iki veri kümesi de raster formata dönüştürülmüştür. Eş zamanlı olarak aynı saha için temin edilen GEDI LiDAR verileri üzerinden kanopi yapısı çıkarılmış ve platformlar arasındaki korelasyon analiz edilmiştir.

2. YÖNTEM

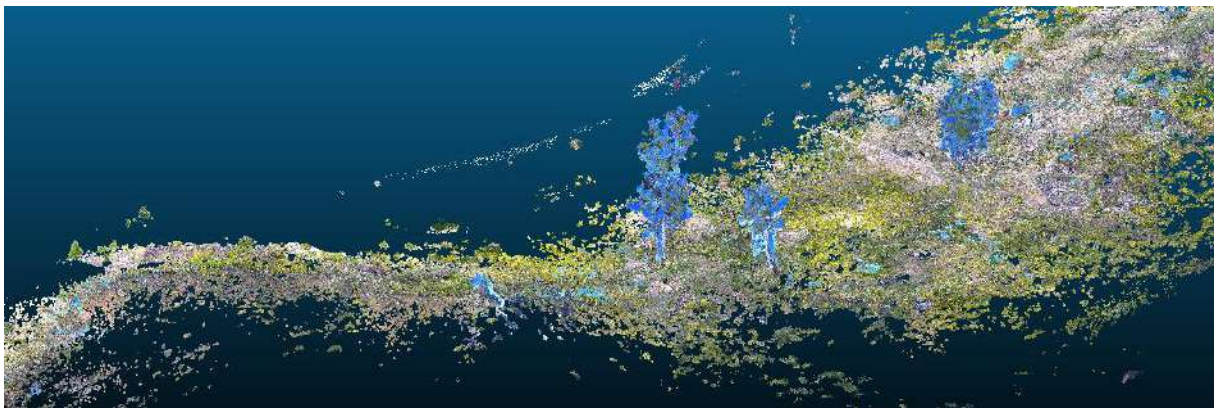
Çalışma kapsamında temin edilen ham İHA LiDAR'ı verilerinin ön işleme çalışması iki adımda gerçekleşmiştir. İlk olarak POSPacUAV 8.4 yazılımı kullanılarak LiDAR verilerinin geometrik düzeltme işlemleri yapılmıştır. Bu kapsamda LiDAR cihazından alınan trajectory verisi temel veri olarak kullanılmıştır. Bu adımda farklı tarihlerde alınan LiDAR verilerin geometrik doğruluğu için, ilgili zaman dilimindeki Alıcı Bağımsız Değişim Biçimi (RINEX-Receiver Independent Exchange Format) dosyaları olarak Aksu base station verileri kullanılmıştır. Bu adım sonrası elde edilen verinin hassasiyet kontrolü kapsamında konum doğruluğu ile PDOP ve baseline kontrolleri gerçekleşmiştir. İkinci adımda ise LiDAR verilerinden nokta bulutu verisi üretilmiştir. Bu kapsamda StarSolve_v1.1.7 yazılımı ile önceki işlem adımında üretilen trajectory dosyası kullanılarak ham LiDAR verileri işlenmiştir. LiDAR verisi işleme çalışmaları ise gürültü giderme, filtreleme, kanopi modelleme ve ağaç tespiti adımlarından oluşmaktadır. LiDAR verileri, proje kapsamında birden fazla tekrarlı olarak toplanmış ve daha sonra nokta yoğunluğunun arttırılması için birbirleriyle bütünleştirilmiştir. Bütünleştirme işlemi için iteratif en yakın nokta (Iterative Closest Point - ICP) yöntemi kullanılmıştır. Bunun için açık kaynaklı Cloud Compare yazılımı kullanılmıştır.



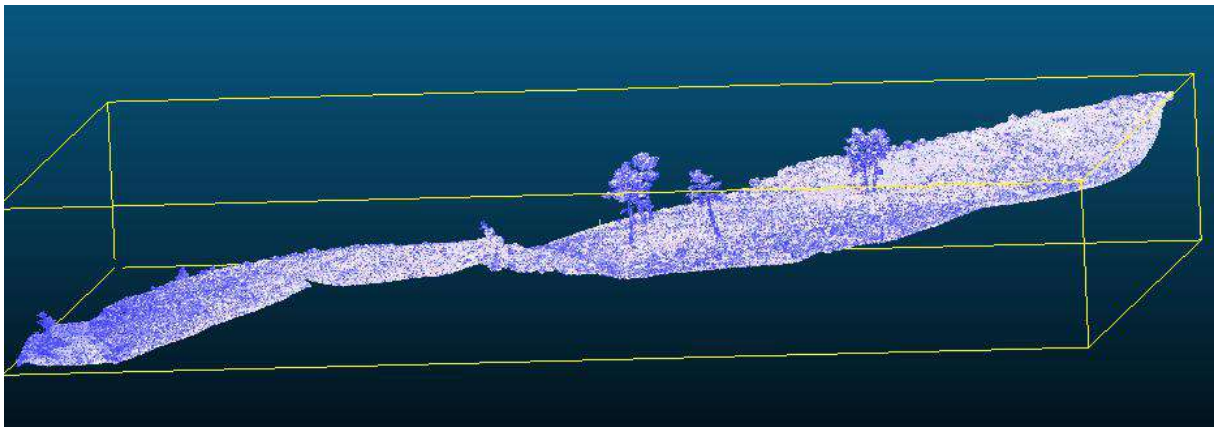
Şekil 1. Çalışma alanına ait bütünleştirilmiş nokta bulutu

Şekil 1'de gösterilen bütünleştirilmiş nokta bulutu, R programlama dili içerisinde bulunan ''lidR'' kütüphanesi ile işlenmiştir. Burada birleştirilen veriler CSF (Cloth Simulation Filtering) yöntemi ile Toprak-Toprak üstü olarak ayrılmıştır. Bu işlemden sonra üçgenleme yöntemi ile SAM (Sayısal Arazi Modeli, DTM) oluşturulmuştur. Yüksek çözünürlüklü LiDAR verileri ile analizler tamamlandıktan sonra Antalya/Taşağıl bölgesi için GEDI LiDAR ile yüksek çözünürlüklü LiDAR verisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişkinin incelenmesi amacıyla NASA'nın sunduğu EarthDataSearch servisi üzerinden Antalya/Taşağıl bölgesi için GEDI LiDAR L2A (Yükseklik) verisi indirilmiştir. Veri sıklığının düşük olması sebebiyle analizlere 2021-2022-2024 yıllarının verileri dahil edilmiştir. Bu veriler 25 m'lik bir çapa sahip olduğundan GEDI verilerinin nokta bulutu üzerine düştüğü kısımlara 25 m çaplı bir silindir oturtulmuş ve bu silindirin içindeki ortalama yükseklik ile GEDI LiDAR yükseklik değerleri karşılaştırılmıştır.

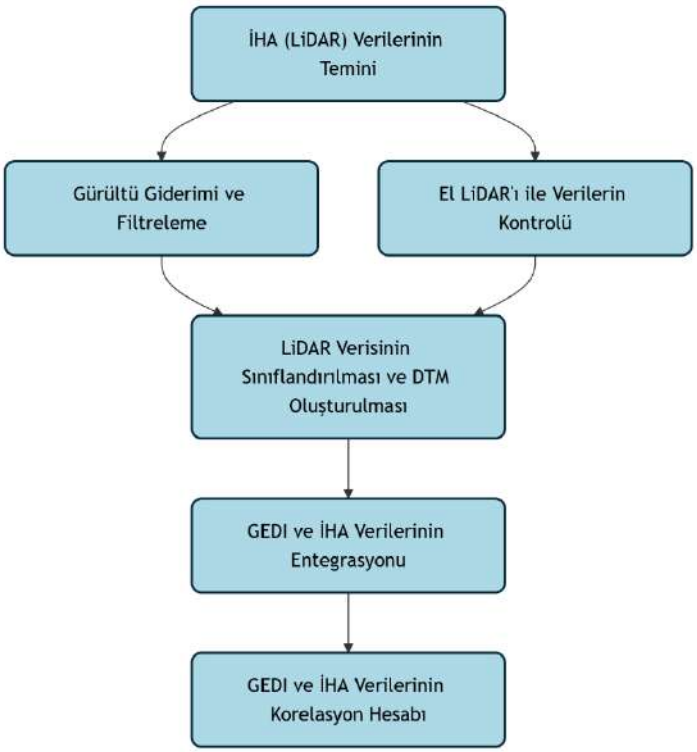
Kasım 2025'te yapılan saha ziyaretinde alan aynı zamanda gezici LiDAR (HMLS) sensörüyle de taranmıştır. Sabit bir platform yardımıyla insan üzerinde taşınan bu sensör ile arazi üzerinde gezilmiş ve yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verisi tekrar toparlanmıştır. Bu şekilde toplanan veriler ALS ile korele edilmiştir. Burada ALS (Havadan Lazer Tarama, Airborne Laser Scanning) tarafından daha geniş taranan alanın ne kadar doğru olduğunu anlamak amacı ile HMLS verisi referans olarak kullanılmıştır. ALS verisi, HMLS (El Tipi Mobil Lazer Tarama, Handheld Mobile Laser Scanning) verisine göre daha geniş bir alanı kapsadığından, HMLS verisinin sınırları kullanılarak ALS verisi kırpılmıştır (Şekil 2, Şekil 3). Elde edilen iki verinin nokta yoğunlukları eşit olmadığı için her iki veriden de 0,5 m çözünürlükte gridler geçirilerek korelasyon hesabı yapılmıştır.



Şekil 2. Toplanan El LiDAR'ı (HMLS) verisi



Şekil 3. Kırpılmış ALS verisi

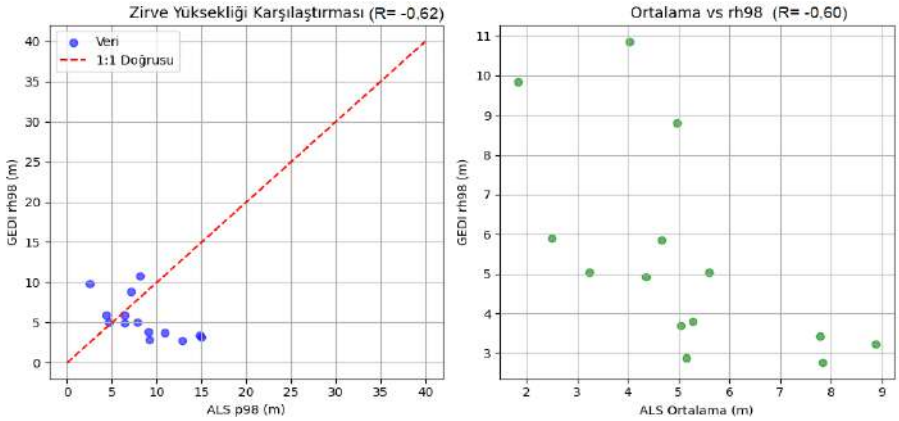


Şekil 4. İş Akış Diyagramı

Şekil 4 içerisinde verilen iş akış diyagramı takip edilerek farklı LiDAR algılayıcılarının korelasyonları incelenmiştir. Antalya/Taşağıl ve Muğla/Kadyanda bölgesine ait veriler saha ziyareti yaparak toplandıktan sonra, veriler üzerindeki gürültüler (Elektrik teli, kuşlar vb.) giderilmiştir. Hava LiDAR'ı ve El LiDAR'ının korelasyonunun hesaplanabilmesi adına her iki veride aynı alana ve aynı çözünürlüğe (raster formatında) getirilmiştir. Bu adımdan sonra bütün LiDAR verileri (GEDI, Hava ve El) korelasyona sokulmuştur.

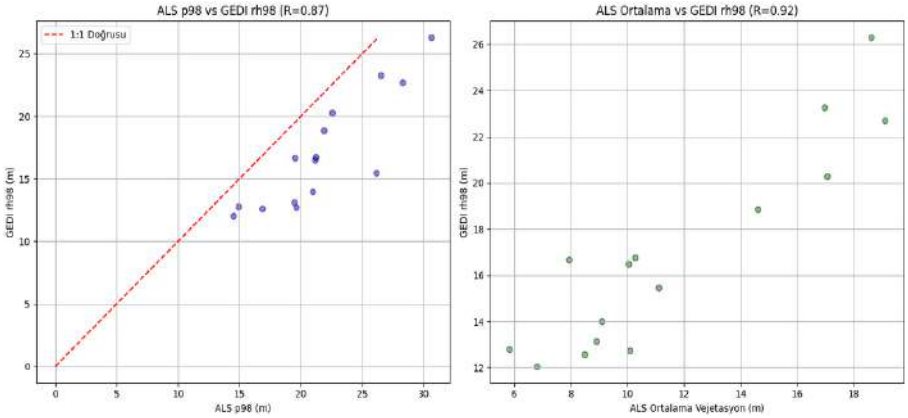
3. BULGULAR

Antalya/Taşağıl bölgesi için GEDI LiDAR ile yüksek çözünürlüklü LiDAR verisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda yaklaşık olarak (-0.60) korelasyon değeri gözlemlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Taşağıl bölgesi ile GEDI LiDAR korelasyonu

Yapılan detaylı incelemeler sonucunda elde edilen düşük korelasyona Antalya/Taşağıl bölgesinin oldukça eğimli ve seyrek vejetasyon yapısına sahip olmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bu düşünceyi test etmek amacı ile GEDI LiDAR verilerinde anormal yükseklik farklılıklarını temizlemek için 5 metre ve 10 metre eşik değeri ile ayrı ayrı filtrelenmiş ve geriye sadece 1 noktanın kaldığı görülmüştür. Bu görüşün desteklenmesi amacı ile daha önce Muğla Fethiye bölgesinde 2025 yılında Kadyanda Antik Kenti alanı için toplanan İHA LiDAR verileri test için kullanılmıştır. Bu verinin Antalya/Taşağıl verisine göre farkı, daha düşük eğimli bir araziye ve daha yoğun ormanlık alana sahip olmasıdır. Muğla Kadyanda bölgesinde olan GEDI LiDAR verileri ile aynı analiz tekrarlandığında yaklaşık 0.90 korelasyon değeri görülmüştür (Şekil 6). Bu bulgular doğrultusunda GEDI LiDAR verilerinin az eğimli ve sık ormanlık alanlarda başarılı olduğu ve bu sayede GEDI LiDAR verisinin gerekli şartlar altında kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.



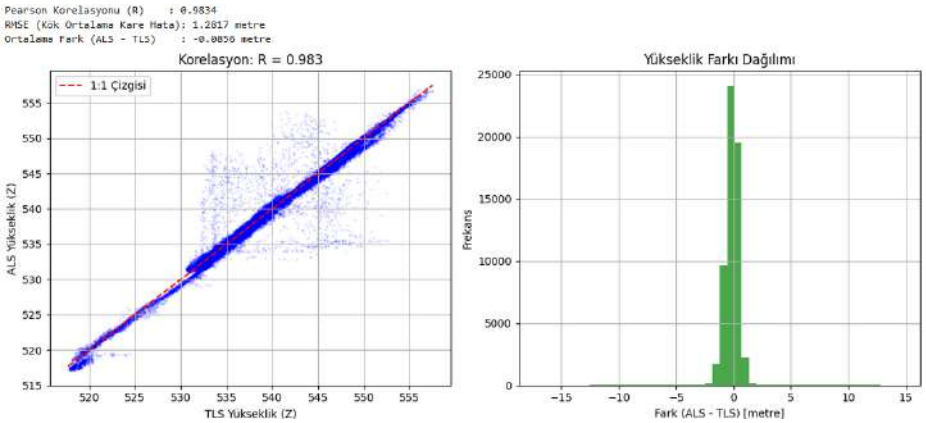
Şekil 6. Muğla, Kadyanda bölgesi ile GEDI LiDAR korelasyonu

Elde edilen korelasyon sonucunda, her bir GEDI LiDAR verisi için İHA LiDAR verilerinde oluşturulan 25 m çaplı alanın ortalama değeri Çizelge 1'e aktarılmıştır.

Çizelge 1. GEDI LiDAR ile İHA LiDAR değerleri (Muğla/Kadyanda)

GEDI Veri Sırası	GEDI RH98	ALS RH98	ALS MAKS
1	22.5m	28.3m	30m
2	23.2m	26.5m	28.7m
3	14m	20m	23.5m
4	12.5m	16.8m	23.5m
5	16.6m	19.5m	20.2m

Kasım ayındaki saha çalışmalarında elde edilen ALS ve HMLS verilerinin korelasyonu Python ortamında hesaplanmıştır (Şekil 7). Elde edilen sonuçlara göre ALS ve HMLS verisi arasında %98 uyum olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda iki veri arasındaki ortalama fark ise (-0.08m) olarak belirlenmiştir. Bu bakımdan İHA LiDAR verisinin arazinin düşük bitki yoğunluğundan dolayı, gezici LiDAR ile yüksek uyumlulukta veri toplayabildiği değerlendirilmiştir.



Şekil 7. ALS ve HMLS (el tipi mobil LiDAR) korelasyon analizi

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, farklı ölçeklerdeki LiDAR platformlarının (uydu, hava, yer) entegre kullanımının orman yapısının çok ölçekli ve doğrulanabilir biçimde izlenmesine olanak sağladığını, ancak GEDI gibi uydu tabanlı sistemlerin performansının arazi eğimi ve vejetasyon yoğunluğu gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Bu bulgular, gelecekte yürütülecek büyük ölçekli biyokütle ve karbon stoğu tahmini çalışmalarında, GEDI verilerinin kullanım koşullarının bölgesel arazi karakteristiklerine göre önceden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123Y274 numaralı proje kapsamında desteklenmiş ve finanse edilmiş olup, COST Action CA20118'in koordinasyonu ve desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Asan, Ü., 2017. Orman Amenajmanı (Planlama Sistemleri). İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul. 434 sayfa.

Çukurlu, G.Y., Veziro, F., Demir, N. ve Stovall, A., 2025. Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Orman Yangını Şiddeti ve Toprak Üstü Biyokütle Yoğunluğu Değişimlerinin İncelenmesi: Mersin/Pembecik Örneği. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB) XIII. Teknik Sempozyumu Genişletilmiş Özet & Tam Metin Bildirileri, Zonguldak, syf: 68.

Eraslan, İ., 1982. Orman Amenajmanı. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, No: 3010/318, İstanbul.

Ganivet, E. ve Bloomberg, M., 2019. Towards Rapid Assessments of Tree Species Diversity and Structure in Fragmented Tropical Forests: A Review of Perspectives Offered by Remotely-Sensed and Field-Based Data. Forest Ecology and Management, 432: 40-53.

García, M., Saatchi, S., Ustin, S. ve Balzter, H., 2018. Modelling Forest Canopy Height by Integrating Airborne LiDAR Samples with Satellite Radar and Multispectral Imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 66: 159-173.

Gollob, C., Ritter, T. ve Nothdurft, A., 2020. Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. Remote Sensing, 12(9): 1509.

Hermosilla, T., Ruiz, L.A., Kazakova, A.N., Coops, N.C. ve Moskal, L.M., 2014. Estimation of Forest Structure and Canopy Fuel Parameters from Small-Footprint Full-Waveform LiDAR Data. International Journal of Wildland Fire, 23(2): 224-233.

Kalıpsız, A., 1984. Dendrometri. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, No: 3194/354, İstanbul.

Kaushal, S. ve Baishya, R., 2021. Stand Structure and Species Diversity Regulate Biomass Carbon Stock under Major Central Himalayan Forest Types of India. Ecological Processes, 10(1): 28.

Kayet, N., 2021. Forest Fire Risk Assessment for Effective Geoenvironmental Planning and Management using Geospatial Techniques. Shit, P.K., Pourghasemi, H.R., Das, P., Bhunia, G.S. (Ed.), Spatial Modeling in Forest Resources Management: Rural Livelihood and Sustainable Development, Springer, Cham.

Lee, H., Slatton, K.C., Roth, B.E. ve Cropper, W.P., 2010. Adaptive Clustering of Airborne LiDAR Data to Segment Individual Tree Crowns in Managed Pine Forests. International Journal of Remote Sensing, 31(1): 45-64.

Ozkan, U.Y., Demirel, T., Ozdemir, I., Saglam, S. ve Mert, A., 2022. Predicting Forest Stand Attributes Using the Integration of Airborne Laser Scanning and Worldview-3 Data in a Mixed Forest in Turkey. Advances in Space Research, 69(2): 1146-1158.

Vatandaşlar, C. ve Zeybek, M., 2020. Application of Handheld Laser Scanning Technology for Forest Inventory Purposes in the NE Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 44(3): 229-242.

Vatandaşlar, C. ve Zeybek, M., 2021. Extraction of Forest Inventory Parameters Using Handheld Mobile Laser Scanning: A Case Study from Trabzon, Turkey. Measurement, 177: 109328.

Vatandaşlar, C., Zeybek, M., Çankaya, E.Ç., Demiraslan, T., Şahin, C., Gündüz, Y., Korkmaz, Ü. ve Avcı, M.L., 2022. El Tipi Mobil LiDAR Teknolojisinin Orman Envanterlerinde Kullanımı: Artvin-Şavşat Örneği. Ormancılık Araştırma Dergisi, 9(1): 81-96.

ASTER VE LANDSAT UYDU GÖRÜNTÜLERİ İLE CROSTA VE PCA TEKNİKLERİ KULLANILARAK ZEOLİTLEŞME ALANLARININ GEE PLATFORMUNDA BELİRLENMESİ: DEMİRCİ AKDERE ÖRNEĞİ

Elif EVCİN[1], Rabia ÇAKAR[2], Gülsüm UÇUM[3], Erhan ŞENER[4], Osman Salih YILMAZ[5]

[1]Demirci Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama, Manisa Celal Bayar Üniversitesi
[2]Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi, Süleyman Demirel Üniversitesi

ÖZET

Bu çalışma, jeoloji ve uzaktan algılama disiplinlerini bir araya getirerek zeolitleşme potansiyeli taşıyan alanların belirlenmesini hedeflemektedir. Zeolit mineralleri, hidrotermal süreçlerle ilişkili olarak gelişen ve özellikle kil, hidroksil ile demir oksit mineralleri açısından zengin alterasyon zonlarında görülen önemli endüstriyel hammaddelerdir. Çalışmada, ASTER ve Landsat-9 (OLI-2) verileri hibrit biçimde birleştirilmiş ve Crosta tekniği uygulanarak zeolitleşme potansiyeli taşıyan alanlar belirlenmiştir. Daha sonra bant oranlama ve Temel Bileşenler Analizi (PCA) kullanılarak hidroksil ve demir oksit alterasyonları belirlenmiştir. PCA sonuçları, hidroksil ve demir oksit varlığını en iyi temsil eden bileşenlerin seçilmesine olanak tanımış ve bu bileşenler kullanılarak Crosta bileşimi oluşturulmuştur. Zeolitleşme alanlarının tespiti için ise adaptif yüzdelik eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen Crosta görüntülerinde hidroksilce zengin alanlar kırmızı tonlarda, demir oksitçe zengin alanlar ise mavi tonlarda temsil edilmiş; hidroksil anomalilerinin Akdere Tüfü ile ilişkili volkanik seviyelerde yoğunlaştığı ve arazi gözlemleriyle büyük ölçüde mekânsal uyum gösterdiği belirlenmiştir. Adaptif eşikleme sonucunda potansiyel zeolitleşme alanlarının toplam yüzölçümü 594.865 m² (0,595 km²) olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, ASTER ve Landsat görüntüleri ile Crosta Tekniği'nin birlikte kullanımının, zeolitleşme araştırmaları için hızlı, tekrarlanabilir ve maliyet etkin bir ön değerlendirme aracı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: ASTER, Crosta tekniği, Google Earth Engine, Landsat-9, PCA, zeolit

ABSTRACT

DETERMINATION OF ZEOLITIZATION AREAS USING ASTER AND LANDSAT SATELLITE IMAGERY WITH CROSTA AND PCA TECHNIQUES ON THE GEE PLATFORM: THE DEMİRCİ–AKDERE CASE STUDY

This study aims to identify areas with zeolitization potential by combining the disciplines of geology and remote sensing. Zeolite minerals are important industrial raw materials that develop in association with hydrothermal processes and are particularly found in alteration zones rich in clay, hydroxyl, and iron oxide minerals. In this study, ASTER and Landsat-9 (OLI-2) data were combined in a hybrid format, and areas with zeolitization potential were determined using the Crosta technique. Subsequently, hydroxyl and iron oxide alterations were determined using band ratioing and Principal Component Analysis (PCA). PCA results allowed the selection of components that best represent the presence of hydroxyl and iron oxide, and Crosta compositions were created using these components. Adaptive percentage thresholding was used to detect zeolitization areas. In the obtained Crosta images, hydroxyl-rich areas are represented in red tones, and iron oxide-rich areas are represented in blue tones; It was determined that hydroxyl anomalies are concentrated in volcanic levels associated with Akdere Tuff and show a high degree of spatial agreement with field observations. As a result of adaptive thresholding, the total surface area of potential zeolitization areas was calculated as 594,865 m² (0.595 km²). These findings demonstrate that the combined use of ASTER and Landsat imagery with the Crosta Technique is a rapid, reproducible, and cost-effective preliminary assessment tool for zeolitization research.

Keywords: ASTER, Crosta technique, Google Earth Engine, Landsat-9, PCA, zeolite

1. GİRİŞ

Uzaktan algılama teknikleri, geniş alanların hızlı ve düşük maliyetle analiz edilmesine olanak sağlayarak mineral araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Drury, 2001). Uydu görüntülerinin spektral özelliklerinden yararlanılarak hidroksil, kil ve demir oksit mineralleri belirlenebilmekte, böylece hidrotermal alterasyon zonları haritalanabilmektedir (Crowley vd., 2003). Zeolitler ise yüksek iyon değişim kapasitesi ve adsorpsiyon özellikleri nedeniyle tarım, çevre ve sanayi alanlarında yaygın kullanım bulan ekonomik açıdan önemli alüminyosilikat

mineralleridir (Mumpton, 1999). Bu mineraller genellikle volkanik kayaçların alterasyonu ve hidrotermal süreçlerle ilişkili olarak oluşmaktadır (Hay ve Sheppard, 2001). Geleneksel jeolojik haritalama çalışmalarının zaman ve maliyet gereksinimi, Google Earth Engine (GEE) gibi bulut tabanlı platformların kullanımını öne çıkarmıştır. Mineral araştırmalarında yaygın olarak kullanılan ASTER sensörünün SWIR dedektörlerinin işlevini kaybetmesi nedeniyle, güncel çalışmalarda hidroksil minerallerinin belirlenmesinde Landsat-9 OLI-2 verileri önemli bir alternatif olarak kullanılmaktadır (USGS, 2023).

Bu çalışmada ASTER ve Landsat-9 verileri kullanılarak hibrit bir veri seti oluşturulmuş; PCA, bant oranlama ve Crosta tekniği ile hidrotermal alterasyon zonları belirlenmiştir. Adaptif eşikleme yöntemi kullanılarak potansiyel zeolitleşme alanları ortaya konmuş ve uzaktan algılama tabanlı yaklaşımların mineral aramalarında etkili bir ön değerlendirme aracı olduğu gösterilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE JEOLOJİSİ

Çalışma alanı, Manisa'nın Demirci ilçesindeki Akdere Köyü çevresinde yer almaktadır. Bölge, Alt–Orta Miyosen yaşlı volkanosedimanter birimler içerisinde gelişen zeolitleşme açısından önemli olup, başlıca zeolit minerali klinoptilolittir. Zeolit oluşumu, Akdere Tüfü'nü oluşturan volkanik camların diyajenetik alterasyonu ile ilişkilidir (Coşkun vd., 2025; MTA, 2020).

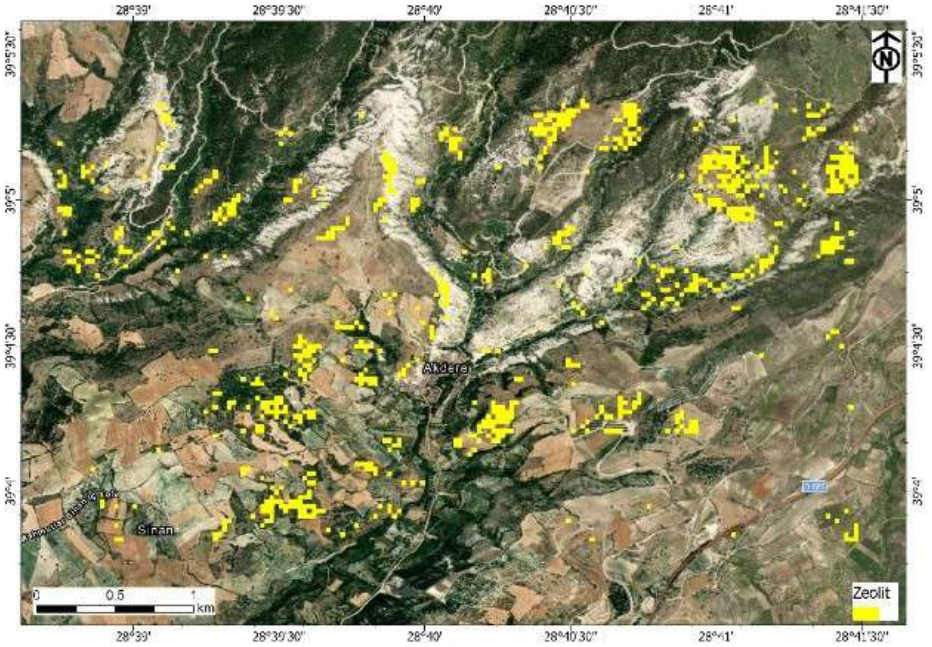
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada hidrotermal alterasyon zonları ve potansiyel zeolitleşme alanlarının belirlenmesi amacıyla ASTER ve Landsat-9 Collection 2 Level-2 yüzey yansıtım verileri kullanılmıştır. ASTER SWIR dedektörlerinin işlevini kaybetmesi nedeniyle hidroksil minerallerine ilişkin bilgiler Landsat-9'un SWIR bantlarından elde edilmiş, ASTER VNIR verileri ile birlikte Google Earth Engine (GEE) ortamında hibrit bir veri seti oluşturulmuştur. ASTER VNIR verilerinin radyometrik ölçeklenmesinde bantlara ait DN değerleri 0,001 katsayısı ile yansıtım değerlerine dönüştürülmüş ve ASTER verilerine çalışma alanındaki 1. yüzdelik koyu piksel değerleri kullanılarak Dark Object Subtraction (DOS) düzeltmesi uygulanmıştır. Landsat-9 OLI-2 Collection 2 Level-2 yüzey yansıtım verileri ise ilgili ölçekleme katsayıları kullanılarak yüzey yansıtım değerlerine dönüştürülmüştür. ASTER VNIR bantları 15 m, Landsat-9 SWIR bantları 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip olduğundan, hibrit veri seti 30 m ortak analiz çözünürlüğünde oluşturulmuştur. Ön işleme aşamasında bulut maskeleme ve kalite filtreleme uygulanmış, ardından çok zamanlı görüntülerden medyan kompozit üretilmiştir. PCA uygulanmadan önce kullanılan bantlar, her bandın çalışma alanındaki ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak z-score yöntemiyle standardize edilmiştir. Mineralojik hedeflerin belirlenmesi amacıyla hidroksil, demir oksit ve kil indeksleri hesaplanmış; bant oranlama, Temel Bileşenler Analizi (PCA) ve Crosta tekniği kullanılarak alterasyon zonları ortaya çıkarılmıştır. PCA, mineralojik hedeflere duyarlı bant grupları kullanılarak ayrı ayrı uygulanmıştır. Hidroksil alterasyonunun belirlenmesi amacıyla ASTER B01, ASTER B3N, Landsat-9 B6 ve Landsat-9 B7 bantlarından oluşan dört bantlı veri seti kullanılmıştır. Demir oksit alterasyonunun belirlenmesinde ise ASTER B01, B02, B3N ve Landsat-9 B6 bantları kullanılmıştır. Her iki veri setinde dört temel bileşen hesaplanmış ve hedef bileşenin seçiminde PCA bant yüklerinin yönü ve büyüklüğü dikkate alınmıştır. Her iki analizde de mineralojik hedefi temsil eden PC4 bileşeni kullanılmıştır. Son aşamada yüzdelik tabanlı adaptif eşikleme uygulanmıştır. Hidroksil anomalilerinin belirlenmesinde Crosta görüntüsünün kırmızı kanalının 75. yüzdelik (P75) değeri, düşük demir oksit anomalilerinin belirlenmesinde ise mavi kanalın 25. yüzdelik (P25) değeri eşik olarak kullanılmıştır. Kırmızı kanalın P75 değerinden yüksek ve mavi kanalın P25 değerinden düşük olduğu pikseller potansiyel zeolitleşme alanları olarak tanımlanmıştır. Crosta kompozitinde kırmızı kanal hidroksil PCA'sından elde edilen PC4, mavi kanal demir oksit PCA'sından elde edilen PC4 olarak atanmıştır. Yeşil kanal ise hidroksil ve demir oksit PC görüntülerinin birlikte PCA'ya tabi tutulması sonucunda elde edilen ikinci bileşenden oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ASTER ve Landsat-9 verilerinin birlikte kullanımının zeolit aramalarında etkili ve hızlı bir ön değerlendirme yaklaşımı sunduğunu göstermiştir.

4. BULGULAR

Hidroksil indeksi sonuçlarında, tüf seviyelerinin yüzeylendiği alanlarda belirgin hidroksil anomalileri gözlenmiştir. Demir oksit indeksi sonuçlarında ise demir oksit alterasyonu ile ilişkili anomaliler belirlenmiştir. PCA bileşenlerinin seçiminde açıklanan varyans oranının yanı sıra, bileşenlerin ilgili bantlardaki yükleri dikkate alınmıştır. Hidroksil PCA'sında hedef mineralojik özellikleri temsil eden zıt yönlü bant yüklerine sahip bileşen ile demir oksit PCA'sında ilgili bantlarda zıt yönlü yükler gösteren bileşen hedef bileşen olarak değerlendirilmiş ve bu kriter doğrultusunda her iki analiz için PC4 kullanılmıştır. Crosta kompozit görüntülerinde kırmızı tonlar hidroksilce zengin alterasyon alanlarını, mavi tonlar demir oksit baskın bölgeleri, sarı-turuncu tonlar ise karma alterasyon zonlarını temsil etmiştir. Kırmızı tonlu hidroksil anomalilerinin Akdere Tüfü ile ilişkili volkanik seviyeler üzerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Potansiyel zeolitleşme alanlarının belirlenmesinde hidroksil bileşeni için %75'lik (P75), demir oksit bileşeni için ise

%25'lik (P25) yüzdelik eşikler kullanılmıştır. Bu adaptif eşikleme sonucunda, yüksek hidroksil ve düşük demir oksit anomalilerinin birlikte bulunduğu potansiyel zeolitleşme alanı 594.865 m² (0,595 km²) olarak hesaplanmıştır. Uzaktan algılama bulgularının arazi gözlemleriyle karşılaştırılması sonucunda, Crosta görüntülerinde belirlenen hidroksil anomalileri ile zeolitleşmiş tüf seviyeleri arasında büyük ölçüde mekânsal uyum olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, belirlenen alanlar potansiyel zeolitleşme zonları olarak değerlendirilmiş olup, mineralojik bileşimin kesin olarak ortaya konulması için laboratuvar tabanlı analizlere ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 1. Zeolitleşme zonları haritası

5. SONUÇ

Bu çalışmada GEE platformunda ASTER, Landsat verileri ve Crosta tekniği kullanılarak Demirci-Akdere çevresindeki zeolitleşme ile ilişkili alterasyon zonları başarıyla belirlenmiştir. Hidroksil, demir oksit ve kil indekslerinin birlikte değerlendirilmesi, çalışma alanındaki alterasyon mineralojisinin mekânsal dağılımını ortaya koymuştur. PCA ve Crosta yaklaşımı, topoğrafya ve aydınlanma etkilerini baskılayarak mineralojik kontrastı artırmış; adaptif eşikleme yöntemi ise yönteme farklı alanlarda tekrarlanabilirlik kazandırmıştır. Elde edilen bulgular, Crosta tekniğinin zeolitleşme araştırmalarında hızlı, maliyet etkin ve güvenilir bir ön değerlendirme yöntemi sunduğunu kanıtlamaktadır. Gelecek çalışmalarda uzaktan algılama bulgularının laboratuvar mineraloji verileriyle doğrulanması ve hiperspektral sensörlerle karşılaştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Coşkun, E., Ekinci Şans, B. ve Esenli, V., 2025. Demirci Havzası zeolitlerinin mineralojik ve jeokimyasal özellikleri. *Yerbilimleri Dergisi*, 46(1): 55-78.

Crowley, J.K., Williams, D.E., Hammarstrom, J.M., Piatak, N., Chou, I.M. ve Mars, J.C., 2003. Spectral Reflectance Properties (350–2500 nm) of Secondary Fe-Oxide, Fe-Hydroxide, and Fe-Sulfate-Hydrate Minerals Associated with Sulfide-Bearing Mine Wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3(3): 219-228.

Drury, S.A., 2001. *Image Interpretation in Geology*. 3. basım, Routledge, Londra.

Gottardi, G. ve Galli, E., 1985. *Natural Zeolites*. Springer-Verlag, Berlin.

Hay, R.L. ve Sheppard, R.A., 2001. Occurrence of Zeolites in Sedimentary Rocks: An Overview. Bish, D.L. ve Ming, D.W. (Ed.), *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications*, Mineralogical Society of America, Washington DC. syf: 217-234.

MTA, 2020. *Türkiye Endüstriyel Hammaddeler Envanteri: Zeolitler*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Mumpton, F.A., 1999. La Roca Magica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7): 3463-3470.

USGS, 2023. *Landsat 9 Data Users Handbook*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

SENTINEL-2 SRF TABANLI SPEKTRAL SENSÖR BOZUNUM MODELİ İLE RED-EDGE VE SWIR SANAL BANT REKONSTRÜKSİYONU

Sena ERDUR HARMAN[1], Uğur AVDAN[2],

[1]Eskişehir Teknik Üniversitesi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, senaerdurharman@eskisehir.edu.tr
[2]Pro. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, uavdan@eskisehir.edu.tr

ÖZET

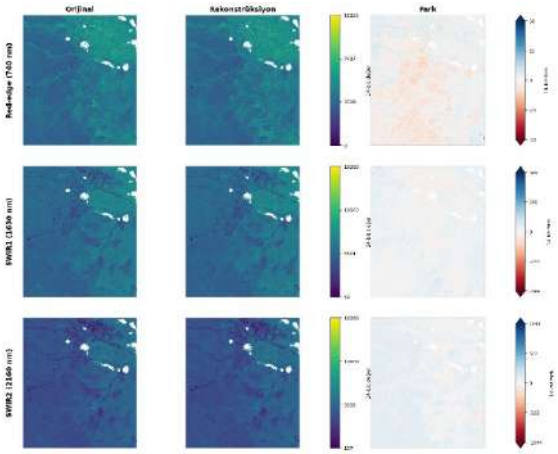
Sentinel-2 MSI görüntüleri, yüksek zamansal çözünürlükleri ve açık veri niteliği nedeniyle tarım, çevre izleme ve arazi örtüsü analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, özellikle red-edge ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgelerinde bantların geniş spektral aralıklara sahip olması, dar soğurma/yansıma özelliklerinin ayrıştırılmasını sınırlandırmaktadır. Bu çalışmada, Sentinel-2 görüntülerindeki geniş bant gözlemlerden red-edge ve SWIR çevresinde sanal dar bantların yeniden üretilmesi için spektral cevap fonksiyonlarına (SRF) dayalı bir spektral sensör bozunum modeli önerilmektedir.

Sentinel-2 süper çözünürlük literatüründe çalışmaların önemli bir bölümü 20 m ve 60 m bantların uzamsal iyileştirilmesine odaklanmakta, DSen2 gibi yaklaşımlar MTF/Gaussian tabanlı bozunum varsayımlarını kullanmaktadır (Lanaras vd., 2018). Son dönemde EnMAP hiperspektral verilerinden Sentinel-2 sentetik eğitim verisi üretimi ve çoklu sensör füzyonu da araştırılmıştır (Boumahdi vd., 2024; Yılmaz vd., 2026). COS2A gibi çalışmalar ise Sentinel-2'den AVIRIS düzeyi hiperspektral rekonstrüksiyonu hedeflemektedir (Lin vd., 2025). Bu çalışma, tüm hiperspektral spektrumu üretmek yerine, Sentinel-2 SRF eğrileriyle tanımlanan spektral bozunum modeli üzerinden red-edge ve SWIR çevresindeki sınırlı fakat uygulama değeri yüksek sanal dar bantlara odaklanması bakımından özgünlük yaratmaktadır.

Referans olarak EnMAP L2A yansıma spektrumları kullanılmıştır. Kalite maskesi ve 0–1,2 yansıma aralığı uygulandıktan sonra elde edilen 27 bağımsız sahne parçası, sahne parçası düzeyinde ve birbirleriyle örtüşmeyecek şekilde üç veri kümesine ayrılmıştır: 13 sahne parçasından oluşan eğitim kümesi (311.277 piksel), yedi sahne parçasından oluşan doğrulama kümesi (168.000 piksel) ve yedi sahne parçasından oluşan bağımsız test kümesi (159.000 piksel). Eğitim kümesi modellerin öğrenilmesinde, doğrulama kümesi model ve sanal bant seçiminde, test kümesi ise yalnızca nihai performansın değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Aynı sahne birden fazla veri kümesine dâhil edilmemiştir. Verilerin normalleştirilmesinde kullanılan katsayılar yalnızca eğitim kümesinden hesaplanmıştır. Her EnMAP spektrumu Copernicus v4.0 resmî S2A SRF'leriyle ağırlıklandırılarak B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 ve B12 girdilerine indirgenmiştir. Hedefler, FWHM'si 10 nm olan birim toplamlı Gaussian cevaplarla 690–800 nm'de 10 nm, 1540–1690 nm'de 30 nm ve 2120–2280 nm'de 40 nm aralıklarla tanımlanan 23 sanal banttır.

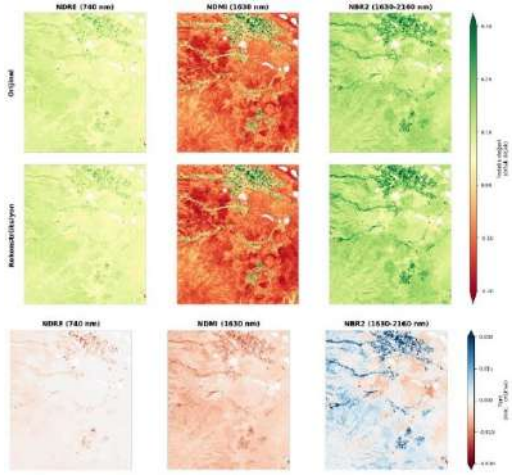
Ridge regresyon (α=1), kısmi en küçük kareler (PLS; sekiz bileşen) ve 192–128–64 gizli birimli, %10 dropout'lu çok katmanlı algılayıcı (MLP) karşılaştırılmıştır. Hedefe özgü model ve bant seçimi yalnız doğrulama kümesinde yapılmıştır. Bir hedef; $R^2 \geq 0{,}70$, daha iyi taban çizgisine göre RMSE kazancı ≥%5 ve model RMSE'si taban RMSE'sinden düşükse aday kabul edilmiştir. Adaylar [RMSE kazancı (%) + $20R^2 - 10$(RMSE/hedef standart sapması)] puanıyla sıralanmış; red-edge/SWIR1/SWIR2 için en çok 6/3/3 olmak üzere 12 hedef (690, 700, 730, 740, 750, 760; 1540, 1570, 1630; 2120, 2160 ve 2280 nm) seçilmiştir. Tabanlar en yakın S2 bandı ve komşu S2 bantları arasındaki doğrusal enterpolasyondur. İyileşme $100 \times (RMSE_{taban} - RMSE_{model})/RMSE_{taban}$ olarak hesaplanmıştır. SRF duyarlılığında S2A ile eğitilmiş modeller yeniden eğitilmeden, aynı test piksellerinin resmî S2B/S2C SRF'leri ve nominal/kaydırılmış Gaussian cevaplarla üretilen girdilerine uygulanmıştır.

Kör test kümesindeki 23 aday hedefte RMSE/R^2 değerleri ridge için 0,00266/0,99952, PLS için 0,00278/0,99945 ve MLP için 0,00429/0,99871 bulunmuştur; doğrusal ve en yakın-bant tabanlarının RMSE'leri sırasıyla 0,01310 ve 0,01860'dir. Doğrulamada seçilen 12 hedef için geçerli piksel–hedef hataları havuzlandığında S2A girdilerinde RMSE 0,00281 olmuş ve doğrulamada hedefe göre seçilen tabana kıyasla %79,41 azalmıştır. Aynı dondurulmuş modellerin RMSE'si S2B'de 0,00302, S2C'de 0,00445 ve nominal Gaussian girdilerde 0,00418'dir. Tüm Gaussian merkezlerinin +2 nm kaydırılması RMSE'yi 0,00617'ye yükseltmiştir. Bu karşılaştırma ayrı ayrı optimize edilmiş sensör modellerini değil, S2A ile eğitilmiş modelin SRF değişimine sıfır-atışlı duyarlılığını ölçmektedir.



Şekil 1. Temsili bir test sahne parçasında EnMAP referansı, resmî S2A SRF girdileriyle kestirilen RE_740, SWIR1_1630 ve SWIR2_2160 sanal bantları ile rekonstrüksiyon−referans farkları.

Uygulama etkisi, EnMAP hedeflerinden hesaplanan referans indekslere karşı NDRE_740=(B8A−RE_740)/(B8A+RE_740), NDMI_1630=(B8A−SWIR1_1630)/(B8A+SWIR1_1630) ve NBR2_1630_2160=(SWIR1_1630−SWIR2_2160)/(SWIR1_1630+SWIR2_2160) ile değerlendirilmiştir. Paydası 0,05'ten büyük geçerli örnekler kullanılmıştır. Resmî S2A senaryosunda indeks RMSE'leri sırasıyla 0,00063, 0,00297 ve 0,00627; hedefe özgü tabanlara göre iyileşmeler ise sırasıyla %90,95, %77,10 ve %79,22 olmuştur.



Şekil 2. Temsili test sahne parçasında EnMAP referanslarından ve resmî S2A SRF girdileriyle kestirilen sanal bantlardan türetilmiş NDRE_740, NDMI_1630 ve NBR2_1630_2160 indeksleri ile fark haritaları.

Şekil 1 ve 2'de sunulan görüntüler, sentetik Sentinel-2-benzeri girdilere ve bu girdilerden kestirilen sanal bantlara dayanmaktadır. Bu nedenle bulgular, çalışma kapsamındaki sahneler için bir yöntem gösterimi olarak değerlendirilmeli, farklı sahnelere ve gerçek Sentinel-2 verilerine aktarılabilirliği bağımsız verilerle ayrıca doğrulanmalıdır.

Anahtar Sözcükler: EnMAP, sanal bant rekonstrüksiyonu, Sentinel-2, spektral cevap fonksiyonu, spektral sensör bozunumu

RED-EDGE AND SWIR VIRTUAL BAND RECONSTRUCTION USING A SENTINEL-2 SRF-BASED SPECTRAL SENSOR DEGRADATION MODEL

ABSTRACT

Sentinel-2 MSI imagery is widely used in agricultural, environmental monitoring, and land-cover applications because of its high temporal resolution and open-access availability. However, the relatively broad spectral bandwidths, particularly in the red-edge and shortwave infrared (SWIR) regions, limit the ability to resolve narrow absorption and reflectance features. This study proposes a spectral sensor degradation model based on spectral response functions (SRFs) to reconstruct virtual narrow bands around the red-edge and SWIR regions from the broadband observations of Sentinel-2.

A substantial portion of the Sentinel-2 super-resolution literature has focused on the spatial enhancement of the 20 m and 60 m bands, with approaches such as DSen2 employing MTF- and Gaussian-based degradation assumptions (Lanaras et al., 2018). More recently, the generation of synthetic Sentinel-2 training data from EnMAP hyperspectral observations and multisensor data fusion have also been investigated (Boumahdi et al., 2024; Yılmaz et al., 2026). Studies such as COS2A, in turn, aim to reconstruct AVIRIS-level hyperspectral data from Sentinel-2 imagery (Lin et al., 2025). The novelty of the present study lies in its

focus on a limited yet application-relevant set of virtual narrow bands in the red-edge and SWIR regions, reconstructed through a spectral degradation model defined by Sentinel-2 SRF curves, rather than on the reconstruction of the entire hyperspectral spectrum.

EnMAP L2A reflectance spectra were used as the reference data. After applying the quality mask and restricting reflectance values to the range of 0–1.2, the resulting 27 independent scene subsets were divided at the scene-subset level into three mutually exclusive datasets: a training set comprising 13 scene subsets (311,277 pixels), a validation set comprising seven scene subsets (168,000 pixels), and an independent test set comprising seven scene subsets (159,000 pixels). The training set was used to fit the models, the validation set was used for model and virtual-band selection, and the test set was used exclusively for the final performance evaluation. No scene subset was included in more than one dataset. The parameters used for data normalization were estimated solely from the training set. Each EnMAP spectrum was weighted using the official Copernicus v4.0 S2A SRFs and reduced to the B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11, and B12 input bands. The targets comprised 23 virtual bands defined using unit-sum Gaussian response functions with a full width at half maximum (FWHM) of 10 nm, positioned at 10 nm intervals from 690 to 800 nm, 30 nm intervals from 1540 to 1690 nm, and 40 nm intervals from 2120 to 2280 nm.

Ridge regression ($\alpha = 1$), partial least squares regression (PLS; eight components), and a multilayer perceptron (MLP) with 192 –128–64 hidden units and a dropout rate of 10% were compared. Target-specific model and band selection was performed exclusively using the validation set. A target was considered eligible if it satisfied the following criteria: $R^2 \geq 0.70$, an RMSE improvement of at least 5% relative to the better-performing baseline, and a model RMSE lower than the baseline RMSE. The eligible targets were ranked using the score [RMSE improvement (%) + $20R^2$ − 10(RMSE/target standard deviation)]. A total of 12 targets were selected, with maximum quotas of 6, 3, and 3 bands for the red-edge, SWIR1, and SWIR2 regions, respectively: 690, 700, 730, 740, 750, and 760 nm; 1540, 1570, and 1630 nm; and 2120, 2160, and 2280 nm. The baselines consisted of the nearest Sentinel-2 band and linear interpolation between adjacent Sentinel-2 bands. Improvement was calculated as 100 × (RMSE_baseline − RMSE_model)/RMSE_baseline. For the SRF sensitivity analysis, the models trained using S2A inputs were applied, without retraining, to inputs generated for the same test pixels using the official S2B and S2C SRFs and nominal or shifted Gaussian response functions.

Across the 23 candidate targets in the blind test set, the RMSE/R^2 values were 0.00266/0.99952 for ridge regression, 0.00278/0.99945 for PLS, and 0.00429/0.99871 for the MLP. The RMSE values of the linear-interpolation and nearest-band baselines were 0.01310 and 0.01860, respectively. When the valid pixel–target errors were pooled across the 12 targets selected using the validation set, the RMSE obtained with the S2A inputs was 0.00281, corresponding to a 79.41% reduction relative to the target-specific baseline selected during validation. The RMSE values of the same frozen models were 0.00302 for S2B, 0.00445 for S2C, and 0.00418 for the nominal Gaussian inputs. Shifting all Gaussian centres by +2 nm increased the RMSE to 0.00617. Therefore, this comparison does not evaluate separately optimized sensor-specific models; rather, it quantifies the zero-shot sensitivity of an S2A-trained model to changes in the SRF definition.

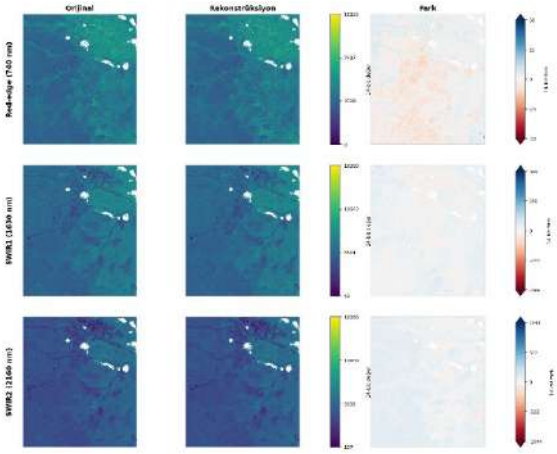


Figure 1. EnMAP reference data, the RE_740, SWIR1_1630, and SWIR2_2160 virtual bands estimated using the official S2A SRF inputs, and the reconstruction-minus-reference differences for a representative test scene subset.

The application-level utility was evaluated against reference indices calculated from the EnMAP targets using NDRE_740 = (B8A − RE_740)/(B8A + RE_740), NDMI_1630 = (B8A − SWIR1_1630)/(B8A + SWIR1_1630), and NBR2_1630_2160 = (SWIR1_1630 − SWIR2_2160)/(SWIR1_1630 + SWIR2_2160). Only valid samples with denominator values greater than 0.05 were included. Under the official S2A scenario, the index RMSE values were 0.00063, 0.00297, and 0.00627, respectively, corresponding to improvements of 90.95%, 77.10%, and 79.22% relative to the target-specific baselines.

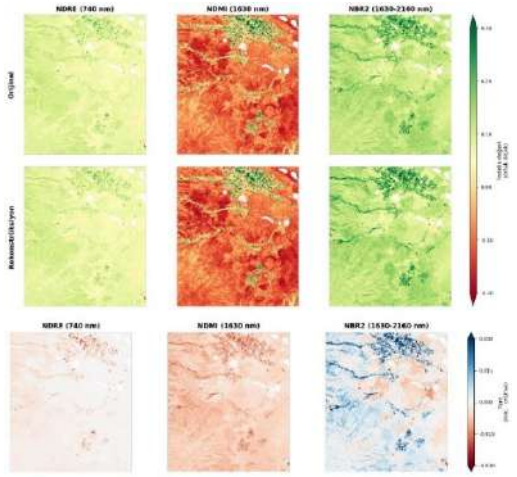


Figure 2. NDRE_740, NDMI_1630, and NBR2_1630_2160 indices derived from the EnMAP references and from the virtual bands estimated using the official S2A SRF inputs, together with their difference maps, for a representative test scene subset.

The images presented in Figures 1 and 2 are based on synthetic Sentinel-2-like inputs and virtual bands estimated from these inputs. Therefore, the findings should be regarded as a methodological demonstration for the scenes considered in this study, and their transferability to other scenes and real Sentinel-2 data should be further validated using independent observations.

Keywords: EnMAP, virtual band reconstruction, Sentinel-2, spectral response function, spectral sensor degradation.

KAYNAKÇA

Copernicus Sentinel-2 Mission. (2024). Sentinel-2 spectral response functions 2024, version 4.0. SentiWiki.

Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Galliani, S., Baltsavias, E., & Schindler, K. (2018). Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 305-319.

Boumahdi, M. vd. (2024). Earth observation multi-spectral image fusion with transformers for Sentinel-2 and Sentinel-3 using synthetic training data. Remote Sensing, 16(16), 3107.

Lin, C.-H., Chen, J.-T., Leng, Z.-C., & Lin, J.-T. (2025). COS2A: Conversion from Sentinel-2 to AVIRIS hyperspectral data using interpretable algorithm with spectral-spatial duality. arXiv:2507.06575.

Yılmaz, V., Yılmaz, C. S., Belgiu, M., Candiani, G., Pepe, M., Boschetti, M., Nutini, F., & Marshall, M. (2026). Fusion of EnMAP/PRISMA hyperspectral and Sentinel-2 multispectral imagery for estimating crop traits. International Journal of Remote Sensing, 47(4), 1699-1726.

AFŞİN-ELBİSTAN TERMİK SANTRALİ EMİSYONLARININ UYDU VERİLERİ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE İZLENMESİ

Çağrı KAPUSUZ[1], Halil İbrahim GÜNDÜZ[2], Osman ORHAN[3]

[1]Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, 33343, Yenişehir, Mersin, kapusuzcagri@gmail.com
[2] Dr. Öğr. Üyesi., Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, halilibrahimgunduz@aksaray.edu.tr
[3]Doç. Dr., Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, 33343, Yenişehir, Mersin, osmanorhan@mersin.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin en büyük linyit yakıtlı termik santral kompleksi olan Afşin-Elbistan Termik Santrallerinin (Kahramanmaraş; A: 4×340 MW, B: 2×635 MW; toplam 2630 MW) merkezinden 100 km yarıçaplı etki alanında troposferik NO_2 konsantrasyonlarının uzamsal ve zamansal değişimi, Ocak 2020–Haziran 2026 dönemini kapsayacak şekilde Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden Sentinel-5P/TROPOMI uydu verileri kullanılarak analiz edilmiştir. CatBoost ve XGBoost tabanlı makine öğrenmesi modelleri; NASA GEOS-CF, ECMWF ERA5-Land, SRTM DEM, MODIS NDVI ve VIIRS gece ışıkları verilerinden elde edilen yordayıcı değişkenler kullanılarak eğitilmiştir. Leave-One-Year-Out Çapraz Doğrulama (LOYOCV) sonuçlarına göre her iki model de tüm yıllarda $R^2>0,86$ düzeyinde yüksek performans göstermiş; XGBoost, ortalama LOYOCV performansında ($R^2=0,906\pm0,018$; RMSE=2,396±0,389 µmol/m²) CatBoost'a ($R^2=0,896\pm0,023$) kıyasla görece daha yüksek başarı sergilemiştir. SHAP tabanlı yorumlanabilirlik analizi, GEOS_NO_2 değişkeninin her iki modelde de en etkili yordayıcı olduğunu ortaya koymuştur. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin (Mw 7,7 ve 7,6) ardından, santral merkezinin 25 km yarıçaplı çevresinde NO_2 konsantrasyonlarında %18,7'lik bir azalma gözlenmiş; 2024 yılında deprem öncesi düzeylere yeniden ulaşıldığı, 2025 yılında ise 32,1 µmol/m² ile incelenen dönemin en yüksek değerinin kaydedildiği belirlenmiştir. Elbistan (r=0,509) ve Kahramanmaraş Merkez (r=0,652) hava kalitesi gözlem istasyonlarıyla gerçekleştirilen validasyon, uydu tabanlı verilerin bölgesel NO_2 eğilimleriyle orta düzeyde uyum gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışma alanı nüfusunun %97–99'unun WHO tarafından önerilen yıllık ortalama NO_2 kılavuz değerinin üzerindeki konsantrasyonlara maruz kaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: afşin-elbistan, hava kalitesi, makine öğrenmesi, NO_2, uzaktan algılama

ABSTRACT

MONITORING OF AFŞİN-ELBİSTAN THERMAL POWER PLANT EMISSIONS USING SATELLITE DATA AND MACHINE LEARNING

In this study, the spatiotemporal variation of tropospheric NO_2 concentrations in the 100 km radius impact area of the Afşin-Elbistan Thermal Power Plants (Kahramanmaraş, Turkey; total 2,630 MW), the largest lignite-fired energy complex in Turkey, was analyzed using Sentinel-5P/TROPOMI satellite data accessed via Google Earth Engine for the period January 2020–June 2026. CatBoost and XGBoost tree-based machine learning models were trained using nine predictor variables including NASA GEOS-CF, ECMWF ERA5-Land, SRTM DEM, MODIS NDVI, and VIIRS night-time lights. Leave-One-Year-Out Cross-Validation (LOYOCV) demonstrated $R^2>0.86$ for all years; XGBoost achieved slightly higher average performance ($R^2=0.906\pm0.018$, RMSE=2.396±0.389 µmol/m²) compared to CatBoost ($R^2=0.896\pm0.023$). SHAP analysis identified GEOS_NO_2 as the dominant predictor in both models. The 6 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes caused an 18.7% NO_2 reduction in the ±25 km plant vicinity, followed by full recovery in 2024 and a study-period record of 32.1 µmol/m² in 2025. Validation with two ground stations (Elbistan r=0.509; K.Maraş Merkez r=0.652) confirmed that satellite data successfully captured regional NO_2 trends. Between 97-99% of the study area population is chronically exposed to NO_2 concentrations exceeding the WHO annual guideline.

Keywords: afşin-elbistan, air quality, machine learning, NO_2, remote sensing

1. GİRİŞ

Azot dioksit (NO_2), başta yüksek sıcaklıktaki yanma süreçleri olmak üzere fosil yakıt kullanımına bağlı olarak oluşan önemli hava kirleticilerinden biridir ve termik santraller, motorlu taşıtlar ve sanayi tesisleri başlıca insan kaynaklı arasında yer almaktadır. Solunum sistemi hastalıkları, kardiyovasküler rahatsızlıklar ve erken mortalite ile ilişkisi kapsamlı biçimde ortaya konan NO_2 için Dünya Sağlık Örgütü (WHO), 2021 yılında yıllık ortalama kılavuz değerini 40 µg/m³'ten 10 µg/m³'e düşürmüştür (WHO, 2021). Bu kılavuz değer, yoğun sanayi ve enerji üretim faaliyetlerinin bulunduğu bölgelerde aşılabilmekte; yer tabanlı hava kalitesi gözlem ağlarının yetersiz olduğu alanlarda ise kirliliğin uzamsal dağılımının ayrıntılı biçimde belirlenmesi güçleşmektedir.

Uydu tabanlı uzaktan algılama, söz konusu gözlem eksikliğinin giderilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Avrupa Uzay Ajansı'nın Sentinel-5P uydusu üzerindeki TROPOMI sensörü, küresel ölçekte günlük troposferik NO_2

dikey kolon yoğunluğu (VCD) ölçümleri sağlamaktadır (Veefkind vd., 2012). Bununla birlikte, TROPOMI'nin yaklaşık 3,5 × 5,5 km düzeyindeki doğal uzamsal çözünürlüğü, özellikle endüstriyel noktasal kaynaklardan yayılan yerel ölçekli emisyon bulutlarının ayrıntılı olarak temsil edilmesinde sınırlılıklar oluşturabilmektedir. Bu nedenle, uydu gözlemlerinin daha yüksek uzamsal çözünürlüğe iyileştirilmesine yönelik makine öğrenmesi (ML) tabanlı yaklaşımlar giderek yaygınlaşmaktadır. Kim vd. (2021), makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak TROPOMI gözlemlerinden yüksek çözünürlüklü NO_2 dağılımlarının üretilebildiğini; Lee vd. (2023) ise TROPOMI tabanlı verilerin yerel ölçekte maruziyet değerlendirmelerinde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Afşin-Elbistan Termik Santralleri; A Santrali (4×340 MW) ve B Santrali (2×635 MW) olmak üzere toplam 2.630 MW kurulu güçle Türkiye'nin en büyük linyit yakıtlı enerji komplekslerinden birini oluşturmaktadır. Yaklaşık 1.050 m ortalama yükseltiye sahip ve çevresi dağlık alanlarla sınırlandırılmış bir havzada yer alan santral kompleksi, kirleticilerin atmosferik taşınımı ve dağılımını etkileyebilecek belirgin topografik özelliklere sahiptir. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremleri (Pazarcık Mw 7,7; Elbistan Mw 7,6) çalışma alanını doğrudan etkilemiş ve bölgedeki enerji üretim faaliyetlerinde kesintilere neden olmuştur. Büyük ölçekli depremlerin endüstriyel faaliyetlerle ilişkili atmosferik kirletici düzeyleri üzerindeki etkilerini çok kaynaklı uydu ve yer gözlemleriyle nicel olarak inceleyen çalışmaların sınırlı olması, bu araştırmanın temel motivasyonlarından birini oluşturmaktadır.

Çalışmanın başlıca katkıları; (i) Leave-One-Year-Out Çapraz Doğrulama (LOYOCV) yaklaşımıyla yıllar arası genellenebilirliği değerlendirilen makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesi, (ii) 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında NO_2 düzeylerinde meydana gelen değişimin TROPOMI gözlemleri, SAR verileri ve iki yer tabanlı hava kalitesi gözlem istasyonundan elde edilen veriler kullanılarak nicel olarak değerlendirilmesi ve (iii) SHAP tabanlı model yorumlanabilirliği, SO_2 analizi ve WorldPop tabanlı nüfus maruziyet modellemesinin bütünleşik bir çerçevede ele alınmasıdır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

2.1 Çalışma Alanı

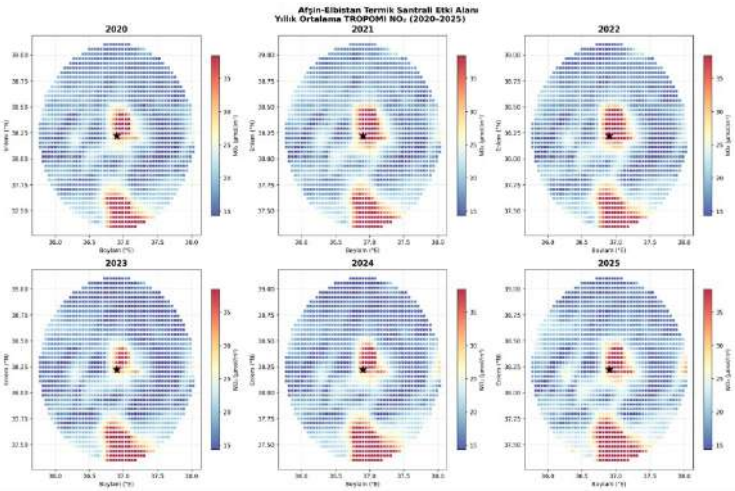
Çalışma alanı, santral merkezi (38,22° K, 36,90° D) etrafında 100 km yarıçaplı dairesel bir bölgeyi (~31.416 km²) kapsamaktadır. SRTM DEM analizine göre yükselti 400–2.500 m arasında değişmekte olup çalışma alanının ortalama yükseltisi yaklaşık 1.050 m'dir. Bölgenin kapalı havza morfolojisi, özellikle yüksek basınç k atmosfer koşullarında kirleticilerin atmosferik dağılımını sınırlandırarak yerel birikimi artırabilmektedir. Çalışma alanı içerisinde aktif NO_2 ölçümü gerçekleştiren iki yer tabanlı hava kalitesi gözlem istasyonu belirlenmiştir: Elbistan istasyonu (santrale 25,8 km; 1.643 günlük gözlem) ve Kahramanmaraş Merkez istasyonu (santrale 71,7 km; 1.312 günlük gözlem).

2.1 Veri Kaynakları

Çalışmada kullanılan tüm veri kaynakları GEE bulut hesaplama platformu üzerinden işlenmiştir (Gorelick vd. 2017). TROPOMI NO_2 görüntülerine bulut fraksiyonu < 0.30 kalite maskesi uygulanmış; mol/m² → µmol/m² birim dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Ocak 2020–Haziran 2026 döneminde toplamda 5.164 günlük görüntü analiz kapsamına alınmıştır. Kullanılan tüm veri kaynakları Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri kaynakları ve özellikleri.

Veri Kaynağı	Çözünürlük	Değişken	Dönem
Sentinel-5P/ TROPOMI L3	~1.1 km	NO_2, SO_2 VCD	2020–2026
NASA GEOS-CF	~0.25°	Troposferik NO_2 (ppb	2020–2025
ECMWF ERA5-Land	~11 km		2020–2025
USGS SRTM DEM	30 m	Yükseklik (m)	statik
MODIS MOD13A3 v6.1	1 km	NDVI	aylık
VIIRS/DNB NTL v1	~500 m	Çevresel Bitki Örtüsü Dinamiği ve insan sosyoekonomik faaliyeti	aktivite göstergesi
Sentinel-1 GRD IW	20 m	VV backscatter (dB)	Deprem hasar doğrulama / 2022–2023
WorldPop GP	100 m	Nüfus yoğunluğu	2020
CSB / havaizleme.gov.tr	Nokta	Günlük NO_2 (µg/m³)	2020–2026



Şekil 1. Afşin-Elbistan Termik Santrali etki alanı — yıllık ortalama TROPOMI NO_2 dağılımı (2020–2025). Yıldız işareti termik santrali, kesik daire 50 km referans mesafesini göstermektedir.

3. YÖNTEM

3.1 Leave-One-Year-Out Çapraz Doğrulama (LOYOCV)

Tek bir referans yılına dayanan eğitim/test yaklaşımları, model performansının anomali yıllara nasıl genelleneceği konusunda metodolojik belirsizlik yaratmaktadır. Bu çalışmada altı yılın tamamını kapsayan LOYOCV tasarımı benimsenmiştir: her iterasyonda bir yıl test seti olarak ayrılmış, geri kalan beş yıl eğitim için kullanılmıştır. 2020-2025 döneminin her yılı için 2.000 nokta GEE'den örneklenmiş; toplam 12.000 nokta üzerinden modeller eğitilmiştir. Bu tasarım özellikle 2023 deprem yılı için kritiktir: model 2023 verisini hiç görmeden test edilmiş ve R^2=0.89 elde etmiştir. Böylece ML tahminlerinin anomali koşullara da başarıyla genellendiği kanıtlanmıştır.

3.2 Makine Öğrenmesi Modelleri ve SHAP Analizi

CatBoost (Prokhorenkova vd. 2018) ve XGBoost (Chen ve Guestrin 2016) algoritmaları dokuz predictor değişkeniyle eğitilmiştir: GEOS_NO_2, DEM, yüzey basıncı, toplam yağış, 2 m sıcaklık, u_{10}/v_{10} rüzgar bileşenleri, gece ışıkları (NTL) ve NDVI. CatBoost için: iterasyon=500, öğrenme hızı=0.05, derinlik=6, erken durdurma=50. XGBoost için: n_estimators=500, max_depth=6, subsample=0.8, colsample_bytree=0.8. Model yorumlanabilirliği için her iki modele de SHAP TreeExplainer (Lundberg ve Lee 2017) uygulanmıştır. LOYOCV ile eğitilen modeller, 2020-2025 döneminin her yılına bağımsız olarak uygulanarak yıllık downscaled NO_2 haritaları üretilmiştir.

3.3 Tamamlayıcı Analizler

Rüzgar ve emisyon plumu analizi için ERA5-Land 10 m rüzgar bileşenlerinden meteorolojik yön hesaplanmış; 16 yön dilimi bazında deprem öncesi (2020-2022) ve sonrası (2023-2025) windrose grafikleri üretilmiştir. Deprem kaynaklı yüzey değişimini ölçmek amacıyla Sentinel-1 GRD IW VV görüntülerinden deprem öncesi (2022-11/2023-02) ve sonrası (2023-02/2023-04) ΔVV backscatter fark haritası oluşturulmuştur. TROPOMI SO_2 VCD verisi aynı metodoloji ile analiz edilmiştir. WorldPop 100 m nüfus ızgarası, downscaled NO_2 haritalarıyla entegre edilerek WHO NO_2 eşiğini (15 µmol/m²) aşan alanlardaki yıllık maruz nüfus hesaplanmıştır.

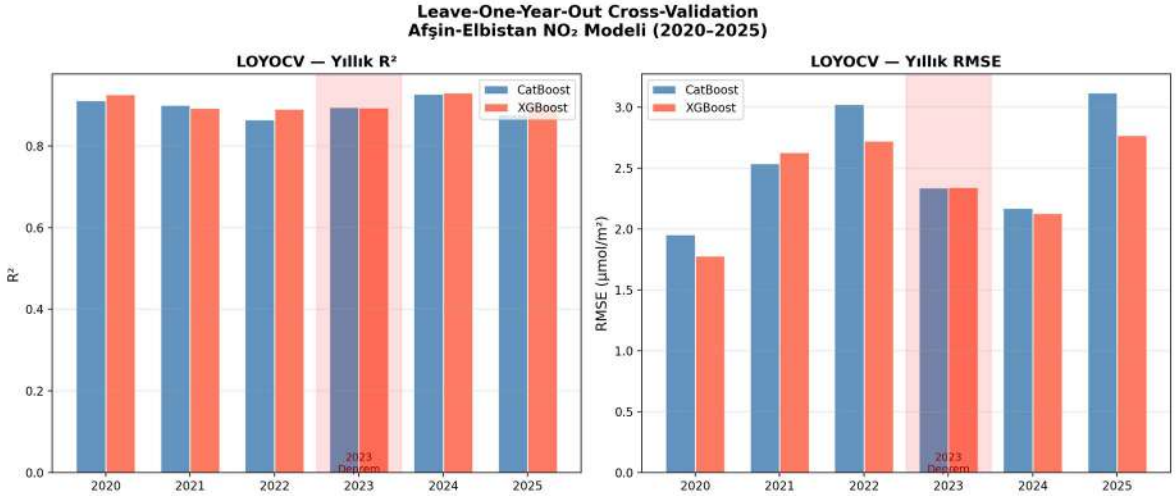
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 LOYOCV Model Performansı

Her iki modelin tüm yıllar için LOYOCV sonuçları Çizelge 2'de verilmektedir. Şekil 4'te yıllık R^2 ve RMSE karşılaştırması görülmektedir. CatBoost ve XGBoost, tüm test yıllarında R^2>0.86 elde etmiş; 2023 deprem yılında da CatBoost R^2=0.895, XGBoost R^2=0.894 başarımı sergilemiştir. Bu sonuç, modelin anomali niteliğindeki bir yıla, onu hiç görmeden başarıyla genellendiğini kanıtlamaktadır. LOYOCV ortalamasında XGBoost (R^2=0.906±0.018), CatBoost'a (R^2=0.896±0.023) hafif üstünlük sağlamıştır; ancak bu fark istatistiksel olarak küçük olup yıla göre değişmektedir. 2020 ve 2024'te XGBoost, 2021 ve 2023'te ise CatBoost biraz daha başarılıdır. Bu durum her iki algoritmanın bu veri seti için benzer öğrenme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 2. LOYOCV sonuçları — yıllık model performans metrikleri (* 6 Şubat 2023 deprem yılı; RMSE birimi µmol/m²).

Test Yılı	CB R^2	CB RMSE	XGB R^2	XGB RMSE
2020	0.912	1.954	0.927	1.780
2021	0.900	2.539	0,893	2.629
2022	0.865	3.026	0.891	2.723
2023*	0.895	2.338	0.894	2.344
2024	0.928	2.173	0.931	2.129
2025	0.877	3.119	0.903	2.771
Ortalama	0.896±0.023	2.525±0.467	0.906±0.018	2.396±0.389

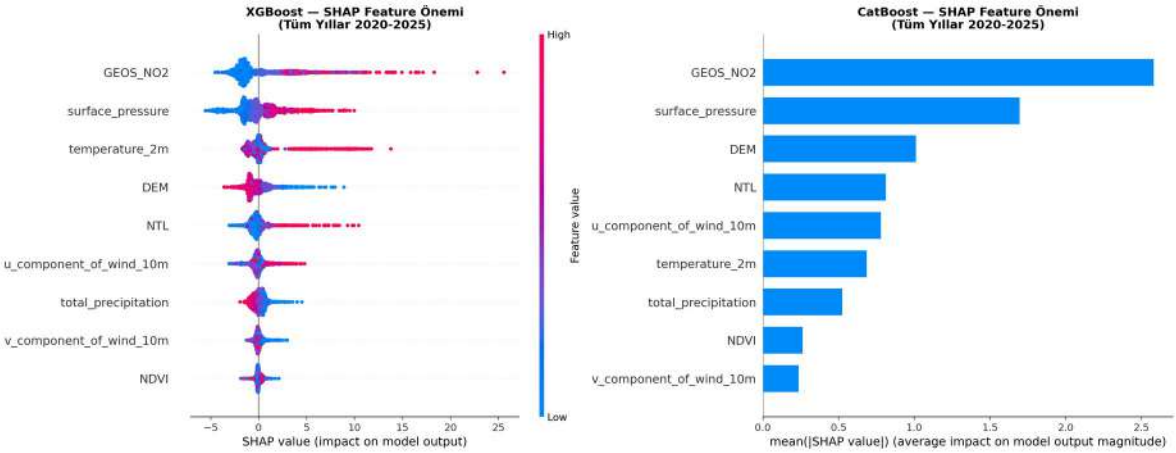


Şekil 2. Leave-One-Year-Out Cross-Validation (LOYOCV) sonuçları — CatBoost ve XGBoost modellerinin yıllık R^2 (sol) ve RMSE (sağ) karşılaştırması. Pembe alan 2023 deprem yılını göstermektedir.

4.2 SHAP Yorumlanabilirlik Analizi:

SHAP TreeExplainer analizi, her iki modelde de GEOS_NO_2'nin açık ara baskın predictor olduğunu ortaya koymuştur (XGBoost |SHAP|=2.35, CatBoost |SHAP|=2.58). Bu sonucun ardında güçlü bir fiziksel gerekçe yatmaktadır: GEOS-CF, emisyon, atmosferik taşınım, fotokimyasal bozunma ve kuru/yaş çökelme süreçlerini fizik tabanlı olarak modelleyen bir atmosfer kimyası sistemidir. Dolayısıyla NO_2'nin bir bölgede neden yüksek ya da düşük olduğunu en iyi açıklayan bilgiyi içermektedir; ML modeli aslında GEOS-CF'nin çözemediği uzamsal ayrıntıları öğrenmekte, GEOS-CF ise büyük ölçekli atmosferik yapının tutarlı temsil edilmesini sağlamaktadır. Bu bulgu, Liu vd. (2024) ve Stirnberg vd. (2021) tarafından da benzer şekilde raporlanmıştır.

İkinci sıradaki DEM, Afşin-Elbistan'ın kapalı havza morfolojisinin kirletici birikimindeki yapısal rolünü yansıtmaktadır. Yüzey basıncının pozitif katkısı anticiklonik koşullarda atmosferik karışım yüksekliğinin azalmasıyla, toplam yağışın negatif katkısı ise yaş çökelme mekanizmasıyla fiziksel olarak tutarlıdır. Gece ışıklarının (NTL) belirleyici değişkenler arasında yer alması, antropojenik aktivite yoğunluğunun NO_2 dağılımıyla doğrudan ilişkisini teyit etmektedir.



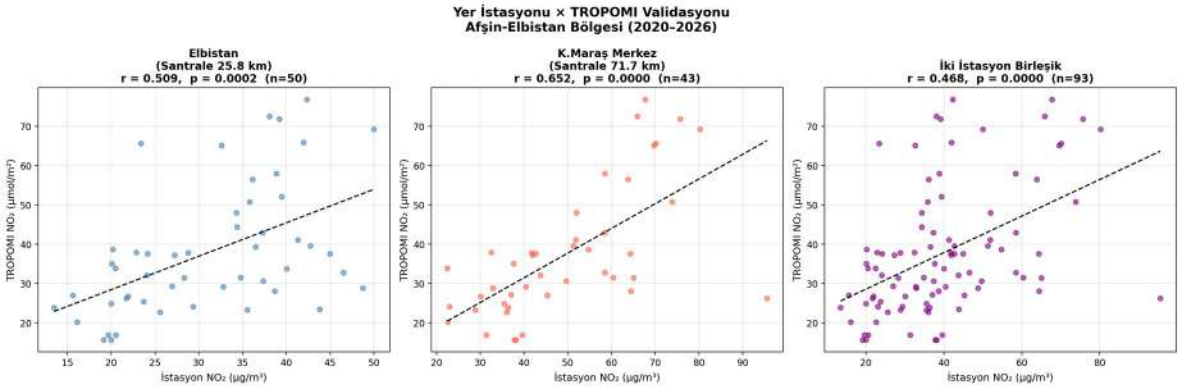
Şekil 3. SHAP feature importance analizi — XGBoost beeswarm plot (sol) ve CatBoost bar plot (sağ). Tüm 2020-2025 yılları verisi kullanılmıştır. Her iki modelde GEOS_NO_2 baskın predictor konumundadır.

4.3 Yer İstasyonu Validasyonu

Çalışma alanı içinde aktif NO_2 ölçümü yapan iki CSB istasyonuyla gerçekleştirilen validasyon sonuçları Çizelge 3 ve Şekil 6'da sunulmaktadır.

Çizelge 3. Yer gözlem istasyonu × TROPOMI validasyonu.

İstasyon	Santrale Uzaklık	N(ay)	Pearson r	p-değeri	Veri Dönemi
Elbistan	25.8 km	50	0.509	0.0002	2020-2026
Kahramanmaraş Merkez	71.7 km	43	0.652	<0.001	2020-2026



Şekil 4. Yer istasyonu × TROPOMI aylık korelasyon: Elbistan (sol, r=0.509), K.Maraş Merkez (orta, r=0.652), iki istasyon birleşik (sağ, r=0.468). Her iki korelasyon da p<0.001 düzeyinde anlamlıdır.

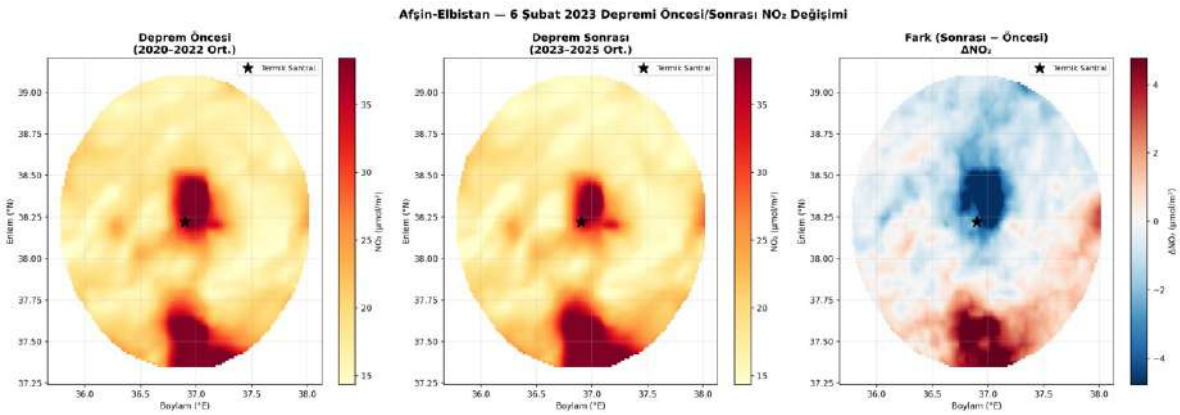
K.Maraş Merkez istasyonunun daha yüksek korelasyon (r=0.652) sergilemesi, şehir merkezindeki yoğun trafik ve sanayi kaynaklı emisyonların TROPOMI'de daha güçlü ve tutarlı bir sinyal oluşturmasıyla açıklanmaktadır. Elbistan istasyonunda rüzgar yönüne bağlı emisyon taşınımının değişkenliği korelasyonu bir ölçüde zayıflatmaktadır. Her iki değer de istatistiksel olarak anlamlı (p<0.001) olup bölgesel NO_2 trendlerinin uydu verisiyle güvenilir biçimde izlenebildiğini göstermektedir.

4.4 Yıllık NO_2 Trendi ve 6 Şubat 2023 Depremi'nin Etkisi

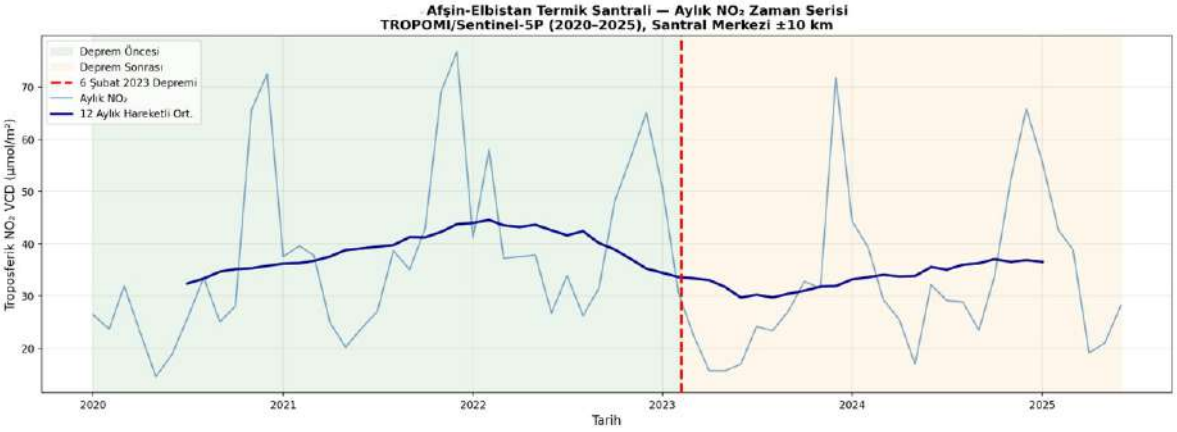
Yıllık NO_2 değerleri ve yer istasyonu ölçümleri Çizelge 4'te, uzamsal dağılım Şekil 1-2'de, downscaled haritalar Şekil 8'de ve trend grafiği Şekil 9'da sunulmaktadır.

Çizelge 4. Yıllık NO_2 özet istatistikleri ve WHO aşım oranları (* 6 Şubat 2023 deprem yılı).

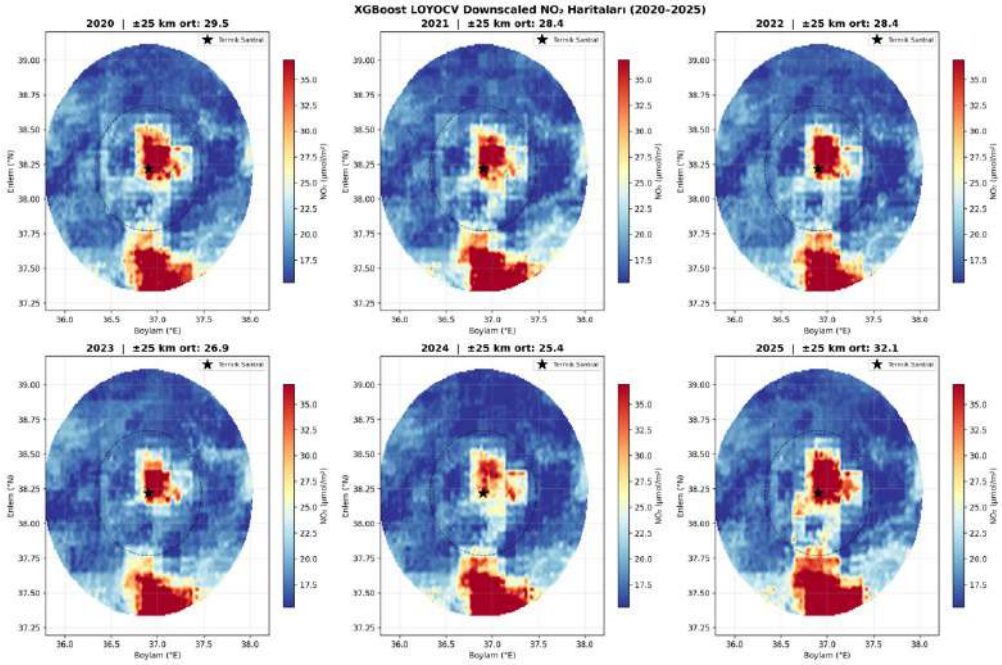
Yıl	ROI Ort. (µmol/m²)	±25 km Ort. (µmol/m²)	Elb. İst. Ort. (µg/m³)	WHO Aşım (%)
2020	20.5	29.5	33.24	99
2021	20.6	28.4	29.19	98
2022	20.2	28.4	30.29	99
2023*	20.0	26.9	29.06	97
2024	19.9	25.4	34.28	99
2025	21.2	32.1	65.81	99



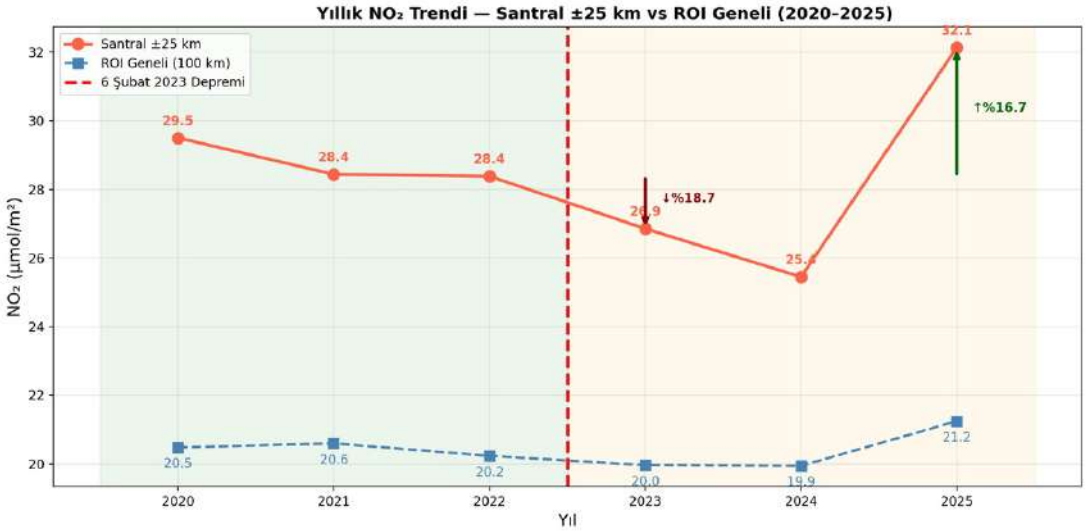
Şekil 5. Afşin-Elbistan — 6 Şubat 2023 depremi öncesi (2020–2022 ort.) ve sonrası (2023–2025 ort.) TROPOMI NO_2 dağılımı ile fark haritası (ΔNO_2). Koyu mavi santral çevresindeki belirgin NO_2 düşüşünü göstermektedir.



Şekil 6. Santral ±10 km aylık ortalama TROPOMI NO_2 zaman serisi (2020–2025). Koyu mavi çizgi 12 aylık hareketli ortalamayı göstermektedir. Deprem sonrası belirgin düşüş ve 2025'teki toparlanma açıkça izlenebilmektedir.



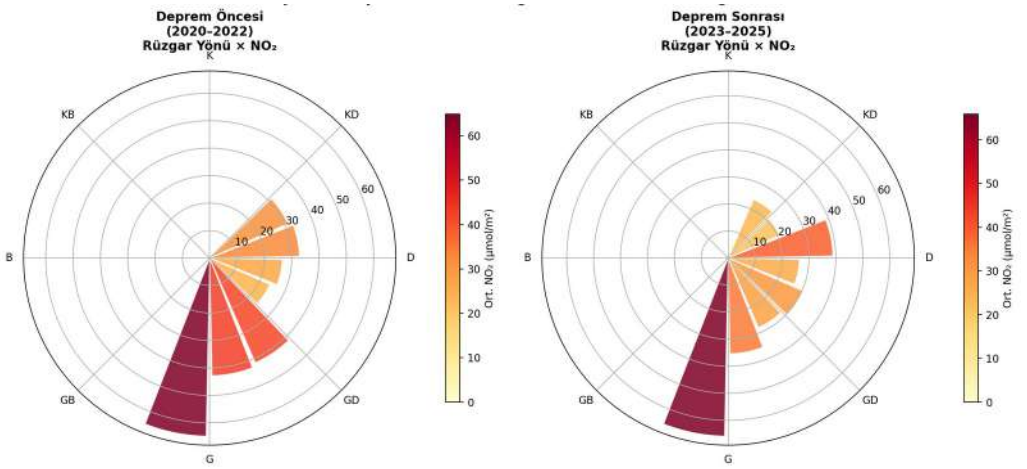
Şekil 7. XGBoost LOYOCV downscaled NO_2 haritaları (2020–2025). Başlıklardaki değerler santral ±25 km ortalama NO_2'yi (µmol/m²) göstermektedir. 2023'teki belirgin azalma ve 2025'teki rekor yükseliş haritada açıkça görülmektedir.



Şekil 8. Yıllık NO_2 trendi — santral ±25 km (kırmızı) ve ROI geneli (mavi). Deprem öncesi döneme kıyasla 2023'te %18.7 azalma, 2025'te ise %16.7 artış gözlemlenmektedir.

Santral ±25 km etki alanında yıllık ortalama NO_2, ROI genelinden (19.9-21.2 µmol/m²) sürekli olarak 8-11 µmol/m² daha yüksek seyretmiştir. Bu kalıcı fark, termik santralin bölgesel NO_2 yüküne yaptığı doğrudan ve ölçülebilir katkının somut kanıtıdır. 6 Şubat 2023 depremi sonrasında santral çevresindeki NO_2, deprem öncesi döneme (2020-2022 ort.: 28.8 µmol/m²) kıyasla 2023'te %18.7 azalarak 26.9 µmol/m²'ye gerilemiştir. Bu düşüşün hava koşullarından değil santral altyapısındaki aksaklıktan kaynaklandığı, windrose analizinde her iki dönem için rüzgar rejiminin benzer seyretmesiyle teyit edilmiştir. Toparlanma hızlı gerçekleşmiş; 2024'te 25.4 µmol/m² ile neredeyse deprem öncesi seviyelere dönülmüş, 2025'te ise 32.1 µmol/m² ile dönem rekoru kırılmıştır. Bu hızlı toparlanma ve rekor yükseliş, santralin tam kapasiteye döndüğünü ve olası ek üretim yüklerini işaret etmektedir. Sentinel-1 SAR backscatter analizi, deprem bölgesinde ortalama -0.56 dB değişim ölçerek yapısal hasarı bağımsız olarak teyit etmiştir (Şekil 11).

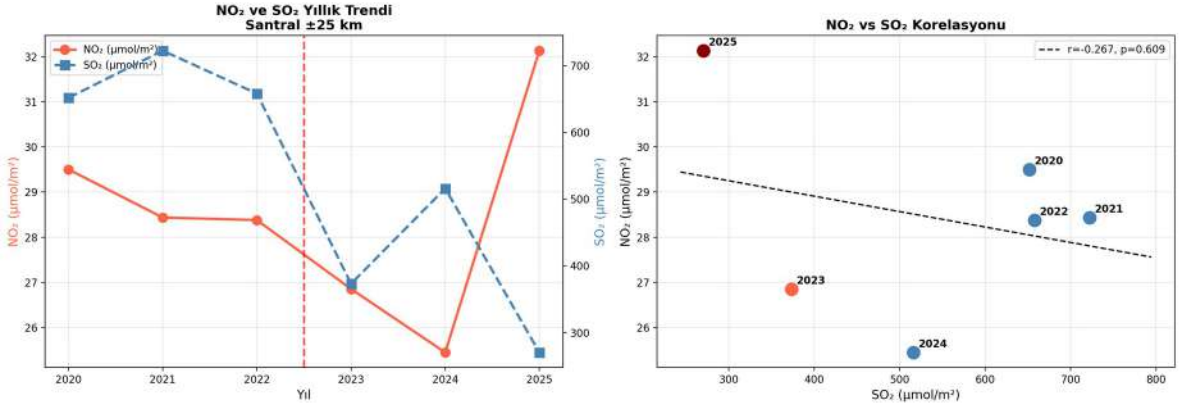
4.5 Rüzgar Yönü ve Emisyon Plumu



Şekil 9. Afşin-Elbistan — rüzgar yönüne göre ortalama NO_2 dağılımı (windrose): deprem öncesi 2020–2022 (sol) ve deprem sonrası 2023–2025 (sağ). Baskın güney-güneybatı yönünde en yüksek NO_2 değerleri yoğunlaşmaktadır.

Windrose analizi, her iki dönemde de baskın rüzgar yönünün güney ve güneybatı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, santralin emisyon plumunun ağırlıklı olarak kuzey yönünde, yani Elbistan ilçe merkezi ve çevre yerleşim alanlarına doğru taşındığını göstermektedir. Deprem sonrası windrose'da aynı rüzgar rejiminin sürmesi, 2023'teki NO_2 düşüşünün meteorolojik bir değişimden değil santral faaliyetlerindeki aksaklıktan kaynaklandığını doğrulayan önemli bir kanıt sunmaktadır.

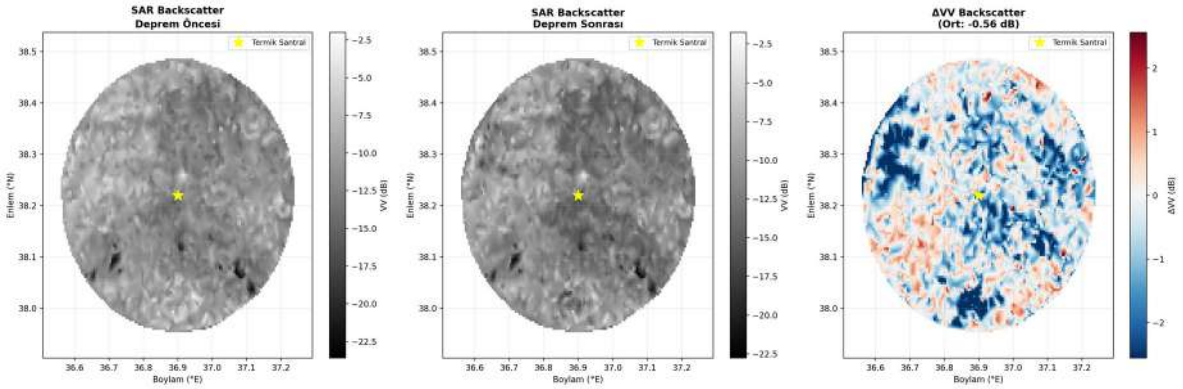
4.6 TROPOMI SO_2 Çoklu Kirletici Analizi



Şekil 10. Afşin-Elbistan — çoklu kirletici analizi: NO_2 ve SO_2 yıllık trendi (sol) ve korelasyon scatter plot (sağ). NO_2 yükselirken SO_2'nin azalması dikkat çekici bir ayrışmaya işaret etmektedir.

TROPOMI SO_2 VCD analizi, NO_2 trendinden belirgin biçimde ayrışan bir tablo ortaya koymuştur: NO_2 yıllar içinde artarken SO_2 değerleri azalmaktadır. Bu ayrışma, baca gazı desülfürizasyon (FGD) sistemlerinin SO_2 kontrolündeki etkinliğini doğrularken, seçici katalitik redüksiyon (SCR) gibi NO_x azaltım mekanizmalarının henüz yeterince devreye alınmadığına işaret etmektedir. Beirle vd. (2021) tarafından geliştirilen NO_x akı diverjans yöntemiyle tutarlı olarak, bu bulgu Afşin-Elbistan için NO_x-özel emisyon azaltım politikalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

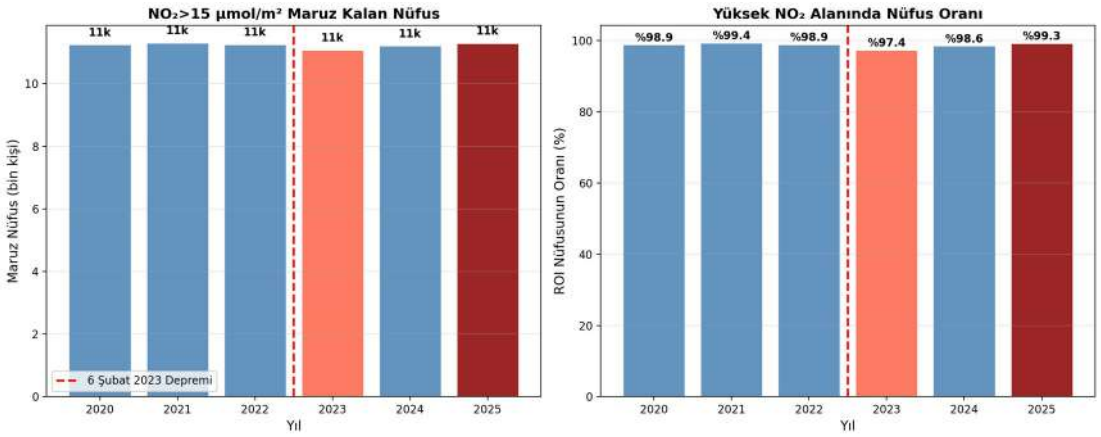
4.7 Sentinel-1 SAR Analizi



Şekil 11. Sentinel-1 SAR backscatter analizi — deprem öncesi (sol), deprem sonrası (orta) ve ΔVV fark haritası (sağ). Ortalama -0.56 dB backscatter değişimi deprem kaynaklı yapısal hasarla örtüşmektedir.

Fark haritasında bölge genelinde mavi rengin (negatif ΔVV) baskın olduğu görülmektedir. Negatif backscatter değişimi, yüzey pürüzlülüğünün azalması, zemin çökmesi ya da yapısal hasar ile ilişkilendirilmektedir. Wang vd. (2023) tarafından 2023 Kahramanmaraş depremleri için Sentinel-1 ile gerçekleştirilen hasar tespiti çalışmasıyla tutarlı olan bu bulgu, uydu SAR verilerinin deprem etkisinin bağımsız doğrulanmasında güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

4.8 Nüfus Maruziyet Analizi



Şekil 12. WorldPop + TROPOMI downscaled — nüfus NO_2 maruziyet analizi (2020–2025). Sol: NO_2>15 µmol/m² alanında maruz kalan nüfus (bin kişi); sağ: ROI nüfusuna oranı.

WorldPop nüfus ızgarasıyla entegre edilen maruziyet değerlendirmesi, çalışma alanındaki ~11.000 kişinin %97-99'unun her yıl WHO NO_2 kılavuz değerini aşan konsantrasyonlara kronik biçimde maruz kaldığını ortaya koymuştur. Elbistan yer istasyonunda 2025 yılı ortalaması 65.81 µg/m³ ile WHO sınırının 6.5 katına, Kasım 2025'te ise tek günde 196.16 µg/m³'e ulaşılmıştır. Ramacher ve Karl (2020), dinamik nüfus maruziyet modellerinin statik yaklaşımlara kıyasla NO_2 maruziyetini %12 daha yüksek tahmin ettiğini göstermiştir; bu bulgu gerçek maruziyetin burada raporlanan değerlerin de üzerinde olabileceğine işaret etmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu Bu çalışma, yer tabanlı hava kalitesi gözlem altyapısının sınırlı olduğu büyük linyit yakıtlı termik santral bölgelerinde, çok kaynaklı uydu uzaktan algılama verileri ile makine öğrenmesi yöntemlerinin bütünleşik kullanımının etkili bir metodolojik yaklaşım sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın temel bulguları aşağıda özetlenmiştir:

• LOYOCV sonuçlarına göre her iki makine öğrenmesi modeli de tüm yıllarda R^2>0,86 düzeyinde yüksek performans göstermiş, 2023 deprem yılı için de R^2=0,89 değerine ulaşılmıştır. XGBoost modeli (ortalama LOYOCV R^2=0,906), CatBoost modeline (R^2=0,896) kıyasla görece daha yüksek performans göstermiş; ancak modeller arasındaki farkın yıllara göre değiştiği ve genel olarak sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir.

• SHAP analizi, GEOS_NO_2 değişkeninin her iki modelde de en etkili yordayıcı değişken olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, fizik tabanlı atmosfer kimyası modeli çıktılarının makine öğrenmesi tabanlı NO_2 tahminlerinde önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

• 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin ardından, santral merkezinin 25 km yarıçaplı çevresinde NO_2 düzeylerinde %18,7 oranında azalma gözlenmiştir. 2025 yılında ise 32,1 µmol/m² ile incelenen dönemin en yüksek

yıllık değeri kaydedilmiştir. Uydu tabanlı bulguların, Elbistan (r=0,509) ve Kahramanmaraş Merkez (r=0,652) hava kalitesi gözlem istasyonları ile Sentinel-1 SAR verilerinden (-0,56 dB) elde edilen sonuçlarla genel olarak tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir.

• SO_2 düzeylerinde gözlenen azalma, baca gazı desülfürizasyon sistemlerinin etkisiyle ilişkili olabilecek bir eğilime işaret ederken, NO_2 düzeylerindeki artış NO_x azaltım uygulamalarının etkinliğinin ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, çalışma alanı nüfusunun %97–99'unun WHO tarafından önerilen yıllık ortalama NO_2 kılavuz değerinin üzerindeki konsantrasyonlara maruz kaldığı belirlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda; derin öğrenme tabanlı zaman serisi modelleme yaklaşımlarının uygulanması, 2025 yılı kış döneminde gözlenen yüksek NO_2 değerlerinin meteorolojik koşullarla ilişkisinin ayrıntılı olarak incelenmesi, Türkiye'deki diğer termik santral bölgeleriyle karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirilmesi ve hava kirliliğine bağlı sağlık etkilerinin epidemiyolojik modeller aracılığıyla değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Eskes, H., Kumar, V., de Laat, A. ve Wagner, T., 2021. Catalog of NOx emissions from point sources as derived from the divergence of the NO_2 flux for TROPOMI. Earth System Science Data, 13(9): 4167-4201.

Chen, T. ve Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference, San Francisco, syf: 785-794.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. ve Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202: 18-27.

Kim, M., Brunner, D. ve Kuhlmann, G., 2021. Importance of satellite observations for high-resolution mapping of near-surface NO_2 by machine learning. Remote Sensing of Environment, 264: 112573.

Lamsal, L.N., Martin, R.V., van Donkelaar, A., Steinbacher, M., Celarier, E.A., Bucsela, E., Dunlea, E.J. ve Pinto, J.P., 2010. Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D16): D16308.

Lee, H.J., Liu, Y. ve Chatfield, R.B., 2023. Neighborhood-scale ambient NO_2 concentrations using TROPOMI NO_2 data: Applications for spatially comprehensive exposure assessment. Science of the Total Environment, 857: 159342.

Liu, F., Page, A., Strode, S.A., Yoshida, Y., Choi, S., Zheng, B., Lamsal, L.N., Li, C., Krotkov, N.A., Eskes, H., van der A, R., Veefkind, P., Levelt, P.F., Hauser, O.P. ve Joiner, J., 2020. Abrupt decline in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19. Science Advances, 6(28): eabc2992.

Liu, Z., Zhan, C., Hu, X. ve Fu, D., 2024. Explainability of machine learning-based methods for predicting surface NO_2 concentrations using satellite remote sensing. Atmospheric Environment, 318: 120234.

Lundberg, S.M. ve Lee, S.I., 2017. A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems, 30: 4765-4774.

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A.V. ve Gulin, A., 2018. CatBoost: Unbiased boosting with categorical features. Advances in Neural Information Processing Systems, 31: 6638-6648.

Ramacher, M.O.P. ve Karl, M., 2020. Integrating modes of transport in a dynamic modelling approach to evaluate population exposure to ambient NO_2 and PM2.5 pollution in urban areas. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(6): 2099.

Stirnberg, R., Cermak, J., Kotthaus, S., Haeffelin, M., Andersen, H., Fuchs, J., Kim, M., Petit, J.E. ve Favez, O., 2021. Meteorology-driven variability of air pollution (PM1) revealed with explainable machine learning. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(5): 3919-3948.

Veefkind, J.P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H.J., de Haan, J.F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., Vink, R., Visser, H. ve Levelt, P.F., 2012. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations. Remote Sensing of Environment, 120: 70-83.

Wang, X., Feng, G., He, L., An, Q., Xiong, Z., Lu, H., Wang, W., Li, N., Zhao, Y., Wang, Y. ve Wang, Y., 2023. Evaluating urban building damage of 2023 Kahramanmaras, Turkey earthquake sequence using SAR change detection. Sensors, 23(14): 6342.

WHO, 2021. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. World Health Organization, Cenevre.

Yu, M. ve Liu, Q., 2021. Deep learning-based downscaling of tropospheric nitrogen dioxide using ground-level and satellite observations. Science of the Total Environment, 773: 145145.

UZAKTAN ALGILAMA TABANLI SPEKTRAL İNDEKSLERLE KAMPÜS EKOSİSTEMLERİNDE YEŞİL ALAN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN ZAMANSAL VE MEKÂNSAL ANALİZİ

Korcan ALPAN[1]

[1]Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, k.alpan2022@gtu.edu.tr

ÖZET

Üniversite kampüsleri, doğal ve yapay alanların bir arada bulunduğu ve arazi kullanım değişimlerinin çevresel etkilerinin izlenebildiği önemli kentsel ekosistemlerdir. Bu alanlarda yeşil alanlar ile yapılaşmış yüzeyler arasındaki dengenin korunması, sürdürülebilir arazi yönetimi ve kampüs planlaması açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda çalışma, Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü ve yakın çevresindeki bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerini Sentinel-2 Level-2A görüntüleri üzerinden zamansal ve mekânsal olarak değerlendirerek yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutuna ilişkin göstergeler sunmayı amaçlamaktadır. Analiz kapsamında, 2015 ve 2025 yıllarının Temmuz aylarına ait Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ve Normalize Edilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (NDBI) hesaplanmış; diferansiyel indeksler (ΔNDVI ve ΔNDBI) üretilerek yeniden sınıflandırma yoluyla alan bazlı değişimler nicel olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen Yeşil Alan Sürdürülebilirlik Skoru (YASS) ile ΔNDVI ve ΔNDBI bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, çalışma alanındaki değişimlerin büyük ölçüde düşük şiddetli ve mekânsal olarak heterojen olduğunu göstermektedir. ΔNDVI sonuçlarına göre alanın %63,35'i belirgin değişim göstermeyen sınıfta yer alırken, düşük ve yüksek azalış sınıflarının toplamı %17,75, düşük ve yüksek artış sınıflarının toplamı ise %18,90 olarak belirlenmiştir. ΔNDBI sonuçlarına göre ise alanın %63,64'ü belirgin değişim göstermeyen sınıfta yer alırken, düşük ve yüksek azalış sınıflarının toplamı %26,74, düşük ve yüksek artış sınıflarının toplamı ise %9,62 olarak tespit edilmiştir. YASS değeri 52,06 olarak hesaplanmış ve bu sonuç 2015–2025 döneminde yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel göstergeleri açısından nötr düzeyin hafif üzerinde olumlu bir değişim dengesine işaret etmiştir. Sonuç olarak, çalışma alanındaki yapılaşmanın yoğunlaşmaktan çok mekânsal yayılım gösterdiği, bitki örtüsü değişimlerinin ise çoğunlukla düşük şiddetli ve yerel ölçekte farklılaştığı belirlenmiştir. Uzaktan algılama tabanlı spektral indekslerin YASS ile birlikte değerlendirilmesi, kampüs ölçeğinde çevresel değişimlerin izlenmesi ve sürdürülebilir planlama süreçlerinin desteklenmesi açısından uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Değişim analizi, Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Normalize Edilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (NDBI), Sentinel-2, Yeşil Alan Sürdürülebilirlik Skoru (YASS)

ABSTRACT

TEMPORAL AND SPATIAL ANALYSIS OF GREEN SPACE SUSTAINABILITY IN CAMPUS ECOSYSTEMS USING REMOTE SENSING-BASED SPECTRAL INDICES

University campuses are important urban ecosystems where natural and built-up areas coexist and where the environmental impacts of land-use changes can be monitored. Maintaining the balance between green spaces and built-up surfaces in these areas is important for sustainable land management and campus planning. Accordingly, this study aims to provide indicators related to the environmental dimension of green space sustainability by temporally and spatially evaluating vegetation and built-up changes within the Gebze Technical University campus and its surrounding area using Sentinel-2 Level-2A imagery. Within the scope of the analysis, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) were calculated for July 2015 and July 2025; differential indices (ΔNDVI and ΔNDBI) were then generated, and area-based changes were quantitatively identified through reclassification. In addition, ΔNDVI and ΔNDBI were evaluated in an integrated manner using the Green Space Sustainability Score (GSSS), which was specifically developed within the scope of this study. The findings indicate that changes across the study area were predominantly low in magnitude and spatially heterogeneous. According to the ΔNDVI results, 63.35% of the area was classified as showing no significant change, while the combined proportion of the low and high decrease classes was 17.75%, and the combined proportion of the low and high increase classes was 18.90%. According to the ΔNDBI results, 63.64% of the area was classified as showing no significant change, while the combined proportion of the low and high decrease classes was 26.74%, and the combined proportion of the low and high increase classes was 9.62%. The GSSS value was calculated as 52.06, indicating a slightly positive change balance above the neutral level in terms of the environmental indicators of green space sustainability during the 2015–2025 period. Overall, the results indicate that built-up development in the study area exhibited spatial expansion rather than intensification, while vegetation changes were predominantly low in magnitude and varied locally. The integrated evaluation of remote sensing-based spectral indices together with GSSS provides an applicable approach for monitoring environmental changes at the campus scale and supporting sustainable planning processes.

Keywords: Change analysis, Green Space Sustainability Score (GSSS), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Sentinel-2

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan kentleşme ve kentsel nüfus, arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerini hızlandırarak özellikle kentsel ekosistemlerde yeşil alanlar üzerinde önemli çevresel baskılar oluşturmaktadır (Kabisch vd., 2019). Doğal alanların yerini yapılaşmış yüzeylerin alması, yeşil alanların azalması ve mekânsal sürekliliğin bozulması ekosistem hizmetlerini zayıflatmakta; bu nedenle kentsel değişimlerin izlenmesi sürdürülebilir planlama açısından önem taşımaktadır. Uzaktan algılama, söz konusu değişimlerin zamansal ve mekânsal olarak izlenmesine olanak sağlarken Sentinel-2 verileri geniş kapsama alanı, yüksek zamansal çözünürlüğü ve vejetasyon haritalamadaki kullanım potansiyeliyle kentsel yeşil alan analizlerinde etkili bir veri kaynağı sunmaktadır (Ludwig vd., 2021).

Literatürde kentsel yeşil alan değişimlerinin uzaktan algılama teknikleriyle incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kabisch vd. (2019), çok zamanlı ve çok sensörlü veriler aracılığıyla yapılaşma, toprak sızdırmazlığı ve yeşil alan değişimlerinin izlenebileceğini göstermiştir. Kowe vd. (2021) ise kentsel yeşil alanların zamanla parçalanarak daha küçük ve izole alanlara dönüşebildiğini ve bunun ekosistem sürekliliğini olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, kentsel yeşil alan dinamiklerinin zamansal ve mekânsal olarak izlenmesinin önemini göstermektedir.

Kentsel yeşil alanlar çevresel işlevlerinin yanı sıra insan sağlığı ve yaşam kalitesi açısından da önem taşımaktadır. Kondo vd. (2018), yeşil alanlara erişimin fiziksel aktiviteyi destekleyebildiğini ve insan sağlığı üzerinde çeşitli olumlu etkiler sağlayabildiğini; Kwon vd. (2021) ise yeşil alan miktarı ile toplumların mutluluk düzeyi arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca Aram vd. (2019), yeşil alanların kentsel ısı adası etkisini azaltarak mikroklimanın düzenlenmesine katkı sağladığını belirtmiştir.

Uzaktan algılama teknikleri, geniş alanların hızlı, ekonomik ve tekrarlanabilir biçimde incelenmesine olanak sağlamakta ve spektral indeksler aracılığıyla arazi örtüsü özelliklerinin nicel olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır (Xie vd., 2008). Rouse vd. (1974) tarafından geliştirilen ve kırmızı ile yakın kızılötesi (NIR) bantlar arasındaki yansıma farkına dayanan Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), bitki örtüsünün varlığı ve yoğunluğunun izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında Zha vd. (2003) tarafından önerilen Normalize Edilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (NDBI), yapılaşmış yüzeylerin belirlenmesinde etkili bir gösterge olarak kullanılmaktadır. NDVI ve NDBI'nin birlikte değerlendirilmesi, bitki örtüsü ve yapılaşmış yüzeylerde meydana gelen değişimlerin birbirini tamamlayan iki çevresel gösterge üzerinden incelenmesine olanak sağlamaktadır.

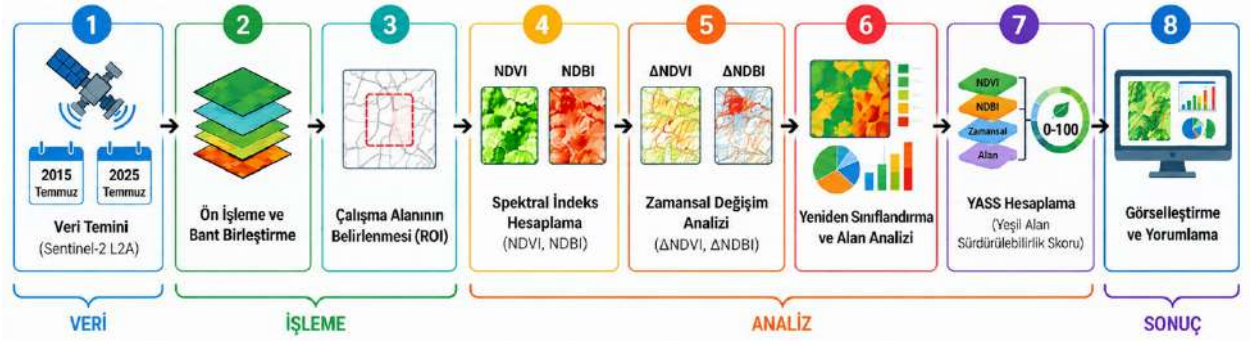
Sentinel-2 gibi yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüğe sahip uydu verilerinin yaygınlaşması, bu tür analizlerin daha ayrıntılı ve düzenli biçimde gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır (Phiri vd., 2020). Bununla birlikte üniversite kampüsleri gibi doğal ve yapay unsurların iç içe geçtiği alanlarda gerçekleştirilen zamansal ve mekânsal analizlerin literatürde görece sınırlı olduğu görülmektedir. Kampüs alanları, kentsel ekosistem dinamiklerinin daha küçük ölçeklerde incelenebilmesi açısından uygun araştırma ortamları sunmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, üniversite kampüsleri ve yakın çevrelerindeki bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerini uzaktan algılama tabanlı spektral indeksler aracılığıyla zamansal ve mekânsal olarak inceleyerek yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutuna ilişkin göstergeler sunmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, NDVI ve NDBI tabanlı değişimlerin bütünleşik olarak değerlendirilmesine olanak sağlamak amacıyla bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen Yeşil Alan Sürdürülebilirlik Skoru (YASS) kullanılmıştır. Böylece çalışma, kampüs ölçeğinde çevresel değişimlerin izlenmesinin yanı sıra, yeşil alan sürdürülebilirliğine ilişkin zamansal değişim dengesinin nicel bir gösterge üzerinden değerlendirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. METODOLOJİ

Bu çalışmada izlenen metodolojik süreç, uydu verilerinin temini ile başlayarak ön işleme, çalışma alanının belirlenmesi ve spektral indekslerin hesaplanması aşamalarını kapsamaktadır. Bu doğrultuda, 2015 ve 2025 yıllarına ait Sentinel-2 Level-2A görüntülerinden NDVI ve NDBI değerleri elde edilmiş ve iki dönem arasındaki zamansal değişimin ortaya konulabilmesi amacıyla diferansiyel indeksler (ΔNDVI ve ΔNDBI) hesaplanmıştır. Elde edilen indeks ve diferansiyel indeks sonuçları yeniden sınıflandırılarak bitki örtüsü ve yapılaşma düzeyleri ile zamansal değişimin yönü ve şiddeti sınıfsal olarak değerlendirilmiş; ardından her bir sınıfa ait alansal büyüklükler ve yüzdesel dağılımlar hesaplanarak sonuçlar nicel olarak ortaya konulmuştur.

Bununla birlikte, diferansiyel indeks sınıflarının yön, şiddet ve alansal dağılım bilgilerinin tek bir bütünleşik gösterge üzerinden değerlendirilmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen YASS hesaplanmıştır. YASS aracılığıyla NDVI ve NDBI tabanlı zamansal değişim sonuçları ortak bir değerlendirme çerçevesinde birleştirilerek, çalışma alanındaki değişimlerin yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutu açısından göreli değişim dengesi nicel olarak ifade edilmiştir. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek çalışma alanındaki değişimler zamansal ve mekânsal açıdan yorumlanmıştır. Çalışma kapsamında izlenen metodolojik iş akışı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada İzlenen Metodolojik İş Akışı

2.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri Seti

Çalışma alanı olarak, Kocaeli ilinin Gebze ilçesinde yer alan Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) kampüsü ve yakın çevresi seçilmiştir. Söz konusu alan, doğal ve yapay yüzeylerin bir arada bulunduğu dinamik bir arazi örtüsü yapısına sahip olup, kentsel ekosistemlerde meydana gelen değişimlerin izlenmesi açısından uygun bir örneklem alanı oluşturmaktadır. Kampüs içerisinde geniş yeşil alanlar, yapılaşmış bölgeler, ulaşım ağları ve açık toprak yüzeylerin birlikte bulunması, farklı arazi örtüsü bileşenlerinin spektral özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikler, çalışma alanını bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin izlenmesi ve yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutuna ilişkin değerlendirmeler açısından uygun kılmaktadır.

Bununla birlikte, Sentinel-2 verilerinin piksel temelli yapısı ve kampüs ölçeğinde sunduğu mekânsal ayrıntı göz önünde bulundurularak çalışma alanı yalnızca kampüs sınırlarıyla sınırlandırılmamış, yakın çevreyi de kapsayacak biçimde genişletilmiştir. Böylece kampüs sınırına komşu arazi örtüsü bileşenlerinin analize dâhil edilmesi, farklı arazi örtüsü bileşenlerinin daha dengeli temsil edilmesi ve kampüs içerisindeki değişimlerin yakın çevredeki arazi örtüsü dinamikleriyle birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, çalışma alanındaki arazi örtüsü değişimlerinin daha bütüncül biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır. Çalışma alanının bölgesel konumu ve detaylı uydu görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışma Alanının Bölgesel Konumu ve Gebze Teknik Üniversitesi Kampüsü ile Yakın Çevresine Ait Uydu Görüntüsü

Çalışmada kullanılan veri seti, Copernicus Data Space Ecosystem kapsamında sağlanan Sentinel-2 uydu görüntülerinden oluşturulmuştur. Analizlerde, atmosferik düzeltmeleri gerçekleştirilmiş Sentinel-2 Level-2A ürünleri kullanılmıştır. Zamansal karşılaştırılabilirliğin artırılması amacıyla 30 Temmuz 2015 ve 29 Temmuz 2025 tarihlerine ait, aynı mevsimsel dönemi temsil eden görüntüler tercih edilmiştir. Böylece fenolojik ve mevsimsel farklılıklardan kaynaklanabilecek etkilerin sınırlandırılması ve iki dönem arasındaki değişimin daha tutarlı biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan Sentinel-2 ürünlerine ilişkin bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Sentinel-2 Ürünlerine İlişkin Bilgiler

Ürün Kimliği (Kısaltılmış)	Uydu	Ürün Seviyesi	Görüntü Tarihi
S2A_MSIL2A_20150730_T35TPF	Sentinel-2A	Level-2A	30.07.2015
S2A_MSIL2A_20250729_T35TPF	Sentinel-2A	Level-2A	29.07.2025

Sentinel-2 görüntülerinde yer alan farklı spektral bantlar, analiz sürecine uygun bütünleşik bir veri yapısı oluşturmak amacıyla ENVI programı üzerinde katman istifleme yöntemiyle birleştirilmiştir. Farklı özgün mekânsal çözünürlüklere sahip bantlar, indeks hesaplamaları öncesinde en yakın komşuluk yeniden örnekleme yöntemi kullanılarak ortak 10 m piksel boyutuna getirilmiş ve mekânsal olarak uyumlu hâle getirilmiştir. Bu işlem, farklı mekânsal çözünürlüklere sahip bantların ortak bir grid yapısı üzerinde birlikte analiz edilebilmesini sağlamıştır. Katman istifleme işleminin ardından görüntüler, belirlenen çalışma alanı sınırları esas alınarak kırpılmış ve sonraki analiz aşamalarında kullanılmak üzere düzenli ve işlenebilir bir veri seti oluşturulmuştur.

2.2 Kullanılan Spektral İndeksler

Bu çalışmada, kampüs ekosisteminde meydana gelen arazi örtüsü değişimlerinin belirlenmesi amacıyla uzaktan algılama tabanlı spektral indekslerden yararlanılmıştır. Spektral indeksler, farklı bant kombinasyonları kullanılarak belirli yüzey özelliklerini ön plana çıkaran ve özellikle bitki örtüsü ile yapılaşmış yüzeylerin analizinde yaygın olarak kullanılan etkili yöntemlerdir (Xue ve Su, 2017).

Çalışma kapsamında NDVI ve NDBI olmak üzere iki temel spektral indeks kullanılmıştır. Bu indeksler sırasıyla bitki örtüsü yoğunluğu ve yapılaşma düzeyini temsil ederek çalışma alanındaki çevresel değişimlerin birbirini tamamlayan iki gösterge üzerinden değerlendirilmesine temel oluşturmuştur. NDVI bitki örtüsü durumunun, NDBI ise yapılaşma düzeyinin izlenmesine yönelik göstergeler olarak değerlendirilmiş; bu iki indeksin diferansiyel sonuçları daha sonra YASS kapsamında bütünleşik olarak ele alınmıştır.

NDVI, kırmızı (Red; B4) ve yakın kızılötesi (NIR; B8) bantlar arasındaki farkın normalize edilmesiyle elde edilen ve bitki örtüsünün varlığı, yoğunluğu ve gelişim durumu hakkında bilgi sağlayan yaygın spektral indekslerden biridir. Bitki örtüsünün spektral özelliklerine duyarlı olması nedeniyle arazi örtüsü ve vejetasyon değişimlerinin izlenmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır (Huang vd., 2021; Glenn vd., 2008). NDBI ise yapılaşmış alanların belirlenmesinde kullanılan ve kısa dalga kızılötesi-1 (SWIR1; B11) ile NIR bantları arasındaki fark üzerinden hesaplanan bir indekstir. Yapılaşmış yüzeylerin spektral özelliklerinden yararlanarak yapılaşma düzeyinin ve zamansal değişiminin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zha vd., 2003). Bu çalışmada kullanılan NDVI ve NDBI indekslerine ait matematiksel ifadeler sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de sunulmuştur.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \tag{1}$$

$$NDBI = \frac{(SWIR1 - NIR)}{(SWIR1 + NIR)} \tag{2}$$

İndeks hesaplamaları, ENVI programı üzerinde 2015 ve 2025 yıllarına ait Sentinel-2 görüntüleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Zamansal değişimin belirlenmesi amacıyla 2025 yılına ait indeks değerlerinden 2015 yılına ait değerler çıkarılarak ΔNDVI ve ΔNDBI elde edilmiş ve indekslerdeki artış ile azalışlar piksel bazında değerlendirilmiştir.

Hesaplanan indeks ve diferansiyel indeksler, çalışma alanındaki bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin mekânsal olarak değerlendirilmesinde kullanılmıştır. İndeks ve diferansiyel indeks sonuçlarına yeniden sınıflandırma uygulanarak bitki örtüsü ve yapılaşma sınıfları ile değişim sınıflarının alansal dağılımları belirlenmiştir. Ayrıca, ΔNDVI ve ΔNDBI sınıflarının yön, şiddet ve alansal dağılım bilgilerinin bütünleştirilmesi amacıyla bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen YASS hesaplanmıştır. Böylece bitki örtüsü ve yapılaşma değişimleri, yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutu açısından tek bir tamamlayıcı nicel gösterge üzerinden değerlendirilmiştir.

2.3 Yeşil Alan Sürdürülebilirlik Skoru (YASS)

Çalışma kapsamında, bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinden elde edilen bulguların tek bir bütünleşik gösterge üzerinden değerlendirilmesi amacıyla YASS özgün olarak geliştirilmiştir. YASS, literatürde mevcut standart bir sürdürülebilirlik indeksinin doğrudan uygulanmasına dayanmayan, ΔNDVI ve ΔNDBI sonuçlarını ortak bir değerlendirme çerçevesinde bütünleştiren çalışmaya özel bir göstergedir.

YASS, çalışma alanının belirli bir tarihteki mutlak bitki örtüsü, yapılaşma veya genel sürdürülebilirlik düzeyini değil, 2015–2025 dönemindeki bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutu açısından oluşturduğu göreli değişim dengesini ifade etmektedir. Bu nedenle hesaplamada yıllara ait doğrudan NDVI ve NDBI değerleri yerine ΔNDVI ve ΔNDBI esas alınmıştır. ΔNDVI ve ΔNDBI sonuçları "yüksek azalış", "düşük azalış", "belirgin değişim yok", "düşük artış" ve "yüksek artış" olmak üzere beş sınıfta değerlendirilmiştir. Değişimin yönü ve göreli şiddetinin hesaba katılması amacıyla düşük şiddetli sınıflara mutlak değeri 1, yüksek şiddetli sınıflara mutlak değeri 2 olan ağırlıklar atanmış, "belirgin değişim yok" sınıfı ise 0 ile temsil edilmiştir.

ΔNDVI ve ΔNDBI'nin yeşil alan sürdürülebilirliği açısından taşıdığı anlam farklı olduğundan, ağırlık yönleri iki indeks için ters tanımlanmıştır. ΔNDVI artışı olumlu, ΔNDVI azalışı olumsuz; ΔNDBI artışı olumsuz, ΔNDBI azalışı ise olumlu yönde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, ΔNDVI sınıfları yüksek azalıştan yüksek artışa doğru −2, −1, 0, +1 ve +2; ΔNDBI sınıfları ise +2, +1, 0, −1 ve −2 olarak ağırlıklandırılmıştır. Her bir diferansiyel indeks için ağırlıklı değişim puanı, ilgili sınıfın çalışma alanındaki yüzdesel payı ile sınıf ağırlığının çarpılması ve tüm sınıflar için elde edilen değerlerin toplanmasıyla hesaplanmıştır. ΔNDVI ve ΔNDBI için ağırlıklı değişim puanlarının matematiksel gösterimi sırasıyla Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'te verilmiştir.

$$S_{\Delta NDVI} = \sum_{i=1}^{5} p_{\Delta NDVI,i} w_{\Delta NDVI,i} \tag{3}$$

$$S_{\Delta NDBI} = \sum_{i=1}^{5} p_{\Delta NDBI,i} w_{\Delta NDBI,i} \tag{4}$$

Eşitliklerde yer alan $p_{\Delta NDVI,i}$ ve $p_{\Delta NDBI,i}$ ilgili değişim sınıfının yüzdesel payını; $w_{\Delta NDVI,i}$ ve $w_{\Delta NDBI,i}$ ise sınıfa atanan YASS ağırlığını ifade etmektedir. Sınıf ağırlıklarının −2 ile +2 arasında değişmesi nedeniyle, her bir indeks için teorik ağırlıklı değişim puanı −200 ile +200 arasında değer alabilmektedir. Negatif değerler yeşil alan sürdürülebilirliği açısından olumsuz, pozitif değerler olumlu, sıfır değeri ise dengeli veya nötr bir değişim durumunu ifade etmektedir.

ΔNDVI ve ΔNDBI göstergelerinden herhangi birinin diğerine göre öncelikli olduğuna ilişkin bağımsız bir ağırlıklandırma ölçütü bulunmadığından, iki indeks eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmiştir. Birleşik ağırlıklı değişim puanı Eşitlik (5) ile hesaplanmış ve −200 ile +200 arasındaki değer aralığı Eşitlik (6) kullanılarak 0–100 ölçeğine dönüştürülmüştür.

$$S_{YASS} = \frac{S_{\Delta NDVI} + S_{\Delta NDBI}}{2} \tag{5}$$

$$YASS = 50 + \frac{S_{YASS}}{4} \tag{6}$$

Bu doğrusal dönüşüm sonucunda, birleşik ağırlıklı değişim skorunda $S_{YASS}=0$ olan nötr durum YASS ölçeğinde 50 değerine karşılık gelmektedir. YASS değerinin 50'nin üzerinde olması, incelenen dönem içerisinde yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel göstergeleri açısından olumlu değişimlerin ağırlık kazandığını; 50'nin altında olması ise olumsuz değişimlerin baskın olduğunu göstermektedir. Değerin 50'den uzaklaşma derecesi, değişim dengesinin yönüyle birlikte göreli büyüklüğünün yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte YASS, çalışma alanının sosyal, ekonomik veya yönetsel sürdürülebilirlik bileşenlerini içermediğinden, elde edilen değer alanın genel veya mutlak sürdürülebilirlik düzeyi olarak değerlendirilmemelidir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan YASS yaklaşımı, ΔNDVI ve ΔNDBI sınıflarının yön ve şiddet bilgilerini ortak bir ölçek altında birleştirmek amacıyla oluşturulmuştur. Dolayısıyla YASS'ın temel işlevi, ayrı spektral göstergeler üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmelerin yerine geçmek değil; söz konusu göstergelerden elde edilen zamansal değişim bilgisini yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutu açısından tek bir tamamlayıcı nicel değer ile özetlemektir.

3. UYGULAMA VE BULGULAR

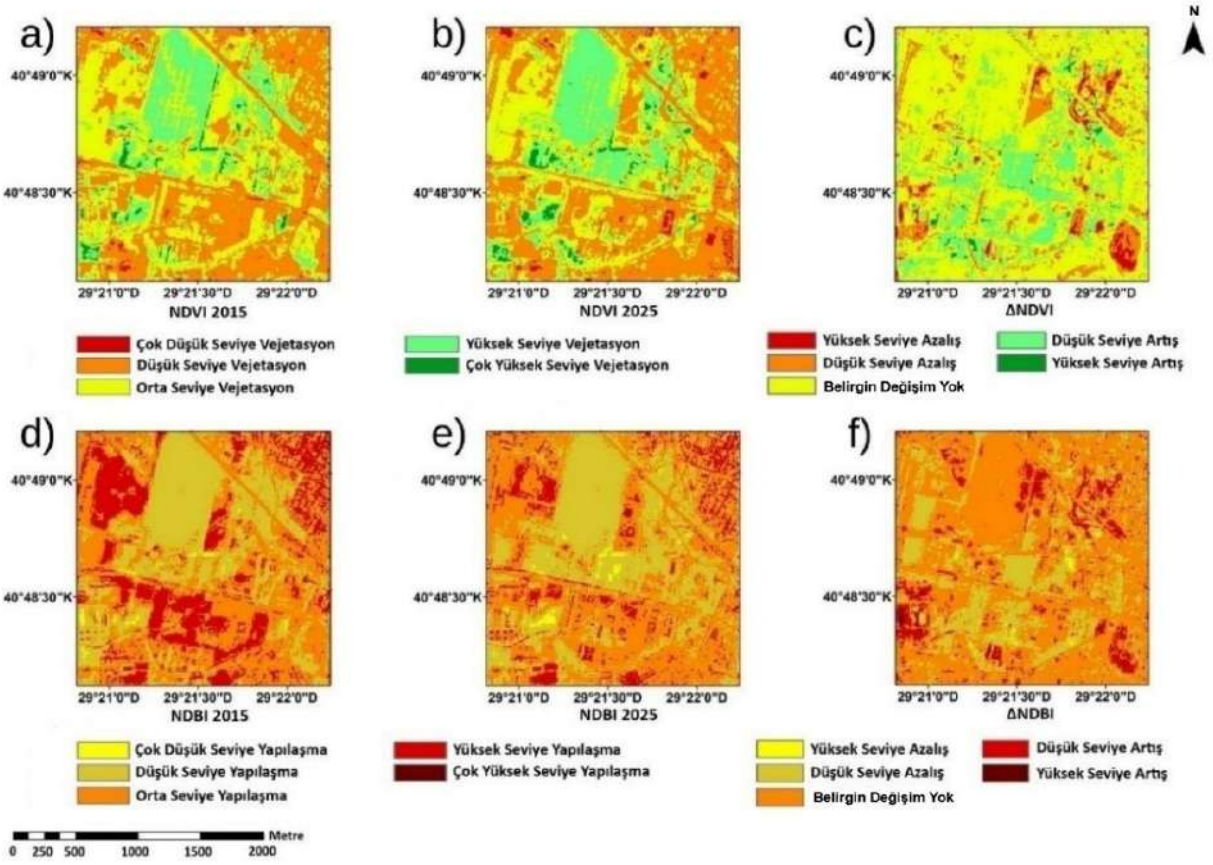
Çalışma kapsamında, 2015 ve 2025 yıllarına ait Sentinel-2 uydu görüntülerinden NDVI ve NDBI indeksleri hesaplanmış, zamansal değişimin belirlenmesi amacıyla 2025 yılı değerlerinden 2015 yılı değerleri çıkarılarak ΔNDVI ve ΔNDBI sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen indeks ve diferansiyel indeks sonuçları, farklı dönemlerin ve indekslerin daha sistematik biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla yeniden sınıflandırılarak sınıfsal bir yapıya dönüştürülmüştür.

Yeniden sınıflandırma aşamasında kullanılan eşik değerleri, spektral indekslerin teorik özellikleri, literatürdeki yaygın kullanım biçimleri ve çalışma alanına ait veri dağılımı birlikte değerlendirilerek belirlenmiştir. NDVI ve NDBI gibi normalize edilmiş fark indekslerinin -1 ile +1 arasında değişen değer aralıklarına sahip olduğu ve farklı arazi örtüsü bileşenlerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Xue ve Su, 2017; Glenn vd., 2008). Bu kapsamda NDVI vejetasyon yoğunluğu, NDBI ise yapılaşma düzeyiyle ilişkilendirilmiştir (Rouse vd., 1974; Zha vd., 2003).

Çalışmada elde edilen NDVI ve NDBI indeks değerleri, karşılaştırmalı yorumlamayı kolaylaştırmak amacıyla vejetasyon ve yapılaşma seviyelerine göre “çok yüksek”, “yüksek”, “orta”, “düşük” ve “çok düşük” olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Eşik değerler belirlenirken indekslerin teorik özellikleri ve veri dağılımları birlikte değerlendirilmiş; NDVI ve NDBI için kendi değer dağılımlarına uygun ayrı sınıf aralıkları oluşturulmuştur.

Diferansiyel indekslerde ise 0 değeri referans alınmış, negatif değerler azalışı, pozitif değerler ise artışı temsil edecek şekilde yorumlanmıştır. Kabisch vd. (2019), kentsel arazi örtüsü değişimlerinin izlenmesinde sensör ve görüntüleme koşullarından kaynaklanabilecek küçük farklılıkların belirsizlik oluşturabileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, düşük düzeyli spektral farklılıkların belirgin değişim olarak yorumlanmasını önlemek amacıyla diferansiyel indekslerde -0,05 ile +0,05 aralığı “belirgin değişim yok” sınıfı olarak kabul edilmiştir.

Bu işlemler sonucunda, her iki yıla ait indeksler ile bu indekslerden türetilen diferansiyel indeks sonuçları belirlenen eşik değerlerine göre sınıflandırılmış ve toplam altı adet sınıflandırılmış indeks haritası elde edilmiştir. Bu haritalar, bitki örtüsü ve yapılaşmış yüzeylerin mekânsal dağılımı ile iki dönem arasındaki değişimlerin daha belirgin biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. NDVI ve NDBI indekslerine ve bunların diferansiyellerine ait haritalar, tek bir bütüncül görsel hâlinde Şekil 3’te sunulmuş ve alt başlıklar hâlinde düzenlenmiştir.



Şekil 3. Yeniden Sınıflandırılmış Haritalar: a) NDVI 2015; b) NDVI 2025; c) ΔNDVI; d) NDBI 2015; e) NDBI 2025; f) ΔNDBI

Elde edilen haritalar incelendiğinde, 2015 ve 2025 yıllarına ait yeniden sınıflandırılmış indeks haritalarının genel olarak benzer bir dağılım sergilediği, ancak belirli bölgelerde sınıfsal geçişlerin meydana geldiği görülmektedir. NDVI haritalarında vejetasyonun parçalı ve heterojen bir yapı gösterdiği, NDBI haritalarında ise yapılaşmanın belirli alanlarda yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. İki indeks birlikte değerlendirildiğinde, bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin çalışma alanında aynı ölçüde ve aynı yönde gerçekleşmediği, değişimlerin mekânsal olarak farklı örüntüler sergilediği anlaşılmaktadır. Diferansiyel haritalar ise bu değişimlerin büyük ölçüde düşük seviyede gerçekleştiğini ve yerel ölçekte farklılaştığını ortaya koymaktadır.

Bu mekânsal örüntülerin nicel karşılığını ortaya koymak amacıyla, yeniden sınıflandırma işlemi sonrasında her bir sınıfa ait alansal büyüklükler hesaplanmış, ardından bu alanların çalışma alanı içerisindeki yüzdesel dağılımları belirlenmiştir. Böylece çalışma alanındaki bitki örtüsü ve yapılaşma bileşenlerinin zamansal değişimi alan bazında karşılaştırılmış ve iki dönem arasındaki farklılıklar daha belirgin biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, NDVI ve NDBI üzerinden bitki örtüsü ve yapılaşma özelliklerinin hem mevcut durumunu hem de zaman içerisindeki değişimini birlikte incelemeye olanak sağlamıştır. Bu kapsamda, 2015 ve 2025 yıllarına ait NDVI ve NDBI sınıflarının yüzdesel dağılımları ve değişim türleri sırasıyla Çizelge 2 ve Çizelge 3'te; ΔNDVI ve ΔNDBI'ye ait değişim sınıflarının yüzdesel dağılımları ise Çizelge 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2. NDVI Sınıflarının Zamansal Değişimi

Sınıf	2015 (%)	2025 (%)	Değişim Türü
Çok Düşük Vejetasyon	0,78	1,81	Artış
Düşük Vejetasyon	41,35	44,02	Artış
Orta Vejetasyon	38,89	33,01	Azalış
Yüksek Vejetasyon	17,43	19,24	Artış
Çok Yüksek Vejetasyon	1,55	1,92	Artış

NDVI sonuçları değerlendirildiğinde, 2015–2025 yılları arasında vejetasyon dağılımında belirgin sınıfsal değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Özellikle düşük ve çok düşük vejetasyon sınıflarındaki artış, çalışma alanının bazı kesimlerinde bitki örtüsü yoğunluğunun zaman içerisinde azalmış olabileceğine işaret etmektedir. Buna karşılık,

yüksek ve çok yüksek vejetasyon sınıflarındaki artış, belirli bölgelerde vejetasyon yoğunluğunun korunduğunu veya artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Orta seviye vejetasyon sınıfındaki azalış ise bu sınıfa ait alanların zaman içerisinde daha düşük ya da daha yüksek vejetasyon sınıflarına geçiş yapmış olabileceğini düşündürmektedir. Bu dağılım, çalışma alanındaki vejetasyon değişiminin tek yönlü ve homojen bir süreçten ziyade, farklı bölgelerde farklı yön ve şiddetlerde gerçekleşen heterojen bir yapı sergilediğini göstermektedir. Dolayısıyla NDVI bulguları, çalışma alanının bütününde genel bir vejetasyon artışı veya azalışından söz etmek yerine, yerel ölçekte farklılaşan ve sınıflar arası geçişlerle karakterize edilen bir değişim yapısına işaret etmektedir.

Çizelge 3. NDBI Sınıflarının Zamansal Değişimi

Sınıf	2015 (%)	2025 (%)	Değişim Türü
Çok Düşük Yapılaşma	0,55	0,94	Artış
Düşük Yapılaşma	33,15	39,39	Artış
Orta Yapılaşma	45,34	48,93	Artış
Yüksek Yapılaşma	20,93	10,68	Azalış
Çok Yüksek Yapılaşma	0,03	0,06	Artış

NDBI sonuçları ve bunların mekânsal dağılımı birlikte değerlendirildiğinde, 2015–2025 yılları arasında yapılaşma düzeyinde dikkat çekici sınıfsal değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Özellikle düşük ve orta seviye yapılaşma sınıflarındaki artış, yapılaşmış yüzeylerin çalışma alanında daha geniş bir mekânsal dağılım göstermeye başladığına işaret etmektedir. Buna karşılık, yüksek seviye yapılaşma sınıfındaki belirgin azalış, yüksek yapılaşma düzeyine sahip alanların göreli payının azaldığını veya bu alanların daha düşük yapılaşma sınıflarına geçiş göstermiş olabileceğini düşündürmektedir. Çok düşük ve çok yüksek yapılaşma sınıflarında gözlenen sınırlı değişimler ise uç sınıflardaki dönüşümün daha düşük düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu dağılım, yapılaşma değişimlerinin yalnızca yoğunluğun artması biçiminde değil, aynı zamanda farklı yapılaşma düzeyleri arasında gerçekleşen geçişler ve daha geniş alanlara yayılan mekânsal örüntüler üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak NDBI sonuçları, çalışma alanındaki yapılaşmanın tek merkezli bir yoğunlaşmadan ziyade daha dağınık ve sınıfsal olarak farklılaşan bir değişim yapısı sergilediğini göstermektedir.

Çizelge 4. Diferansiyel İndekslere Göre Değişim Türleri

Değişim Türü	ΔNDVI (%)	ΔNDBI (%)
Yüksek Azalış	2,66	0,52
Düşük Azalış	15,09	26,22
Belirgin Değişim Yok	63,35	63,64
Düşük Artış	18,20	9,23
Yüksek Artış	0,70	0,39

Diferansiyel indeks sonuçları, çalışma alanının büyük bir bölümünde belirgin bir değişim yaşanmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, ΔNDVI'da düşük seviyeli artış ve azalışların öne çıktığı, ΔNDBI'da ise düşük seviyeli azalışların daha baskın olduğu görülmektedir. İki indeks birlikte değerlendirildiğinde, bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin çalışma alanında aynı yönde ve aynı şiddette gerçekleşmediği; değişimlerin mekânsal olarak farklı örüntüler sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, çalışma alanının genel yapısının büyük ölçüde korunmasına karşın, belirli bölgelerde yerel ölçekte ve çoğunlukla düşük şiddetli çevresel değişimlerin meydana geldiğini ortaya koymaktadır.

Diferansiyel indekslere ait değişim sınıflarının yön, şiddet ve alansal dağılım bilgilerinin ortak bir değerlendirme çerçevesinde bütünleştirilmesi amacıyla, YASS hesaplanmıştır. Bu kapsamda, Çizelge 4'te yer alan ΔNDVI ve ΔNDBI sınıflarının yüzdesel alan dağılımları, ilgili sınıflara atanan ağırlıklarla birlikte değerlendirilmiştir. YASS'ın hesaplanması için uygulanan işlem adımları Eşitlik (7), Eşitlik (8), Eşitlik (9) ve Eşitlik (10)'da verilmiştir.

$$S_{\Delta NDVI} = (-2 * 2{,}66) + (-1 * 15{,}09) + (0 * 63{,}35) + (1 * 18{,}20) + (2 * 0{,}70) = -0{,}81 \quad (7)$$

$$S_{\Delta NDBI} = (2 * 0{,}52) + (1 * 26{,}22) + (0 * 63{,}64) + (-1 * 9{,}23) + (-2 * 0{,}39) = 17{,}25 \quad (8)$$

$$S_{YASS} = \frac{-0{,}81 + 17{,}25}{2} = 8{,}22 \quad (9)$$

$$YASS = 50 + \frac{8,22}{4} = 52,06 \quad (10)$$

Bu eşitliklere göre çalışma alanı için YASS değeri 52,06 olarak hesaplanmıştır. YASS ölçeğinde 50 değerinin nötr referans düzeyini temsil etmesi dikkate alındığında, elde edilen sonuç 2015–2025 döneminde yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel göstergeleri açısından nötr düzeyin hafif üzerinde olumlu bir değişim dengesi bulunduğunu göstermektedir. Bu sonucun oluşmasında, ΔNDVI değişimlerinin genel olarak dengeli bir yapı sergilemesine karşılık ΔNDBI azalışlarının ΔNDBI artışlarına göre daha geniş bir alanda görülmesi etkili olmuştur.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elde edilen bulgular, çalışma alanındaki arazi örtüsü bileşenlerinde 2015–2025 döneminde büyük ölçüde düşük şiddetli ve mekânsal olarak heterojen değişimlerin meydana geldiğini göstermektedir. Diferansiyel indeks sonuçları, alanın büyük bir bölümünde belirgin değişim yaşanmadığını, buna karşılık düşük seviyeli artış ve azalışların farklı bölgelerde dağıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, alanın genel olarak görece kararlı bir yapı sergilediğini, ancak yerel ölçekte sınırlı çevresel ve antropojenik değişimlerin meydana geldiğini düşündürmektedir. Farklı spektral indekslerin birlikte kullanılması, kentsel alanlardaki değişimlerin birbirini tamamlayan göstergeler üzerinden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Zheng vd., 2021).

NDVI sonuçları, bitki örtüsü değişimlerinin heterojen ancak çoğunlukla düşük şiddetli olduğunu göstermektedir. Düşük seviyeli vejetasyon sınıflarındaki artış bazı alanlarda bitki örtüsü yoğunluğunun azaldığına, yüksek sınıflardaki artış ise belirli bölgelerde vejetasyon gelişiminin sürdüğüne işaret etmektedir. Nitekim literatürde, kentsel vejetasyon parçalanmasının yeşil alanların daha küçük ve izole parçalara dönüşmesine yol açabildiği vurgulanmaktadır (Kowe vd., 2021). Bununla birlikte, her bir yıl için yaz dönemine ait tek tarihli görüntülerin kullanılması nedeniyle bitki fenolojisi, sulama ve kısa süreli çevresel koşulların NDVI değerleri üzerinde belirli ölçüde etkili olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

NDBI sonuçları, yapılaşmanın yoğunlaşmaktan ziyade alansal yayılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Düşük ve orta seviye yapılaşma sınıflarındaki artış yapılaşmanın daha geniş alanlara yayıldığını, yüksek yapılaşma sınıfındaki azalış ise sınıflar arası geçişleri düşündürmektedir. Nitekim kentsel alanlarda yapılaşma artışı ve geçirimsiz yüzeylerin genişlemesi, arazi örtüsü değişimlerinin önemli belirleyicileri arasında değerlendirilmekte ve yeşil alan kaybı ile ilişkilendirilmektedir (Zha vd., 2003; Kabisch vd., 2019).

NDVI ve NDBI birlikte değerlendirildiğinde, bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin çalışma alanının tamamında birebir ters bir örüntü sergilemediği, yerel ölçekte farklılaştığı görülmektedir. Bu durum, değişimlerin yalnızca yapılaşma baskısıyla değil, yerel çevresel koşullar, arazi yönetimi uygulamaları ve mevcut arazi örtüsü özellikleriyle de şekillenebileceğini düşündürmektedir. NDVI'nın vejetasyon yoğunluğu ve kanopi yeşilliği ile ilişkili olduğu dikkate alındığında, çalışma alanında gözlenen farklılaşmaların bitki örtüsü koşullarındaki yerel değişimlerle ilişkili olduğu değerlendirilebilir (Glenn vd., 2008).

Bu çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen YASS, ΔNDVI ve ΔNDBI sınıflarının yön, şiddet ve alansal dağılım bilgilerinin bütünleşik olarak değerlendirilmesini sağlamıştır. Hesaplanan 52,06 YASS değeri, 50 olarak tanımlanan nötr referans düzeyinin hafif üzerinde yer almakta ve 2015–2025 döneminde yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel göstergeleri açısından sınırlı düzeyde olumlu bir değişim dengesine işaret etmektedir. Bununla birlikte YASS, çalışma alanının mutlak sürdürülebilirlik düzeyini değil, iki referans tarih arasındaki göreli çevresel değişim dengesini temsil etmektedir.

Sonuç olarak, NDVI ve NDBI indekslerinin diferansiyel analiz ve yeniden sınıflandırma sonuçlarının, ΔNDVI ve ΔNDBI değerlerinden elde edilen YASS ile birlikte değerlendirilmesi, kampüs ve yakın çevresindeki bitki örtüsü ve yapılaşma değişimlerinin zamansal ve mekânsal olarak ortaya konulmasına ve yeşil alan sürdürülebilirliğinin çevresel boyutunun nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, Sentinel-2 verilerinin mekânsal çözünürlüğü heterojen yüzeylerde piksel karışımı etkisine yol açabilmekte, analizlerin iki referans tarih üzerinden gerçekleştirilmesi ise yıl içi ve mevsimsel değişkenliğin tam olarak temsil edilmesini sınırlayabilmektedir. Ayrıca, değerlendirmelerin NDVI, NDBI ve bu indekslerden türetilen diferansiyel göstergelerle sınırlı tutulması, ekosistem değişimini etkileyen farklı çevresel bileşenlerin kapsamlı biçimde temsil edilmesini kısıtlayan bir unsur olarak değerlendirilebilir.

Gelecek çalışmalarda daha yüksek mekânsal çözünürlüklü ve çok tarihli verilerin kullanılması, farklı çevresel özellikleri temsil eden ek spektral indekslerin analize dâhil edilmesi ve bu indekslerin YASS hesaplamasına entegre edilmesi, değerlendirme çerçevesinin güçlendirilmesine ve ekosistem koşullarının daha bütüncül biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, YASS yaklaşımının farklı çalışma alanlarında, farklı dönemlere ait veri setleri,

alternatif indeks kombinasyonları ve farklı ağırlıklandırma yaklaşımları kullanılarak sınanması, yöntemin tutarlılığının, genellenebilirliğinin ve farklı çevresel koşullara uyarlanabilirliğinin değerlendirilmesine olanak sağlayabilir. Bunun yanı sıra, uzaktan algılama bulgularının arazi gözlemleri ve planlama verileriyle desteklenmesi, elde edilen sonuçların doğrulanabilirliğini ve yorumlama gücünü artırabilir.

Bu yönüyle çalışma, uzaktan algılama tabanlı spektral indeksler ile bütünleşik bir değerlendirme yaklaşımını bir araya getirerek kampüs ekosistemlerinde yeşil alan sürdürülebilirliğinin izlenmesine yönelik uygulanabilir ve geliştirilebilir bir çerçeve sunmaktadır. Aynı zamanda, farklı veri setleri ve çevresel göstergelerle geliştirilebilecek bu yaklaşımın, benzer alanlarda gerçekleştirilecek sürdürülebilirlik ve değişim izleme çalışmalarına da katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma fikrinin oluşmasında katkı sağlayan, kurucu üyesi olduğum GTÜ Sürdürülebilirlik Uygulama ve Araştırma Topluluğu'na teşekkür ederim. Çalışmanın akademik bir nitelik kazanması sürecinde, GTÜ Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri lisansüstü programı kapsamında aldığım FBE501 Bilimsel Araştırma Teknikleri ve Yayın Etiği dersi çerçevesinde değerli katkı ve yönlendirmeleri için Doç. Dr. İsmail Çölkesen'e ayrıca teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Aram, F., Higueras García, E., Solgi, E. ve Mansournia, S., 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4): e01339. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L. ve Nelson, S. G., 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4): 2136–2160. https://doi.org/10.3390/s8042136

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y. ve Shao, G., 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1): 1–6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

Kabisch, N., Selsam, P., Kirsten, T., Lausch, A. ve Bumberger, J., 2019. A multi-sensor and multi-temporal remote sensing approach to detect land cover change dynamics in heterogeneous urban landscapes. *Ecological Indicators*, 99: 273–282. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.033

Kondo, M. C., Fluehr, J. M., McKeon, T. ve Branas, C. C., 2018. Urban green space and its impact on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3): 445. https://doi.org/10.3390/ijerph15030445

Kowe, P., Mutanga, O. ve Dube, T., 2021. Advancements in the remote sensing of landscape pattern of urban green spaces and vegetation fragmentation. *International Journal of Remote Sensing*, 42(10): 3797–3832. https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1881185

Kwon, O.-H., Hong, I., Yang, J., Wohn, D. Y., Jung, W.-S. ve Cha, M., 2021. Urban green space and happiness in developed countries. *EPJ Data Science*, 10: 28. https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-021-00278-7

Ludwig, C., Hecht, R., Lautenbach, S., Schorcht, M. ve Zipf, A., 2021. Mapping public urban green spaces based on OpenStreetMap and Sentinel-2 imagery using belief functions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4): 251. https://doi.org/10.3390/ijgi10040251

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y. ve Ranagalage, M., 2020. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14): 2291. https://doi.org/10.3390/rs12142291

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. ve Harlan, J. C., 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. NASA CR-144661. Texas A&M University, Remote Sensing Center.

Xie, Y., Sha, Z. ve Yu, M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1): 9–23. https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005

Xue, J. ve Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017: 1353691. https://doi.org/10.1155/2017/1353691

Zha, Y., Gao, J. ve Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3): 583–594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Zheng, Y., Tang, L. ve Wang, H., 2021. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328: 129488. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488

HAVRAN ALTIN MADENİ SAHASINDA MADENCİLİK VE REHABİLİTASYON SÜREÇLERİNİN UZAKTAN ALGILAMA İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Seda Kara [1], Filiz Sunar [2]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, karas18@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, fsunar@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Balıkesir ili Havran ilçesinde yer alan altın madeni sahasında madencilik faaliyetlerinin bitki örtüsü, çıplak toprak yüzeyi ve genel ekolojik kalite üzerindeki etkileri ile rehabilitasyon sürecindeki iyileşme uzaktan algılama yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında 2000–2025 dönemine ait toplam 181 Landsat-5 TM ve Landsat-8 OLI uydu görüntüsü kullanılarak Google Earth Engine platformunda zaman serisi analizi gerçekleştirilmiştir. Madencilik öncesi, madencilik dönemi ve rehabilitasyon sonrası süreçlerde arazi yüzeyindeki değişimleri belirlemek amacıyla Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI), Çıplak Toprak İndeksi (BSI), Bozulma İndeksi (DI) ve Modifiye Edilmiş Uzaktan Algılama Ekolojik İndeksi (mRSEI) hesaplanmıştır. NDVI, BSI ve DI indeksleri bitki örtüsü kaybı, çıplak toprak artışı ve yüzey bozulmasını ayrı ayrı değerlendirmek için kullanılırken, mRSEI farklı ekolojik bileşenleri bütünleşik olarak analiz ederek maden sahasındaki çevresel bozulma ve iyileşme dinamiklerinin daha kapsamlı biçimde yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular, madencilik faaliyetlerinin başlamasından kısa süre sonra DI değerinin yaklaşık −2,5'ten +0,6'ya yükseldiğini ve mRSEI değerinin yaklaşık 0,50'den 0,30 seviyelerine gerilediğini göstermektedir. Bu değişim, bitki örtüsü kaybı, yüzey bozulması ve ekolojik kalite azalması ile ilişkilendirilmiştir. Rehabilitasyon sürecinin ilerleyen yıllarında ise DI ve BSI değerlerinde azalma, NDVI ve mRSEI değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, referans alan ve meteorolojik değişkenlere dayalı ayrı bir analiz yapılmadığından, gözlenen iyileşmenin rehabilitasyon uygulamaları ile doğal ve iklimsel değişkenlerin göreli katkıları birbirinden ayrıştırılamamıştır. Sonuçlar, Landsat tabanlı spektral indekslerin ve mRSEI yaklaşımının madencilik kaynaklı çevresel bozulmanın ve madencilik sonrası iyileşme eğilimlerinin izlenmesi açısından etkili araçlar olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Altın madenciliği, Rehabilitasyon, Landsat, mRSEI, Bozulma İndeksi, Zaman serisi analizi

ABSTRACT

REMOTE SENSING-BASED ASSESSMENT OF MINING AND REHABILITATION PROCESSES IN THE HAVRAN GOLD MINE, TÜRKİYE

In this study, the effects of gold mining activities on vegetation cover, bare soil surface, and overall ecological quality, as well as the recovery process during rehabilitation, were evaluated using remote sensing methods in a gold mining area located in Havran district of Balıkesir Province, Türkiye. Within the scope of the study, time series analysis was carried out on the Google Earth Engine platform using a total of 181 Landsat-5 TM and Landsat-8 OLI satellite images acquired between 2000 and 2025. To determine land surface changes during the pre-mining, mining, and post-rehabilitation periods, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Bare Soil Index (BSI), Disturbance Index (DI), and modified Remote Sensing Ecological Index (mRSEI) were calculated. While NDVI, BSI, and DI were used to separately assess vegetation loss, increase in bare soil, and surface disturbance, mRSEI enabled a more comprehensive interpretation of environmental degradation and recovery dynamics in the mining area by integrating different ecological components. The findings indicate that shortly after the initiation of mining activities, DI increased from approximately −2.5 to +0.6, while mRSEI decreased from about 0.50 to 0.30, indicating substantial land surface degradation and a decline in ecological quality. In the following years of the rehabilitation process, DI and BSI values decreased, whereas NDVI and mRSEI values increased. However, because no separate analysis based on a reference area and meteorological variables was conducted, the relative contributions of rehabilitation practices and natural or climatic variability to the observed recovery could not be distinguished. The results demonstrate that Landsat-based spectral indices and the mRSEI approach are effective tools for monitoring mining-induced environmental degradation and post-mining recovery trends.

Keywords: Gold mining, Rehabilitation, Landsat, mRSEI, Disturbance Index, Time-series analysis

1. GİRİŞ

Altın, elektronik, finans ve mücevherat gibi birçok sektörde ekonomik değeri yüksek ve yaygın olarak kullanılan bir metaldir. Artan küresel talebi karşılamak amacıyla altın çoğunlukla açık ocak madenciliğiyle çıkarılmakta; ancak bu yöntem, büyük miktarda toprak ve kayanın kaldırılmasına bağlı olarak peyzaj değişimi, doğal bitki örtüsü kaybı ve yüzey suyu sistemlerinde bozulma gibi ciddi çevresel etkilere yol açabilmektedir (Mencho, 2022). Türkiye'deki altın madenciliği faaliyetlerinin çevresel etkileri de farklı çalışma alanları kapsamında ele alınmıştır (Gülersoy, 2008).

Ayrıca maden atık ve pasa depolama alanları ise madencilik sonrasında dahi ekolojik risk oluşturmaya devam edebilmektedir (BRGM, 2001).

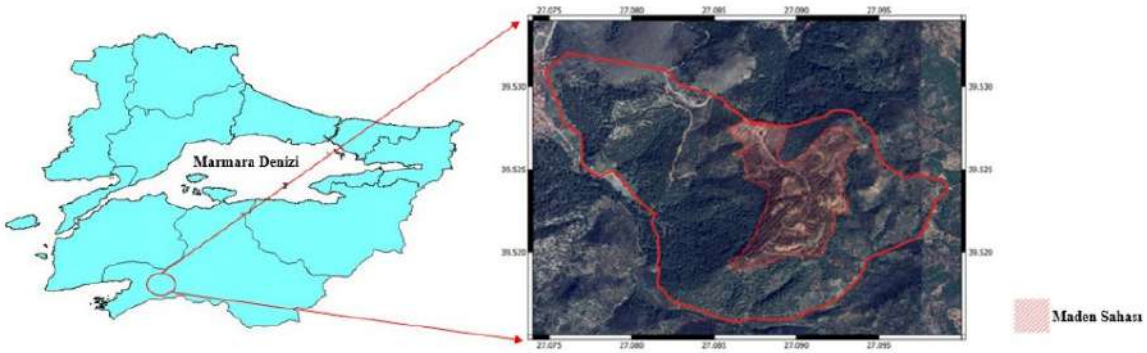
Bir sahanın ekonomik değeri tükendiğinde, etkilenen peyzaj çoğu zaman bozulmuş bir durumda bırakılır. Aktif rehabilitasyon olmaksızın doğal iyileşme süreçleri genellikle yavaş ve eksiktir; bu durum özellikle üst toprağın kaldırıldığı veya kirliliğin devam ettiği alanlarda daha belirgindir. Bu nedenle, madencilik sonrası rehabilitasyon sürdürülebilir madencilik uygulamalarının kritik bir bileşeni haline gelmiştir. Maden faaliyetleri sonucunda bozulan alanların rehabilitasyonu, yüzey koşullarının iyileştirilmesi ve bitki örtüsünün yeniden gelişiminin sağlanmasını içeren ve başarısı zamansal olarak izlenebilen bir süreçtir (Bell, 2015). Rehabilitasyonun temel amacı yalnızca bitki örtüsünü yeniden oluşturmak değil, aynı zamanda ekosistem fonksiyonlarını, toprak stabilitesini ve biyolojik çeşitliliği mümkün olduğunca eski durumuna yaklaştırmaktır.

Bununla birlikte, rehabilitasyon uygulamalarının etkinliğinin izlenmesi önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Maden sahalarının genellikle uzak veya dağlık alanlarda yer alması, saha çalışmalarına dayalı değerlendirmelerin zamansal ve mekânsal açıdan sınırlı kalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, madencilik sonrası peyzajların dinamik yapısı, bitki örtüsü sağlığı ve toprak stabilitesindeki değişimlerin düzenli olarak izlenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda uzaktan algılama teknolojileri, arazi örtüsü değişimlerinin belirlenmesi ve uzun dönemli zamansal eğilimlerin izlenmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır (Rogan ve Chen, 2004). Uzun dönemli uydu zaman serileri, madencilik faaliyetlerinin neden olduğu bitki örtüsü bozulmalarının ve rehabilitasyon sonrasındaki iyileşmenin izlenmesinde de kullanılmaktadır (Yang vd., 2018). McKenna vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen küresel sistematik incelemede, Türkiye'den beşten az çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Bu durum, Türkiye'deki maden sahalarında ekosistem iyileşme süreçlerinin uzun dönemli uydu zaman serileriyle daha fazla incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada, Balıkesir ili Havran ilçesinde bulunan bir altın madeni sahasında madencilik faaliyetleri ve rehabilitasyon sürecinde bitki örtüsü, yüzey bozulması ve ekolojik kalitede meydana gelen değişimler Landsat zaman serisi verileri kullanılarak değerlendirilmiş; uzaktan algılama indeksleriyle madencilik sonrası iyileşme eğilimleri incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI & KULLANILAN VERİLER

2.1 Çalışma Alanı

Havran Altın Madeni, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin güneyinde yer alan Balıkesir ili Havran ilçesindeki Büyükdere ve Küçükdere mahalleleri sınırları içinde bulunmaktadır (Şekil 1). Bölge, Akdeniz ve karasal iklim özellikleri arasında geçiş gösteren Ege ikliminin etkisi altındadır. Doğal bitki örtüsü içerisinde meşe, kayın, gürgen, karaağaç, kocayemiş, kızılçam ve karaçam gibi türler yaygın olarak bulunmaktadır (Havran Belediyesi, 2025). Havran, altın, demir ve bakır kaynakları bakımından önemli bir madencilik potansiyeline sahiptir. İlçede yer alan Havran-Küçükdere altın yatağında ortalama 6,43 g/ton Au ve 11,8 g/ton Ag tenörlü yaklaşık 1,41 milyon ton görünür rezerv rapor edilmiştir (Güney Marmara Kalkınma Ajansı, 2011).



Şekil 1: Havran Altın Madeni çalışma alanının konumu ve maden sahası sınırları.

2.2 Kullanılan Veriler

Bitki örtüsü ve toprak yüzeyi koşullarının zamansal değişimini incelemek amacıyla bu çalışmada Landsat serisine ait multispektral uydu verilerinden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında 2000–2025 dönemini kapsayan Landsat görüntüleri Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden temin edilmiş ve işlenmiştir. 2013 yılı öncesindeki dönem için Landsat 5 TM, 2013 sonrası dönem için ise Landsat 8 OLI algılayıcılarına ait Collection 2 Tier 1 Level-2 Surface Reflectance ürünleri kullanılmıştır. Görüntü seçiminde çalışma alanı ile mekânsal olarak kesişme, Haziran–Eylül döneminde elde edilmiş olma ve sahne bazındaki bulutluluk oranının %10'un altında bulunması kriterleri uygulanmıştır. Ayrıca QA_PIXEL kalite bandından yararlanılarak bulut ve bulut gölgesi içeren pikseller analiz dışında bırakılmıştır.

Oluşturulan zaman serisi daha sonra görsel kalite ve analiz uygunluğu açısından ayrıca değerlendirilmiştir. Radyometrik veya spektral açıdan anormal davranış gösteren, veri bütünlüğü bozulmuş, belirgin artefakt içeren veya çalışma alanının yüzey özelliklerini sağlıklı biçimde temsil etmediği değerlendirilen görüntüler veri setinden çıkarılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda 23 görüntü analiz dışında bırakılmış ve nihai zaman serisi 181 Landsat görüntüsünden oluşturulmuştur. Bu yaklaşım ile uzun dönemli NDVI, BSI ve diğer spektral ve ekolojik göstergelerin hesaplanmasında düşük kaliteli veya anomalili görüntülerden kaynaklanabilecek yanıltıcı zamansal değişimlerin mümkün olduğunca azaltılması amaçlanmıştır. Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI algılayıcılarının spektral özelliklerindeki farklılıklar, uzun dönemli zaman serisinin oluşturulmasında dikkate alınmış; algılayıcı farklılıklarının analizlerde nasıl ele alındığı Bölüm 3.1'de açıklanmıştır. Her iki algılayıcıya ait temel özellikler ve spektral karakteristikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Landsat-5 TM ve Landsat-8 OLI yüzey yansıtım (SR) ürünlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması.

Teknik Özellikler	Landsat-5 TM	Landsat-8 OLI
Spektral Bantlar	6 bant SR_B1: Mavi SR_B2: Yeşil SR_B3: Kırmızı SR_B4: Yakın Kızıl Ötesi (NIR) SR_B5: SWIR1 SR_B7: SWIR2	7 bant SR_B1: Kıyı/Aerosol SR_B2: Mavi SR_B3: Yeşil SR_B4: Kırmızı SR_B5: Yakın Kızılötesi (NIR) SR_B6: SWIR1 SR_B7: SWIR2
Mekânsal Çözünürlük	30 m	30 m
Zamansal Çözünürlük	16 gün	16 gün

3. YÖNTEM

Analiz, Havran altın madeni sahası ve çevresinde, madencilik faaliyetleri sırasında ve rehabilitasyon sonrası dönemde bitki örtüsü sağlığı ile yüzey toprak koşullarındaki değişimlerin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Metodolojik akış şemasında gösterildiği üzere (Şekil 2), zaman serisi değerlendirmesi NDVI, BSI, DI ve mRSEI olmak üzere dört temel uzaktan algılama göstergesine dayandırılmıştır. NDVI bitki örtüsünün durumunu, BSI çıplak toprak koşullarını ve DI ise arazi yüzeyindeki bozulma düzeyini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. mRSEI ise bitki örtüsü, nemlilik, çıplaklık, yüzey sıcaklığı ve albedo bileşenlerini bütünleştirerek ekolojik kalite değişiminin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2: Çalışmada uygulanan yöntemin akış şeması.

3.1 Spektral Verilerin Hazırlanması

Spektral göstergelerin hesaplanmasından önce Landsat Collection 2 Level-2 optik bantlarına 0.0000275 ölçek katsayısı ve −0.2 ofset değeri uygulanarak yüzey yansıtım değerleri elde edilmiştir. Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI algılayıcılarının bant konfigürasyonlarındaki farklılıklar dikkate alınarak analizlerde kullanılan spektral bantlar her algılayıcı için ayrı ayrı tanımlanmış; NDVI ve BSI hesaplamalarında mavi, kırmızı, yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bölgelerine karşılık gelen algılayıcıya özgü bantlar kullanılmıştır. Benzer şekilde Tasseled Cap dönüşümünde de Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI için ilgili algılayıcıya özgü dönüşüm katsayıları uygulanmıştır.

Bu çalışmada TM yüzey yansıtımlarını OLI eşdeğerine veya OLI yansıtımlarını TM eşdeğerine dönüştüren bant bazlı regresyon katsayılarına dayalı ek bir algılayıcılar arası harmonizasyon uygulanmamıştır. Landsat Collection 2 ürünleri, Landsat algılayıcıları arasındaki radyometrik tutarlılığın iyileştirilmesine yönelik güncellenmiş kalibrasyonları içerdiğinden, analizlerde Collection 2 Level-2 Surface Reflectance ürünleri doğrudan kullanılmıştır (USGS, 2026). İki algılayıcıdan elde edilen görüntü koleksiyonları, algılayıcıya özgü bu işlemlerin ardından ortak zaman serisi içerisinde birleştirilmiştir. DI hesaplamasında kullanılan Tasseled Cap Brightness, Greenness ve Wetness bileşenleri ise birleştirilmiş zaman serisinin ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak standartlaştırılmıştır.

3.2 Spektral İndekslerin Hesaplanması

Ön işleme süreci tamamlanan Landsat görüntülerinden, çalışma alanındaki bitki örtüsü, yüzey nemliliği ve çıplak toprak koşullarının zamansal değişimini ortaya koymak amacıyla çeşitli spektral indeksler türetilmiştir. Bu kapsamda bitki örtüsünün durumunu temsil eden Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), kırmızı ve yakın kızılötesi bantlar kullanılarak

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{1}$$

eşitliğiyle hesaplanmıştır. Landsat 5 TM görüntülerinde NIR ve kırmızı bantlar için sırasıyla SR_B4 ve SR_B3, Landsat 8 OLI görüntülerinde ise SR_B5 ve SR_B4 kullanılmıştır. Bitki örtüsü ve yüzey nemliliğinin değerlendirilmesi amacıyla Normalize Edilmiş Fark Nem İndeksi (NDMI),

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR\,1}{NIR + SWIR\,1} \tag{2}$$

eşitliği kullanılarak üretilmiştir. NDMI hesabında Landsat 5 TM için SR_B4 ve SR_B5, Landsat 8 OLI için ise SR_B5 ve SR_B6 bantlarından yararlanılmıştır. Yüksek NDVI değerleri daha yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü, yüksek NDMI değerleri ise daha yüksek nem içeriğine sahip yüzeyleri temsil edecek şekilde değerlendirilmiştir.

Çıplak toprak ve açık yüzey koşullarının belirlenmesi amacıyla BSI,

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. BSI değerlerindeki artış, bitki örtüsünden yoksun veya çıplak yüzeylerin etkisinin artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Hesaplanan spektral göstergeler, çalışma alanındaki bitki örtüsü durumu, yüzey nemliliği ve çıplak toprak koşullarının zamansal değişimini birlikte değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve mRSEI hesabının girdileri arasında yer almıştır.

3.3 Arazi Yüzey Sıcaklığı ve Albedo

Arazi yüzeyinin termal ve yansıtım özelliklerini değerlendirmek amacıyla Arazi Yüzey Sıcaklığı (Land Surface Temperature, LST) ve Albedo göstergeleri hesaplanmıştır. LST, Landsat Collection 2 Level-2 ürünlerinin yüzey sıcaklığı bantlarından elde edilmiş; Landsat 5 TM görüntülerinde ST_B6, Landsat 8 TIRS algılayıcısında ise ST_B10 bandı kullanılmıştır. Termal bant piksel değerlerine 0.00341802 ölçek katsayısı ve 149.0 K ofseti uygulanmış, ardından 273.15 çıkarılarak sıcaklık değerleri °C birimine dönüştürülmüştür:

$$LST = (DN \times 0.00341802 + 149.0) - 273.15 \quad (4)$$

Yüzeyin kısa dalga güneş ışınımını yansıtma özelliğini temsil eden Albedo, kullanılan Landsat sensörlerine özgü bant katsayıları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Landsat 5 TM görüntüleri için Liang (2001) tarafından önerilen dar bant-geniş bant dönüşüm eşitliği kapsamında mavi, kırmızı, yakın kızılötesi (NIR), SWIR1 ve SWIR2 bantlarına ait katsayılar kullanılmış ve Albedo değerleri Eşitlik (5)'te verilen formül yardımıyla elde edilmiştir.

$$Albedo = 0.356Blue + 0.130Red + 0.373NIR + 0.085SWIR1 + 0.072SWIR2 - 0.0018 \quad (5)$$

Landsat 8 OLI görüntüleri için ise Silva vd. (2016) tarafından verilen bant ağırlık katsayıları, Collection 2 Level-2 Surface Reflectance bantlarına uygulanmıştır. Bu kapsamda mavi, yeşil, kırmızı, NIR, SWIR1 ve SWIR2 bantları kullanılarak Albedo Eşitlik (6)'ya göre hesaplanmıştır.

$$Albedo = 0.300Blue + 0.277Green + 0.233Red + 0.143NIR + 0.036SWIR1 + 0.012SWIR2 \quad (6)$$

LST ve Albedo, sırasıyla çalışma alanındaki termal koşulların ve yüzeyin kısa dalga ışınımını yansıtma özelliklerinin zamansal değişimini temsil eden göstergeler olarak değerlendirilmiş ve mRSEI hesabında kullanılan bileşenler arasında yer almıştır.

3.4 Tasseled Cap Dönüşümü ve Bozulma İndeksi (DI)

Tasseled Cap dönüşümü ile elde edilen Brightness, Greenness ve Wetness bileşenlerine dayanan Disturbance Index (DI), çalışma alanındaki yüzey bozulmalarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır (Healey vd., 2005). Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI algılayıcılarının spektral özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle Tasseled Cap dönüşümünde her bir algılayıcıya özgü katsayılar kullanılmış; bu kapsamda Brightness, Greenness ve Wetness bileşenleri Landsat 5 TM görüntüleri için Crist vd. (1986), Landsat 8 OLI görüntüleri için ise Baig vd. (2014) tarafından önerilen katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır.

Landsat 5 TM için kullanılan katsayılar:

$$Brightness = 0.2909B1 + 0.2493B2 + 0.4806B3 + 0.5568B4 + 0.4438B5 + 0.1706B7 \quad (7a)$$
$$Greenness = -0.2728B1 - 0.2174B2 - 0.5508B3 + 0.7221B4 + 0.0733B5 - 0.1648B7 \quad (7b)$$
$$Wetness = 0.1446B1 + 0.1761B2 + 0.3322B3 + 0.3396B4 - 0.6210B5 - 0.4186B7 \quad (7c)$$

Landsat 8 OLI için kullanılan katsayılar:

$$Brightness = 0.3029B2 + 0.2786B3 + 0.4733B4 + 0.5599B5 + 0.5080B6 + 0.1872B7 \quad (8a)$$
$$Greenness = -0.2941B2 - 0.2430B3 - 0.5424B4 + 0.7276B5 + 0.0713B6 - 0.1608B7 \quad (8b)$$
$$Wetness = 0.1511B2 + 0.1973B3 + 0.3283B4 + 0.3407B5 - 0.7117B6 - 0.4559B7 \quad (8c)$$

Elde edilen Brightness, Greenness ve Wetness bileşenleri tüm analiz koleksiyonunun ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak standartlaştırılmıştır. Standartlaştırılmış bileşenler sırasıyla B_n, G_n ve W_n olarak tanımlanmış ve DI eşitlik (9)'da hesaplanmıştır:

$$DI = B_n - (G_n + W_n) \quad (9)$$

Yüksek DI değerleri parlaklık artışı ile birlikte yeşillik ve nemlilik bileşenlerinin azalmasını, dolayısıyla daha yüksek düzeyde yüzey bozulmasını temsil etmektedir.

3.5 Modifiye Edilmiş Uzaktan Algılama Ekolojik İndeksi (mRSEI)

Çalışmada NDVI, BSI ve DI göstergelerine ek olarak, çalışma alanındaki ekolojik değişimleri farklı yüzey özelliklerini birlikte dikkate alarak değerlendirmek amacıyla mRSEI hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında mRSEI'nin oluşturulmasında NDVI, Tasseled Cap Wetness (WET), NDMI, BSI, LST ve Albedo olmak üzere altı bileşen kullanılmıştır.

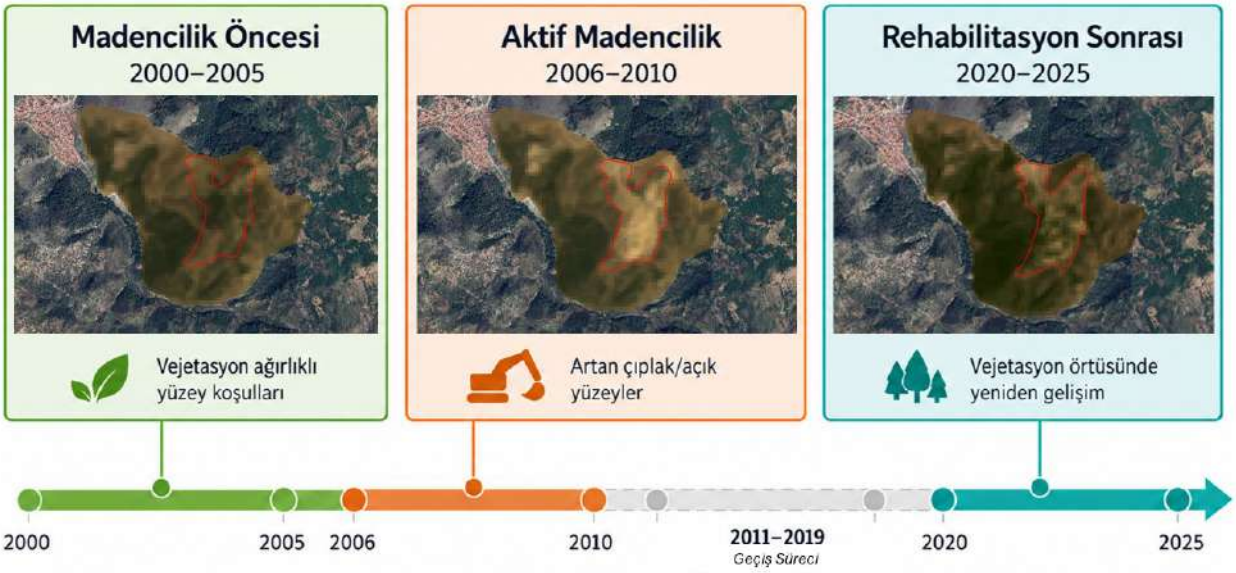
mRSEI hesaplamasından önce her bir bileşen, ilgili görüntünün çalışma alanındaki %2 ve %98 yüzdelik değerleri esas alınarak 0–1 aralığına normalize edilmiştir (Zhao vd., 2026). Ekolojik kalite ile pozitif ilişkiye sahip NDVI, WET ve NDMI bileşenleri doğrudan kullanılırken; ekolojik kalite ile ters yönlü ilişki gösteren BSI, LST ve Albedo bileşenleri ters çevrilmiştir. Böylece tüm değişkenlerde yüksek değerlerin daha iyi ekolojik koşulları temsil etmesi sağlanmıştır. Normalize edilmiş bileşenlere Temel Bileşenler Analizi (PCA) uygulanmış ve birinci temel bileşen (PC1) ekolojik kalite bilgisini bütünleştirmek amacıyla kullanılmıştır. PC1'in yönü NDVI yükü dikkate alınarak kontrol edilmiş ve gerekli durumlarda işareti ters çevrilmiştir. Son aşamada PC1 değerleri yeniden 0–1 aralığında normalize edilerek mRSEI elde edilmiştir.

Elde edilen NDVI, BSI, DI ve mRSEI göstergeleri 2000–2025 dönemindeki Landsat görüntüleri için sahne bazında hesaplanmış ve çalışma alanı genelindeki ortalama değerler kullanılarak zaman serileri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları madencilik öncesi, aktif madencilik ve rehabilitasyon sonrası dönemler kapsamında değerlendirilmiş; böylece madencilik faaliyetleri sırasında meydana gelen yüzey değişimleri ile rehabilitasyon sonrasındaki iyileşme eğilimleri hem zamansal hem de mekânsal olarak incelenmiştir.

4. UYGULAMA

4.1 Zamansal Dönemlerin Belirlenmesi

Madencilik faaliyetlerinin etkisinin ve rehabilitasyon sonrasında meydana gelen değişimin daha açık biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla analiz dönemi üç temel zaman aralığı altında incelenmiştir. 2000–2005 dönemi madencilik öncesi, 2006–2010 dönemi aktif madencilik, 2020–2025 dönemi ise rehabilitasyon sonrası dönem olarak tanımlanmıştır (Şekil 3). 2011–2019 dönemi, aktif madencilik ile rehabilitasyon sonrası dönem arasındaki geçiş süreci olarak değerlendirilmiştir. Bu dönemlendirme sayesinde yalnızca yıllar arasındaki kısa süreli dalgalanmaların değil, madencilik faaliyetlerinin başlaması, işletme süreci ve rehabilitasyon sonrasında ortaya çıkan daha uzun dönemli eğilimlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

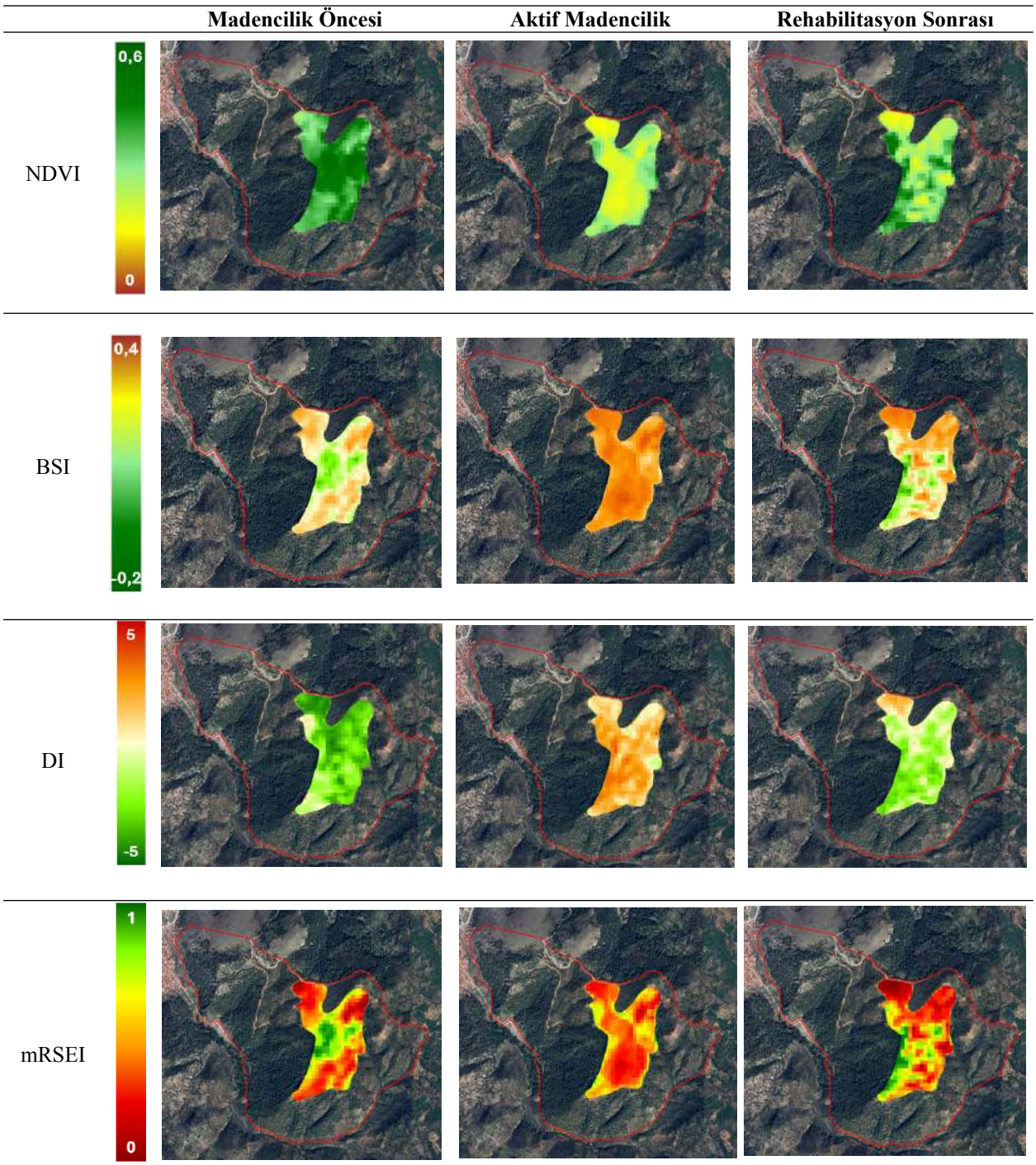


Şekil 3: Çalışmada kullanılan zamansal dönemler ve bu dönemleri temsil eden doğal renkli Landsat görüntüleri.

4.2 Spektral ve Ekolojik Göstergelerin Zamansal ve Mekânsal Analizi

Çalışma alanındaki çevresel değişimlerin uzun dönemli olarak ortaya konulabilmesi amacıyla, hesaplanan spektral ve ekolojik göstergeler çok zamanlı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda gösterge değerlerinin yıllara göre değişimi incelenmiş, elde edilen zamansal eğilimler madencilik faaliyetlerinin farklı evreleriyle ilişkilendirilerek yorumlanmıştır.

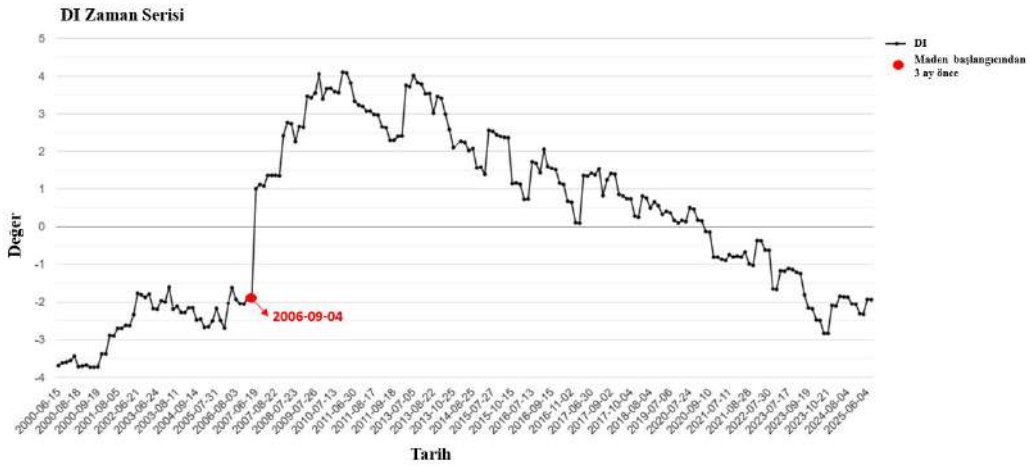
Hesaplanan göstergelerin çalışma alanı içerisindeki ortalama değerleri her görüntü tarihi için ayrı ayrı elde edilmiş ve böylece 2000–2025 yılları arasındaki yüzey ve ekolojik koşulların değişimini ortaya koyan zaman serileri oluşturulmuştur. Zamansal değerlendirmede NDVI ve BSI, bitki örtüsü ile açık yüzeyler arasındaki değişimin; DI, madencilik faaliyetleriyle ilişkili yüzey bozulmasının; mRSEI ise bitki örtüsü, nemlilik, çıplaklık, yüzey sıcaklığı ve albedo bileşenleri üzerinden genel ekolojik kalitenin izlenmesinde kullanılmıştır. Göstergelerin zamansal değişimlerinin yanı sıra, madencilik öncesi (2000–2005), aktif madencilik (2006–2010) ve rehabilitasyon sonrası (2020–2025) dönemlerdeki mekânsal dağılımları da karşılaştırılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4: Madencilik öncesi, aktif madencilik ve rehabilitasyon sonrası dönemlerde NDVI, BSI, DI ve mRSEI'nin mekânsal dağılımları.

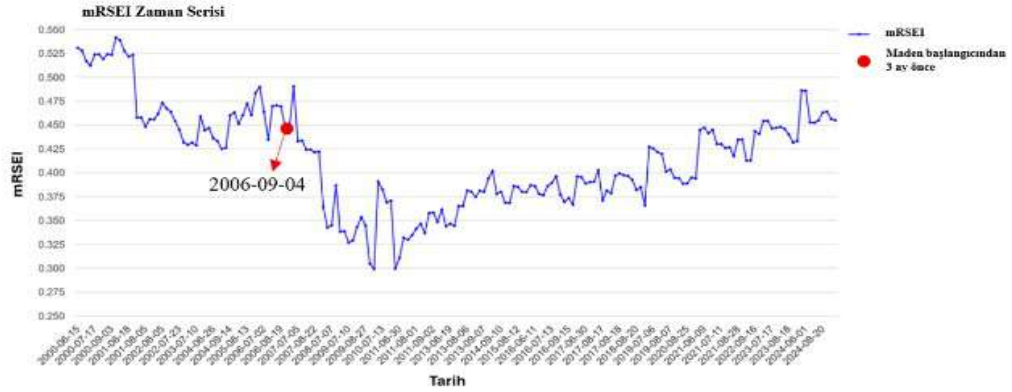
4.3 BULGULAR

NDVI, BSI, DI ve mRSEI göstergelerine dayalı analizler, çalışma alanında altın madenciliği faaliyetlerinin başlamasının ardından yüzey bozulmasında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir (Şekil 5). Madencilik öncesinde, 4 Eylül 2006 tarihinde Bozulma İndeksi (DI) yaklaşık -2.5 değerindeyken, madenciliğin başlamasından yaklaşık yedi ay sonra, 9 Haziran 2007 itibarıyla +0.6 seviyesine yükselmiştir. Bu değişim, aynı dönemde NDVI değerlerinde gözlenen azalma ile BSI değerlerindeki artışla birlikte değerlendirildiğinde, madencilik faaliyetlerinin başlamasını izleyen dönemde arazi yüzeyinde belirgin bir bozulma meydana geldiğini göstermektedir.

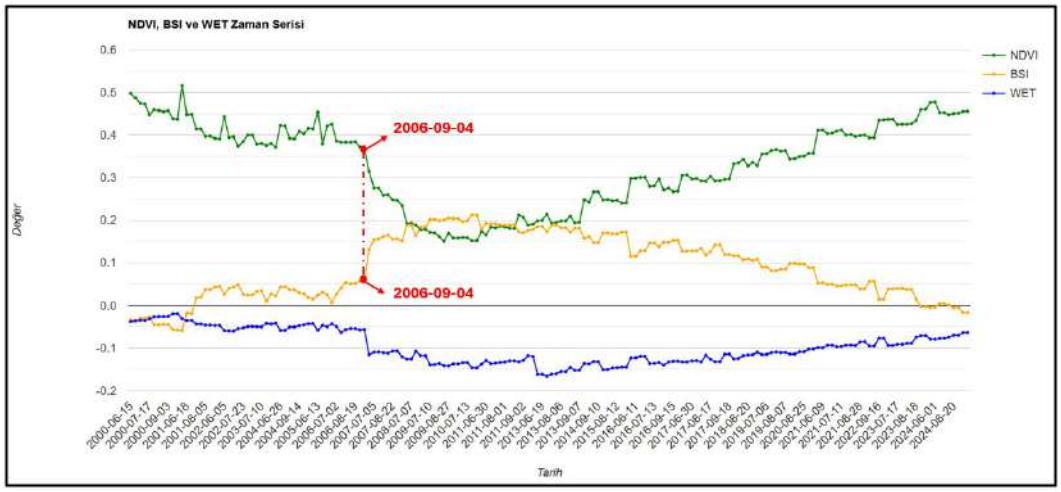


Şekil 5: Bozulma İndeksi (DI) zaman serisi.

Aktif madencilik döneminin ilerleyen yıllarında yüksek değerlerini koruyan DI, faaliyetlerin sona ermesi ve rehabilitasyon uygulamalarının başlamasının ardından genel olarak azalma eğilimine girmiştir. Özellikle 2012 sonrasında belirginleşen bu azalış sonucunda DI değerleri 2020'li yıllarda yeniden negatif düzeylere gerilemiştir. Bu eğilim, madencilik döneminde artan yüzey bozulmasının faaliyetlerin sona ermesinin ardından zaman içerisinde azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte referans alan ve meteorolojik değişkenlere dayalı ayrı bir analiz yapılmadığından, bu iyileşmenin ne ölçüde rehabilitasyon uygulamalarından, doğal bitki örtüsü gelişiminden veya yıllar arası iklimsel değişkenlikten kaynaklandığı ayrıştırılamamaktadır. Zaman serisinde görülen kısa süreli dalgalanmaların görüntüleme tarihi, mevsimsel koşullar ve yüzey nemliliği gibi etkenlerden de kaynaklanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



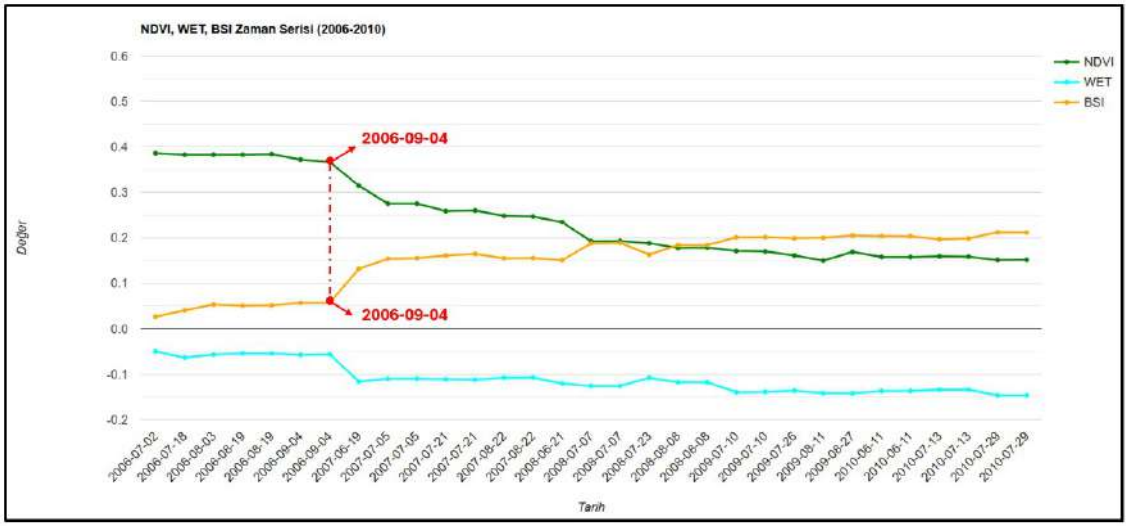
Şekil 6: Modifiye Edilmiş Uzaktan Algılama Ekolojik İndeksi (mRSEI) zaman serisi.



Şekil 7: NDVI, BSI ve WET zaman serileri.

DI sonuçlarıyla uyumlu olarak, mRSEI zaman serisi de aktif madencilik döneminde ekolojik kalitede belirgin bir düşüş olduğunu göstermektedir. Şekil 6'da mRSEI değerlerinin 2006–2010 yılları arasında yaklaşık 0.45–0.50

seviyelerinden 0.30 seviyelerine gerilemesi, ekolojik kalite koşullarındaki bozulmayı desteklemektedir. Madencilik faaliyetlerinden sonraki yıllarda NDVI değerleri toparlanmaya başlamış, BSI değerleri ise azalmıştır. Ayrıca mRSEI hesaplamasında kullanılan WET bileşeni artış eğilimi gösterirken, BSI değerlerinde azalma gözlenmiştir (Şekil 7). Bu göstergelerin birlikte değişimi, madencilik sonrasında çalışma alanındaki bitki örtüsü, yüzey nemliliği ve çıplak toprak koşullarında kademeli bir iyileşme eğilimine işaret etmektedir. Bununla birlikte, incelenen göstergeler rehabilitasyon sonrası dönemde madencilik öncesi koşullara tam olarak ulaşılmadığını göstermektedir.



Şekil 8: 2006-2010 yılları arasındaki NDVI, WET ve BSI değişimleri.

Madencilik faaliyetlerinin en yoğun olduğu 2006–2010 dönemine ait NDVI, WET ve BSI değişimleri ayrıntılı olarak Şekil 8'de sunulmuştur. Madencilik faaliyetlerinin başlamasından önceki 4 Eylül 2006 tarihli gözlemden sonra NDVI değerlerinde hızlı bir düşüş meydana gelirken BSI indeks değerinde belirgin artış görülmüştür. WET değerlerinin daha negatif düzeylere gerilemesi de yüzey nemliliğinin madencilik faaliyetleriyle eş zamanlı olarak azaldığını göstermektedir. Bu göstergelerde eş zamanlı olarak gözlenen değişimler, aktif madencilik döneminin başlangıcında bitki örtüsünün ve yüzey nemliliğinin azaldığını, çıplak ve açık yüzeylerin ise arttığını göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Havran altın madeni sahasında 2000–2025 döneminde madencilik ve madencilik sonrası süreçlerde meydana gelen çevresel değişimler Landsat zaman serileri ve farklı spektral ve ekolojik göstergeler kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Aktif madencilik döneminde NDVI ve WET değerlerinde azalma, BSI ve DI değerlerinde artış gözlenmiş; bu değişimler bitki örtüsü kaybı, yüzey nemliliğinin azalması ve yüzey bozulmasının artmasıyla ilişkilendirilmiştir.
- Aynı dönemde mRSEI değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiş ve farklı ekolojik bileşenlerin birlikte değerlendirilmesi, madencilik dönemindeki ekolojik kalite kaybını ortaya koymuştur.
- Madencilik faaliyetlerinin sona ermesini izleyen dönemde NDVI ve mRSEI değerleri genel olarak artarken, BSI ve DI değerleri azalmış ve çalışma alanında kademeli bir iyileşme eğilimi gözlenmiştir. Bununla birlikte, incelenen göstergeler rehabilitasyon sonrası dönemde madencilik öncesi koşullara tam olarak ulaşılmadığını göstermektedir.
- Referans alan ve meteorolojik değişkenlere dayalı ayrı bir analiz yapılmadığından, gözlenen iyileşmenin rehabilitasyon uygulamaları, doğal toparlanma ve yıllar arası iklimsel değişkenlikle ilişkili katkıları birbirinden ayrıştırılamamıştır. Bu nedenle sonuçlar, rehabilitasyonun doğrudan etkisinin nicel bir ölçümü olarak değil, madencilik sonrası uzun dönemli iyileşme eğilimlerinin göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. Remote Sensing Letters, 5(5), 423–431. https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434

Bell, M. A. (2015). *Monitoring rehabilitation success using remotely sensed vegetation indices at Navachab Gold Mine, Namibia* [Master's thesis, Stellenbosch University]. Stellenbosch University. http://hdl.handle.net/10019.1/97888

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). (2001). *Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union* (Report No. BRGM/RP-50319-FR). European Commission, Directorate-General Environment.

Crist, E. P., Laurin, R., & Cicone, R. C. (1986). Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '86)* (pp. 1465 –1470). European Space Agency.

Gülersoy, A. E. (2008). Altın madenciliği ve çevre etkileri üzerine bir değerlendirme. CORE.

Güney Marmara Kalkınma Ajansı. (2011). Balıkesir ili maden potansiyeline bir bakış.

Havran Belediyesi. (2025). https://www.havran.bel.tr/havran/ilcemizin-cografi-durumu/ (Erişim tarihi: 17 Haziran 2025)

Healey, S. P., Cohen, W. B., Yang, Z., & Krankina, O. N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. Remote Sensing of Environment, 97(3), 301–310. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009

Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment, 76*(2), 213–238. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4

McKenna, P. B., Lechner, A. M., Phinn, S., & Erskine, P. D. (2020). Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: A global systematic review. *Remote Sensing*, *12*(21), 3535. https://doi.org/10.3390/rs12213535

Mencho, B. B. (2022). Assessing the effects of gold mining on environment: A case study of Shekiso district, Guji zone, Ethiopia. *Heliyon, 8*(12), e11882.

Rogan, J., & Chen, D. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. Progress in Planning, 61(4), 301-325.

Silva, B. B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20*(1), 3–8. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8

U.S. Geological Survey (USGS). Landsat 4–5 TM Calibration Notices. Landsat Missions. Erişim tarihi: 13 Eylül 2026.

Yang, Y., Erskine, P. D., Lechner, A. M., Mulligan, D., Zhang, S., & Wang, Z. (2018). Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. Journal of Cleaner Production, 178, 353–362. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.050

Zhao, Y., Li, H., & Yuan, Y. (2026). Analysis of ecological environment quality in Xinjiang based on remote sensing ecological index. Sustainability, 18(3), 1637. https://doi.org/10.3390/su18031637

TERRASCANE: GOOGLE EARTH ENGINE TABANLI AÇIK ERİŞİMLİ BİR UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ PLATFORMU: MİMARİ, YÖNTEM VE BARTIN ÖRNEK UYGULAMASI

Cumhur Eren BİLAL[1,], Fidan Şevval BULUT[2], Ayhan ATEŞOĞLU[3]*

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Bartın Üniversitesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 74100, Merkez, Bartın, cumhureren0@gmail.com
[2]Arş. Gör., Bartın Üniversitesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 74100, Merkez, Bartın, fbulut@bartin.edu.tr
[3]Prof. Dr., Bartın Üniversitesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 74100, Merkez, Bartın, aatesoglu@yahoo.com
* Sorumlu yazar: cumhureren0@gmail.com

ÖZET

Uydu veri arşivlerinin büyümesi, uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri analizlerinde bulut tabanlı işlem platformlarının kullanımını artırmıştır. Bununla birlikte Google Earth Engine (GEE) gibi platformların doğrudan kullanımı; programlama, veri ürünleri ve ön işleme parametreleri hakkında teknik bilgi gerektirebilmektedir. Bu çalışmada, GEE altyapısı üzerinde çalışan, kodlama gerektirmeyen, web tabanlı ve Türkçe–İngilizce dil desteğine sahip TerraScane platformunun mimarisi, analiz modülleri ve çıktı yapısı tanıtılmıştır. Platform; 13 spektral indeks, yüzey sıcaklığı ve kentsel ısı adası göstergesi, topografya, arazi örtüsü ve sulak alan taraması işlevlerini içermektedir. Analizler tek tarih, zaman serisi, iki tarih karşılaştırma, değişim tespiti ve toplu analiz modlarında yürütülebilmekte; sonuçlar PDF, Excel, KMZ ve GeoTIFF formatlarında üretilebilmektedir. Platformun temel işlevleri, Bartın il merkezini ve çevresini kapsayan 4.908,42 ha büyüklüğündeki örnek alanda Sentinel-2 NDVI ve Dynamic World arazi örtüsü verileri kullanılarak gösterilmiştir. Örnek uygulamada farklı dönemlere ait NDVI dağılımları karşılaştırılmış ve piksel bazlı NDVI değişimleri haritalanmıştır. Arazi örtüsü analizi ise Dynamic World kompozitlerinin seçilen zaman aralığına duyarlı olabildiğini göstermiştir. Sonuç olarak TerraScane, GEE tabanlı analizlerin farklı çalışma alanları ve dönemler için kod yazmadan uygulanmasını ve standart çıktılarla raporlanmasını sağlayan kullanıcı odaklı bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: coğrafi bilgi sistemleri, Google Earth Engine, spektral indeks, TerraScane, uzaktan algılama

TERRASCANE: AN OPEN-ACCESS GOOGLE EARTH ENGINE-BASED REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS PLATFORM: ARCHITECTURE, METHODOLOGY, AND A CASE STUDY IN BARTIN

ABSTRACT

The expansion of satellite data archives has increased the use of cloud-based processing platforms in remote sensing and Geographic Information Systems analyses. However, the direct use of platforms such as Google Earth Engine (GEE) may require technical knowledge of programming, satellite data products, and preprocessing parameters. This study introduces the architecture, analysis modules, and output structure of TerraScane, a web-based platform that operates on the GEE infrastructure, requires no coding, and provides Turkish and English language support. The platform includes 13 spectral indices, land surface temperature and an urban heat island indicator, topographic analysis, land-cover analysis, and wetland screening. Analyses can be performed in single-date, time-series, two-date comparison, change-detection, and batch-analysis modes, while the results can be exported in PDF, Excel, KMZ, and GeoTIFF formats. The main functions of the platform were demonstrated using Sentinel-2 NDVI and Dynamic World land-cover data for a 4,908.42 ha study area covering Bartın city centre and its surroundings. The case study compared NDVI distributions across different periods and mapped pixel-based NDVI changes. The land-cover analysis also indicated that class distributions derived from Dynamic World composites may be sensitive to the selected temporal window. Overall, TerraScane provides a user-oriented approach that enables GEE-based analyses to be performed without coding for different study areas and periods and reported through standardised outputs.

Keywords: geographic information systems, Google Earth Engine, remote sensing, spectral index, TerraScane

1. GİRİŞ

Günümüzde iklim değişikliği, arazi örtüsü ve arazi kullanımındaki değişimler, doğal ekosistemlerin bozulması ve doğal kaynaklar üzerindeki artan baskıların çevresel süreçlerin mekânsal ve zamansal boyutlarıyla izlenmesini daha önemli hâle getirmektedir (Roy vd., 2022; Gabriele vd., 2023). Bu bağlamda uzaktan algılama teknolojileri; geniş alanların sistematik, tekrarlanabilir ve farklı zamanlarda gözlemlenmesine olanak sağlaması nedeniyle doğal kaynakların ve çevresel değişimlerin izlenmesinde temel veri kaynaklarından biri hâline gelmiştir (Zhang ve Zhu, 2023). Özellikle yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüklü uydu sistemlerinin yaygınlaşması ile yeryüzüne ilişkin sürekli ve çok boyutlu gözlemlerin gerçekleştirilmesine imkân verirken; farklı sensörlerden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi, arazi süreçlerinin daha ayrıntılı ve dinamik biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır. Uydu teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve açık veri politikalarının yaygınlaşması sonucunda, araştırmacıların ve uygulayıcıların erişebildiği uzaktan algılama veri miktarı ve çeşitliliği önemli ölçüde artmıştır (Zhao ve Yu, 2025). Sentinel ve Landsat gibi uzun süreli ve ücretsiz veri arşivlerinin (Drusch vd., 2012; Claverie vd., 2018) ile farklı sensör ve platformlardan sağlanan görüntüler, tek tarihli analizlerin ötesine geçmeyi mümkün kılmaktadır. Bu arşivler uzun dönemli zaman serilerinin oluşturulmasına imkân vermektedir. Bununla birlikte veri kaynaklarının ve gözlem sıklığının artması, bu verilerin etkin biçimde işlenmesi, analiz edilmesi, görselleştirilmesi ve karar destek süreçlerine aktarılması konusunda yeni gereksinimler ortaya çıkarmaktadır (Elgendy ve Elragal, 2016).

Bu dönüşüm ihtiyacı, uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri çalışmalarında geleneksel masaüstü tabanlı iş akışlarının yanı sıra bulut bilişim ve web tabanlı analiz yaklaşımlarının yaygınlaşmasında etkili olmuştur (Griffith, 2025).

Uzaktan algılama verilerinin daha geniş kullanıcı kitlelerine ulaştırılması amacıyla son yıllarda çok sayıda açık erişimli veri ve analiz platformu geliştirilmiştir. Google Earth Engine, Sentinel Hub, Copernicus Data Space Ecosystem ve EarthMap gibi platformlar, geniş uydu veri arşivlerine erişim, görüntülerin işlenmesi, görselleştirilmesi ve farklı ölçeklerde analiz edilmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır (Gomes vd., 2020; Kovács vd., 2026; Lehmann vd., 2026). Bununla birlikte bu platformların kullanım biçimleri ve teknik gereksinimleri açısından birbirinden farklılık göstermektedir. Çok zamanlı veri seçimi, ön işleme, bulut ve kalite maskeleme, spektral indekslerin hesaplanması, zaman serilerinin oluşturulması ve tek bir iş akışında yürütülmesini gerçekleştirebilmek için kullanıcıdan uzaktan algılama, CBS ve programlama bilgisi beklenmektedir. Bu bağlamda Google Earth Engine (GEE), petabayt ölçeğindeki uydu arşivini sunucu tarafında işleyen ve sonuçları kullanıcıya aktaran bir bulut platformu sunmaktadır (Gorelick vd., 2017). GEE'nin kullanıma girmesiyle bölgesel ve küresel ölçekte zaman serisi, değişim tespiti ve arazi örtüsü çalışmaları yerel bilgisayar gücünden bağımsız hale gelmiştir. Ancak GEE'nin doğrudan kullanımı JavaScript veya Python ile kod yazmak, uydu ürünlerinin ölçek faktörleri, kalite bantları ve projeksiyon davranışı gibi karmaşık bilgileri bilmeyi gerektirir. Bu durum, özellikle öğrenciler, uygulayıcılar ve ileri düzey kodlama deneyimine sahip olmayan kullanıcılar açısından açık uydu verilerinin sunduğu potansiyelin tam olarak kullanılmasını sınırlayabilmektedir. Dolayısıyla ihtiyaç yalnızca veri ve analiz kaynaklarını erişilebilir kılmak değildir. Farklı veri işleme ve analiz aşamalarını tek bir akışta birleştiren, teknik karmaşıklığı azaltan, tekrarlanabilir ve kullanıcı odaklı bütünleşik yaklaşımlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu engeli aşmak için GEE üzerinde kod yazmadan analiz yapılabilen arayüzler geliştirilmiştir. Climate Engine, iklim ve kuraklık odaklı çok sayıda veri setini harita ve zaman serisi olarak sunan bilimsel bir arayüzdür (Huntington vd., 2017). Ticari tarafta EOSDA LandViewer (Dengia vd., 2023) ve EOS Crop Monitoring (Oymatov vd., 2023) parsel bazlı indeks takibi sunar; Copernicus Browser, Sentinel ve Landsat görüntülerini evalscript ile işleyen ücretsiz bir görüntü tarayıcısıdır.

Bu gereksinimler doğrultusunda TerraScane, uzaktan algılama verilerinin herkes tarafından erişilebilirliğini artırmanın yanı sıra, analiz süreçlerinin şeffaf, tekrarlanabilir ve kullanıcı açısından izlenebilir olmasını hedefleyen bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir. Mevcut araçlara ilişkin yapılan karşılaştırmalı incelemelerde; kullanılan sınıflandırma ve analiz eşiklerinin literatür temellerinin yeterince açık biçimde sunulmaması, elde edilen sonuçların denetlenebilir ve standart bir raporlama yapısı içerisinde üretilememesi ve Türkçe kullanıcı arayüzü seçeneklerinin sınırlı olması önemli eksiklikler olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca Türkiye'deki uygulamalarda kullanılan çözümlerin önemli ölçüde yurt dışı kaynaklı, ücretli veya kapalı kaynaklı olması; özellikle karbon izleme, raporlama ve doğrulama (MRV), çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) ve kamuya yönelik izleme çalışmalarında analizlerin yeniden üretilebilirliği, yöntemsel şeffaflık ve yerel kullanıcı ihtiyaçları açısından çeşitli kısıtlar oluşturabilmektedir. TerraScane bu ihtiyaçlara yanıt vermek amacıyla, Google Earth Engine altyapısıyla çalışan, ücretsiz ve web tabanlı bir uzaktan algılama ve CBS analiz platformu olarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Platformun temel yaklaşımı, analiz zincirinin tamamını bütünleşik bir yapı içinde yürütmektir. Bu zincir, kullanıcının belirlediği çalışma alanında açık uydu verilerinin seçilmesi ve işlenmesiyle başlar; spektral indekslerin üretilmesi ile zamansal değişim analizleriyle sürer; sonuçların harita, grafik ve rapor olarak sunulmasıyla biter. Bu yönüyle TerraScane, yalnızca uydu verilerine erişim sağlayan bir arayüz değil, kullanılan veri, yöntem ve analiz adımlarının izlenebilirliğini gözeten, açık erişimli ve kullanıcı odaklı bir uzaktan algılama analiz yaklaşımı olarak konumlandırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, GEE altyapısıyla çalışan TerraScane platformunun mimarisini, veri işleme kurallarını, analiz modüllerini ve çıktı yapısını tanıtmak; platformun temel işlevlerini Bartın il merkezini kapsayan örnek bir alanda gerçekleştirilen NDVI ve arazi örtüsü analizleri üzerinden göstermektir. Ayrıca platformun mevcut web tabanlı uzaktan algılama araçları arasındaki konumu ve temel sınırlılıkları değerlendirilmektedir.

2. TERRASCANE PLATFORM MİMARİSİ VE ÖZELLİKLERİ

TerraScane'in geliştirilmesine Mart 2026'da başlanmış ve platform Nisan 2026'da kullanıma açılmıştır. terrascane.com adresi üzerinden erişilebilen platform, kayıt gerektirmeyen misafir kullanımını ve kullanıcı hesabı oluşturulmasını desteklemektedir. Platformun analiz iş akışında veri seçimi, ölçek faktörlerinin uygulanması, bulut maskeleme, görüntü kompozitlerinin oluşturulması, spektral indekslerin hesaplanması ve sınıflandırma işlemleri önceden tanımlanmış kurallara göre yürütülmektedir. Bulut maskeleme, kompozit oluşturma ve sınıflandırma gibi ortak işlemler, farklı analiz modüllerinde aynı işlevler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu yapı, aynı veri işleme adımlarının her modül için ayrı ayrı tanımlanmasını önleyerek analiz modülleri arasında yöntemsel tutarlılığın korunmasını amaçlamaktadır.

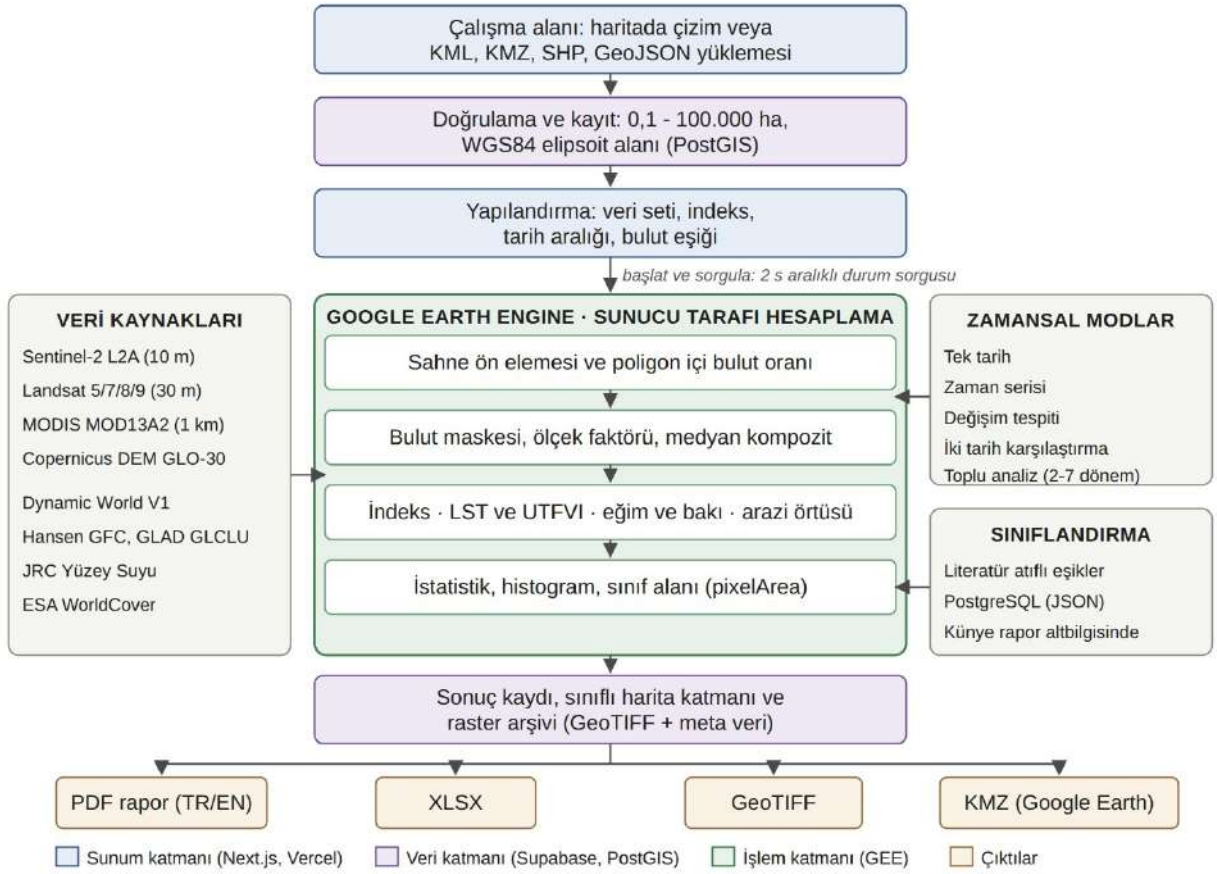
2.1. TerraScane Platformunun Genel Yapısı

TerraScane; kullanıcı arayüzü, veri yönetimi ve analiz işlemleri olmak üzere üç temel katmandan oluşmaktadır (Şekil 1). Birinci katman, kullanıcının platformla etkileşim kurduğu web tabanlı arayüzdür. Kullanıcı bu arayüz üzerinden çalışma alanını harita üzerinde çizebilmekte veya KML, KMZ, Shapefile ve GeoJSON formatlarındaki sınır verilerini sisteme yükleyebilmektedir. Ayrıca kullanılacak veri seti, analiz türü, tarih aralığı ve diğer analiz parametreleri bu katmanda belirlenmektedir.

İkinci katman, kullanıcı tarafından tanımlanan çalışma alanlarının, analiz parametrelerinin, sınıflandırma şemalarının ve daha önce gerçekleştirilen analizlere ait kayıtların saklandığı veri yönetimi katmanıdır. Bu katmanda PostgreSQL ve PostGIS kullanılmakta; kullanıcı verileri ve mekânsal geometriler kullanıcı hesaplarıyla ilişkilendirilerek saklanmaktadır.

Üçüncü katman, uydu verilerinin işlenmesi ve analizlerin gerçekleştirilmesinden sorumlu Google Earth Engine altyapısıdır. TerraScane, kullanıcı tarafından seçilen çalışma alanı ve analiz parametrelerini GEE'ye iletmekte; uydu görüntülerinin seçilmesi, ön işlenmesi, kompozitlerin oluşturulması ve analiz ürünlerinin hesaplanması GEE sunucularında gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar TerraScane tarafından harita, tablo, grafik ve indirilebilir dosyalar biçiminde kullanıcıya sunulmaktadır. Dolayısıyla TerraScane bağımsız bir uydu veri arşivi veya bulut hesaplama altyapısı oluşturmamakta; GEE'nin veri ve işlem kapasitesini web tabanlı bir kullanıcı arayüzü ve otomatik raporlama yapısıyla bütünleştirmektedir.

Analizler arka planda yürütüldüğünden kullanıcı arayüzü işlem süresince kullanılabilir durumda kalmaktadır. Platform, işlemin durumunu belirli aralıklarla kontrol ederek analiz tamamlandığında sonuçları kullanıcıya sunmaktadır. Analiz süresi; seçilen veri setine, zaman aralığına, çalışma alanının büyüklüğüne ve GEE sunucularındaki işlem yoğunluğuna bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 1. TerraScane'in üç katmanlı mimarisi ve iş akış şeması.

2.2. Veri Kaynakları

TerraScane tarafından kullanılan veri setleri, bunlara ait Google Earth Engine katalog kimlikleri, mekânsal çözünürlükleri ve temel ön işleme parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Spektral indekslerin hesaplanmasında Sentinel-2 ve Landsat'ın atmosferik düzeltmesi yapılmış yüzey yansıtımı ürünleri kullanılmaktadır. Landsat 5 TM ve Landsat 7 ETM+ sensörlerinin bant yapıları Landsat 8/9 OLI sensörlerinden farklı olduğundan, spektral bantlar sensörlere özgü eşleştirmelerle ortak bant adlarına dönüştürülmektedir. MODIS NDVI ve EVI değerleri ise ilgili hazır üründen doğrudan alınmaktadır. Arazi örtüsü, topografya, orman kaybı ve sulak alan taramalarında kullanılan yardımcı veri setleri de analiz amaçlarına göre aynı iş akışına dâhil edilmektedir.

Çizelge 1. Kullanılan veri kaynakları ve ön işleme parametreleri.

Veri seti	GEE kimliği	Çözünürlük	Kullanım	Ölçek / maske	Kaynak
Sentinel-2 L2A	COPERNICUS/ S2_SR_HARMONIZED	10 m	13 spektral indeks	×0,0001; SCL 0, 1, 8, 9, 10 hariç	https:// sentinels.copernicus.eu/
Landsat 8 / 9 C2 L2	LANDSAT/LC08 ve LC09/C02/T1_L2	30 m	12 indeks (NDRE hariç), LST, UTFVI	SR: ×0,0000275 − 0,2; ST_B10: ×0,00341802 + 149 K; QA_PIXEL bit 3 ve 2	https:// www.usgs.gov/ landsat-missions/ landsat-collection-2-level-2-science-products
Landsat 5 / 7 C2 L2	LANDSAT/LT05 ve LE07/C02/T1_L2	30 m	12 indeks, LST (ST_B6)	L8/9 ile aynı ölçek ve maske; TM bant eşlemesi	https:// www.usgs.gov/ landsat-missions/ landsat-collection-2-level-2-science-products
MODIS MOD13A2 v6.1	MODIS/061/ MOD13A2	1000 m	Yalnız NDVI ve EVI	×0,0001; SummaryQA ≤ 1	https:// www.earthdata.nasa.gov/data/ catalog/lpcloud-mod13a2-061
Copernicus DEM GLO-30	COPERNICUS/ DEM/GLO30	30 m	Eğim, bakı, DEM indirme	Mozaik sonrası yerel projeksiyon yeniden atanır	https:// dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/ copernicus-contributing-missions
Dynamic World V1	GOOGLE/ DYNAMICWORLD/ V1	10 m	Yıllık arazi örtüsü (mod kompozit)	label bandı; 9 sınıf, resmi palet	https:// dynamicworld.app/
Hansen GFC v1.12	UMD/hansen/ global_forest_change_2024_v1_12	30 m	Orman kaybı çapraz kontrolü (2001-2024)	treecover2000 ≥ %30 ve loss = 1	https:// glad.earthengine.app/view/global-forest-change
GLAD GLCLU 2020 v2	projects/glad/ GLCLU2020/v2/ LCLUC_2015, _2020	30 m	Tarım sınıfı çapraz kontrolü	Kod 244 (cropland); ≥ %50 alan	https:// glad.umd.edu/ dataset/ GLCLUC2020
JRC Global Surface Water	JRC/GSW1_4/ GlobalSurfaceWater	30 m	Sulak alan taraması (sinyal A)	occurrence / seasonality eşikleri	https://global-surface-water.appspot.com/
ESA WorldCover	ESA/WorldCover/ v200 (2021)	10 m	Sulak alan taraması (sinyal D)	Sınıf 90 (herbaceous wetland)	https://esa-worldcover.org/en

2.3. Ön İşleme Kuralları

Analiz sonuçlarının karşılaştırılabilir ve izlenebilir biçimde üretilebilmesi için veri seçimi, kalite maskeleme, ölçek faktörlerinin uygulanması, görüntü kompozitlerinin oluşturulması ve sonuçların raporlanması önceden tanımlanmış kurallara göre gerçekleştirilmektedir. Spektral indeks analizlerinde yalnızca atmosferik düzeltmesi yapılmış yüzey yansıtımı ürünleri kullanılmakta ve veri setlerine ait ölçek faktörleri indeks hesaplamalarından önce uygulanmaktadır. Belirlenen tarih aralığındaki geçerli görüntüler, piksel bazında medyan değer alınarak tek bir kompozit görüntüye dönüştürülmektedir.

Sentinel-2 görüntülerinde kalite maskeleme işlemi Scene Classification Layer (SCL) bandı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Veri bulunmayan veya hatalı pikseller ile bulut gölgesi, orta ve yüksek olasılıklı bulut ve ince bulut sınıfları analiz dışında bırakılmaktadır. Kar ve buz piksellerinin kullanımı ise gerçekleştirilen analizin amacına göre belirlenmektedir. Su sınıfındaki pikseller bulut olarak değerlendirilmemekte ve analiz kapsamında korunmaktadır.

Landsat görüntülerinde bulut, bulut gölgesi, genişletilmiş bulut ve gerektiğinde kar/buz pikselleri QA_PIXEL bandı kullanılarak maskelenmektedir. Kalite bandındaki bit tanımları sensörler arasında farklılık gösterebildiğinden Landsat 5/7 ve Landsat 8/9 görüntülerine sensöre özgü maskeleme kuralları uygulanmaktadır. Katalog düzeyindeki bulutluluk oranı yüksek görüntüler ilk aşamada elenmekte, kalan bütün görüntülerde kalite sorunu bulunan pikseller ayrıca maskelenmektedir. Çalışma alanı içindeki geçerli piksel oranı, görüntünün kompozite dâhil edilmesinde ek bir kalite ölçütü olarak kullanılmaktadır.

Çalışma alanları 0,1–100.000 ha arasında sınırlandırılmış ve bir poligonda en fazla 500 köşeye izin verilmiştir. Bu sınırlar, kullanıcı geometrisi kaydedilmeden ve analiz başlatılmadan önce kontrol edilmektedir. Kullanıcı arayüzündeki anlık sınır denetimi istemci tarafında gerçekleştirilmekte, veri tabanında saklanan kesin poligon alanı ise PostGIS kullanılarak WGS84 elipsoidine göre hesaplanmaktadır.

Analiz çıktılarında kullanılan veri seti, tarih aralığı, görüntü sayısı, kompozit yöntemi, mekânsal çözünürlük ve sınıflandırma eşikleri belirtilmektedir. Haritalarda ölçek çubuğu, lejant, veri kaynağı ve analiz dönemi bilgilerine yer verilmekte; sınıflandırma eşiklerinin kaynakları ilgili raporlarda gösterilmektedir. Harita renkleri, sınıfların birbirinden ayırt edilmesini destekleyecek biçimde seçilmektedir.

2.4. Analiz Modülleri

TerraScane'in analiz araçları; spektral indeksler, yüzey sıcaklığı ve kentsel ısı adası göstergesi, topografik analizler ile arazi örtüsü ve sulak alan taraması olmak üzere dört ana grupta toplanmaktadır.

Spektral indeksler; Platform, bitki örtüsü, yüzey suyu, nem, yapılaşma, çıplak toprak, yangın etkisi ve toprak işleme koşullarının incelenmesine yönelik 13 spektral indeks üretmektedir (Çizelge 2). Sentinel-2 ve Landsat görüntülerindeki sensöre özgü bantlar, RED, GREEN, BLUE, NIR, SWIR1 ve SWIR2 biçimindeki ortak bant adlarıyla eşleştirilmekte ve indeksler bu bantlar üzerinden hesaplanmaktadır.

NDRE hesabında Sentinel-2'nin 705 nm merkez dalga boyuna sahip B5 kırmızı kenar bandı kullanıldığından bu indeks yalnızca Sentinel-2 verileriyle üretilmektedir. B5 bandının diğer spektral bantlardan farklı mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle NDRE için gerekli bantlar ortak bir analiz ızgarasında işlenmektedir. MODIS analizlerinde ise NDVI ve EVI değerleri MOD13A2 ürününün ilgili bantlarından doğrudan alınmakta ve ürünün ölçek faktörü uygulanmaktadır.

Her indeks için kullanılan varsayılan sınıflandırma şeması veri tabanında yapılandırılmış biçimde saklanmaktadır. Sınıf adları, eşik değerleri ve bunların dayandığı kaynaklar platform tarafından üretilen raporlarda belirtilmektedir.

Çizelge 2. Spektral indeksler, formüller ve sınıflandırma eşiklerinin dayandığı kaynaklar.

İndeks	Formül	Tema	Kaynak
NDVI	(NIR − RED) / (NIR + RED)	Bitki örtüsü	Rouse vd., 1974
EVI	2,5 (NIR − RED) / (NIR + 6 RED − 7,5 BLUE + 1)	Bitki örtüsü	Huete vd., 2002
SAVI	1,5 (NIR − RED) / (NIR + RED + 0,5)	Bitki örtüsü	Huete, 1988
GNDVI	(NIR − GREEN) / (NIR + GREEN)	Bitki örtüsü	Gitelson vd., 1996
NDRE	(NIR − RedEdge) / (NIR + RedEdge)	Bitki örtüsü (yalnız S2)	Barnes vd., 2000
NDWI	(GREEN − NIR) / (GREEN + NIR)	Su	McFeeters, 1996
MNDWI	(GREEN − SWIR1) / (GREEN + SWIR1)	Su	Xu, 2006
NDMI	(NIR − SWIR1) / (NIR + SWIR1)	Nem	Wilson ve Sader, 2002
NDBI	(SWIR1 − NIR) / (SWIR1 + NIR)	Yapılaşma	Zha vd., 2003
MNDBI	(SWIR2 − NIR) / (SWIR2 + NIR)	Yapılaşma (SWIR2 varyantı)	Zha vd., 2003 türevi
BSI	((SWIR1 + RED) − (NIR + BLUE)) / ((SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE))	Çıplak toprak	Rikimaru vd., 2002
NBR	(NIR − SWIR2) / (NIR + SWIR2)	Yangın etkisi / yanmış alan	López García ve Caselles, 1991; Key ve Benson, 2006
NDTI	(SWIR1 − SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)	Toprak işleme / anız	Van Deventer vd., 1997

Her analizde indeks görüntüsüne ait minimum, maksimum, ortalama, medyan, standart sapma ve geçerli piksel sayısı, GEE üzerinde birleşik bir indirgeme işlevi (reducer) kullanılarak hesaplanmaktadır. İndeks değerlerinin dağılımı sabit aralıklı histogramla gösterilmekte, sınıf alanları ise histogram bölmelerinin ilgili sınıf eşiklerine atanmasıyla yaklaşık olarak belirlenmektedir. Harita katmanı aynı sınıf eşikleri kullanılarak raster biçiminde oluşturulmakta ve PDF ile KMZ çıktılarında sunulmaktadır.

Yüzey sıcaklığı ve kentsel ısı adası; Yüzey sıcaklığı (LST), Landsat Collection 2 Level-2 yüzey sıcaklığı bandından (L8/9 için ST_B10, L5/7 için ST_B6) hesaplanır: ST × 0,00341802 + 149,0 Kelvin, sonra 273,15 çıkarılarak °C olarak yazılır. Bulut maskesi spektral hatla aynı QA_PIXEL fonksiyonudur. LST sınıfları 25, 30, 35, 40 ve 45 °C eşikleriyle altı sabit bölmeden oluşur. Kentsel ısı adası göstergesi UTFVI, alan ortalamasına göre bağıl sapmadır:

$$UTFVI = (T_s - T_{ort}) / T_{ort} \quad (1)$$

Burada T_s piksel sıcaklığı, T_{ort} çalışma alanı ortalamasıdır ve ikisi de Kelvin cinsindendir. Hesabın Kelvin'de yapılması gereklidir çünkü °C ile bölme yapılırsa UTFVI değeri yaklaşık olarak on kat büyütür ve 0 ile 0,020 arasındaki altı ekolojik sınıf eşiğini (Liu ve Zhang, 2011) anlamsız kılar. UTFVI yalnız Landsat 8/9 ile hesaplanmaktadır.

Topografik analizler; Yükseklik, eğim ve bakı analizleri Copernicus DEM GLO-30 verisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Veri seti GEE kataloğunda görüntü koleksiyonu biçiminde sunulduğundan, çalışma alanını kapsayan görüntüler mozaiklenmekte ve arazi türevleri hesaplanmadan önce analiz projeksiyonu açıkça tanımlanmaktadır. Böylece eğim ve bakı değerlerinin uygun mekânsal çözünürlükte hesaplanması sağlanmaktadır.

Arazi örtüsü ve sulak alan taraması; Arazi örtüsü analizi, Dynamic World V1 veri setinin label bandı kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Brown vd., 2022). Seçilen zaman aralığındaki sınıflandırılmış görüntülerden her piksel için en sık gözlenen sınıf belirlenerek mod kompoziti oluşturulmaktadır. Arazi örtüsü sınıflarının kapladığı alanlar, ee.Image.pixelArea() fonksiyonuyla elde edilen piksel alanlarının sınıflara göre gruplanması ve toplanmasıyla hesaplanmaktadır.

Dynamic World sonucuna ek olarak, çalışma alanındaki orman kaybı Hansen Küresel Orman Değişimi verisiyle (Hansen vd., 2013), tarım alanı oranı ise GLAD GLCLU verisiyle (Potapov vd., 2022) karşılaştırmalı olarak raporlanmaktadır. Bu veri setleri Dynamic World sınıflandırmasının bağımsız doğruluk değerlendirmesi olarak değil, sonuçların yorumlanmasını destekleyen tamamlayıcı göstergeler olarak kullanılmaktadır.

İsteğe bağlı sulak alan taraması dört tamamlayıcı göstergeye dayanmaktadır:

- JRC Global Surface Water veri setinin su tekrarlanma ve mevsimsellik bantları,
- Dynamic World su ve su basmış bitki örtüsü sınıflarının gözlenme sıklığı,
- Sentinel-2 görüntülerinden hesaplanan MNDWI ≥0 alanları,
- ESA WorldCover 2021 veri setinin otsu sulak alan sınıfı.

Her gösterge için en az 0,5 ha mekânsal büyüklük koşulu uygulanmaktadır. Elde edilen göstergeler doğrudan sulak alan uygunluk veya yasal statü kararı vermek amacıyla kullanılmamakta; "yüksek", "orta", "düşük", "bulunmadı" veya "değerlendirilemedi" düzeylerinde ön tarama sonucu olarak raporlanmaktadır.

2.4.1. Zamansal Analiz Modları

Spektral indeksler, TerraScane üzerinde tek tarihli analiz, zaman serisi, iki tarihli karşılaştırma, değişim tespiti ve toplu analiz olmak üzere beş farklı analiz iş akışıyla değerlendirilebilmektedir. Zaman serisi ve değişim tespiti işlevleri, kullanıcı arayüzünde "Değişim Analizi" başlığı altında sunulmaktadır.

Tek tarihli analiz, kullanıcının belirlediği tarih aralığındaki geçerli görüntülerden piksel bazında medyan kompozit oluşturur. Elde edilen indeks görüntüsü için minimum, maksimum, ortalama, medyan, standart sapma ve geçerli görüntü sayısı hesaplanır; sonuçlar sınıflandırılmış harita, histogram ve sınıf alanlarıyla birlikte sunulur.

Zaman serisi analizi, seçilen tarih aralığını haftalık, aylık veya yıllık dönemlere ayırır. Haftalık dönemler pazartesi günü başlatılmakta, aylık dönemler seçilen başlangıç gününe göre oluşturulmakta, yıllık analizlerde ise aynı mevsimsel zaman aralığı birbirini izleyen yıllar için tekrarlanmaktadır. Her dönem için indeksin ortalama, minimum, maksimum, medyan ve standart sapma değerleri ile kullanılan görüntü sayısı hesaplanır. Dönem ortalamaları zaman grafiğinde nokta ve çizgilerle gösterilir. Geçerli görüntü bulunmayan dönemler boş bırakılarak komşu dönemler arasındaki çizgi kesilir. Böylece veri bulunmayan dönemlerin kesintisiz bir gözlem gibi gösterilmesi önlenir.

İki tarihli karşılaştırma, kullanıcı tarafından tanımlanan iki döneme ait medyan kompozitleri fark görüntüsü üretmeden karşılaştırır. Dönemlere ait istatistikler ve sınıf alanları ayrı ayrı sunulur; haritalar yan yana veya kaydırmalı görüntüleme aracıyla incelenebilir. Bu işlev, iki dönemin genel dağılımlarının görsel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmasını sağlar ancak piksel bazlı sınıf geçişlerini göstermez.

Değişim tespiti, iki döneme ait kompozitler arasındaki farkı ortak geçerli pikseller üzerinde hesaplar. Genel spektral indeks farkı aşağıdaki eşitlikle elde edilir:

$$\Delta I = I_{T2} - I_{T1} \tag{2}$$

Burada I_{T1}ilk döneme, I_{T2}ise ikinci döneme ait indeks değeridir.

Toplu analiz, aynı analiz işleminin birden fazla dönem veya çalışma alanı için kuyruk üzerinden yürütülmesini sağlar. Platformda haftalık ve iki haftalık analizler için 2–4, aylık ve yıllık analizler için 2–7 dönem birlikte işlenebilmektedir. Böylece kullanıcı, aynı indeks ve analiz parametrelerini farklı dönemlere veya birden fazla çalışma alanına ayrı ayrı işlem başlatmadan uygulayabilmektedir.

2.5. Raporlama

Sonuçlar PDF raporu, Excel (XLSX), GeoTIFF ve Google Earth KMZ olmak üzere dört formatta dışa aktarılmaktadır. PDF raporları; analiz parametrelerini, kullanılan formül ve bantları, mekânsal çözünürlüğü, bulut maskeleme ve kompozit yöntemlerini, istatistiksel özeti, piksel dağılımı histogramını, sınıflandırılmış haritayı ve sınıf alanı tablosunu içermektedir. KMZ çıktıları ise harita katmanlarıyla birlikte kullanıcı tarafından incelenebilen öznitelik bilgilerini sunmaktadır.

2.6. Benzer Platformlara Göre TerraScane'in Konumu

TerraScane'in işlevsel konumu, Eylül 2026 itibarıyla erişilebilen kamuya açık belgeleri incelenen web tabanlı uzaktan algılama platformlarıyla nitel olarak karşılaştırılmıştır. Copernicus Browser (Kovács vd., 2026) uydu veri ürünlerinin aranması, görüntülenmesi ve farklı tarihlere ait görüntülerin görsel olarak karşılaştırılmasına; Climate Engine (Huntington vd., 2017) çevresel ve iklimsel veri setlerinin zaman serisi ve anomali analizlerine; EOSDA LandViewer (Dengia vd., 2023) uydu görüntülerinin incelenmesi ve spektral indeks analizlerine odaklanmaktadır. EOSDA Crop Monitoring (Oymatov vd., 2023) gibi tarımsal izleme platformları ise ağırlıklı olarak parsel bazlı bitki gelişimi ve spektral indeks takibi sunmaktadır.

TerraScane, GEE tabanlı uzaktan algılama analizlerinin kod yazmadan gerçekleştirilmesi, sınıf alanlarının hesaplanması ve analiz sonuçlarının Türkçe veya İngilizce raporlanması üzerine yapılandırılmıştır. Kullanılan veri seti, analiz dönemi, kompozit yöntemi ve sınıflandırma eşiklerinin raporlarda belirtilmesi, analiz sürecinin kullanıcı tarafından izlenmesini desteklemektedir. Bununla birlikte zaman atlamalı animasyon, uzun dönem ortalamasına göre anomali analizi, mobil uygulama ve sonuçların açık bağlantı aracılığıyla paylaşılması gibi bazı işlevler TerraScane'in mevcut sürümünde bulunmamaktadır. Platformların özellikleri erişim veya abonelik düzeylerine ve yazılım güncellemelerine bağlı olarak değişebildiğinden, bu değerlendirme yalnızca inceleme tarihinde erişilebilen kamuya açık bilgilerle sınırlıdır.

2.7. Sınırlılıklar

TerraScane'in temel teknik sınırlılığı Google Earth Engine altyapısına bağımlı olmasıdır. Raster verilerin seçilmesi, ön işlenmesi ve analiz edilmesi GEE sunucularında gerçekleştirildiğinden işlem süreleri, GEE'nin anlık işlem yoğunluğu ve uygulanan işlem kotalarından etkilenebilmektedir. Analizlerin ortak bir hizmet hesabı üzerinden yürütülmesi nedeniyle eş zamanlı kullanımın artması işlem sürelerini uzatabilmektedir. Platform web tabanlı olduğundan analizlerin başlatılması, sonuçların görüntülenmesi ve çıktıların indirilmesi için internet bağlantısı gerekmektedir.

Hesaplama yükünün ve işlem hatalarının sınırlandırılması amacıyla çalışma alanları 0,1–100.000 ha arasında tutulmakta ve bir poligonda en fazla 500 köşeye izin verilmektedir. Bu sınırlar, özellikle 10 m mekânsal çözünürlüğe sahip veri setleriyle gerçekleştirilen geniş alan analizlerinde GEE'nin bellek ve işlem kısıtları dikkate alınarak belirlenmiştir. Analiz süresi; çalışma alanının büyüklüğüne, veri setinin mekânsal çözünürlüğüne, incelenen zaman aralığına, kullanılabilir görüntü sayısına ve seçilen analiz modülüne bağlı olarak değişebilmektedir.

Platform tarafından üretilen spektral indeks sınıfları için yer referans verilerine dayalı bağımsız bir doğruluk değerlendirmesi yapılmamıştır. Benzer şekilde, Dynamic World tabanlı arazi örtüsü sonuçlarının Bartın çalışma alanındaki doğruluğu bağımsız referans örnekleriyle sınanmamıştır. Bu nedenle spektral indeks sonuçları, kullanılan uydu ürünleri, kompozit yöntemleri ve varsayılan eşik değerleri kapsamında değerlendirilmelidir. Arazi örtüsü sonuçları ise çalışma alanına özgü doğrulanmış sınıflar olarak değil, Dynamic World sınıflandırmalarından üretilen mod kompozitleri olarak yorumlanmalıdır.

Spektral indekslerin yorumlanmasında kullanılan varsayılan eşiklerin farklı iklim bölgeleri, mevsimler, arazi örtüsü türleri ve sensörler için aynı ölçüde geçerli olduğu kabul edilmemelidir. Platform tarafından sunulan sınıflar, kesin arazi örtüsü veya çevresel durum sınıfları olarak değil, indeks değerlerinin yorumlanmasını kolaylaştıran varsayılan aralıklar olarak değerlendirilmelidir. Benzer biçimde NDVI değişim sınıfları, piksel değerlerindeki spektral değişimi göstermekte; gözlenen artış veya azalışın nedenini tek başına açıklamamaktadır.

Zamansal analiz sonuçları; kullanılan tarih aralığına, görüntü sayısına, bulut ve kalite maskeleme yöntemlerine ve kompozite dâhil edilen sahnelerin mevsimsel dağılımına duyarlıdır. Özellikle Dynamic World yıllık mod kompozitlerinde tam yıl ve kısmi yıl zaman pencerelerinin kullanılması, aynı çalışma alanı için farklı baskın sınıflar üretebilmektedir. Bu nedenle yıllar arası karşılaştırmalarda eşdeğer takvim aralıklarının seçilmesi ve her dönem için kullanılan görüntü sayısının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Platform tarafından otomatik olarak oluşturulan açıklamalar betimsel niteliktedir. Bu açıklamalar sayısal sonuçları ve sınıf dağılımlarını özetlemekte; gözlenen değişimlerin nedenlerine ilişkin nedensel çıkarım, çevresel uygunluk kararı veya yönetim önerisi üretmemektedir. Benzer şekilde sulak alan taraması, farklı veri setlerinden elde edilen tamamlayıcı göstergelere dayalı bir ön değerlendirme sunmakta; arazi çalışmasının, yasal sulak alan belirleme süreçlerinin veya ayrıntılı ekolojik değerlendirmelerin yerine geçmemektedir.

Veri seti ve analiz türü eşleşmelerinde sensör özelliklerinden kaynaklanan sınırlamalar da bulunmaktadır. MODIS MOD13A2 ürünü platformda yalnızca NDVI ve EVI analizlerinde kullanılabilmektedir. NDRE yalnızca kırmızı kenar bandına sahip Sentinel-2 görüntülerinden, UTFVI ise mevcut uygulamada Landsat 8 ve Landsat 9 yüzey sıcaklığı ürünlerinden hesaplanabilmektedir.

Platform kod yazmayı gerektirmeyen bir kullanıcı arayüzü sunmakla birlikte, arayüzün kullanılabilirliği farklı deneyim düzeylerine sahip kullanıcı gruplarını içeren yapılandırılmış bir kullanıcı çalışmasıyla henüz değerlendirilmemiştir.

3. BARTIN ÖRNEK UYGULAMASI

3.1. Çalışma Alanı ve Uygulama Tasarımı

Çalışma alanı, Bartın il merkezini ve çevresindeki tarım, orman ve yerleşim mozaiğini kapsayan 32,2902°–32,3925° D boylamları ile 41,6031°–41,6550° K enlemleri arasındaki dikdörtgen poligondur. Çalışma alanının elipsoit yüzölçümü 4.908,42 ha olup kenar uzunlukları yaklaşık 8,5 × 5,7 km'dir.

Sentinel-2 görüntülerinden hesaplanan NDVI, platformun dört farklı analiz modu kullanılarak incelenmiştir. Haziran 2024 dönemi tek tarihli analizle, Nisan–Haziran 2024 dönemleri toplu analizle, Nisan ve Temmuz 2024 dönemleri iki tarihli karşılaştırmayla, Haziran 2023 ve Haziran 2024 dönemleri ise piksel bazlı değişim tespitiyle değerlendirilmiştir. Böylece platformun tek bir dönemi analiz etme, birden fazla dönemi birlikte inceleme, iki dönemin sınıf dağılımlarını karşılaştırma ve dönemler arasındaki mekânsal değişimi belirleme işlevleri aynı çalışma alanında örneklendirilmiştir.

Arazi örtüsü analizinde ise Dynamic World verilerinden üretilen mod kompozitlerinin kullanılan zaman penceresine duyarlılığı incelenmiştir. Bu amaçla 2016 yılı için 1 Ocak–31 Aralık dönemini kapsayan tam yıl kompoziti ile 1 Ocak–30 Temmuz dönemini kapsayan kısmi yıl kompoziti karşılaştırılmıştır. Analizlerde kullanılan dönemler, veri setleri ve uygulama amaçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Örnek uygulama girdileri.

Mod	Dönemler	Ortak parametreler
Tek tarih	2024-06-01 - 2024-06-30	Poligon: Bartın referans alanı (4.908,42 ha)
İki tarih karşılaştırma	T1: 2024-04-01 - 04-30; T2: 2024-07-01 - 07-31	Rapor dili: Türkçe NDVI modlarında veri seti: Sentinel-2 L2A (10 m)
Değişim tespiti (yıllık)	T1: 2023-06-01 - 06-30; T2: 2024-06-01 - 06-30	NDVI modlarında şema: varsayılan 7 sınıf, bulut eşiği %20
Toplu (aylık, 3 dönem)	Nisan, Mayıs, Haziran 2024	Arazi örtüsünde: Dynamic World V1 (10 m), resmi 9 sınıf
Arazi örtüsü (Dynamic World)	2016 tam yıl; 2016 (1 Ocak - 30 Temmuz)	

3.2. NDVI Analizleri

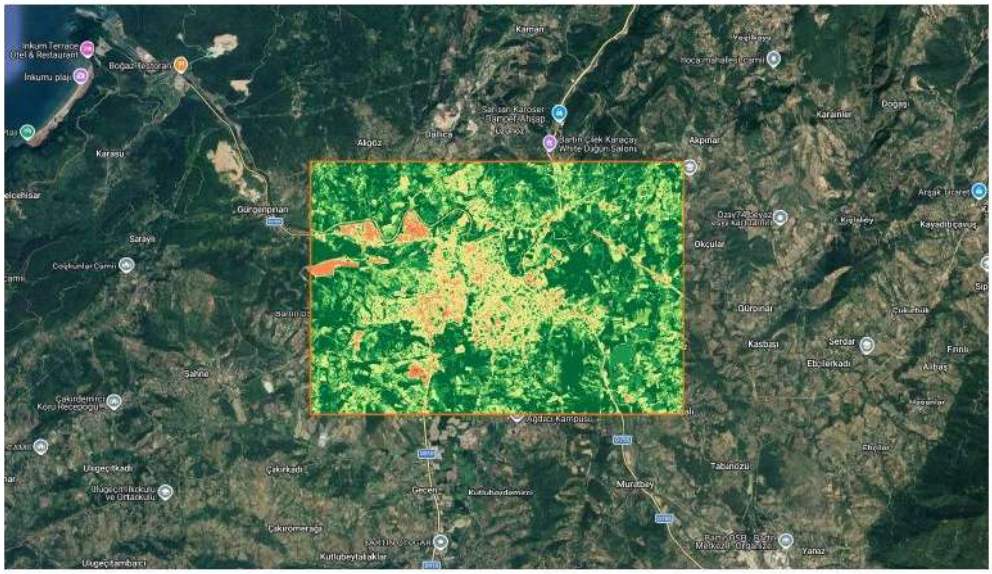
3.2.1. Tek Tarihli Analiz

Haziran 2024 dönemine ait tek tarihli analizde, 13 Sentinel-2 görüntüsünden medyan NDVI kompoziti oluşturulmuştur. Çalışma alanındaki ortalama NDVI değeri 0,5965, medyan değer 0,6524 ve standart sapma 0,2498 olarak hesaplanmış; NDVI değerlerinin −0,2810 ile 0,9272 arasında değiştiği belirlenmiştir.

NDVI değerleri platformun yedi sınıflı varsayılan şemasına göre sınıflandırılmıştır (Çizelge 4, Şekil 2). Bu sınıflandırmaya göre çalışma alanının %27,76'sı yoğun, %28,69'u ise çok yoğun bitki örtüsü sınıfında yer almıştır. Bu iki sınıf birlikte çalışma alanının %56,45'ini kapsamaktadır. Negatif ve çok düşük NDVI değerleriyle tanımlanan ilk iki sınıfın toplam oranı ise %3,25 olarak hesaplanmıştır. Haritanın görsel incelemesinde, yerleşim alanlarının bulunduğu kesimlerin ağırlıklı olarak düşük NDVI sınıflarıyla örtüştüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte bu gözlem, bağımsız bir arazi örtüsü verisiyle doğrulanmamıştır.

Çizelge 4. Tek tarih NDVI sınıf dağılımı, Haziran 2024.

Sınıf	Aralık	Alan (ha)	Yüzde (%)
Su kütleleri	−1 - 0	5,73	0,12
Çıplak toprak	0 - 0,1	153,47	3,13
Seyrek bitki örtüsü	0,1 - 0,2	416,92	8,49
Düşük yoğunluk	0,2 - 0,4	588,04	11,98
Orta yoğunluk	0,4 - 0,6	973,37	19,83
Yoğun bitki örtüsü	0,6 - 0,8	1.362,55	27,76
Çok yoğun bitki	0,8 - 1	1.408,34	28,69
Toplam		**4.908,42**	**100,00**



Şekil 2. Bartın referans alanı, Sentinel-2 NDVI sınıflı harita (1-30 Haziran 2024, 13 sahne, bulut eşiği %20). Turuncu çerçeve çalışma alanı sınırıdır.

3.2.2. İki Tarihli Karşılaştırma Analizi

İki tarihli karşılaştırma modunda Nisan 2024 ve Temmuz 2024 dönemlerine ait NDVI kompozitleri karşılaştırılmıştır. Ortalama NDVI değeri nisanda 0,6063 iken temmuzda 0,5544'e düşmüş ve iki dönem arasındaki fark −0,0519 olarak hesaplanmıştır. Medyan NDVI değeri de 0,6914'ten 0,5899'a gerilemiştir. Buna karşılık standart sapma değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir: Nisan için 0,2445, Temmuz için 0,2459 (Çizelge 5).

Platformun varsayılan NDVI sınıflandırmasına göre "yoğun bitki örtüsü" sınıfının toplam alan içindeki payı %42,4'ten %26,7'ye gerileyerek 15,7 yüzde puan azalmıştır. "Orta yoğunluk" sınıfının payı 9,0 yüzde puan, "düşük yoğunluk" sınıfının payı ise 6,4 yüzde puan artmıştır. Bu iki sınıftaki toplam artış 15,4 yüzde puandır. "Çok yoğun bitki" sınıfının payında ise yalnızca 0,3 yüzde puanlık bir azalma görülmüştür.

Çizelge 5. Nisan 2024 (T1) ve Temmuz 2024 (T2) dönemlerine ait NDVI sınıf alanlarının karşılaştırılması.

Sınıf	T1 (ha)	T1 (%)	T2 (ha)	T2 (%)	Fark (puan)
Su kütleleri	27,54	0,6	9,35	0,2	−0,4
Çıplak toprak	169,27	3,4	208,98	4,2	+0,8
Seyrek bitki örtüsü	357,45	7,3	366,07	7,5	+0,2
Düşük yoğunluk	487,16	9,9	799,02	16,3	+6,4
Orta yoğunluk	699,94	14,3	1.144,56	23,3	+9,0
Yoğun bitki örtüsü	2.080,13	42,4	1.309,08	26,7	−15,7
Çok yoğun bitki	1.086,54	22,1	1.070,95	21,8	−0,3

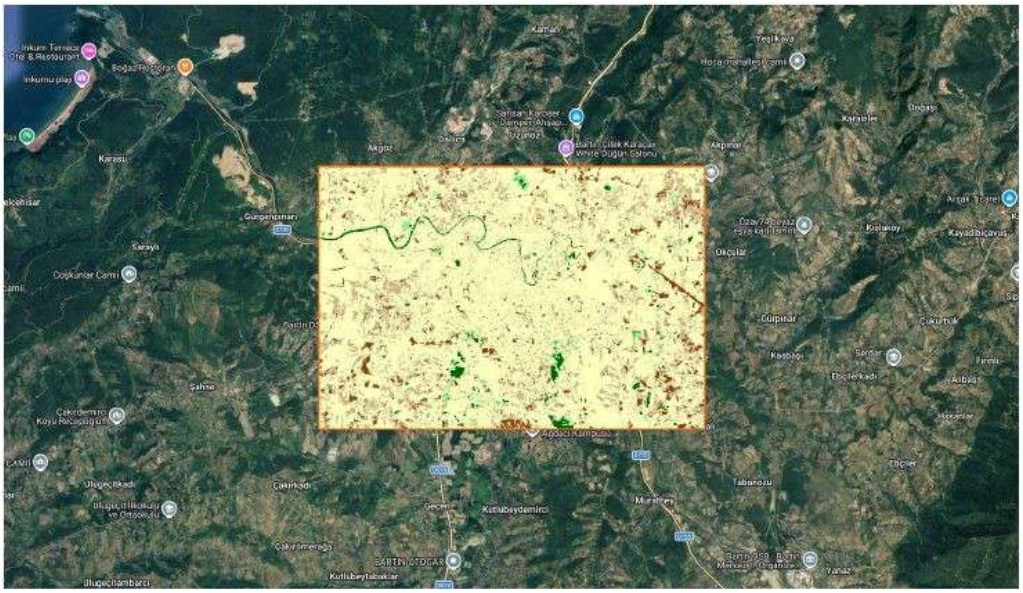
3.2.3. Değişim Tespiti Analizi

Haziran 2023 ve Haziran 2024 dönemlerine ait medyan NDVI kompozitleri arasında piksel bazında değişim analizi gerçekleştirilmiştir. Haziran 2023 kompoziti 7, Haziran 2024 kompoziti ise 13 Sentinel-2 görüntüsünden üretilmiştir. Çalışma alanının ortalama NDVI değeri 0,6350'den 0,5965'e düşmüş ve dönemler arasındaki ortalama fark −0,0385 olarak hesaplanmıştır.

Piksel bazlı fark görüntüsü $\Delta NDVI = NDV\,I_{2024} - NDV\,I_{2023}$ eşitliğiyle oluşturulmuştur. Fark görüntüsünün ortalaması −0,0385, standart sapması 0,1131; minimum ve maksimum değerleri sırasıyla −0,9900 ve 0,7355'tir. Platformun varsayılan değişim eşiklerine göre çalışma alanının %74,2'si (3.641,87 ha) "sınırlı değişim" sınıfında yer almıştır. Negatif NDVI değişimi gösteren sınıfların toplam oranı %20,7'dir. Bu alanın 831,72 ha'sında hafif, 186,03 ha'sında ise belirgin NDVI azalması belirlenmiştir. Pozitif değişim gösteren sınıflar toplam alanın %5,1'ini oluşturmuş; 176,17 ha hafif, 71,85 ha belirgin NDVI artışı sınıfında yer almıştır (Şekil 3).

Belirgin NDVI azalması gösteren piksellerin nehir yatağı boyunca ve yerleşim çevresindeki küçük parsellerde yoğunlaştığı görsel olarak gözlenmiştir. Bununla birlikte bu dağılım doğrudan bitki örtüsü bozulmasının göstergesi olarak yorumlanmamalıdır. Nehir yatağındaki farklılıklar su düzeyi ve kıyı çizgisindeki değişimlerden; yerleşim çevresindeki farklılıklar ise bitki fenolojisi, tarımsal faaliyetler, yüzey nemi, gölge, karma pikseller veya görüntüleme koşullarından kaynaklanabilir.

İki dönemde kullanılan görüntü sayılarının farklı olması ve medyan kompozite katılan sahnelerin aynı tarihlerde elde edilmemesi de fark görüntüsünü etkileyebilir. Bu nedenle sonuçlar, gerçek arazi örtüsü değişiminin doğrulanmış ölçümü olarak değil, iki dönemin spektral NDVI koşulları arasındaki farklılığın ön göstergesi olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3. Bartın çalışma alanında Haziran 2023 ve Haziran 2024 dönemleri arasındaki piksel bazlı NDVI farkı (kahverengi tonlar NDVI azalmasını, açık sarı sınırlı değişimi ve yeşil tonlar NDVI artışını göstermektedir).

3.2.4. Toplu Analiz

Toplu analiz modunda aynı çalışma alanı için Nisan, Mayıs ve Haziran 2024 dönemlerine ait aylık Sentinel-2 NDVI kompozitleri birlikte değerlendirilmiştir. Kompozitlerin oluşturulmasında nisanda 6, mayısta 9 ve haziranda 13 görüntü kullanılmıştır. Ortalama NDVI değeri nisanda 0,6063 iken mayısta 0,6492'ye yükselmiş, haziranda ise 0,5965'e gerilemiştir. Buna göre incelenen üç dönem içinde en yüksek ortalama NDVI mayısta, en düşük ortalama NDVI ise haziranda elde edilmiştir (Çizelge 6).

Standart sapma değerleri nisan, mayıs ve haziran dönemleri için sırasıyla 0,2445, 0,2403 ve 0,2498 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler NDVI dağılımındaki değişkenliğin üç dönemde benzer düzeyde olduğunu göstermektedir. Aylık kompozitlerin sınıflandırılmış görünümleri Şekil 4'te sunulmuştur.

Çizelge 6. Toplu analiz dönem istatistikleri ve sınıf alanları.

Dönem	Görüntü	Ortalama	Std	Min	Maks
Nisan 2024	6	0,6063	0,2445	−0,6394	0,9500
Mayıs 2024	9	0,6492	0,2403	−0,3062	0,9285
Haziran 2024	13	0,5965	0,2498	−0,2810	0,9272

Sınıf alanları hektardır.



Şekil 4. Toplu analiz: Nisan (T1), Mayıs (T2) ve Haziran (T3) 2024 NDVI sınıflı haritaları, aynı yedi sınıflı şema.

3.3. Arazi Örtüsü Analizi

Arazi örtüsü modülünde, seçilen bir sınıfa ait alansal dağılımın yıl içerisindeki zamansal değişimi izlenebilmekte ve bu değişimlerin değerlendirilmesine ilişkin bir örnek Çizelge 7'de sunulmaktadır. Bu kapsamda, Dynamic World veri seti kullanılarak 2016 yılına ait tüm aylardaki arazi örtüsü sınıflarının alansal varlığı ile yılın ilk yedi aylık dönemine (1 Ocak–30 Temmuz) ait alansal dağılımlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 7'de görüldüğü üzere, sınıfların hesaplanan alansal büyüklüklerinde yıl içerisinde farklılıklar meydana gelmiştir. 1 Ocak– 30 Temmuz dönemi ile 12 aylık dönem

karşılaştırıldığında; tarım alanlarının yaklaşık %25,5, çıplak toprak sınıfının %14,0 ve su sınıfının %20,1 oranında daha yüksek alansal değer aldığı, buna karşılık çalı/funda sınıfının yaklaşık %52,9 oranında azaldığı görülmektedir. Ayrıca, 12 aylık dönemde gözlenmeyen kar/buz sınıfının 1 Ocak– 30 Temmuz döneminde 0,98 ha olarak sınıflandırıldığı belirlenmiştir.

Bununla birlikte, söz konusu farklılıkların doğrudan gerçek arazi örtüsü değişimi olarak yorumlanmaması gerekmektedir. Dynamic World gibi yüksek zamansal çözünürlüklü veri setlerinde gözlenen sınıfsal farklılıklar; mevsimsel değişimler, atmosferik koşullar, görüntüleme geometrisi, bulutluluk ve kullanılan görüntü sayısındaki farklılıklar gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Dolayısıyla, gözlenen değişimlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının belirlenmesi ve gerçek arazi örtüsü değişimlerinden ayrıştırılması için görsel değerlendirmelerin yanı sıra uygun istatistiksel yöntemlerle doğrulama yapılması önem taşımaktadır. Bu örnek uygulama Dynamic World verilerinin yalnızca uzun dönemli arazi örtüsü değişimlerini değil, belirli bir örnek alanın yıl içerisindeki zamansal ve sınıfsal değişimlerinin izlenmesine de olanak sağlayabileceğini göstermektedir. Bu özellik, özellikle tarım, su, çıplak toprak ve bitki örtüsü gibi mevsimsel dinamiklerin belirgin olduğu sınıfların izlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Bu değerlendirmede özellikle dikkate alınması gereken bir diğer husus, farklı yıllarda analize dâhil edilen uydu görüntüsü sayılarının aynı olmamasıdır. Örneğin, 1 Ocak–30 Temmuz dönemi için 2016 yılında 29 gözlenebilir Sentinel-2 sahnesi bulunurken, aynı dönem için 2026 yılında bu sayı 53'e ulaşmaktadır. Buna göre güncel dönemde kullanılabilecek gözlem sayısı yaklaşık 1,83 kat artmıştır. Bu farklılık, zaman serilerinin ve yıllar arası karşılaştırmaların yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Görüntü sayısındaki artışın temel nedenlerinden biri, 2016 yılında yörüngede yalnızca Sentinel-2A uydusunun bulunmasına karşın, Sentinel-2B'nin 2017 yılında ve Sentinel-2C'nin 2024 yılında sisteme dâhil olmasıdır. Dolayısıyla, Dynamic World tabanlı arazi örtüsü değerlendirmelerinde yalnızca elde edilen sınıf alanlarının karşılaştırılması yeterli olmayıp, analiz dönemleri arasındaki görüntü sayısı, zamansal örnekleme yoğunluğu ve mevsimsel koşulların da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, gözlenen alansal farklılıkların gerçek arazi örtüsü değişimlerinden mi, yoksa veri ve gözlem koşullarındaki farklılıklardan mı kaynaklandığının daha güvenilir biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.

Çizelge 7. Dynamic World 2016 verisinin arazi kullanım sınıf alanlarına etkisi.

Sınıf	**2016 (12 ay) (ha)**	**2016 (Oca-Tem) (ha)**
Su	57,31	68,86
Ağaçlık	2.580,14	2.542,53
Çayır / ot	475,63	469,89
Su basmış bitki	0,01	0,07
Tarım	223,46	280,46
Çalı / funda	106,25	50,07
Yapılı alan	1.435,85	1.461,67
Çıplak toprak	29,38	33,50
Kar / buz	0,00	0,98

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Google Earth Engine altyapısı üzerinde çalışan, kodlama gerektirmeyen ve web tabanlı bir uzaktan algılama ve CBS analiz platformu olan TerraScane tanıtılmıştır. Platform; spektral indeks, yüzey sıcaklığı, kentsel ısı adası göstergesi, topografya, arazi örtüsü ve sulak alan taraması gibi farklı analizleri ortak bir arayüzde bir araya getirmektedir. Çalışma alanı, tarih aralığı, veri seti ve analiz türünün kullanıcı tarafından belirlenebilmesi, platformun farklı uygulama ihtiyaçlarına göre kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kullanılan veri seti, analiz dönemi, kompozit yöntemi ve sınıflandırma eşiklerinin çıktılarda belirtilmesi ise analiz sürecinin izlenmesini ve benzer parametrelerle yeniden uygulanmasını desteklemektedir.

Platformun temel işlevleri, Bartın il merkezini ve çevresini kapsayan 4.908,42 ha büyüklüğündeki örnek alanda Sentinel-2 NDVI ve Dynamic World arazi örtüsü verileri kullanılarak gösterilmiştir. NDVI analizleriyle farklı dönemlere ait değer dağılımları karşılaştırılmış ve dönemler arasındaki piksel bazlı farklılıklar haritalanmıştır. Haziran 2024 dönemi için ortalama NDVI değeri 0,5965 olarak hesaplanmış; Nisan–Haziran 2024 döneminde incelenen aylar arasındaki en yüksek ortalama NDVI mayısta elde edilmiştir. Haziran 2023 ve Haziran 2024 arasındaki değişim analizinde ise çalışma alanının büyük bölümünün sınırlı değişim sınıfında kaldığı belirlenmiştir.

Dynamic World arazi örtüsü uygulamasında, aynı yıla ait tam ve kısmi yıl kompozitlerinin bazı sınıflar için farklı alan sonuçları ürettiği görülmüştür. Bu bulgu, arazi örtüsü karşılaştırmalarında eşdeğer zaman aralıklarının kullanılmasının ve kompozite dâhil edilen görüntülerin zamansal dağılımının dikkate alınmasının önemini göstermektedir.

Bartın uygulaması, platformun doğruluk değerlendirmesinden çok farklı analiz işlevlerinin kullanımını gösteren örnek bir uygulamadır. Sonuçlar bağımsız yer referans verileriyle doğrulanmadığından kesin arazi örtüsü sınıfları veya

değişim nedenleri olarak değil, ileri incelemeleri destekleyen mekânsal göstergeler olarak değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmalarda platformun farklı coğrafi koşullarda sınanması, sonuçların yer referans verileriyle karşılaştırılması ve arayüzün farklı kullanıcı gruplarıyla değerlendirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak TerraScane, GEE altyapısındaki açık erişimli uydu verilerini ve analiz olanaklarını, kod yazmadan kullanılabilen Türkçe ve İngilizce dil desteğine sahip bütünleşik bir web arayüzünde sunmaktadır. Platformun farklı çalışma alanlarına, tarih aralıklarına ve analiz ihtiyaçlarına uyarlanabilmesi, benzer analizlerin ortak işlem kurallarıyla yeniden uygulanmasını ve sonuçların standart çıktılar üzerinden karşılaştırılmasını desteklemektedir. Gelecek çalışmalarda platformun farklı coğrafi ve çevresel koşullarda sınanması, sonuçlarının yer referans verileriyle karşılaştırılması ve arayüz kullanılabilirliğinin farklı deneyim düzeylerindeki kullanıcılarla değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu çalışmalar, platformun eğitim, araştırma ve çevresel izleme uygulamalarındaki kullanım olanaklarının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H. ve Moran, M.S., 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA.

Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R. ve Tait, A.M., 2022. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data, 9: 251.

Claverie, M., Ju, J., Masek, J.G., Dungan, J.L., Vermote, E.F., Roger, J.-C., Skakun, S.V. ve Justice, C., 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. Remote Sensing of Environment, 219: 145-161.

Dengia, A., Dechassa, N., Wogi, L. ve Amsalu, B., 2023. A simplified approach to satellite-based monitoring system of sugarcane plantation to manage yield decline at Wonji-Shoa Sugar Estate, central Ethiopia. Heliyon, 9(8): e18982.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. ve Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment, 120: 25-36.

Elgendy, N. ve Elragal, A., 2016. Big data analytics in support of the decision making process. Procedia Computer Science, 100: 1071-1084.

Gabriele, M., Brumana, R., Previtali, M. ve Cazzani, A., 2023. A combined GIS and remote sensing approach for monitoring climate change-related land degradation to support landscape preservation and planning tools: the Basilicata case study. Applied Geomatics, 15(3): 497-532.

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. ve Merzlyak, M.N., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 58(3): 289-298.

Gomes, V.C.F., Queiroz, G.R. ve Ferreira, K.R., 2020. An overview of platforms for big earth observation data management and analysis. Remote Sensing, 12(8): 1253.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. ve Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202: 18-27.

Griffith, J.A., 2025. Understanding the limits: opportunities and challenges in the use of web-based land cover analysis tools by conservation groups. Natural Areas Journal, 45(3): 218-225.

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O. ve Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, 342(6160): 850-853.

Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3): 295-309.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. ve Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1-2): 195-213.

Huntington, J.L., Hegewisch, K.C., Daudert, B., Morton, C.G., Abatzoglou, J.T., McEvoy, D.J. ve Erickson, T., 2017. Climate Engine: Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(11): 2397-2410.

Key, C.H. ve Benson, N.C., 2006. Landscape Assessment (LA): Sampling and Analysis Methods. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-164-CD.

Kovács, D.D., Musial, J., Bojanowski, J., Clarijs, D., de la Mar, J. ve Zlinszky, A., 2026. Copernicus Data Space Ecosystem establishes public cloud processing for earth observation data. Scientific Data, 13(1): 537.

Lehmann, F., Lewińska, K.E., Frantz, D., Pflugmacher, D., Katerndahl, F., Kummer, F., Hostert, P. ve Leser, U., 2026. Portable and scalable workflows for earth observation data analysis with Nextflow. Leser, U., Hilbrich, M., Wilkinson, S.R. ve Ferreira da Silva, R. (ed.), Workflow Systems for Large-Scale Scientific Data Analysis içinde, Berlin Universities Publishing, Berlin.

Liu, L. ve Zhang, Y., 2011. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. Remote Sensing, 3(7): 1535-1552.

López García, M.J. ve Caselles, V., 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. Geocarto International, 6(1): 31-37.

McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7): 1425-1432.

Oymatov, R., Musaev, I., Bakhriev, M. ve Aminova, G., 2023. Monitoring agricultural land areas using GIS-online program EOS DA: case study of Andijan region. E3S Web of Conferences, 401: 02005.

Potapov, P., Hansen, M.C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I. ve Kommareddy, A., 2022. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. Frontiers in Remote Sensing, 3: 856903.

Rikimaru, A., Roy, P.S. ve Miyatake, S., 2002. Tropical forest cover density mapping. Tropical Ecology, 43(1): 39-47.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. ve Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 309-317.

Roy, P.S., Ramachandran, R.M., Paul, O., Thakur, P.K., Ravan, S., Behera, M.D. ve Kanawade, V.P., 2022. Anthropogenic land use and land cover changes: a review on its environmental consequences and climate change. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 50(8): 1615-1640.

Van Deventer, A.P., Ward, A.D., Gowda, P.H. ve Lyon, J.G., 1997. Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(1): 87-93.

Wilson, E.H. ve Sader, S.A., 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment, 80(3): 385-396.

Xu, H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14): 3025-3033.

Zha, Y., Gao, J. ve Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3): 583-594.

Zhang, Z. ve Zhu, L., 2023. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: platforms, sensors, data processing methods, and applications. Drones, 7(6): 398.

Zhao, Q. ve Yu, L., 2025. Advancing sustainable development goals through earth observation satellite data: current insights and future directions. Journal of Remote Sensing, 5: 0403.

METEOROLOJİK KURAKLIK ANALİZİ SÜRECİNİN UML DİYAGRAMLARIYLA MODELLENMESİ

Bekir TAŞTAN

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, 37150, Kastamonu, bekirtastan@kastamonu.edu.tr

ÖZET

Kuraklık, uzun süreli yağış azlığı nedeniyle meydana gelen; tarım, ekosistemler, su kaynakları ve sosyoekonomik faaliyetler üzerinde çok önemli etkiler oluşturan doğal afetler arasındadır. Son zamanlarda iklim değişikliğinin de etkisiyle kuraklık olaylarının sıklığı, süresi ve şiddetinde meydana gelen değişimler nedeniyle kuraklığın izlenmesi ve değerlendirilmesine yönelik bilimsel çalışmaların önemi giderek artmaktadır.

Bugünlerde kuraklık analizlerinin yapılmasında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojileri önemli katkılarda bulunmaktadır. Yağış ve sıcaklık değerlerinin analiz edilmesi, bitki örtüsü indekslerinin hesaplanması ve sonuçlarının mekânsal olarak modellenmesi, farklı veri kaynaklarını bütünleştirebilen bir yapıya sahip olan Coğrafi Bilgi Sistemleri sayesinde karmaşık işlemler kolaylıkla yapılabilmektedir.

Birleşik Modelleme Dili (Unified Modeling Language - UML) karmaşık sistemlerin bileşenlerini, işleyiş süreçlerini ve aralarındaki ilişkileri görsel olarak anlatmak için kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır. Çalışmanın amacı, meteorolojik kuraklık analizi sürecinde kullanılan veri kaynakları, analiz aşamaları ve çıktı üretim süreçlerini UML diyagramları kullanarak modellemek ve CBS tabanlı kuraklık analizi için kavramsal bir model ortaya koymaktır. Modelleme sürecinde meteorolojik veriler (yağış, sıcaklık, buharlaşma, normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI), yüzey sıcaklığı, sayısal yükseklik verisi, arazi kullanım verisi, toprak verileri, hidrolojik veriler, iklim değişikliği projeksiyonları) dikkate alınarak UML diyagramları oluşturulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), meteorolojik kuraklık, uml modelleme

ABSTRACT

MODELLING THE METEOROLOGICAL DROUGHT ANALYSIS PROCESS USING UML DIAGRAMS

Drought is among the natural hazards that occur due to prolonged precipitation deficiency and cause significant impacts on agriculture, ecosystems, water resources, and socioeconomic activities. Recently, due to the effects of climate change, changes in the frequency, duration, and severity of drought events have increased the importance of scientific studies focusing on drought monitoring and assessment.

Today, Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing technologies provide significant contributions to drought analysis. Complex processes can be effectively performed through Geographic Information Systems, which have the ability to integrate different data sources, such as precipitation and temperature data analysis, vegetation index calculations, and spatial modelling of results.

Unified Modelling Language (UML) is a modelling approach used to visually represent the components, operational processes, and relationships of complex systems. This study aims to model the data sources, analysis stages, and output generation processes used in meteorological drought analysis using UML diagrams and to propose a conceptual model for GIS-based drought analysis. During the modelling process, UML diagrams were developed by considering meteorological data (precipitation, temperature, evapotranspiration), normalised difference vegetation index (NDVI), land surface temperature, digital elevation data, land use/land cover data, soil data, hydrological data, and climate change projections.

Keywords: Geographic Information Systems (GIS), meteorological drought, UML modelling

GİRİŞ

Meteorolojik kuraklık belirli bir zaman dilimi süresince yeryüzünün aldığı yağış miktarının ortalamanın altında olmasıyla gerçekleşen bir süreci ifade eder (Sarış ve Gedik, 2021). İklim değişikliğinin etkisiyle son zamanlarda yağış süresi ve şiddetinde meydana gelen değişimler kuraklığın etkilerinin daha fazla hissedilmesine neden olmaktadır.

Kuraklık analizlerinde geçmişte ağırlıklı olarak zamansal değişimler ele alınırken, günümüzde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojilerinin gelişmesiyle beraber kuraklığın mekânsal dağılımının belirlenmesine yönelik analiz ve modelleme çalışmaları da yaygınlaşmıştır (Demiray ve Sarış, 2025). Bu kapsamda farklı veri kaynaklarının birlikte analiz edilmesiyle beraber kuraklık analiz süreçleri daha kapsamlı ancak karmaşık bir yapıya dönüşmeye başlamıştır.

Bu karmaşık analiz süreçlerinin daha anlaşılır, sistematik ve standart bir yapı halinde sunulabilmesi için modelleme yaklaşımlarından faydalanılmaktadır. Birleşik Modelleme Dili (UML) yazılım geliştirme süreçlerinde sistemlerin bileşenlerini, işleyiş adımlarını ve bileşenler arasındaki etkileşimleri görsel olarak ifade etmek amacıyla kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır (Uymaz ve Kahramanlı, 2016). UML CBS tabanlı meteorolojik kuraklık analiz süreçlerinin veri akışı, analiz aşamaları ve çıktı üretim süreçlerinin modellenmesinde kullanılabilecek uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada meteorolojik kuraklık analizi süreci, nesne yönelimli modelleme yaklaşımıyla gösterilmiştir. Kuraklık analizinde kullanılan temel veri ve yöntemler dikkate alınarak UML diyagramları geliştirilmiştir. Meteorolojik veriler, uzaktan algılama verileri, CBS analizleri ve sonuç ürünleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Birleşik Modelleme Dili (Unified Modeling Language) sistem veya yazılım geliştiricileri için yazılım sistemlerinin bileşenlerini belirten, görselleştirme sağlayan ve belgeleme konusunda yardımcı olan entegre diyagram kümesinden oluşan standartlaştırılan modelleme dilidir (Url-1). Sınıf diyagramları sistemde bulunan farklı nesneleri, nitelikleri, işlemleri ve aralarındaki ilişkileri göstermek için kullanılır (Baykara, 2020).

Kuraklık analizi coğrafi veri modeli ISO 19103 kavramsal şema dili (ISO/TC211), Afet-Acil Durum Yönetim Sistemi (ADYS), Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ve Kent Bilgi Sistemi ile uyumludur. Model kuraklık analizi tehlike, zarar görebilirlik, risk ve maruziyet analizleri için gerekli olan veri türlerini genel kabuller bağlamında gösteren ve bu veri türlerinin özelliklerini açıklayan bilgileri ihtiva etmektedir.

Çalışma kapsamında kuraklık analizinde kullanılan temel nesneler ve bunların özellikleri tanımlanmıştır. Meteorolojik veriler, uzaktan algılama verileri, topografik veriler, arazi kullanımı, hidrografya, kuraklık indeksi verileri için veri formatları belirlenmiş ve analiz sonuç sınıfları oluşturulmuştur. Oluşturulan veri modeli INSPIRE ve TUCBS gibi mekânsal veri altyapılarına uyumlu hale getirilmiş ve GML dönüşüm formatına uyumlulaştırılmıştır.

Modelin çalıştırılması için kuraklık tehlikesinin, zarar görebilirlik niteliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Her iki nitelik diyagramlarla modellenmiştir. Kuraklık analizinin sonucu olan *"KuraklıkTehlike"* sınıfı modelin merkezinde yer alır (Şekil 1). Bu sınıf "featureType" stereotype'ı ile tanımlanmıştır. Tehlike analizinin gerçekleştirildiği coğrafi birimleri göstermektedir. Kuraklık tehlikesi yalnızca sayısal veya sözel bir nitelik olarak belirtilmekle kalmayıp mekânsal olarak dağılımı verilen bir coğrafi nesne olarak modellenmiştir.

"KuraklıkTehlike" sınıfında analiz yönteminin, analiz sonucunun oluşturulması, tehlike değeri ve tehlike sınıfını tanımlayan öznitelikler de bulunmaktadır. "*analizYontemi"* özniteliği kuraklık analiz yöntemini, *"tehlikeDegeri"* ise analiz sonucunda elde edilecek sayısal tehlike değerini göstermektedir.

Kuraklık tehlikesinin belirlenmesi için meteorolojik verilere de ihtiyaç vardır. Bu sınıf *"featureType"* olarak belirtilmiş ve GM_Point geometrisiyle ilişkilendirilmiştir. Bu sınıfta sıcaklık, güneşlenme süresi, radyasyon, istasyon kimliği, yağış ve tarih, zaman aralığı, potansiyel evapotranspirasyon, aktüel evapotranspirasyon gibi öznitelikler vardır. Bu sınıf meteorolojik ölçümlerin hem zamansal hem de mekânsal olarak tespit edilip modelde kullanılmasını öngörmektedir.

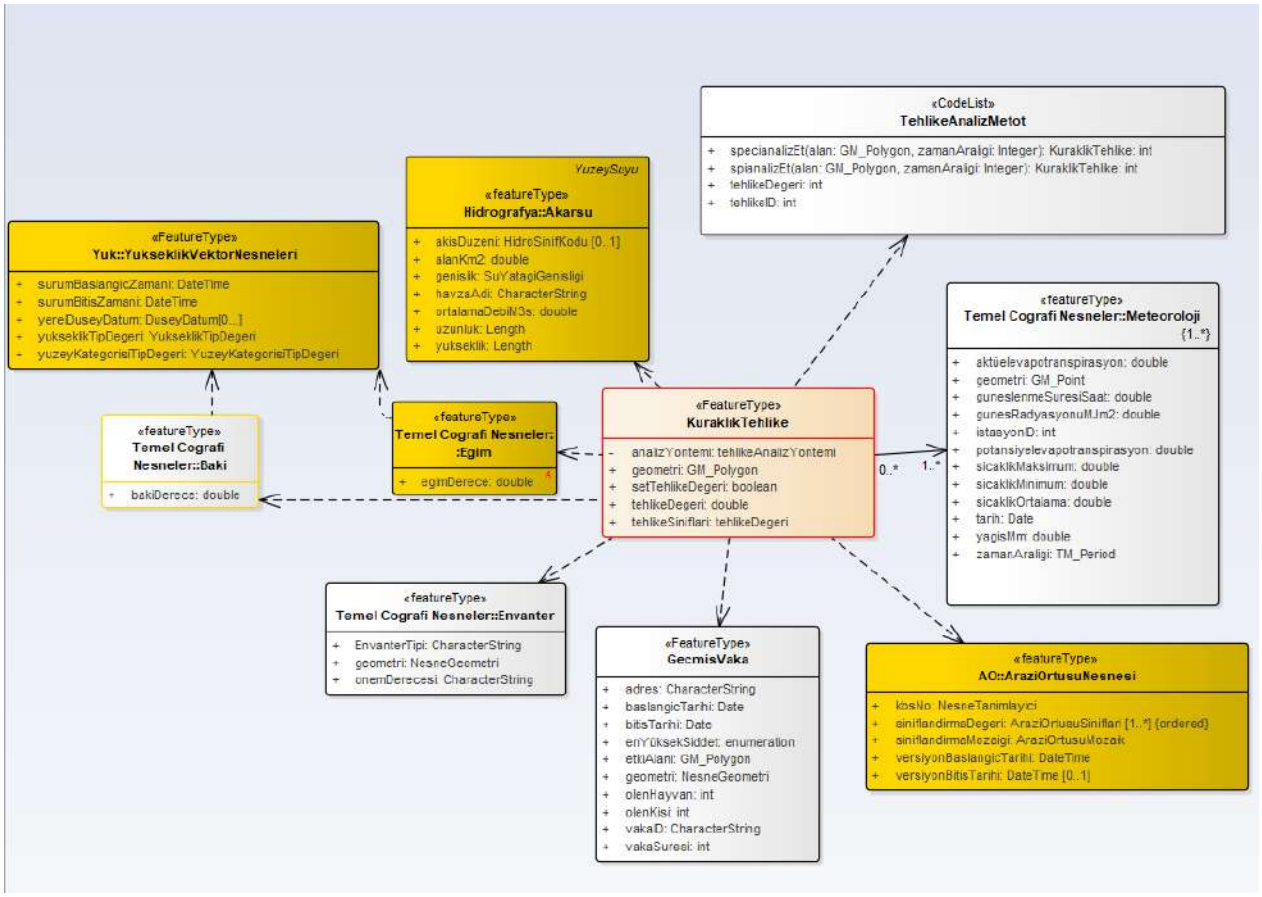
Hidrolojik veriler Hidrografya::Akarsu sınıfı ile gösterilmiştir. Akarsu veri sınıfı (<<featuretype>>Akarsu) TUCBS HI'den, Arazi örtüsü veri sınıfı (<<featureType>> AraziOrtusuNesnesi) TUCBS AO'dan, meteoroloji (<<TemelCografiNesneler>> Meteoroloji) veri temalarından elde edilmiştir.

Kuraklık tehlike analizi veri sınıfı ile diğer veri sınıfları arasında tehlike analizini gerçekleştirebilmek için diğer veri sınıflarına da ihtiyaç duyulduğu için bağımlılık ilişkisi kurulmuştur.

Topografik veriler Yuk::YükseklikVektörNesneleri, Bakı ve Eğim gibi sınıflarla temsil edilmiştir. Bu veri sınıfları (<<featuretype>> YukseklikGrid) TUCBS Yuk veri temasından elde edilmiştir. Yükseklik sınıfı yüzeyin başlangıç ve bitiş zamanları, düşey datum, yükseklik tipi ve yüzey kategorisini ihtiva ederken, bakı sınıf bakı derecesini, eğim

sınıfı ise eğim derecesini tanımlar. Bu sınıflar arazinin hidrolojik anlamda göstereceği davranışı, su tutabilme kapasitesini etkileyen topoğrafik niteliklerin analize dahil edilmesini sağlamaktadır.

Tehlikenin belirlenebilmesi için geçmişte yaşanmış tehlike vakaları da önemlidir. Bu vakalar "GeçmişVaka" sınıfı ile gösterilmiştir. Bu sınıfta olayın konumu, başlangıç ve bitiş tarihleri, etkilenme alanı, en yüksek şiddeti, olayın geometrisi, ölen kişi sayısı ve vaka süresi ihtiva edilmektedir. Tehlike analizinin gerçekleştirilmesi sonrası doğruluk analizinin yapılması böylelikle mümkün hale gelebilecektir.



Şekil 1 Kuraklık tehlike analizi UML diyagramı

Sınıflar arasındaki ilişkiler, analiz girdilerinin "KuraklıkTehlike" sınıfında bütünleştiğini göstermektedir. Diyagramda görülen 0..* ve 1..* çoklukları, bir tehlike nesnesiyle birden fazla meteorolojik ölçümün, arazi örtüsü kaydının ve diğer coğrafi nesnenin ilişkilendirilebileceğini ifade eder. Farklı zamanlarda ve farklı mekânlarda üretilen ölçümlerin bir tehlike nesnesi altında yönetilebilmesine bu yaklaşım yardımcı olmaktadır.

Modelde yöntem ve sınıflandırma seçeneklerinin standart bir biçimde sunulabilmesi amacıyla "TehlikeAnalizMetot" ve tehlike sınıfı bilgileri kod listesi biçiminde tanımlanmıştır. Bu yapı birbirinden farklı veri üreticileri tarafından girilebilecek serbest metin değerlerini sınırlandırarak veri bütünlüğünü artırmaktadır.

Sonuç olarak, kuraklık tehlikesi UML modeli diyagramı, kuraklık tehlikesi analizinde kullanılan farklı veri kaynaklarının ortak bir coğrafi veri modeli bünyesinde birleştirilmesini sağlamaktadır. Model yalnızca kavramsal veri yapısını göstermekle kalmayıp aynı zamanda GML uygulama şeması ve buna bağlı XML biçiminde veri üretimi için de temel oluşturmaktadır.

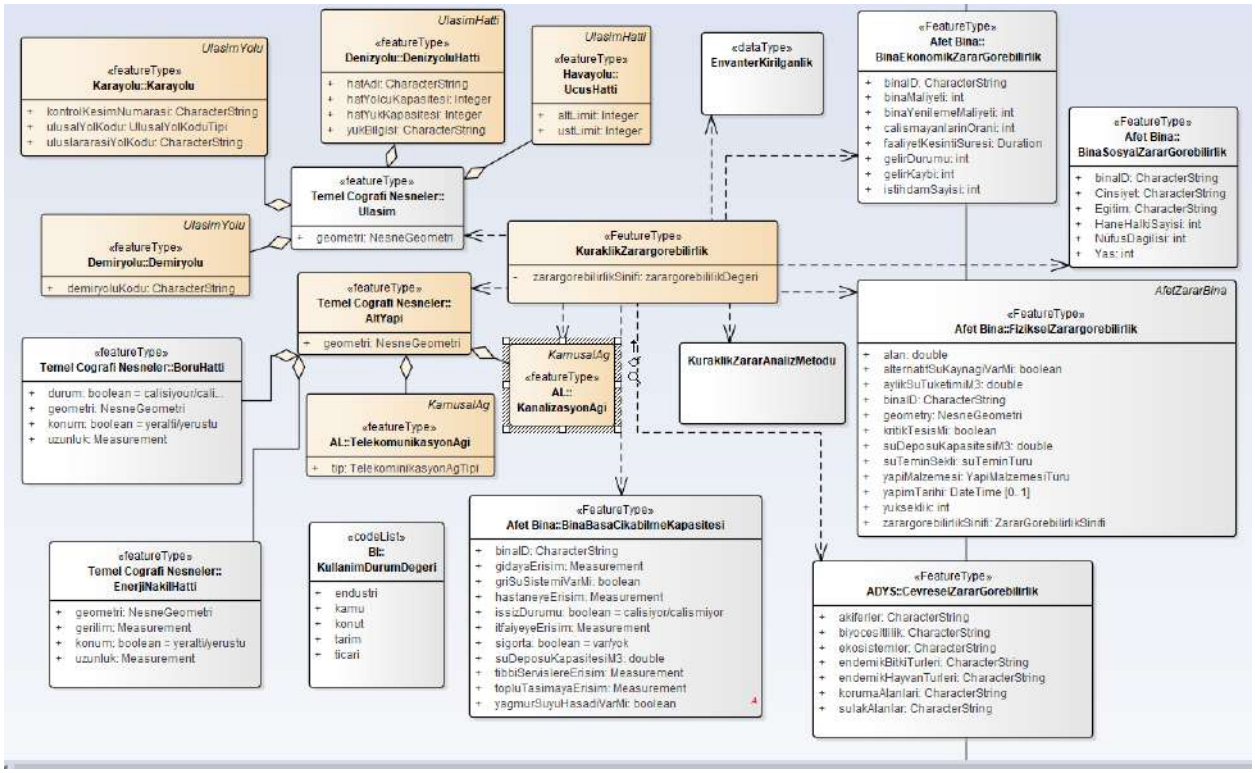
Modelde ikinci olarak kuraklık zarar görebilirlik analizinin yapılması için gereken veri tipleri ve aralarındaki ilişkiler UML veri diyagramı ile gösterilmiştir. Kuraklık zarar görebilirlik analizi belirli bir metoda bağlı olarak üretileceğinden, *KuraklıkZararAnalizMetodu* veri sınıfı ile bağımlılık ilişkisine bağlı olarak gösterilmiştir (Şekil 2).

Kuraklık zarar görebilirlik analizini gerçekleştirmek için farklı veri setlerine ve veri özelliklerine ihtiyaç vardır. Oluşabilecek şiddetli bir kuraklık sonucunda yaşanması muhtemel su sıkıntısı ve su ihtiyacı için ulaşım hatları kullanılacaktır. Ayrıca ulaşım ve altyapı unsurları kuraklığın ortaya çıkarabileceği olumsuz şartlardan da etkilenebilecektir. Kuraklık zarar görebilirlik analizi için altyapı (*<<featuretype>>Altyapi),* ulaşım *(<<featuretype>> Ulasim)* ve zarar görebilirlik (*<<featuretype>>KuraklikZarargorebilirlik)* detay sınıflarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kuraklık zarar görebilirlilk analizi için altyapı *(<<featuretype>> Altyapi)* TUCBS.UL'den, ulaşım *(<<featuretype>>Ulasim)* TUCBS.UL'den, bina detay sınıfı *(<<featuretype>> AfetBina)*TUCBS.BI'dan; sosyal,

ekonomik ve çevresel zarargörebilirlik detay sınıfları ise Taştan (2021) ve Bilgin (2013) tarafından geliştirilen ADYS temel coğrafi nesneler *(<<featuretype>> TemelCoğrafiNesneler)* detay sınıflarından türetilmiştir.

Kuraklık zarar görebilirlik detay sınıfıyla çevresel zarar görebilirlik, bina başaçıkabilme kapasitesi, bina sosyal, ekonomik zarargörebilirlik detay sınıfları arasında bağımlılık ilişkisi atanmıştır. Bina sosyal zarar görebilirlik sınıfı bina veya o birim içerisinde yaşayan nüfusun sosyal zarar görebilirliğini belirlemeye yarayan öznitelikleri göstermektedir. Bu veri sınıfı bünyesindeki özniteliklerden; binaID: Bina kimlik numarası (CharacterString), Cinsiyet: Sakinlerin cinsiyet bilgisi (CharacterString), Egitim: Sakinlerin eğitim durumu (CharacterString), HaneHalkiSayisi: Hanedeki kişi sayısı, (int), NufusDagilisi: Yaş grupları veya yoğunluğuna göre nüfus dağılımı (int), Yas: Sakinlerin yaş bilgisi (int) bilgileri bulunur ve bu özniteliklerin hangi şekilde veri tabanında kaydının yapılacağı formatına parantez içerisinde belirtilen şekillere göre kodlanması hususunu belirtir.

Kuraklık zarar görebilirlik analizini gerçekleştirebilmek için belirtilen veri sınıflarına ihtiyaç duyulmaktadır. Altyapı detay sınıfı nesneleri arasında bütünleme ilişkisi bulunmaktadır. Bu ilişki türü ulaşım detay sınıfı nesneleri arasında da bulunmaktadır. Bu safhaya kadar gösterilen UML modelleri Enterprise Architect programı kullanılıp ISO/TC211 kuralları temel alınıp kodlanarak tasarımı yapılmıştır. Model istenirse UML formatından GML tabanlı GML formatına dönüşüm sağlanarak açık veri değişimini destekleyebilecektir.



Şekil 2 Kuraklık zarar görebilirlik analizi UML diyagramı

Bina fiziksel zarar görebilirlik sınıfı, binanın yapısal özelliklerini, altyapı durumunu ve fiziksel zarar görebilirliğini belirlemeye yarayan öznitelikleri göstermektedir. Bu veri sınıfı bünyesindeki özniteliklerden; binaID: Bina kimlik numarası (CharacterString), alan: Binanın taban veya toplam alanı (double), alternatifSuKaynagiVarMi: Binada alternatif su kaynağının bulunma durumu (boolean), aylikSuTuketimiM3: Binadaki aylık su tüketim miktarı (double), geometry: Binanın mekânsal coğrafi verisi (NesneGeometri), kritikTesisMi: Binanın kritik bir tesis/yapı olup olmadığı durumu (boolean), suDeposuKapasitesiM3: Mevcut su deposunun hacmi (double), suTeminSekli: Binanın su sağlama/temin şekli türü (suTeminTuru), yapimMalzemesi: Binanın inşaat ve taşıyıcı yapı malzemesi türü (YapiMalzemesiTuru), yapimTarihi: Binanın inşa edildiği tarih (DateTime [0..1]), yükseklik: Binanın yüksekliği (int) ve zarar görebilirlik sınıfı: Binanın fiziksel zarar görebilirlik seviyesi sınıfı (ZararGorebilirlikSinifi) bilgileri bulunur ve bu özniteliklerin nasıl veri tabanında kaydedileceği ve hangi formatta kodlanacağı ve parantez içinde formatlar belirtilmiştir.

Bina ekonomik zarar görebilirlik sınıfı, binanın finansal değerini, ekonomik faaliyet durumunu ve olası bir afette karşılaşabileceği mali kayıpları belirlemeye yarayan öznitelikleri göstermektedir. Bu veri sınıfı bünyesindeki özniteliklerden; binaID: Binanın benzersiz kimlik numarası (CharacterString), binaMaliyeti: Binanın toplam inşa veya varlık değeri (int), binaYenilemeMaliyeti: Binanın olası bir hasar sonrası yeniden yapım veya onarım maliyeti (int), calismayanlarinOrani: Binada yaşayan veya çalışanlar arasında istihdam dışı olan nüfusun oranı (int), faaliyetKesintiSuresi: Afet sonrası binadaki ticari veya işlevsel faaliyetlerin duraksama süresi (Duration), gelirDurumu: Binadaki hane veya işletmelerin ortalama gelir düzeyi (int), gelirKaybi: Faaliyetlerin durması veya aksaması nedeniyle oluşacak toplam gelir kaybı (int) ve istihdamSayisi: Binada çalışan veya istihdam sağlanan toplam

kişi sayısı (int) bilgileri bulunur ve bu özniteliklerin nasıl veri tabanında kaydedileceği ve hangi formatta kodlanacağı belirtilmiştir.

SONUÇ

Çalışmada meteorolojik kuraklık analizi süreci UML kullanılarak nesne yönelimli bir yaklaşımla modellenmiştir. Geliştirilen UML modeli, kuraklık analizinde kullanılan farklı formattaki veri kaynaklarının bütünleştirilmesinde belirgin bir standart format sunmaktadır. UML sınıf diyagramları ile meteorolojik kuraklık analizinde kullanılan veri nesneleri ve aralarındaki ilişkiler modellenmiştir. Geliştirilen veri modeli, INSPIRE ve Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) kapsamında tanımlanan mekânsal veri altyapısı yaklaşımları doğrultusunda tasarlanmıştır. Model bünyesinde kuraklık analizi için gerekli olan verilerin geometrik özellikleri, koordinat bilgileri, öznitelik yapıları ve veriler arasındaki ilişkiler tanımlanıp standartlaştırılmış bir veri modeli ortaya konmuştur. Geliştirilen model GML şemalarına dönüştürülebilecek bir yapıda olup farklı kullanıcılar ve platformlar arasında veri paylaşımını ve birlikte çalışabilirliği destekleyecek yapıdadır.

Elde edilen bulgular UML tabanlı modellemenin kuraklık analiz süreçlerinin daha anlaşılır, standartlaştırılmış ve geliştirilebilir bir yapıda sunulabildiğini göstermektedir. Model gelecekte geliştirilecek CBS tabanlı mekânsal veri servisleri ve paylaşım platformları için temel bir altyapı oluşturabilecek yapıya sahiptir. Ayrıca model sel, heyelan ve diğer afet risk modellemelerinde katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Tasarlanan kavramsal coğrafi veri modeli veri kaynakları arasındaki bütünlük ilişkilerini açık bir şekilde ortaya koyarak veri analizi, veri bütünlüğü ve paylaşılabilirliğini sağlayabilecek bir yapı sunmaktadır. Veri yapısı INSPIRE ve TUCBS standartlarına uygun olduğundan dolayı mekansal veri servislerine entegre edilebilirliği sayesinde gelecekte kuraklık izleme, erken uyarı ve afet risk yönetimi için sürdürülebilir bir altyapı sunmaktadır. Modelin esnek yapısı sayesinde yalnızca kuraklık analizi için değil, kuraklığın tetikleyebileceği veya kuraklık sonrası ortaya çıkabilecek sel, heyelan ve diğer doğal afet risk ve zarar azaltma çalışmlarında kullanılabilir formattadır.

KAYNAKÇA

Baykara, M. (2020). Sınıf diyagramları. <https://muhammetbaykara.com/wp-content/uploads/2025/04/Sınıf-Diyagramları.pdf>, adresinden 17.09.2026 tarihinde erişilmiştir.

Bilgin, M. S. (2013). Afet yönetimine yönelik açık veri modeli ve konumsal analiz araçlarının geliştirilmesi: Sel ve heyelan örneği. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü. İstanbul.

Demiray, D., & Sarış, F. (2025). Kuzey Ege Havzası'nda uzun dönemli meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizi. Türk Coğrafya Dergisi, 88, 61-79. https://doi.org/10.17211/tcd.1721637.

Sarış, F., & Gedik, F. (2021). Konya Kapalı Havzası'nda Meteorolojik Kuraklık Analizi. Journal of Geography, 42, 295-308. https://izlik.org/JA84JC68LA

Taştan, B. (2021). Bütünleşik afet risk maruziyetine yönelik coğrafi veri modelinin belirlenmesi. (Doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. İstanbul.

Url-1: https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/what-is-uml/ adresinden 17.09.2026 tarihinde erişilmiştir.

Uymaz, S. A., & Kahramanlı, Ş. (2016). UML ile Sanal Kampüs Modellemesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 87-99. https://doi.org/10.15317/Scitech.2016218521

CBS TABANLI AKILLI ŞEHİR ALTYAPILARINDA IOT GÜVENLİĞİ: TEHDİT ANALİZİ, GİZLİLİK RİSKLERİ VE STRATEJİK SAVUNMA YAKLAŞIMLARI

Mevlüt SEVİNÇ[1], Şüheda Semih AÇMALI[2],

[1]Bilişim Teknolojileri Öğretmeni, Karabük Bilim ve Sanat Merkezi, Milli Eğitim Bakanlığı, 78020, Merkez, Karabük, mvlt.sevinc@gmail.com
[2]Öğr. Gör., Karabük Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, 78100, Merkez, Karabük, semihacmali@karabuk.edu.tr

ÖZET

Akıllı şehir uygulamalarında Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörlerinden elde edilen gerçek zamanlı verilerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bütünleştirilmesi; ulaşım, enerji, çevresel izleme, su yönetimi, afet yönetimi ve acil durum müdahalesi gibi kentsel hizmetlerin konumsal bağlamda izlenmesini ve yönetilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte fiziksel altyapı, iletişim ağları ve sayısal mekansal veri katmanları arasındaki karşılıklı bağımlılık; cihaz ele geçirme, veri manipülasyonu, hizmet engelleme, GNSS karıştırma ve sahtecilik saldırıları ile konum gizliliği ihlallerinin kentsel karar süreçlerine doğrudan yansımasına neden olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, CBS tabanlı akıllı şehir altyapılarındaki IoT güvenlik tehditlerini etkilenen konumsal varlıklar, veri bütünlüğü, gizlilik ve hizmet sürekliliği bakımından değerlendirmek ve literatür bulgularını bütünleştiren bir siber dayanıklılık çerçevesi oluşturmaktır. Araştırma, Google Scholar üzerinde yürütülen yapılandırılmış bir literatür taramasına dayanmaktadır. Öncelikli inceleme dönemi Ocak 2023-Haziran 2026 olarak belirlenmiş; alanın mimari ve kavramsal temelini açıklayan daha eski çalışmalar da dahil edilmiştir. CBS-IoT entegrasyonu, akıllı şehir güvenliği, GNSS sahteciliği, konumsal gizlilik, uç bilişim, dijital ikiz, saldırı tespiti ve federatif öğrenme ile doğrudan ilişkili, tam metnine erişilebilen 22 çalışma nihai tematik senteze alınmıştır. Bulgular, güvenliğin yalnızca cihaz ve ağ katmanlarında ele alınmasının yeterli olmadığını; konumsal veri kaynağının doğrulanması, mekansal-zamansal tutarlılık, veri minimizasyonu, erişim denetimi ve hizmet sürekliliğinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmanın özgün katkısı, literatürde dağınık biçimde ele alınan kontrolleri konumsal veri bütünlüğü, gizlilik odaklı veri yönetişimi ve tespit-müdahale-süreklilik olmak üzere üç boyutlu bir değerlendirme çerçevesinde birleştirmesidir. Önerilen çerçeve, literatürün tematik sentezinden türetilmiş kavramsal bir araçtır ve bu çalışma kapsamında saha uygulaması veya deneysel performans testiyle doğrulanmamıştır.

Anahtar Sözcükler: Akıllı Şehirler, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Konumsal Veri Güvenliği, Nesnelerin İnterneti, Siber Dayanıklılık, GNSS Sahteciliği

ABSTRACT

IOT SECURITY IN GIS-BASED SMART CITY INFRASTRUCTURES: SPATIAL THREATS, PRIVACY RISKS AND DEFENCE APPROACHES

Integrating real-time data generated by Internet of Things (IoT) sensors with Geographic Information Systems (GIS) enables urban services such as transportation, energy, environmental monitoring, water management, disaster management, and emergency response to be monitored and managed in a spatial context. However, the interdependence among physical infrastructure, communication networks, and digital geospatial data layers allows device compromise, data manipulation, denial-of-service attacks, GNSS jamming and spoofing, and location privacy breaches to affect urban decision-making directly. This study evaluates IoT security threats in GIS-based smart city infrastructures in terms of affected spatial assets, data integrity, privacy, and service continuity, and develops a cyber-resilience framework that integrates findings reported in the literature. The research is based on a structured literature review conducted through Google Scholar. Studies published between January 2023 and June 2026 were prioritised, while earlier foundational studies explaining the architectural and conceptual background were also included. Twenty-two full-text studies directly related to GIS-IoT integration, smart city security, GNSS spoofing, location privacy, edge computing, digital twins, intrusion detection, and federated learning were included in the final thematic synthesis. The findings indicate that security should encompass spatial data-source validation, spatiotemporal consistency, data minimisation, access control, and service continuity in addition to device- and network-level controls. The study's original contribution is a three-dimensional evaluation framework that combines controls dispersed across the literature under spatial data integrity, privacy-oriented data governance, and detection-response-continuity. The proposed framework is a conceptual tool derived from thematic synthesis and has not been validated through field implementation or experimental performance testing within this study.

Keywords: Cyber Resilience, Geographic İnformation Systems, GNSS Spoofing, İnternet Of Things, Location Privacy, Smart cities

1. GİRİŞ

Akıllı şehir yaklaşımı, kentsel hizmetlerin veri temelli kararlar yoluyla daha etkin, erişilebilir ve sürdürülebilir biçimde yürütülmesini amaçlamaktadır. Ulaşım ağlarında araç ve yol sensörleri, enerji sistemlerinde akıllı sayaçlar, çevresel

izlemede hava ve su kalitesi sensörleri, afet yönetiminde erken uyarı cihazları ve kamu güvenliğinde hareketli ya da sabit görüntüleme sistemleri sürekli veri üretmektedir (Boulos ve Al-Shorbaji, 2014; Hancke vd., 2013; Lim vd., 2018). IoT, bu cihazların birbirleriyle ve merkezi ya da dağıtık bilgi sistemleriyle iletişim kurmasını sağlarken CBS, üretilen veriyi konum, zaman ve kentsel altyapı ilişkileri içinde anlamlandırmaktadır (Zanella vd., 2014; Bellini vd., 2022). CBS'nin görselleştirme ve mekansal analiz yetenekleri ile IoT'nin gerçek zamanlı veri üretme kapasitesi birleştiğinde, kentsel olayların nerede gerçekleştiği, hangi varlıkları etkilediği ve hangi müdahalelerin öncelikli olduğu belirlenebilmektedir (Safari Bazargani vd., 2021).

Bu bütünleşme yeni bir güvenlik bağımlılığı da meydana getirmektedir. Bir sensörün ele geçirilmesi yalnızca ilgili cihazın çalışmasını bozmakla kalmayabilir; yanlış koordinat, zaman damgası veya ölçüm değerinin CBS katmanlarına aktarılması, risk haritalarının ve karar destek çıktılarının hatalı oluşmasına neden olabilir. Trafik yoğunluğunun yanlış gösterilmesi, acil durum ekibinin sahte bir konuma yönlendirilmesi, su şebekesindeki arızanın yanlış bölgede raporlanması veya enerji talebinin hatalı tahmin edilmesi bu ilişkinin olası sonuçlarıdır. Bu nedenle akıllı şehir güvenliği, bilgi teknolojisi varlıklarının korunması kadar siber olayların fiziksel hizmetlere ve mekansal kararlara nasıl yansıdığının değerlendirilmesini de gerektirir (Hernandez-Ramos vd., 2021; Ismagilova vd., 2022).

Konum verileri ayrıca kişisel mahremiyet bakımından özel bir hassasiyete sahiptir. Kimlik bilgileri kaldırılmış olsa bile düzenli güzergahlar, zaman damgaları, ev ve iş yeri gibi sık ziyaret edilen noktalar ile farklı veri kümelerinin birleştirilmesi kişilerin yeniden tanımlanmasına olanak verebilir. Akıllı ulaşım, enerji, sağlık ve güvenlik uygulamalarında toplanan verilerin uzun süre saklanması ya da amacı dışında paylaşılması, bireysel hareket ve davranış örüntülerinin çıkarılmasına yol açabilir. Dolayısıyla güvenlik değerlendirmesinde gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik ilkelerinin yanında veri minimizasyonu, amaçla sınırlılık, saklama süresi ve denetlenebilir erişim de yer almalıdır.

Mevcut literatür; cihaz kimliği, haberleşme protokolleri, şifreleme, saldırı tespit sistemleri, uç bilişim, blockchain, dijital ikiz ve federatif öğrenme gibi çok sayıda kontrol önermektedir. Bununla birlikte bu çözümler çoğunlukla ayrı teknik katmanlarda incelenmekte, CBS varlıkları ile konumsal kararların korunmasına nasıl katkı verdikleri ortak bir değerlendirme yapısında yeterince açıklanmamaktadır. Bu çalışma söz konusu boşluğu, IoT güvenliği ile CBS tabanlı karar süreçleri arasında açık ilişkiler kuran kavramsal bir çerçeve aracılığıyla ele almaktadır.

2. ARAŞTIRMANIN SORULARI VE ÖZGÜN KATKISI

Çalışmanın amacı, CBS tabanlı akıllı şehir IoT ekosisteminde güvenlik tehditlerinin hangi teknik ve yönetsel katmanlarda ortaya çıktığını, bu tehditlerin konumsal veri ve kentsel hizmetler üzerindeki sonuçlarını ve literatürde önerilen savunmaların bütünleşik bir dayanıklılık yaklaşımına nasıl dönüştürülebileceğini değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

1. CBS-IoT ekosisteminde cihaz, ağ, veri ve uygulama katmanlarını etkileyen başlıca siber-fiziksel saldırı vektörleri nelerdir?

2. GNSS verisi, sensör ölçümleri ve CBS katmanlarının bozulması kentsel karar süreçlerini ve hizmet sürekliliğini nasıl etkileyebilir?

3. Konum verisinin toplanması, birleştirilmesi, paylaşılması ve saklanması hangi gizlilik risklerini doğurmaktadır?

4. Literatürde önerilen teknik ve yönetsel kontroller, CBS tabanlı akıllı şehirler için nasıl bütünleşik bir siber dayanıklılık çerçevesinde sınıflandırılabilir?

Çalışmanın özgün katkısı, genel IoT güvenliği bulgularını konumsal bağlam içinde yeniden düzenlemesidir. Bu amaçla tehdit türü, etkilenen IoT veya CBS varlığı, olası mekansal karar hatası ve uygulanabilir kontrol arasında ilişki kurulmuştur. Literatürde ayrı ayrı incelenen kontroller, konumsal veri bütünlüğü, gizlilik odaklı veri yönetişimi ve tespit-müdahale-süreklilik boyutlarında birleştirilmiştir. Böylece çalışma yeni bir saldırı tespit algoritması ya da uygulamalı olarak sınanmış bir güvenlik ürünü önermek yerine, mimari değerlendirme ve risk analizi için kullanılabilecek kavramsal bir sınıflandırma sunmaktadır.

3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

3.1 Tarama Stratejisi ve İnceleme Dönemi

Araştırma, Google Scholar üzerinden yürütülen yapılandırılmış bir literatür taramasına dayanmaktadır. Tarama Haziran 2026'da tamamlanmış ve güncel tehditler ile savunma yaklaşımlarını yakalayabilmek için 2023-Haziran 2026 döneminde yayımlanan çalışmalar önceliklendirilmiştir. CBS-IoT entegrasyonunun mimari gelişimini ve akıllı şehir güvenliği ile gizliliğinin kavramsal temelini açıklayan 2012-2022 dönemindeki çalışmalar da temel yayın olarak değerlendirmeye alınmıştır.

Aramada "smart city IoT security", "GIS IoT integration", "geospatial data privacy", "location privacy smart city", "GNSS spoofing", "GNSS jamming detection", "urban digital twin cybersecurity", "IoT communication protocol security", "IoT intrusion detection", "edge computing privacy smart city" ve "federated learning IoT security" sorguları kullanılmıştır. Kesişimleri daraltmak için bu terimler "GIS", "smart city", "security", "privacy", "integrity" ve "resilience" terimleriyle AND işleci kullanılarak birleştirilmiştir. Türkçe literatürdeki olası yayınlar için "akıllı şehir IoT güvenliği", "CBS konumsal veri güvenliği", "GNSS sahteciliği" ve "konum gizliliği" sorguları da değerlendirilmiştir.

3.2. Dahil Etme ve Dışlama Ölçütleri

Bir yayının incelemeye alınabilmesi için akıllı şehirlerde IoT veya CBS-IoT bütünleşmesiyle doğrudan ilişkili olması; cihaz, ağ, konumsal veri, gizlilik, saldırı tespiti ya da siber dayanıklılık boyutlarından en az birini ele alması; yöntem ve bulgularının değerlendirilebildiği tam metne sahip olması ve akademik bir yayın niteliği taşıması aranmıştır. Güncel dönemin yanı sıra yalnızca alanın mimari veya kuramsal gelişimini açıklamak için gerekli görülen temel çalışmalar tarih aralığı dışında tutulmamıştır.

Akıllı şehir veya konumsal veri bağlamı kurmayan genel teknoloji tanıtımları, güvenlik ya da gizlilik boyutu içermeyen uygulama açıklamaları, aynı çalışmanın yinelenen kayıtları, tam metnine ulaşılamayan belgeler ve iddiaları akademik yöntemle desteklenmeyen ikincil internet içerikleri kapsam dışında bırakılmıştır. Başlık ve özet değerlendirmesinin ardından uygun görülen yayınların tam metinleri amaç, yöntem, uygulama bağlamı ve önerilen kontrol bakımından incelenmiştir. Bu ölçütleri karşılayan ve kaynakçada gösterilen 22 çalışma nihai tematik senteze dahil edilmiştir.

3.3. Veri Çıkarma ve Tematik Sentez

Her çalışmadan yayın yılı, çalışma türü, ele alınan akıllı şehir bileşeni, tehdit veya gizlilik riski, etkilenen varlık, önerilen kontrol ve uygulamalı doğrulama durumu çıkarılmıştır. Bulgular ilk aşamada altı örtüşen tema altında kodlanmıştır: CBS-IoT mimarisi, cihaz ve protokol güvenliği, konumsal veri bütünlüğü ve GNSS, konum gizliliği ve veri yönetişimi, uç bilişim ile yapay zekâ destekli saldırı tespiti ve dijital ikiz veya blockchain tabanlı dayanıklılık. Bir yayın birden fazla temayla ilişkili olabildiği için tematik sayılar toplam yayın sayısını aşabilmektedir.

İkinci aşamada temalar, korunan varlık ve güvenlik işlevi bakımından yeniden gruplanmıştır. CBS-IoT mimarisi ile GNSS bulguları konumsal veri bütünlüğü; mahremiyet, erişim ve saklama bulguları gizlilik odaklı veri yönetişimi; saldırı tespiti, dijital ikiz, federatif öğrenme ve hizmet devamlılığı bulguları ise tespit-müdahale-süreklilik boyutuna bağlanmıştır. Üç boyutlu çerçeve bu tematik birleştirme işlemi sonucunda oluşturulmuştur.

Çizelge 1. İncelenen literatürün tematik dağılımı

TEMA	İLİŞKİLİ YAYIN SAYISI	SENTEZLENEN TEMEL KONU
Akıllı şehir ve CBS-IoT mimarisi	8	Sensör, ağ, işleme, CBS ve uygulama katmanları arasındaki veri akışı
IoT cihazı, protokol ve ağ güvenliği	7	Kimlik doğrulama, protokol yapılandırması, veri manipülasyonu ve hizmet engelleme
Konumsal veri bütünlüğü ve GNSS	3	Yanlış koordinat, zaman verisi ve konumsal kararların güvenilirliği
Konum gizliliği ve veri yönetişimi	7	Yeniden tanımlama, veri minimizasyonu, erişim ve saklama politikaları
Uç bilişim, federatif öğrenme ve saldırı tespiti	5	Kaynağa yakın analiz, merkezi veri toplama riskinin azaltılması ve anomali tespiti
Dijital ikiz, blockchain ve dayanıklılık	6	Denetlenebilirlik, olay benzetimi, dağıtık güven ve toparlanma

Çizelgede dağılım, literatürün mimari ve genel güvenlik konularında daha geniş; konumsal veri bütünlüğü, ortak ölçütler ve uzun dönemli saha doğrulaması bakımından ise daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, CBS'ye özgü güvenlik değerlendirmelerinin geliştirilmesi ihtiyacını desteklemektedir.

4. CBS IOT BÜTÜNLEŞMESİNİN GÜVENLİK BAĞLAMI

4.1. Katmanlı Mimari ve Varlıklar

CBS tabanlı bir akıllı şehir altyapısı; algılama, iletişim, işleme, mekânsal veri yönetimi ve uygulama-karar katmanlarından oluşan siber-fiziksel bir sistem olarak ele alınabilir. Algılama katmanında sensörler, GNSS alıcıları,

kameralar, sayaçlar ve eyleyiciler fiziksel çevreyi ölçer. İletişim katmanı MQTT, CoAP, hücresel ağlar, Wi-Fi, ZigBee veya düşük güç geniş alan ağları üzerinden veri aktarır. İşleme katmanında uç, sis veya bulut bileşenleri veriyi temizler, birleştirir ve analiz eder. CBS katmanı koordinatları, geometrileri, öznitelikleri, zaman bilgilerini ve altyapı ilişkilerini yönetir. Uygulama katmanı ise bu verileri trafik kontrolü, enerji yönetimi, afet müdahalesi veya planlama kararına dönüştürür (Safari Bazargani vd., 2021; Gerodimos vd., 2023).

Bu katmanlar arasındaki veri akışı, bir katmandaki güvenlik sorununun diğer katmanlarda zincirleme etki oluşturmasına neden olabilir. Örneğin sahte bir sensör kaydı ağ üzerinden geçerli kimlik bilgileriyle iletilirse, yalnızca cihaz düzeyinde değil, CBS katmanı ve karar destek uygulamasında da güvenilir veri gibi işlenebilir. Bu nedenle varlık envanteri fiziksel cihazlarla sınırlı tutulmamalı; koordinat sistemleri, konumsal veri servisleri, katman sürümleri, mekânsal analiz modelleri, dijital ikizler ve karar kuralları da korunacak varlıklar arasında sayılmalıdır.

4.2. Tehdit Modeli

Tehdit modeli gizlilik, bütünlük, erişilebilirlik, kimlik doğrulama, yetkilendirme ve izlenebilirlik ilkelerini birlikte kapsamalıdır. Kaynakları sınırlı cihazlar, uzun kullanım ömrü, varsayılan kimlik bilgileri, düzensiz yazılım güncellemesi ve farklı üreticilerin birlikte çalışması saldırı yüzeyini genişletmektedir (Hassija vd., 2019; Andrade vd., 2020). Cihaza fiziksel müdahale, sahte cihaz ekleme, kimlik taklidi, zararlı yazılım yükleme ve güvenli olmayan güncelleme, algılama katmanındaki temel risklerdir. İletişim katmanında dinleme, aradaki adam, tekrar oynatma, mesaj değiştirme ve hizmet engelleme saldırıları öne çıkmaktadır. MQTT veya CoAP gibi protokollerin güvenli kurulmadığı durumlarda yetkisiz yayın, abonelik veya mesaj manipülasyonu mümkün hâle gelebilir (Gerodimos vd., 2023).

CBS katmanında saldırının hedefi yalnızca veriye erişmek değildir. Koordinat, geometri, zaman damgası veya öznitelik üzerinde yapılan küçük bir değişiklik mekânsal analizin sonucunu değiştirebilir. Bir altyapı varlığının konumu kaydırılabilir, bir afet bölgesinin sınırı daraltılabilir, bir yol kapalı olduğu hâlde açık gösterilebilir veya yetkisiz bir kullanıcıya hassas tesis katmanı açılabilir. Bu nedenle veri bütünlüğü kontrolleri hem kayıt düzeyindeki değişikliği hem de değişikliğin mekânsal tutarlılığını değerlendirmelidir.

5. BULGULAR

5.1. Cihaz ve İletişim Güvenliği

Literatür, IoT cihazlarının düşük işlem gücü, sınırlı enerji kapasitesi ve uzun saha ömrü nedeniyle geleneksel güvenlik kontrollerinin doğrudan uygulanmasında güçlükler bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte kaynak kısıtları, temel kontrollerin kaldırılmasını değil, uygun maliyetli ve cihaz yetenekleriyle uyumlu biçimde tasarlanmasını gerektirir. Benzersiz cihaz kimliği, güvenli önyükleme, imzalı ürün yazılımı, anahtarların korumalı alanda saklanması ve destek süresi boyunca güvenli güncelleme sağlanması cihaz güvenliğinin temel bileşenleridir.

Ağ düzeyinde karşılıklı kimlik doğrulama, aktarım şifrelemesi, ağ segmentasyonu, cihaz davranışlarının izlenmesi ve en az ayrıcalık ilkesi birlikte uygulanmalıdır. Tek bir kontrol bütün saldırıları önleyemeyeceği için önleyici kontrollerin tespit, izolasyon ve kurtarma mekanizmalarıyla desteklenmesi gerekir. Derin öğrenme tabanlı saldırı tespit çalışmalarında yüksek doğruluk değerleri bildirilmekle birlikte performansın kullanılan veri kümesi, saldırı dağılımı ve ağ koşullarına bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Bakhsh vd., 2023).

5.2. GNSS Sahteciliği ve Konumsal Veri Bütünlüğü

GNSS karıştırma, alıcının gerçek uydu sinyallerini kullanmasını engellerken sahtecilik saldırısı alıcıyı yanlış konum veya zaman bilgisine yönlendirebilir. Düşük maliyetli yazılım tanımlı radyo araçlarının yaygınlaşması bu saldırıların erişilebilirliğini artırmıştır (Radoš vd., 2024). Akıllı ulaşım araçları, insansız sistemler, acil durum ekipleri, zaman eşzamanlamasına bağlı enerji altyapıları ve hareketli sensörler bakımından yanlış konum ya da zaman verisi, fiziksel güvenlik ve hizmet sürekliliği sonucu doğurabilir.

Tek bir GNSS kaynağına güvenmek yerine uydu verisinin ataletsel ölçüm birimleri, baz istasyonu konumu, Wi-Fi konumlandırması, harita eşleme ve komşu sensör kayıtlarıyla karşılaştırılması saldırının belirlenmesini destekleyebilir. Konum değişiminin cihazın fiziksel hareket sınırlarıyla uyumlu olup olmadığı, hız ve yön değerlerinin ardışık ölçümlerle tutarlılığı ve zaman damgasındaki olağan dışı sapmalar mekânsal-zamansal doğrulamanın parçalarıdır. CBS katmanında veri kaynağı, dönüşüm adımları ve katman sürümleri kayıt altına alınarak şüpheli değişikliğin hangi aşamada oluştuğu izlenebilmelidir.

5.3. Konum Gizliliği ve Yeniden Tanımlama

Mekânsal mahremiyet, doğrudan kimlik bilgilerinin kaldırılmasıyla tam olarak sağlanamaz. Zaman damgaları, düzenli güzergâhlar, hizmet kullanım kayıtları ve dış veri kümeleri birleştirildiğinde bireylerin yeniden tanımlanması mümkün olabilir. Özellikle ev ve iş yeri gibi tekrarlanan konumların belirlenmesi, görünürde anonim olan bir hareket kaydını belirli bir kişiyle ilişkilendirebilir (Hernandez-Ramos vd., 2021; Ismagilova vd., 2022).

Bu riskin yönetilmesi için yalnızca teknik anonimleştirme uygulanmamalı; veri yaşam döngüsünün tamamı düzenlenmelidir. Amaç için gerekli olmayan koordinatlar toplanmamalı, yüksek konumsal doğruluk gerekmeyen hizmetlerde veriler bölge veya ızgara düzeyinde genelleştirilmeli, saklama süreleri sınırlandırılmalı ve erişimler rol ya da öznitelik temelli politikalarla denetlenmelidir. Ham verinin kaynağa yakın işlenmesi merkezi sisteme aktarılan kişisel veri miktarını azaltabilir; ancak uç düğümlerin güvenliği sağlanmadığında risk yalnızca merkezden çevreye taşınmış olur (Gheisari vd., 2019; Perera vd., 2017).

5.4. Kritik Hizmet Bağımlılıkları ve Siber Dayanıklılık

Akıllı şehir hizmetleri birbirinden bağımsız değildir. Enerji kesintisi iletişim altyapısını, iletişim kesintisi ulaşım ve acil müdahale sistemlerini, konumsal veri bozulması ise birden fazla hizmetin ortak karar destek süreçlerini etkileyebilir (Motlagh vd., 2020). Bu nedenle risk analizinde saldırının ilk hedefi kadar sonraki yayılım yolları da değerlendirilmelidir. Siber dayanıklılık; saldırıya hazırlık, saldırıya direnme, olay sırasında kritik işlevleri sürdürme, güvenli duruma dönme ve edinilen deneyime göre sistemi uyarlama yeteneklerini birlikte içerir.

Dijital ikizler, fiziksel cihazın veya altyapının güncel durumunu sanal ortamda temsil ederek normal davranış ile gözlenen durum arasındaki sapmaların incelenmesini ve saldırı senaryolarının fiziksel sistemi etkilemeden denenmesini destekleyebilir (Mazzetto, 2024; El-Hajj, 2024). Bununla birlikte dijital ikizin verisi veya eşzamanlama mekanizması da saldırıya uğrayabileceğinden ikiz, tek başına güvenilir bir doğruluk kaynağı olarak görülmemelidir.

Çizelge 2. Başlıca tehditlerin konumsal sonuçları ve kontrolleri

Tehdit	Etkilenen varlık	Olası konumsal veya operasyonel sonuç	Öncelikli kontrol
GNSS karıştırma veya sahtecilik	Konum ve zaman verisi	Yanlış rota, varlık konumunun kayması, zaman eşzamanlama hatası	Çoklu sensör doğrulaması ve mekânsal-zamansal tutarlılık
Sensör ya da cihaz ele geçirme	Ölçüm ve cihaz kimliği	Sahte olay veya eksik gözlem üretilmesi	Güvenli önyükleme, imzalı güncelleme ve cihaz kimliği
MQTT veya CoAP yapılandırma zafiyeti	Mesaj akışı	Yetkisiz veri yayını ve veri manipülasyonu	Karşılıklı kimlik doğrulama, şifreleme ve segmentasyon
CBS katmanı manipülasyonu	Geometri, öznitelik ve katman sürümü	Hatalı risk haritası ve yanlış kaynak tahsisi	Değişiklik kaydı, veri kökeni ve bütünlük doğrulaması
Konum verilerinin birleştirilmesi	Hareket geçmişi	Yeniden tanımlama, izleme ve profilleme	Veri minimizasyonu, genelleştirme ve erişim denetimi
DDoS ve ağ kesintisi	Veri iletimi ve hizmet erişimi	Gerçek zamanlı görünürlüğün ve müdahalenin kesilmesi	Yedeklilik, hız sınırlama, olay müdahalesi ve güvenli çalışma modu

6. STRATEJİK SAVUNMA YAKLAŞIMI

Savunma kontrolleri cihaz, ağ, CBS-veri ve yönetişim düzeylerinde uygulanmalıdır. Cihaz düzeyinde güvenli önyükleme, benzersiz kimlik, imzalı güncelleme ve anahtar koruması; ağ düzeyinde karşılıklı kimlik doğrulama, şifreleme, segmentasyon ve sürekli davranış izleme gereklidir. CBS-veri düzeyinde veri kaynağı izlenebilirliği, katman değişikliklerinin denetlenmesi, koordinat ve zaman tutarlılığı ile hassas konumların genelleştirilmesi öne çıkmaktadır. Yönetişim düzeyinde ise veri sorumlulukları, olay müdahale görevleri, saklama ve silme süreleri, tedarikçi güvenliği ve bağımsız denetim tanımlanmalıdır.

Blockchain, dağıtık ortamlarda kayıtların değiştirilmesini güçleştiren ve taraflar arası denetlenebilirliği artıran bir mekanizma sağlayabilir (Biswas ve Muthukkumarasamy, 2016; Reyna vd., 2018). Bununla birlikte zincire giren verinin başlangıçta doğru olduğunu garanti etmez; yanlış konum veya sensör verisinin değiştirilemez biçimde

saklanması sorunu ağırlaştırabilir. Ölçeklenebilirlik, enerji tüketimi, yönetişim ve verinin silinmesi gereksinimleri uygulamaya göre ayrıca değerlendirilmelidir.

Yapay zekâ tabanlı anomali tespiti yüksek hacimli IoT trafiğinde insan gözetiminin fark etmekte zorlanacağı davranış örüntülerini belirleyebilir. Ancak modelin doğruluğu eğitim verisinin temsiline, saldırı türlerinin güncelliğine ve cihazlar arası veri dağılımına bağlıdır; akıllı şehirlerde yapay zekânın sağladığı katkılar kadar yönetişim ve güvenlik riskleri de değerlendirilmelidir (Yiğitcanlar vd., 2020). Federatif öğrenme, ham veriyi merkezde toplamadan cihaz veya kurumların ortak model geliştirmesini destekleyerek gizlilik ve bant genişliği bakımından avantaj sağlayabilir (Khraisat vd., 2025). Buna karşılık model zehirleme, tersine çıkarım, güvenli toplama ve heterojen cihaz kapasitesi gibi riskler ayrıca yönetilmelidir.

7. ÜÇ BOYUTLU SİBER DAYANIKLILIK DEĞERLENDİRME ÇERÇEVESİ

Literatür bulgularının tematik sentezi sonucunda üç boyutlu bir siber dayanıklılık değerlendirme çerçevesi oluşturulmuştur. Çerçeve, güvenlik kontrollerinin yalnızca teknik varlığına değil, CBS tabanlı karar süreçlerini hangi güvenlik işlevi üzerinden koruduğuna odaklanmaktadır.

Çizelge 3. Üç boyutlu kavramsal değerlendirme çerçevesi

Boyut	Temel soru	Değerlendirilecek bileşenler	Beklenen katkı
Konumsal veri bütünlüğü	Konum, zaman ve ölçüm verisinin kaynağı ve tutarlılığı doğrulanabiliyor mu?	Çoklu sensör doğrulaması, veri kökeni, katman sürümü, koordinat ve zaman tutarlılığı	Yanlış mekânsal analiz ve karar riskinin azaltılması
Gizlilik odaklı veri yönetişimi	Konum verisi gerekli amaç, ayrıntı ve süreyle sınırlı mı?	Veri minimizasyonu, genelleştirme, erişim politikası, saklama ve silme, denetim kaydı	Yeniden tanımlama ve amaç dışı kullanım riskinin azaltılması
Tespit müdahale ve süreklilik	Saldırı belirlenip sınırlandırılabilir ve kritik hizmet sürdürülebilir mi?	Uç IDS, federatif öğrenme, dijital ikiz, segmentasyon, yedeklilik, güvenli çalışma modu ve olay müdahalesi	Olayın yayılımının sınırlandırılması ve hizmetin toparlanması

Birinci boyut, sensörden CBS katmanına kadar konum, zaman ve ölçüm verisinin güvenilirliğini korur. İkinci boyut, teknik erişim kontrolünü veri yaşam döngüsü ve kurumsal sorumluluklarla birleştirir. Üçüncü boyut, önlenemeyen olayların erken belirlenmesini, etkilenen bileşenin izolasyonunu ve kritik hizmetlerin kabul edilebilir düzeyde sürdürülmesini hedefler. Bu boyutlar birbirinin alternatifi değildir. Örneğin bir GNSS sahteciliğinin saldırı tespit sistemi tarafından fark edilmesi üçüncü boyutla, sahte koordinatın başka sensörlerle karşılaştırılması birinci boyutla ve olay kayıtlarındaki kişisel konumların yetkili kişilerle sınırlandırılması ikinci boyutla ilişkilidir.

Çerçeve, literatürde bildirilen bulguların bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş kavramsal bir değerlendirme aracıdır. Bu çalışma kapsamında bir belediye altyapısına uygulanmamış, deneysel bir veri kümesi üzerinde ölçülmemiş ve kontrol kombinasyonlarının performansı karşılaştırılmamıştır. Bu nedenle çerçeve, uygulamalı olarak doğrulanmış bağımsız bir güvenlik modeli izlenimiyle sunulmamalıdır. Uygulayıcılar çerçeveyi varlık envanteri, risk analizi ve kontrol boşluğu değerlendirmesi için başlangıç yapısı olarak kullanabilir; etkinlik iddiası için gerçek şehir senaryolarında doğrulama gereklidir.

8. TARTIŞMA

İncelenen çalışmalar, akıllı şehir ve IoT güvenliği için çok sayıda teknik çözüm önermekle birlikte üç önemli boşluğa işaret etmektedir. İlk olarak genel IoT güvenliği ile CBS'ye özgü bütünlük gereksinimleri arasındaki bağlantı sınırlı sayıdaki çalışmada açıkça kurulmaktadır. Ağ trafiğinin olağan görünmesi, iletilen koordinatın veya mekânsal ilişkinin doğru olduğu anlamına gelmez. Bu nedenle ağ temelli anomali göstergelerinin mekânsal-zamansal tutarlılık ölçütleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

İkinci olarak gizlilik kontrolleri çoğunlukla verinin kimliksizleştirilmesine veya şifrelenmesine indirgenmektedir. Oysa konum verisindeki tekrar ve bağlamsal zenginlik, başka veri kümeleriyle birleştirme sonucunda yeniden tanımlama riski yaratır. Gelecek çalışmalar farklı ayrıntı düzeyleri, saklama süreleri ve yardımcı veri kaynakları altında yeniden tanımlama olasılığını ölçen ortak değerlendirme yöntemleri geliştirmelidir.

Üçüncü olarak dijital ikiz, federatif öğrenme, blockchain ve yapay zekâ temelli çözümler çoğunlukla belirli veri kümeleri, benzetimler veya sınırlı test ortamlarında değerlendirilmektedir. Bu çözümlerin gerçek kentsel ölçek, farklı kurumların yönetişimi, düşük kaynaklı cihazlar, ağ kesintileri ve uzun dönemli bakım koşulları altındaki performansı konusunda daha fazla kanıt gerekmektedir.

Bu çerçevede öne çıkan açık araştırma soruları şunlardır:

1. Uç bilişim, konum mahremiyeti ve gerçek zamanlı saldırı tespiti arasında ölçülebilir denge nasıl kurulabilir?

2. Anonimleştirilmiş hareket verilerindeki yeniden tanımlama riski farklı şehir ve hizmetler arasında karşılaştırılabilir biçimde nasıl ölçülebilir?

3. GNSS sahteciliği göstergeleri ile CBS katmanlarındaki mekânsal-zamansal tutarsızlıklar ortak bir tespit modelinde nasıl birleştirilebilir?

4. Dijital ikiz destekli saldırı senaryoları enerji, ulaşım, su ve acil durum hizmetleri arasındaki zincirleme bağımlılığı nasıl temsil etmelidir?

5. Üç boyutlu çerçevenin kontrol etkinliği gerçek bir belediye veya kentsel test ortamında hangi göstergelerle doğrulanabilir?

Çalışmanın ilk sınırlılığı, taramanın temel olarak Google Scholar üzerinden yürütülmesidir. Bu tercih disiplinler arası yayınlara geniş erişim sağlamakla birlikte veri tabanının sıralama mantığı ve kapsamı nedeniyle sonuçların tam olarak aynı sırayla yeniden üretilmesini güçleştirebilir. İkinci olarak, güncel yayınların yanında mimari ve kavramsal temel sağlamak üzere daha eski çalışmaların amaçlı biçimde dâhil edilmesi, incelemenin katı tarih sınırlı sistematik derleme olarak değerlendirilmesini engellemektedir. Üçüncü olarak, tematik sınıflandırma çalışmaların raporladığı amaç ve bulgular üzerinden yapılmış; yayın kalitesi için nicel bir puanlama veya meta-analiz uygulanmamıştır. Son olarak önerilen üç boyutlu çerçeve saha verisi, simülasyon veya kontrollü deneyle doğrulanmamıştır. Bu sınırlılıklar nedeniyle sonuçlar, kontrol performansını kanıtlayan ölçümler olarak değil, mevcut bilgi birikimini düzenleyen kavramsal bir sentez olarak yorumlanmalıdır.

9. SONUÇ

CBS ile IoT'nin bütünleşmesi, akıllı şehirlerde gerçek zamanlı görünürlük ve karar desteği sağlarken cihaz, ağ ve veri katmanlarındaki güvenlik sorunlarının mekânsal kararlar ve fiziksel hizmetler üzerinde etkili olmasına neden olmaktadır. GNSS sahteciliği, sensör manipülasyonu, güvensiz iletişim protokolleri, CBS katmanı değişiklikleri ve konum verilerinin farklı kaynaklarla birleştirilmesi; veri bütünlüğü, mahremiyet ve hizmet sürekliliğini birlikte tehdit etmektedir.

Yapılandırılmış incelemeye dâhil edilen 22 çalışmanın sentezi, tek bir teknolojinin bu çok katmanlı riskleri karşılamadığını göstermektedir. Güvenli cihaz yaşam döngüsü, karşılıklı kimlik doğrulama, şifreleme, segmentasyon, çoklu sensör doğrulaması, veri kaynağı izlenebilirliği, veri minimizasyonu, uç tabanlı saldırı tespiti, federatif öğrenme, dijital ikiz ve olay müdahalesi birbirini tamamlayan kontroller olarak ele alınmalıdır.

Çalışmanın özgün katkısı, bu kontrolleri CBS tabanlı karar süreçleriyle ilişkilendirerek konumsal veri bütünlüğü, gizlilik odaklı veri yönetişimi ve tespit-müdahale-süreklilikten oluşan üç boyutlu bir kavramsal değerlendirme çerçevesinde birleştirmesidir. Çerçevenin uygulama değeri, belediye veya kentsel test ortamlarında ölçülebilir göstergelerle sınanmasına bağlıdır. Gelecek çalışmalar yanlış konum tespit oranı, olay belirleme süresi, hizmet toparlanma süresi, veri minimizasyon düzeyi ve yeniden tanımlama riski gibi göstergeler üzerinden çerçevenin geçerliliğini değerlendirmelidir.

KAYNAKÇA

Andrade, R., Yoo, S. G., Tello-Oquendo, L., ve Ortiz-Garcés, I. (2020). A comprehensive study of the IoT cybersecurity in smart cities. IEEE Access, 8, 228922-228941. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046442

Bakhsh, S. A., Khan, M. A., Ahmed, F., Alshehri, M. S., Ali, H., ve Ahmad, J. (2023). Enhancing IoT network security through deep learning-powered intrusion detection system. Internet of Things, 24, 100936. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100936

Bellini, P., Nesi, P., ve Pantaleo, G. (2022). IoT-enabled smart cities: A review of concepts, frameworks and key technologies. Applied Sciences, 12(3), 1607. https://doi.org/10.3390/app12031607

Biswas, K., ve Muthukkumarasamy, V. (2016). Securing smart cities using blockchain technology. 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems içinde (ss. 1392-1393). https://doi.org/10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0198

Boulos, M. N. K., ve Al-Shorbaji, N. M. (2014). On the Internet of Things, smart cities and the WHO Healthy Cities. International Journal of Health Geographics, 13, 10. https://doi.org/10.1186/1476-072X-13-10

El-Hajj, M. (2024). Leveraging digital twins and intrusion detection systems for enhanced security in IoT-based smart city infrastructures. Electronics, 13(19), 3941. https://doi.org/10.3390/electronics13193941

Gerodimos, A., Maglaras, L., Ferrag, M. A., Ayres, N., ve Kantzavelou, I. (2023). IoT: Communication protocols and security threats. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 3, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.12.003

Gheisari, M., Pham, Q. V., Alazab, M., Zhang, X., Fernández-Campusano, C., ve Srivastava, G. (2019). ECA: An edge computing architecture for privacy-preserving in IoT-based smart city. IEEE Access, 7, 155779-155786. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937177

Hancke, G. P., Silva, B. C., ve Hancke, G. P. (2013). The role of advanced sensing in smart cities. Sensors, 13(1), 393-425. https://doi.org/10.3390/s130100393

Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Jain, D., Goyal, P., ve Sikdar, B. (2019). A survey on IoT security: Application areas, security threats, and solution architectures. IEEE Access, 7, 82721-82743. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924045

Hernandez-Ramos, J. L., Martínez, J. A., Savarino, V., Angelini, M., Napolitano, V., Skarmeta, A. F., ve Baldini, G. (2021). Security and privacy in Internet of Things-enabled smart cities: Challenges and future directions. IEEE Security & Privacy, 19(1), 12-23. https://doi.org/10.1109/MSEC.2020.3012353

Ismagilova, E., Hughes, L., Rana, N. P., ve Dwivedi, Y. K. (2022). Security, privacy and risks within smart cities: Literature review and development of a smart city interaction framework. Information Systems Frontiers, 24(2), 393-414. https://doi.org/10.1007/s10796-020-10044-1

Khraisat, A., Alazab, A., Alazab, M., Obeidat, A., Singh, S., ve Jan, T. (2025). Federated learning for intrusion detection in IoT environments: A privacy-preserving strategy. Discover Internet of Things, 5, 72. https://doi.org/10.1007/s43926-025-00169-7

Lim, C., Kim, K.-J., ve Maglio, P. P. (2018). Smart cities with big data: Reference models, challenges, and considerations. Cities, 82, 86-99. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.04.011

Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. Sustainability, 16(19), 8337. https://doi.org/10.3390/su16198337

Motlagh, N. H., Mohammadrezaei, M., Hunt, J. D., ve Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the energy sector. Energies, 13(2), 494. https://doi.org/10.3390/en13020494

Perera, C., Qin, Y., Estrella, J. C., Reiff-Marganiec, S., ve Vasilakos, A. V. (2017). Fog computing for sustainable smart cities: A survey. ACM Computing Surveys, 50(3), 32. https://doi.org/10.1145/3057266

Radoš, K., Brkić, M., ve Begušić, D. (2024). Recent advances on jamming and spoofing detection in GNSS. Sensors, 24(13), 4210. https://doi.org/10.3390/s24134210

Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., ve Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT: Challenges and opportunities. Future Generation Computer Systems, 88, 173-190. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046

Safari Bazargani, J., Sadeghi-Niaraki, A., ve Choi, S.-M. (2021). A survey of GIS and IoT integration: Applications and architecture. Applied Sciences, 11(21), 10365. https://doi.org/10.3390/app112110365

Yiğitcanlar, T., Desouza, K. C., Butler, L., ve Roozkhosh, F. (2020). Contributions and risks of artificial intelligence in building smarter cities: Insights from a systematic review of the literature. Energies, 13(6), 1473. https://doi.org/10.3390/en13061473

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., ve Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 1(1), 22-32. https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328

E-ÇED RAPORLARININ COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE ANALİZİ

Nurhayat ÇUBUKÇU[1], Fatih DÖNER[2],

[1]Harita Yüksek Müh., Gümüşhane, 29100, Gümüşhane, cubukcunur@hotmail.com
[2]Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, fatihdoner@gumushane.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Türkiye'de Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sürecinin yasal ve kurumsal boyutu incelendikten sonra Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, ÇED İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmekte olan e-ÇED Portalı'nda bulunan Gümüşhane ilini kapsayan ÇED raporlarına ait verilerin (Coğrafi Bilgi Sistemleri) CBS desteğiyle mekânsal bir veri tabanına aktarılarak analiz edilmesi amaçlanmaktadır. e-ÇED Portal verileri incelendiğinde Türkiye için 2013 yılından bugüne kadar olan yaklaşık 111 bin ÇED raporunun PDF formatında erişilebilir olduğu görülmektedir. Gümüşhane ili için bu sayı 594'tür. e-ÇED Portal'da ÇED raporları 14 sektör altında sınıflandırılmaktadır. Gümüşhane için en çok ÇED raporunun bulunduğu ilk iki sektör, toplamda 394 ÇED raporuyla maden ve toplamda 94 ÇED raporuyla enerji sektörüdür. Yapılan analizler sonucunda, tüm projeler için toplam proje alanının %12'sinin orman alanlarından tahsis edildiği ve il nüfusunun %58'inin bir maden alanına 1 km mesafede yaşadığı belirlenmiştir. CBS desteği sayesinde tüm ÇED raporu gerektiren projelerin Gümüşhane ili genelindeki mekânsal dağılımının gösterilmesi, mekânsal sorgulama ve analizler ile yeni projeler için yer belirlemede daha sağlıklı karar verme olanaklı hale gelmiştir. Mevcut e-ÇED Portal harita tabanlı bir yapıya dönüştürülerek gelecekte benzer uygulamalar farklı iller için de gerçekleştirilebilir.

Anahtar Sözcükler: coğrafi bilgi sistemleri (CBS), çevresel etki değerlendirmesi (ÇED), orman

ABSTRACT

ANALYSIS OF E-EIA REPORTS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

This study aims to analyze the data from (Environmental Impact Assessment) EIA reports covering Gümüşhane province, found on the e-EIA Portal managed by the General Directorate of EIA Permits and Supervision of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, by transferring them to a spatial database with (Geographic Information Systems) GIS support. An examination of the e-EIA Portal data reveals that approximately 111,000 EIA reports for Turkey from 2013 to the present are accessible in PDF format. For Gümüşhane province, this number is 594. In the e-EIA Portal, EIA reports are classified under 14 sectors. For Gümüşhane, the top two sectors with the most EIA reports are mining with a total of 394 reports and energy with a total of 94 reports. Analyses have shown that 12% of the total project area for all projects is allocated from forest areas, and 58% of the province's population lives within 1 km of a mining area. Thanks to GIS support, the spatial distribution of all projects requiring EIA reports across Gümüşhane province is shown, and spatial queries and analyses enable more informed decision-making in site selection for new projects. The current e-EIA Portal can be transformed into a map-based structure, and similar applications can be implemented for different provinces in the future.

Keywords: environmental impact assessment (EIA), forest, geographic information systems (GIS)

1. GİRİŞ

Birleşmişmiş Milletler (BM), 1987 yılında Brundtland Raporu ile sürdürülebilir kalkınma kavramını tanımlamış ve bu fikri küresel politika gündemine taşımıştır (Birleşmiş Milletler, 1987). 2015 yılında kabul edilen 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi (SDG'ler), çevre konularını doğrudan içeren hedefler barındırmaktadır (Birleşmiş Miletler, 2015). Bu hedefler arasında su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve kirliliğin önlenmesi (SDG 6), temiz ve yenilenebilir enerjiye geçiş (SDG 7), sürdürülebilir enerji üretimi ve tüketiminin teşvik edilmesi (SDG 12), iklim değişikliğiyle mücadele (SDG 13), deniz ve okyanus ekosistemlerinin korunması (SDG 14) ile kara ekosistemlerinin ve biyolojik çeşitliliğin korunması (SDG 15) yer almaktadır.

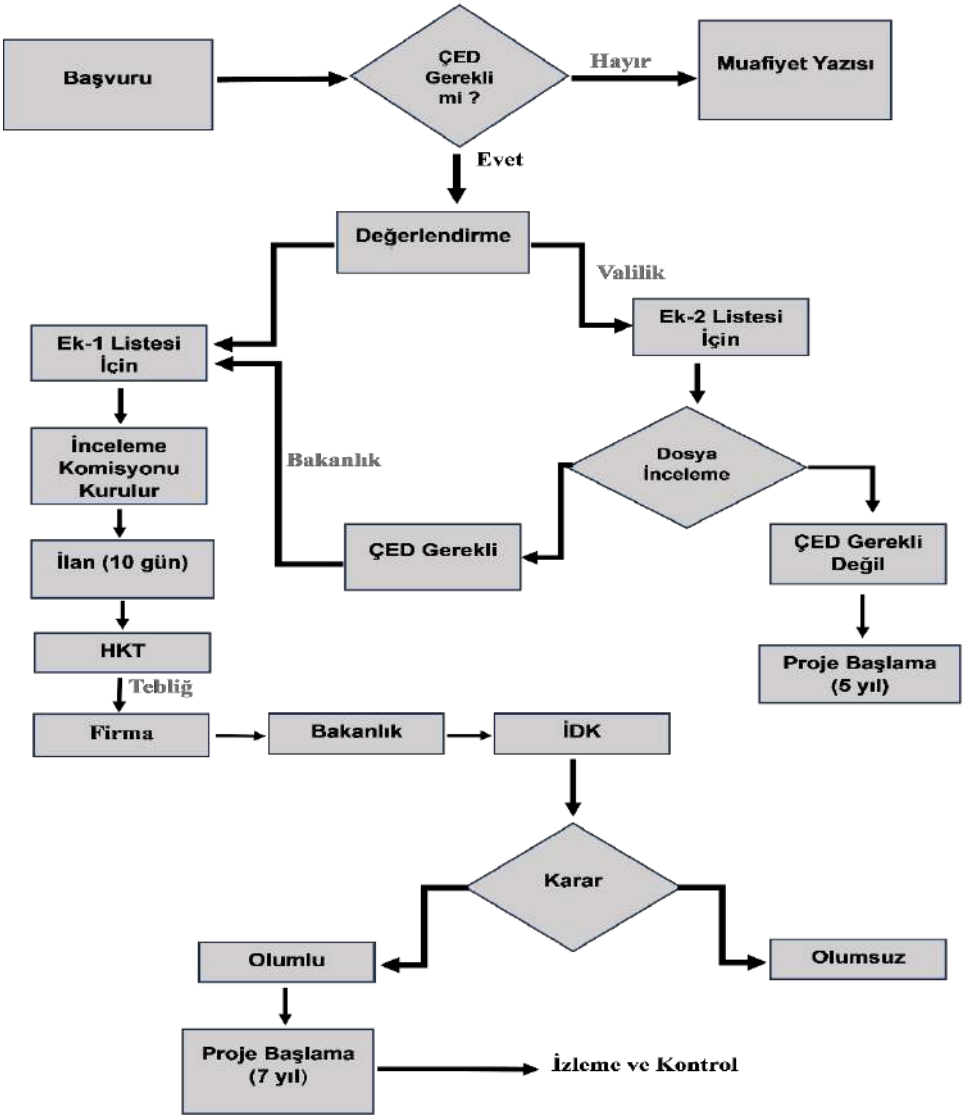
Sürdürülebilir bir çevre için yapılacak faaliyetlerin çevre üzerindeki etkilerinin önceden belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Dünyada sanayileşme ile beraber gerçekleştirilen projelerin zamanla olumsuz tarafları görülmeye başlamış ve bu durum çevre koruma bilincinin oluşmasına neden olmuştur (Sadler, 1996). Bunun sonucunda Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) kavramı 1970'li yılarda oluşmaya başlamış ve zamanla tüm dünyada önemini artırmıştır (Bayram, 2022).

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), mekânsal ve öznitelik verilerinin birlikte yönetilmesine, sorgulanmasına, analiz edilmesine ve görselleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Yomralıoğlu, 2000; Burrough vd., 2015). ÇED sürecinde

CBS kullanımı; proje alanlarının belirlenmesi, alternatiflerin karşılaştırılması, çevresel etkilerin mekânsal olarak analiz edilmesi ve karar destek sistemlerinin oluşturulması açısından önemli olanaklar sunmaktadır (Çabuk ve Şahin, 1998; João, 1998).

Türkiye'de ÇED süreci, 2872 sayılı Çevre Kanunu çerçevesinde yürütülmektedir. ÇED sürecine ilişkin usul ve esaslar, 29 Temmuz 2022 tarihli ve 31907 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği ile düzenlenmiştir. ÇED sürecinin planlanması, uygulanması ve denetimi görevi ise T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile il müdürlüklerine verilmiştir. Türkiye' de Çevrimiçi ÇED Yönetimi Sistemi (e–ÇED) ilk defa 01.12.2013 tarihinde uygulanmaya başlamıştır. E-ÇED uygulaması ile ÇED Yönetmeliği kapsamında verilen tüm kararlara hızlı erişim sağlanarak kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu uygulama elektronik ortamda gerçekleştiği gibi evrak işlemleri için de yaşanacak zaman kaybını ortadan kaldırmıştır. Yatırımcılar için ise sürecin her aşamasının takip edilebiliyor oluşu sistemin etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bunların yanı sıra sistemde yapılacak projeler için hazırlanan ÇED raporu dosyalarına pdf formatında ulaşılabilmektedir.

Şekil 1'de Türkiye'de ÇED sürecinin başvuru aşamasından karar aşamasına kadar olan işlem adımları bir iş akış şemasında gösterilmektedir.



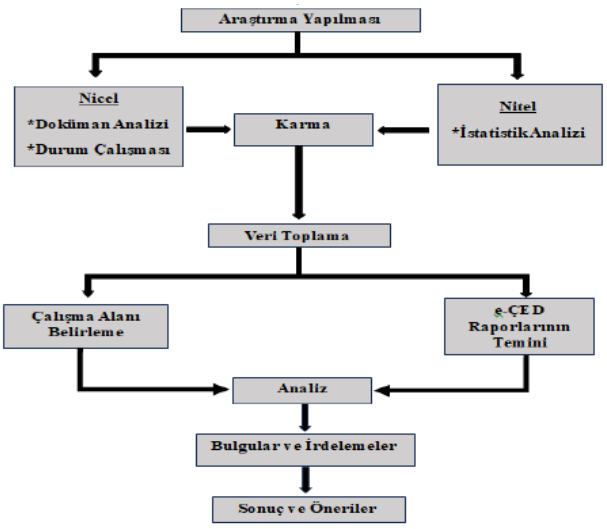
Şekil 1. Türkiye'de ÇED süreci iş akışı (Çubukçu, 2026).

Halkın Katılım Toplantısı (HKT), proje hakkında halkın bilgilendirilmesi ile görüş ve önerilerinin alınması amacıyla düzenlenen toplantılardır. HKT, ÇED raporu için kapsam ve özel format belirlenmeden önce gerçekleştirilir. Toplantının yeri, tarihi ve saati en az on gün öncesinden yerel veya ulusal basın aracılığıyla duyurulur. Toplantıya Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürü veya görevlendireceği yetkili başkanlık eder; düzenlenen tutanak bir nüshası Valilikte kalmak üzere Bakanlığa gönderilir. Komisyon üyeleri de toplantıya katılma hakkına sahiptir. İnceleme ve Değerlendirme Komisyonu (İDK), ÇED Raporu'nun nihai değerlendirmesinin yapılması amacıyla

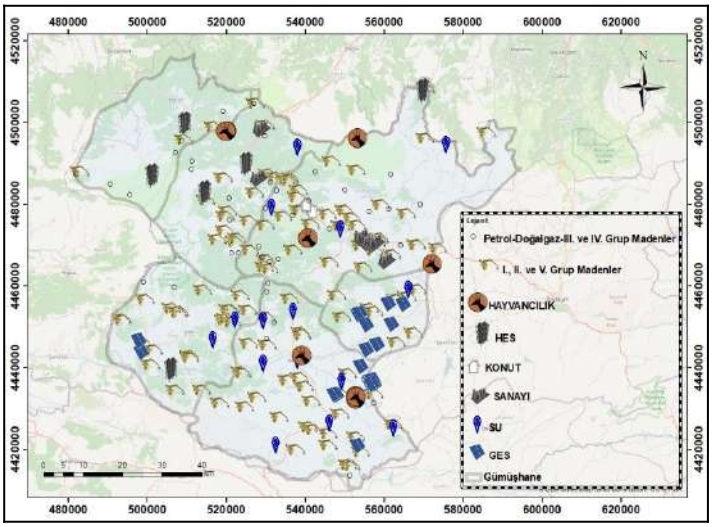
Bakanlıkça oluşturulan, süreç yönetiminden sorumlu birimler ile ilgili kamu kurum ve kuruluşlarından uzmanların yer aldığı komisyondur.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışma için Şekil 2'de gösterilen iş akış şemasındaki adımlar takip edilmiştir. Çalışma alanı olarak seçilen Gümüşhane ilinde gerçekleştirilecek projelere ait ÇED raporu bilgileri 2014-2025 yılları baz alınarak e-ÇED portal üzerinden elde edilmiştir. Türkiye'de T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü bünyesinde yürütülen e-ÇED portal sistemi 2013'ten beri uygulanmaya başlamıştır. Bu portala "https://eced-duyuru.csb.gov.tr/eced-prod/duyurular.xhtml" internet adresinden ulaşılmaktadır. 2014 yılından günümüze kadar yapılan tüm projeler için hazırlanan ÇED rapor dosyalarında proje alanına ait koordinatlar (coğrafi, UTM) ve proje alanının yüzölçümü gibi konumsal bilgiler bulunmaktadır. Bu konumsal bilgilerin yanında e-ÇED portalda proje ili ve ilçesi, proje adı, sektör ve alt sektör adı, proje tarihi, proje sahibi, ÇED kararı, karar tarihi gibi öz nitelik bilgileri yer almaktadır. İlk olarak Excel ortamında düzenlenen ÇED raporlarına ait veriler daha sonra ArcMAP yazılımın veri dönüşüm araçları kullanılarak CBS ortamına aktarılmıştır. Veri dönüşüm aracı sayesinde, Excel dosyasında koordinatların kayıt edildiği sütunlar referans alınarak nesneler bir harita katmanı üzerinde temsil edilir. Ayrıca öznitelik bilgileri de bu nesneler ile bir tablo üzerinden ilişkilendirilir. Şekil 3'te gösterilen haritada çalışma alanına ait ÇED raporlarından elde edilen veriler sunulmaktadır.



Şekil 2. Çalışma iş akış şeması.



Şekil 3. Çalışma alanına ait veriler.

Çalışmanın temel veri kaynağını e-ÇED Portalı'nda Gümüşhane iline ait ÇED raporları oluşturmuştur. Toplam 594 rapor incelenmiş; aynı projenin birden fazla kez kaydedildiği kayıtlar ve iptal edilen projeler analiz dışında bırakılarak 238 projeye ait veriler CBS ortamına aktarılmıştır. ÇED raporlarından elde edilen proje konumları ve öznitelik bilgileri; yerleşim ve nüfus verileri, arazi kullanımı, orman alanları, akarsu ve yol verileriyle birlikte

değerlendirilmiştir. Nüfus analizlerinde 2024 yılı köy nüfusları kullanılmıştır. Projelere ait konumsal bilgilerle öz nitelik bilgilerinin CBS ortamında entegre edilmesi sayesinde belirli sektörlere ait projelerin seçilmesi, projelerin belirli mesafedeki yerleşimlerle ilişkilendirilmesi, proje alanlarının arazi kullanımıyla çakıştırılması ve orman alanı tahsislerinin analiz edilmesi mümkün olmuştur.

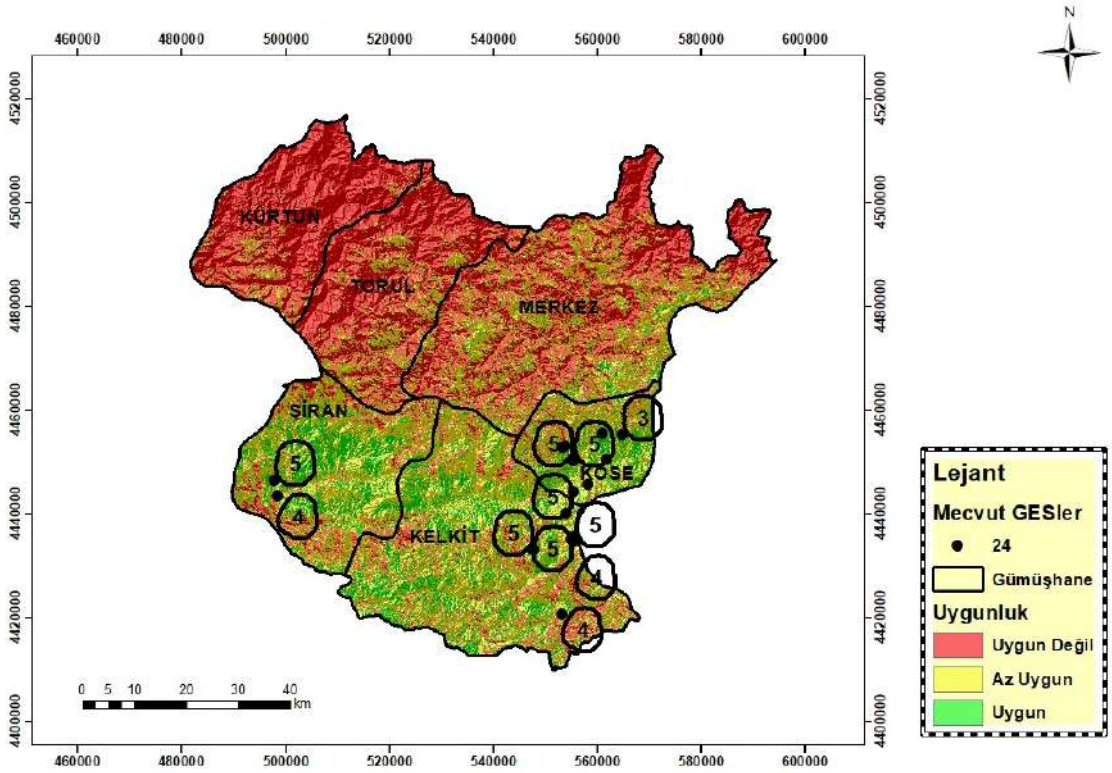
Güneş Enerjisi Santrali (GES) projeleri için uygunluk analizi güneş radyasyonu, eğim, bakı ve yola yakınlık olmak üzere dört temel kriter üzerinden gerçekleştirilmiştir. Eğimde %0–10 uygun, %10–20 az uygun ve %20 üzeri uygun değil; yola yakınlıkta 0–1500 m uygun, 1500–3000 m az uygun ve 3000 m üzeri uygun değil sınıfları kullanılmıştır. Kriterler Analitik Hiyerarşi Süreci yaklaşımıyla ağırlıklandırılmış; güneş radyasyonu %55, eğim %30, bakı %10 ve yola yakınlık %5 ağırlıkla değerlendirilmiştir. Son uygunluk yüzeyi mevcut GES proje konumlarıyla karşılaştırılmıştır.

Madencilik faaliyetleri I., II. ve V. Grup Madenler ile Petrol-Doğalgaz-III. ve IV. Grup Madenler olmak üzere iki ana grup altında incelenmiştir. Maden alanlarının çevresinde 1 km, 5 km ve 10 km tampon bölgeler oluşturularak yerleşim ve nüfus ilişkileri analiz edilmiştir. Maden alanlarının akarsularla ilişkisi 0–250 m, 1 km ve 3 km mesafe kuşakları üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca maden alanlarının arazi kullanım sınıflarına isabet durumu CBS birleştirme analizleriyle belirlenmiş, ÇED raporlarında yer alan orman alanı tahsis bilgileri proje katmanlarına aktarılmıştır.

3. BULGULAR

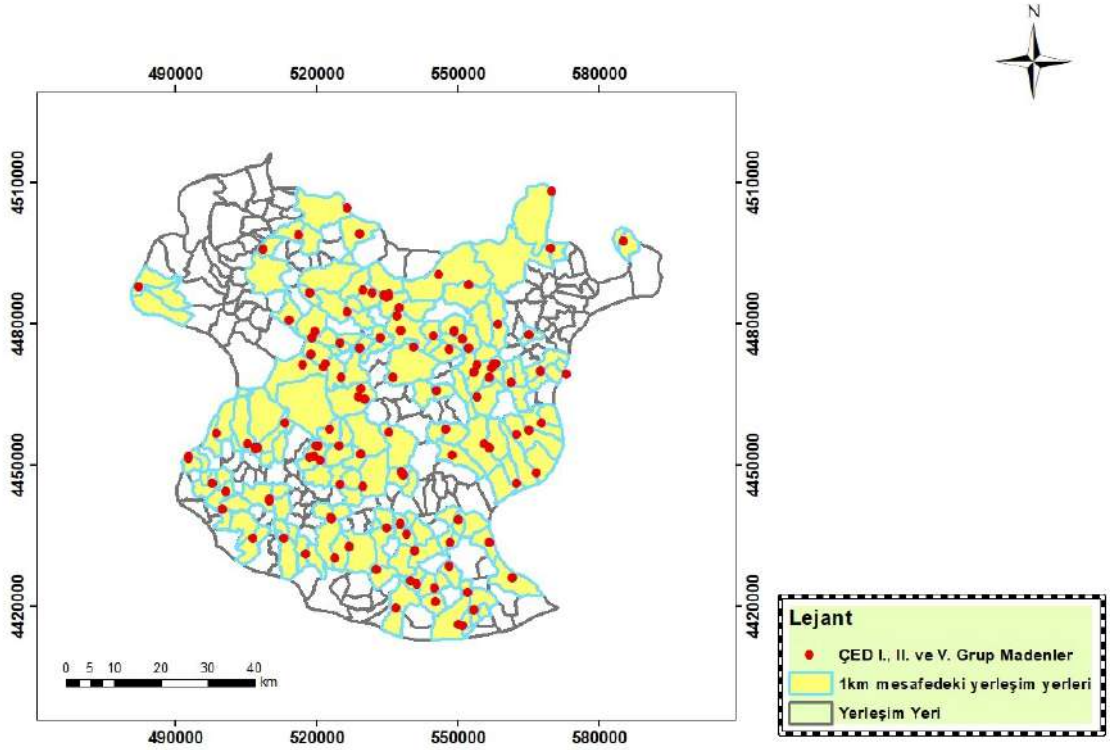
2014 yılından günümüze kadar yapılan tüm projeler için hazırlanan ÇED rapor dosyalarında proje alanına ait koordinatlar, enlem boylam (coğrafi, UTM) ve proje alanının yüzölçümü gibi konumsal bilgileri bulunmaktadır. Bu konumsal bilgilerin yanında e-ÇED portalda proje ili ve ilçesi, proje adı, sektör ve alt sektör adı, proje tarihi, proje sahibi, ÇED kararı, karar tarihi gibi öz nitelik bilgileri yer almaktadır. e-ÇED portal üzerinden ve bilgisayara indirilen PDF formatındaki ÇED raporlarından elde edilen konumsal ve öznitelik bilgileri öncelikle bir Excel dosyasında depolanmıştır. e-ÇED Portal'da Gümüşhane için toplam 594 ÇED raporu belirlenmiştir. Bu raporların 394'ü madencilik, 94'ü enerji sektöründedir. Tekrarlanan ve iptal edilen kayıtların temizlenmesiyle 238 proje analizlere dâhil edilmiştir. Bu projelerin 169'u (%71) madencilik, 31'i (%13) enerji sektöründedir. Sonuçlar, Gümüşhane'de ÇED faaliyetlerinin belirgin biçimde madencilik sektöründe yoğunlaştığını göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen GES uygunluk analizi sonuçları mevcut GES projeleriyle karşılaştırıldığında mevcut 24 GES projesinin 23'ü (%95,8) uygun, biri (%4,2) az uygun sınıfta bulunduğu görülmektedir. Uygun değil sınıfına isabet eden mevcut GES projesi bulunmamaktadır. Bu sonuç, CBS tabanlı çok kriterli yaklaşımın mevcut yatırım kararlarının mekânsal açıdan değerlendirilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 4'te dört kriterin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen GES uygunluk haritası ve mevcut proje konumları gösterilmektedir.



Şekil 4. Gümüşhane iline ait GES uygunluk haritası.

Madencilik faaliyetlerinin mekânsal yoğunluk analizleri, faaliyetlerin özellikle ilin kuzeybatı ve kuzeydoğu kesimlerinde belirginleştiğini göstermektedir. Şekil 5'te I., II. ve V. Grup Madenler için 1 km yakınlık kuşağı ile yerleşimlerin ilişkisi sunulmuştur. I., II. ve V. Grup Madenlerin 1 km yakınında yaşayan nüfus 91.129 kişi olarak hesaplanmıştır. Bu değer il nüfusunun %58,61'ine karşılık gelmektedir. Mesafe 5 km'ye çıkarıldığında belirlenen mesafe içinde yaşayan nüfus 148.993 kişiye ve il nüfusunun %95,81'ine ulaşmaktadır (Çizelge 1).

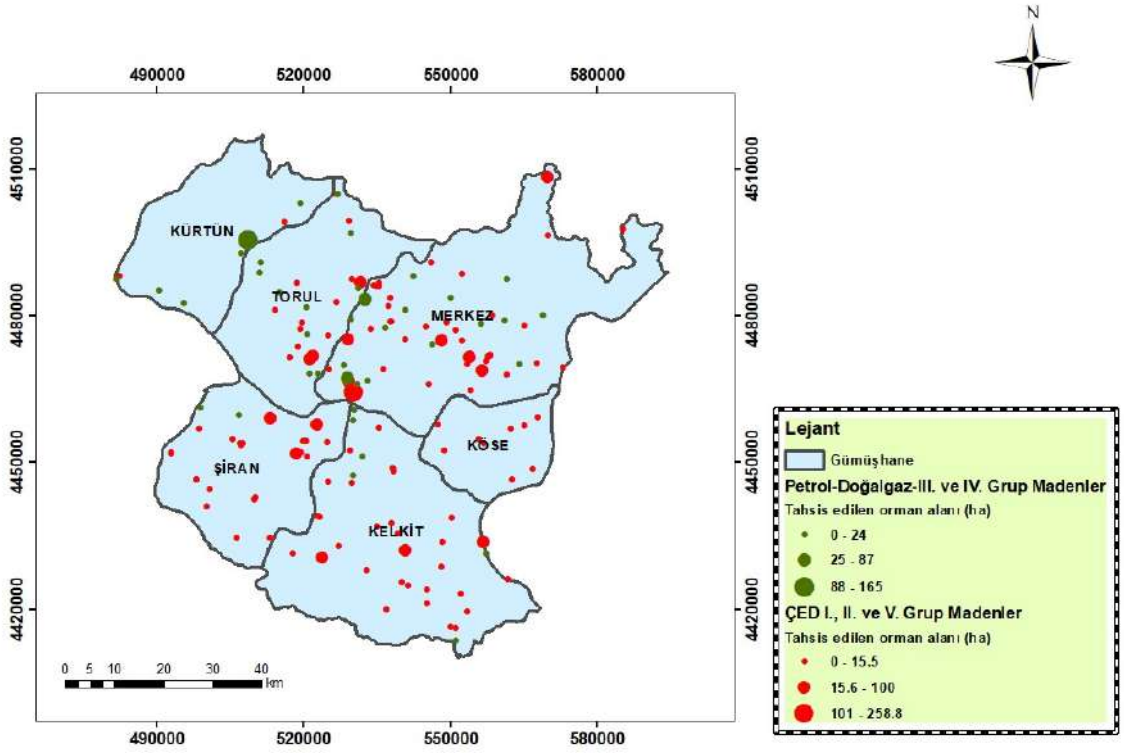


Şekil 5. Gümüşhane I., II. ve V. Grup Madenler için 1 km mesafedeki yerleşim yerleri.

Çizelge 1. I., II. ve V. grup madenlere belirlenen mesafe içinde yaşayan nüfus.

Mesafe	Nüfus	İl nüfusuna oranı
1 km	91.129	%58,61
5 km	148.993	%95,81

Gümüşhane'nin toplam yüzölçümünün %35,93'ünü oluşturan 236.262 hektarlık orman alanı ilin önemli doğal kaynaklarından biridir. İncelenen ÇED raporları kapsamında toplam 18.620,28 hektar orman alanının tahsis edildiği ve bu miktarın toplam proje alanlarının yaklaşık %12'sini oluşturduğu belirlenmiştir. Bu değer toplam orman varlığının yaklaşık %7,88'ine karşılık gelmektedir. Şekil 6'daki haritada maden projeleri için tahsis edilen orman alanlarının mekânsal dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6. Gümüşhane'de maden projeleri kapsamında tahsis edilen orman alanlarının mekânsal dağılımı.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Gümüşhane ili örneğinde e-ÇED verilerinin CBS ortamına aktarılması ve mekânsal analizlerle değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. 594 e-ÇED raporu incelenmiş, tekrar eden ve iptal edilen kayıtların ayıklanması sonucunda 238 proje analizlere dâhil edilmiştir.

GES projeleri için gerçekleştirilen uygunluk analizinde 24 mevcut projenin 23'ünün (%95,8) uygun, birinin (%4,2) az uygun alanda bulunduğu belirlenmiştir. Madencilik faaliyetlerinin yerleşimlerle ilişkisi incelendiğinde I., II. ve V. Grup Madenlerin 1 km yakınında 91.129 kişinin yaşadığı ve bu nüfusun il nüfusunun %58,61'ini oluşturduğu belirlenmiştir.

Projeler kapsamında 18.620,28 hektar orman alanının tahsis edildiği ve bunun toplam proje alanlarının yaklaşık %12'sini oluşturduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, ekonomik faaliyetlerin orman bütünlüğü üzerindeki toplam baskısının proje bazında değil, kümülatif olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Çalışmanın temel önerisi e-ÇED Portalı'nın yalnızca PDF raporlarının sunulduğu bir sistem olmaktan çıkarılarak CBS tabanlı bir karar destek altyapısıyla bütünleştirilmesidir. Kısa vadede raporların yanında standartlaştırılmış konumsal verilerin paylaşılması; orta ve uzun vadede web CBS tabanlı bütünleşik bir e-ÇED platformunun oluşturulması önerilmektedir.

Böyle bir sistem sayesinde yeni yatırımların mevcut projeler, doğal kaynaklar, yerleşimler, su kaynakları, ormanlar ve plan kararlarıyla ilişkisi birlikte değerlendirilebilecek, daha sağlıklı yer seçimi ve kümülatif etki değerlendirmesi yapılabilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma yüksek lisans tezinden (Çubukçu, 2026) geliştirilerek hazırlanmıştır. UZAL-CBS 2026 kapsamında çalışmayı değerlendirerek, görüşleriyle çalışmanın geliştirilmesine katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Bayram, M. (2022). Türkiye'deki çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) süreçlerinin karar alma süreçlerine etkisinin atık yönetim projeleri özelinde araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Birleşmiş Milletler. (1987). Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu.

Birleşmiş Milletler. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

Burrough, P.A., McDonnell, R.A. ve Lloyd, C.D., 2015. Principles of Geographical Information Systems. 3. basım, Oxford University Press.

Çabuk, S.N. ve Şahin, M., 1998. Coğrafi bilgi sistemlerinin çevresel etki değerlendirmesinde kullanımı. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, 88: 45–56.

Çubukçu, N. (2026). e-ÇED Raporlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Analizi: Gümüşhane Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gümüşhane.

João, E., 1998. Use of GIS in environmental impact assessment. Impact Assessment and Project Appraisal, 16(4): 333–334.

Sadler, B. (1996). Environmental assessment in a changing world: Evaluating practice to improve performance. Canadian Environmental Assessment Agency.

Yomralıoğlu, T., 2000. Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar. Akademi Kitabevi.

KENTSEL TOPLU ULAŞIMDA CBS TABANLI GERÇEK ZAMANLI YOLCU BİLGİLENDİRME SİSTEMİ: TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ AKUS ÖRNEĞİ

Osman DUMAN[1], Osman YAVUZYILMAZ[2]

1 Bilg. Müh., Trabzon Büyükşehir Belediyesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 61000, Ortahisar, Trabzon, osmanduman@trabzon.bel.tr
2 Bilg. Müh., Trabzon Büyükşehir Belediyesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 61000, Ortahisar, Trabzon, osmanyavuzyilmaz@trabzon.bel.tr

ÖZET

Kent içi toplu ulaşım sistemlerinde araç konumu, durak, hat, güzergâh, sefer saati ve tahmini varış süresi gibi bilgilerin güncel ve konumsal olarak sunulması, yolcuların seyahat kararlarının desteklenmesi açısından önem taşımaktadır. Planlanan sefer saatleri temel bir bilgilendirme aracı olmakla birlikte trafik koşulları, yolcu hareketleri, duraklama süreleri ve operasyonel değişkenler nedeniyle gerçekleşen araç hareketleri planlanan zamanlardan farklılaşabilmektedir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), durak, güzergâh ve hareketli araç verilerinin ortak bir mekânsal referans içerisinde yönetilmesine, analiz edilmesine ve harita tabanlı kullanıcı arayüzlerinde sunulmasına olanak sağlamaktadır (Yomralıoğlu, 2009; Longley vd., 2015). Otobüs varış ve seyahat süresi tahmini literatürde tarihsel yaklaşımlardan makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modellere kadar geniş bir yöntem yelpazesiyle ele alınmaktadır. Yakın dönem çalışmalarda doğrusal olmayan durum uzayı ve Kalman filtresi, LSTM/GRU tabanlı mekânsal-zamansal modeller ve derin öğrenme-Kalman hibritleri kullanılmıştır (Achar vd., 2022; Lee ve Yoon, 2022; Shen vd., 2025). Türkiye'de de Kayseri ve İstanbul gerçek toplu ulaşım verileri üzerinde yapay sinir ağları ve destek vektör regresyonu gibi yöntemler incelenmiştir (Taşyürek ve Çelik, 2020; Şahinbaş, 2022).

Bu çalışmada Trabzon Büyükşehir Belediyesi tarafından geliştirilen AKUS uygulamasının CBS tabanlı sistem mimarisi, gerçek zamanlı araç verilerinin işlenme yapısı ve üretimde kullanılan tahmini varış süresi (Estimated Time of Arrival - ETA) yöntemi incelenmiştir. Çalışmanın amacı yeni bir makine öğrenmesi veya derin öğrenme algoritması geliştirmek değil, hâlihazırda gerçek kullanıcılar tarafından kullanılan üretim sistemindeki tarihsel güzergâh kesimi tabanlı ETA yaklaşımını açıklamak ve yöntemin gerçek işletme kayıtları üzerindeki performansını nicel olarak değerlendirmektir. Böylece çalışma yalnızca uygulamanın işlevsel özelliklerinin tanıtılmasıyla sınırlandırılmamış, sistem mimarisi ve tahmin performansı birlikte ele alınmıştır.

AKUS, ASP.NET Core MVC tabanlı ve mobil cihaz kullanımına uygun bir web uygulamasıdır. İlişkisel ve konumsal veriler PostgreSQL/PostGIS ortamında yönetilmekte, GeoServer mekânsal servis bileşeni olarak kullanılmakta ve dinamik geometrilerin bir bölümü PostGIS üzerinden doğrudan GeoJSON biçiminde istemciye aktarılmaktadır. Harita arayüzünde OpenLayers kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı araç konumları ASIS ve Mobiliz araç takip sistemlerinden sağlanmaktadır. Duraklar noktasal, güzergâhlar çizgisel, araç konumları ise zaman içinde değişen hareketli konumsal veriler olarak ele alınmaktadır. Kullanıcılar hat ve durakları sorgulayabilmekte, seçilen hattın güzergâhını ve aktif araçlarını harita üzerinde görüntüleyebilmekte, konumlarına yakın durakları belirleyebilmekte ve seçilen durağa yaklaşan araçların tahmini varış sürelerini görebilmektedir. Son konumu 120 saniyeden eski olan araçlar yaklaşan araç hesabına dahil edilmemektedir. Araç ile hedef durak arasındaki mesafede kuş uçuşu uzaklık yerine güzergâh geometrisi esas alınmaktadır.

ETA hesabında aracın son geçtiği duraktan hedef durağa kadar olan ardışık güzergâh kesimlerine ait tarihsel geçiş süreleri kullanılmaktadır. Araç takip kayıtlarından aynı araç ve güzergâha ait ardışık durak geçişleri belirlenmekte; 5 saniyeden kısa ve 2400 saniyeden uzun geçişler tarihsel profil dışında bırakılmaktadır. Profiller güzergâh, durak çifti, hafta içi/hafta sonu durumu ve gün içerisindeki zaman aralığı dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Üretimde kullanılan yöntemde bir kesimin tahmini süresi, ilgili profildeki minimum ve maksimum geçiş sürelerinin orta noktası olarak $Ti=(Tmin,i+Tmax,i)/2$ biçiminde hesaplanmakta; hedef durağa kadar olan kesim süreleri toplanarak ETA elde edilmektedir. Uygun tarihsel profil üretilemediğinde araç ile hedef durak arasındaki güzergâh mesafesi 40 km/saat referans hız kullanılarak süreye dönüştürülmekte ve yedek tahmin oluşturulmaktadır. Geriye dönük değerlendirmede bu üretim kuralları değiştirilmeden korunmuştur.

Tahmin performansının değerlendirilmesinde test verisinin tarihsel profil oluşturma sürecine dahil edilmesini önlemek amacıyla zamansal olarak ayrılmış iki test günü kullanılmıştır. 11 Eylül 2026 Cuma günü için tarihsel profiller 13 Ağustos-10 Eylül 2026 arasındaki kayıtlarla, 12 Eylül 2026 Cumartesi günü için ise 13 Ağustos-11 Eylül 2026 arasındaki kayıtlarla oluşturulmuştur. Böylece her test günü kendi değerlendirmesinde kullanılan tarihsel profilin dışında bırakılmış ve zamansal veri sızıntısı önlenmiştir. Yüksek frekanslı araç kayıtlarında aynı hareketin aşırı temsil edilmesini azaltmak amacıyla her araç-güzergâh kombinasyonu için dakikada bir test noktası seçilmiş, her test noktasında güzergâh üzerinde ileride bulunan en fazla 10 hedef durak için tahmin üretilmiş ve tahminler aynı aracın ilgili hedef durağa gerçekleşen varış zamanı ile eşleştirilmiştir. Cuma günü 599.922, Cumartesi günü 364.356 olmak üzere toplam 964.278 tahmin-gerçekleşme çifti değerlendirilmiştir.

İki test günü birlikte değerlendirildiğinde ortalama mutlak hata (MAE) 150,12 saniye (2,50 dakika), medyan mutlak hata ise 55 saniye olarak hesaplanmıştır. Tahminlerin %52,75'i ±1 dakika, %71,56'sı ±2 dakika, %79,75'i ±3 dakika ve %87,37'si ±5 dakika içerisinde gerçekleşmiştir. Medyan mutlak hatanın MAE'den belirgin biçimde düşük olması, tahminlerin önemli bir bölümünde hata değerlerinin düşük olduğunu, ancak daha yüksek hata değerlerinin ortalamayı artırdığını göstermektedir. Performans test günleri arasında farklılaşmıştır: Cuma günü MAE 2,95 dakika ve ±2 dakika içerisindeki tahmin oranı %66,30 iken, Cumartesi günü MAE 1,77 dakika ve aynı oran %80,21 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, ETA performansının tek bir gün üzerinden genellenmemesi gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte bağımsız trafik yoğunluğu verisi kullanılmadığından günler

arasındaki fark doğrudan trafik yoğunluğuna veya belirli bir işletme değişkenine bağlanmamıştır. Hedefe kadar gerekli tüm kesimler için tarihsel profil bulunan tahminlerde de her iki test gününde kalan durak sayısı arttıkça hata büyüklüğünün yükseldiği görülmüştür.

Sonuç olarak AKUS örneği, yerel yönetimlerde gerçek zamanlı araç takip sistemleri, mekânsal veri altyapısı ve web tabanlı CBS teknolojilerinin yolcu bilgilendirme amacıyla bütünleşik biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Gerçek işletme verileri üzerinde gerçekleştirilen geriye dönük doğrulama, üretimde kullanılan ETA yaklaşımının ölçülebilir performansını ortaya koyarken günler ve tahmin ufukları arasında farklılıklar bulunduğunu da göstermiştir. Çalışmanın doğrulama dönemi iki test günü ile sınırlı olduğundan elde edilen değerlerin tüm işletme dönemlerini temsil ettiği ileri sürülmemektedir. Gelecek çalışmalarda doğrulama döneminin daha uzun süreye yayılması, farklı gün ve dönemlerin karşılaştırılması, tarihsel kesim profillerinde alternatif istatistiksel yöntemlerin değerlendirilmesi ve makine öğrenmesi temelli ETA modellerinin mevcut üretim yaklaşımıyla karşılaştırılması planlanmaktadır.

Anahtar Sözcükler: AKUS, akıllı ulaşım sistemleri, CBS, gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme, tahmini varış süresi, toplu ulaşım.

ABSTRACT

GIS-BASED REAL-TIME PASSENGER INFORMATION SYSTEM IN URBAN PUBLIC TRANSPORTATION: THE CASE OF TRABZON METROPOLITAN MUNICIPALITY AKUS

In urban public transport systems, providing up-to-date and spatially referenced information on vehicle locations, stops, lines, routes, schedules, and estimated arrival times is important for supporting passengers' travel decisions. Although scheduled departure and arrival times constitute a basic information source, actual vehicle movements may deviate from schedules because of traffic conditions, passenger activity, dwell times, and operational factors. Geographic Information Systems (GIS) enable stops, routes, and moving vehicle data to be managed, analysed, and presented within a common spatial reference through map-based user interfaces (Yomralıoğlu, 2009; Longley et al., 2015). Bus arrival and travel time prediction has been addressed through a wide range of methods, from historical approaches to machine-learning and deep-learning models. Recent studies have employed nonlinear state-space and Kalman filtering approaches, LSTM/GRU-based spatio-temporal models, and deep learning-Kalman hybrid methods (Achar et al., 2022; Lee and Yoon, 2022; Shen et al., 2025). In Türkiye, artificial neural networks and support vector regression have also been examined using real public transport data from Kayseri and Istanbul (Taşyürek and Çelik, 2020; Şahinbaş, 2022).

This study examines the GIS-based system architecture, real-time vehicle data processing structure, and production Estimated Time of Arrival (ETA) method of AKUS, developed by Trabzon Metropolitan Municipality. The objective is not to develop a new machine-learning or deep-learning algorithm, but to explain the historical route-segment-based ETA approach currently used in a live production system and to quantitatively evaluate its performance against actual operational records. Accordingly, the study goes beyond a functional description of the application and evaluates both the system architecture and the predictive performance of the operational ETA method.

AKUS is a mobile-compatible web application developed with ASP.NET Core MVC. Relational and spatial data are managed in PostgreSQL/PostGIS; GeoServer is used as a spatial service component, while some dynamic geometries are transferred directly from PostGIS to the client in GeoJSON format. OpenLayers is used for web mapping. Real-time vehicle positions are obtained from the ASIS and Mobiliz vehicle tracking systems. Stops are represented as point features, routes as linear features, and vehicle positions as temporally changing moving spatial data. Users can query lines and stops, view routes and active vehicles on the map, locate nearby stops, and access estimated arrival times for vehicles approaching a selected stop. Vehicle positions older than 120 seconds are excluded from the approaching-vehicle calculation. Route geometry, rather than straight-line distance, is used when calculating the distance between a vehicle and a target stop.

The ETA calculation uses historical travel times for consecutive route segments between the last stop passed by a vehicle and the target stop. Consecutive stop transitions are derived from vehicle tracking records, while transitions shorter than 5 seconds or longer than 2,400 seconds are excluded from the historical profile. Profiles are generated according to route, stop pair, weekday/weekend status, and time period. In the production method, the estimated time for a segment is calculated as the midpoint of the historical minimum and maximum transition times, $T_i=(T_{min,i}+T_{max,i})/2$, and the segment estimates are summed up to the target stop. When a suitable historical ETA cannot be produced, the remaining route distance is converted to time using a reference speed of 40 km/h as a fallback estimate. These production rules were preserved without modification during retrospective evaluation.

To prevent test records from contributing to the historical profiles used for their own evaluation, two temporally separated test days were selected. For Friday, 11 September 2026, historical profiles were generated from records between 13 August and 10 September 2026. For Saturday, 12 September 2026, profiles were generated from records between 13 August and 11 September 2026. Thus, each test day was excluded from its corresponding profile-building period. To reduce over-representation caused by high-frequency tracking records, one test point per vehicle-route-minute combination was selected. At each test point, predictions were generated for up to ten downstream stops and matched with the actual subsequent arrival of the same vehicle at the corresponding target stop. A total of 599,922 prediction-observation pairs were evaluated on Friday and 364,356 on Saturday, yielding 964,278 matched pairs overall.

Across both test days, the mean absolute error (MAE) was 150.12 seconds (2.50 minutes), while the median absolute error was 55 seconds. Overall, 52.75% of predictions were within ±1 minute, 71.56% within ±2 minutes, 79.75% within ±3 minutes, and 87.37% within ±5 minutes of the observed remaining travel time. The substantially lower median absolute error relative to the MAE

indicates that many predictions had relatively small errors, while a smaller number of larger errors increased the mean. Performance differed between the two test days: on Friday, the MAE was 2.95 minutes and 66.30% of predictions were within ±2 minutes, whereas on Saturday the MAE was 1.77 minutes and the corresponding rate was 80.21%. This difference indicates that ETA performance should not be generalised from a single day. Since independent traffic-density data were not available, the observed day-to-day difference was not attributed directly to traffic or to any specific operational factor. For predictions with complete historical segment coverage, the error magnitude also increased as the number of remaining stops to the target increased on both test days.

The AKUS case demonstrates how real-time vehicle tracking, spatial data infrastructure, and web-based GIS technologies can be integrated by local governments for passenger information services. Retrospective validation using operational data provides a quantitative assessment of the existing ETA method and reveals variations across test days and prediction horizons. Because the validation period in this study is limited to two test days, the reported values are not claimed to represent all operating periods. Future work will extend the validation period, compare different days and operating periods, evaluate alternative statistical summaries for historical segment profiles, and compare machine-learning-based ETA models with the current production approach.

Keywords: AKUS, estimated arrival time, GIS, intelligent transportation systems, public transport, real-time passenger information.

KAYNAKÇA / REFERENCES

Achar, A., Natarajan, A., Regikumar, R. ve Anil Kumar, B. (2022). Predicting public transit arrival: A nonlinear approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 144, 103875.

Lee, C. ve Yoon, Y. (2022). A novel bus arrival time prediction method based on spatio-temporal flow centrality analysis and deep learning. Electronics, 11(12), 1875.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. ve Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Science and Systems. Wiley.

Shen, J., Liu, Q., Zhang, Y. ve Yu, M. (2025). A novel model incorporating deep learning and Kalman filter augmentation for route-level bus arrival time prediction with error accumulation mitigation. Expert Systems with Applications, 281, 127622.

Şahinbaş, K. (2022). Gerçek Hayat Verileriyle Makine Öğrenmesi Algoritmalarına Dayalı Otobüs Durak Süresi Tahmini. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13(3), 421-428.

Taşyürek, M. ve Çelik, M. (2020). Akıllı Durak Sistemindeki Araç Seyahat Sürelerinin Birleşik Yapay Sinir Ağları Kullanarak Tahmini. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 72-79.

Yomralıoğlu, T. (2009). Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar. Akademi Kitabevi.

COĞRAFİ İŞARETLİ TARIM ÜRÜNLERİNİN MEKÂNSAL BOYUTU VE ARAZİ YÖNETİMİNDEKİ YERİ

Nihal GENÇ[1,2], Hüsniye Ebru ÇOLAK[3]

[1]Doktora Öğrencisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080, Trabzon, Türkiye
[2]Arş. Gör., Giresun Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 28200, Giresun, nihal.genc@giresun.edu.tr
[3]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, ecolak@ktu.edu.tr

ÖZET

Coğrafi işaretler, belirli bir ürünün niteliği, ünü veya ayırt edici özellikleri ile belirli bir coğrafi alan arasındaki bağı tanımlayan önemli koruma araçlarıdır (Türk Patent ve Marka Kurumu, 2026; WIPO, 2021). Tarım ürünleri açısından bu bağ, yalnızca ürünün hangi yöreye ait olduğunu gösteren bir işaret olmanın ötesinde, ürünün yetiştiği arazi, doğal çevre koşulları, üretim biçimi, yerel bilgi ve kırsal ekonomik yapı ile doğrudan ilişkilidir (Bérard & Marchenay, 2006; Vandecandelaere vd., 2010). Bu ilişki, coğrafi işaretli tarım ürünlerinin yalnızca tescil, tanıtım veya pazarlama boyutuyla değil, üretildikleri alanın mekânsal özellikleri ve arazi yönetimi süreçleriyle birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, coğrafi işaretli tarım ürünlerinin mekânsal boyutunu arazi yönetimi perspektifinden ele almak ve bu ürünlerin korunmasında üretim alanı, arazi kullanımı, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve kırsal kalkınma ilişkisini ortaya koymaktır. Çalışma, kavramsal bir değerlendirme niteliğinde olup coğrafi işaretli tarım ürünlerinin ürün adı ya da ekonomik değerle sınırlı olmayan, üretim alanı ve arazi kullanımıyla doğrudan bağlantılı bir yapıya sahip olduğu yaklaşımına dayanmaktadır.

Tarımsal ürünlerin karakteri çoğu zaman üretildiği alanın özellikleriyle şekillenmektedir. Toprak yapısı, iklim koşulları, yükselti, eğim, bakı, su kaynakları ve arazi kullanım biçimi ürünün kalitesini, verimini ve ayırt edici niteliğini etkileyen temel unsurlar arasındadır (Genc & Colak, 2026). Coğrafi işaretli ürünlerde bu unsurlar daha belirgin hale gelmekte; ürünün özgün değeri, belirli bir coğrafi çevrede oluşan doğal ve beşerî koşullardan beslenmektedir (Vandecandelaere vd., 2010; WIPO, 2021). Bu nedenle coğrafi işaretli tarım ürünlerinin korunması, yalnızca ürün adının korunması olarak görülmemeli; ürünü ortaya çıkaran arazi yapısı, üretim alanı ve çevresel koşullar da koruma anlayışının temel bileşenleri arasında değerlendirilmelidir. Arazi yönetimi bu noktada merkezi bir öneme sahiptir. Arazi yönetimi; arazinin kullanımı, korunması, planlanması, değerinin belirlenmesi ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesini kapsayan bütüncül bir yaklaşımdır (FAO, 1993; Williamson vd., 2010). Coğrafi işaretli tarım ürünlerinin üretildiği alanlar hem tarımsal üretim hem kırsal kalkınma hem de yerel ekonomi açısından özel nitelik taşıyan alanlardır. Bu alanlarda üretimin devamlılığı; tarım arazilerinin korunmasına, amaç dışı kullanımların önlenmesine, üretim alanlarının doğru tanımlanmasına ve arazi kullanım kararlarının ürünün sürdürülebilirliğini destekleyecek biçimde yönlendirilmesine bağlıdır. Günümüzde tarım arazileri plansız kentleşme, sanayi ve turizm yatırımları, altyapı projeleri, arazi parçalanması, su kaynaklarının azalması, çevresel bozulma ve iklim değişikliği gibi çeşitli baskılarla karşı karşıyadır (Genc & Colak, 2026; Genc, Colak, & Baser, 2025). Bu baskılar, belirli bir coğrafi alana bağlı olarak üretilen tarım ürünleri için daha hassas sonuçlar doğurmaktadır. Coğrafi işaretli ürünlerde üretim alanının daralması, parçalanması veya çevresel niteliğini kaybetmesi yalnızca üretim miktarını değil, ürünün kimliğini, özgünlüğünü ve ekonomik değerini de etkileyebilmektedir (FAO, 2021; Vandecandelaere vd., 2010). Bu nedenle coğrafi işaret sistemi ile arazi yönetimi politikaları arasında daha güçlü bir ilişki kurulması gerekmektedir. Coğrafi işaretli tarım ürünlerinin üretim alanları yalnızca idari sınırlar üzerinden değil, arazi özellikleri ve üretim koşulları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Üretim alanlarının açık biçimde tanımlanması, hangi alanların ürünün özgün niteliğini taşıdığına ilişkin daha sağlıklı kararlar alınmasını sağlar. Bu yaklaşım, denetim süreçlerini güçlendirdiği gibi ürünün mekânsal temelini de görünür hale getirir. Bu noktada Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), üretim alanlarının haritalanması, arazi kullanım durumunun analiz edilmesi, zamansal değişimlerin izlenmesi ve risk altında bulunan bölgelerin belirlenmesi açısından önemli bir araçtır. Toprak, eğim, yükselti, iklim, su kaynakları, parsel yapısı ve mevcut arazi kullanımı gibi verilerin birlikte değerlendirilmesi, coğrafi işaretli ürünlerin mekânsal sürdürülebilirliği için daha güçlü bir karar zemini oluşturabilir (Kurowska vd., 2020; Williamson vd., 2010). Öte yandan, kırsal kalkınma açısından coğrafi işaretli tarım ürünleri, yerel üretimi destekleyen ve kırsal ekonomiye katkı sağlayan önemli araçlardır. Bu ürünler, üreticilere pazar avantajı sağlayabilir, yöresel üretim bilgisini görünür kılabilir ve yerel kimliğin güçlenmesine katkı sunabilir (Belletti vd., 2017). Ancak bu katkının kalıcı olabilmesi, üretim alanlarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesine bağlıdır. Bu nedenle coğrafi işaretli ürünlere yönelik politikalar yalnızca tanıtım, markalaşma ve pazarlama faaliyetleriyle sınırlı kalmamalı; arazi kullanım planlaması, üretim alanlarının korunması, üretici yapısının güçlendirilmesi ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımıyla birlikte ele alınmalıdır.

Bu çalışma, coğrafi işaretli tarım ürünlerinin korunmasını yalnızca ürün adının tescili, tanıtımı veya ekonomik değeriyle sınırlı bir süreç olarak değil, üretim alanı ve arazi kullanım kararlarıyla ilişkili bir arazi yönetimi konusu olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada öncelikle coğrafi işaretli tarım ürünlerinde ürün niteliği ile coğrafi çevre arasındaki ilişki ele alınmakta; ardından üretim alanı, toprak özellikleri, iklim koşulları, su kaynakları, arazi kullanımı ve yerel üretim bilgisinin ürünün özgünlüğü üzerindeki rolü değerlendirilmektedir. Daha sonra kentleşme, amaç dışı arazi kullanımı, arazi parçalanması, çevresel bozulma ve iklim değişikliği gibi baskıların coğrafi işaretli tarım ürünlerinin üretim alanları üzerinde oluşturabileceği riskler tartışılmaktadır. Bu kapsamda CBS ve arazi yönetimi araçlarının üretim alanlarının tanımlanması, haritalanması, arazi kullanım değişimlerinin izlenmesi ve denetim süreçlerinin desteklenmesi açısından sağlayabileceği katkılar ortaya konulmaktadır. Bu yönüyle çalışma, coğrafi işaretli tarım ürünlerinin sürdürülebilirliğini ürün adı ve pazar değeri yanında, ürün-mekân-arazi ilişkisi üzerinden ele alan mekânsal temelli bir arazi yönetimi değerlendirmesi sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: arazi yönetimi, CBS, coğrafi işaret, mekânsal boyut, kırsal kalkınma

THE SPATIAL DIMENSION OF GEOGRAPHICALLY INDICATED AGRICULTURAL PRODUCTS AND THEIR PLACE IN LAND MANAGEMENT

ABSTRACT

Geographical indications are important protection tools that define the link between the quality, reputation, or distinctive characteristics of a particular product and a specific geographical area (Turkish Patent and Trademark Office, 2026; WIPO, 2021). In terms of agricultural products, this link goes beyond being merely an indication showing the region to which the product belongs and is directly related to the land where the product is grown, natural environmental conditions, the mode of production, local knowledge, and the rural economic structure (Bérard & Marchenay, 2006; Vandecandelaere et al., 2010). This relationship makes it necessary to evaluate agricultural products with geographical indications not only in terms of registration, promotion, or marketing, but also together with the spatial characteristics of the area where they are produced and land management processes. The aim of this study is to address the spatial dimension of agricultural products with geographical indications from a land management perspective and to reveal the relationship among production area, land use, Geographic Information Systems (GIS), and rural development in the protection of these products. The study is a conceptual evaluation and is based on the approach that agricultural products with geographical indications have a structure that is not limited to product name or economic value, but is directly connected with production area and land use.

The character of agricultural products is often shaped by the characteristics of the area where they are produced. Soil structure, climatic conditions, elevation, slope, aspect, water resources, and land use type are among the main elements that affect the quality, yield, and distinctive character of the product (Genc & Colak, 2026). In products with geographical indications, these elements become more evident; the unique value of the product draws on the natural and human conditions formed in a specific geographical environment (Vandecandelaere et al., 2010; WIPO, 2021). Therefore, the protection of agricultural products with geographical indications should not be seen only as the protection of the product name; the land structure, production area, and environmental conditions that give rise to the product should also be considered among the main components of the protection approach. Land management has central importance at this point. Land management is a holistic approach that covers the use, protection, planning, valuation, and sustainable management of land (FAO, 1993; Williamson et al., 2010). The areas where agricultural products with geographical indications are produced are areas with special characteristics in terms of agricultural production, rural development, and the local economy. The continuity of production in these areas depends on the protection of agricultural lands, the prevention of uses for purposes other than intended, the accurate definition of production areas, and the guidance of land use decisions in a way that supports the sustainability of the product. Today, agricultural lands face various pressures such as unplanned urbanization, industrial and tourism investments, infrastructure projects, land fragmentation, the decline of water resources, environmental degradation, and climate change (Genc & Colak, 2026; Genc, Colak, & Baser, 2025). These pressures lead to more critical consequences for agricultural products produced in relation to a specific geographical area. In products with geographical indications, the shrinking, fragmentation, or loss of environmental quality of the production area can affect not only the production quantity but also the identity, authenticity, and economic value of the product (FAO, 2021; Vandecandelaere et al., 2010). Therefore, a stronger relationship should be established between the geographical indication system and land management policies. The production areas of agricultural products with geographical indications should be evaluated not only through administrative boundaries but also by taking land characteristics and production conditions into account. Clearly defining production areas enables sounder decisions to be made regarding which areas carry the distinctive character of the product. This approach strengthens inspection processes and also makes the spatial basis of the product visible. At this point, Geographic Information Systems (GIS) are an important tool for mapping production areas, analyzing land use status, monitoring temporal changes, and identifying areas at risk. The integrated evaluation of data such as soil, slope, elevation, climate, water resources, parcel structure, and current land use can create a stronger decision-making basis for the spatial sustainability of products with geographical indications (Kurowska et al., 2020; Williamson et al., 2010). On the other hand, in terms of rural development, agricultural products with geographical indications are important tools that support local production and contribute to the rural economy. These products can provide market advantages to producers, make local production knowledge visible, and contribute to the strengthening of local identity (Belletti et al., 2017). However, the permanence of this contribution depends on the sustainable management of production areas. Therefore, policies for products with geographical indications should not remain limited to promotion, branding, and marketing activities; they should be addressed together with land use planning, the protection of production areas, the strengthening of the producer structure, and the sustainable use of natural resources.

This study aims to evaluate the protection of agricultural products with geographical indications not only as a process limited to the registration, promotion, or economic value of the product name, but also as a land management issue related to production area and land use decisions. In line with this aim, the study first addresses the relationship between product quality and the geographical environment in agricultural products with geographical indications; then evaluates the role of production area, soil characteristics, climatic conditions, water resources, land use, and local production knowledge in the authenticity of the product. Subsequently, the risks that pressures such as urbanization, use of land for purposes other than intended, land fragmentation, environmental degradation, and climate change may create on the production areas of agricultural products with geographical indications are discussed. In this context, the contributions that GIS and land management tools can provide in terms of defining production areas, mapping them, monitoring land use changes, and supporting inspection processes are presented. In this respect, the study presents a spatially based land management evaluation that addresses the sustainability of agricultural products with geographical indications through the product–space–land relationship, in addition to product name and market value.

Keywords: geographical indication, GIS, land management, rural development spatial dimension

KAYNAKÇA

Belletti, G., Marescotti, A., & Touzard, J. M. (2017). Geographical indications, public goods, and sustainable development: The roles of actors' strategies and public policies. World Development, 98, 45–57. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.05.004

Bérard, L., & Marchenay, P. (2006). Local products and geographical indications: Taking account of local knowledge and biodiversity. International Social Science Journal, 58(187), 109–116. https://doi.org/10.1111/j.1468-2451.2006.00592.x

FAO. (1993). Guidelines for land-use planning. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/t0715e/t0715e00.htm

FAO. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point. Synthesis report 2021. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cb7654en

Genc, N., H. E. Colak, and V. Baser. 2025. Towards Sustainable Futures: An Interdisciplinary Bridge—A Bibliometric Review on Climate Change, Agriculture, Land Management, and GIS. Sustainable Development 33 (4), 5848–5873. https://doi.org/10.1002/sd.3439.

Genc, N., & Colak, H.E. (2026). Impacts of Climate Change on Food Security: Land Management–Based Strategies Within a Nature-Based Solutions Framework. Land Degradation & Development 1–35. https://doi.org/10.1002/ldr.70603.

Kurowska, K., Marks-Bielska, R., Bielski, S., Aleknavičius, A., & Kowalczyk, C. (2021). Geographic Information Systems and the sustainable development of rural areas. Land, 10(1), 6. https://doi.org/10.3390/land10010006

Türk Patent ve Marka Kurumu. (2026). Coğrafi işaret ve geleneksel ürün adı. Erişim tarihi: 18 Haziran 2026, https://www.turkpatent.gov.tr/cografi-isaret

Vandecandelaere, E., Arfini, F., Belletti, G., & Marescotti, A. (2010). Linking people, places and products: A guide for promoting quality linked to geographical origin and sustainable geographical indications (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations & SINER-GI. https://www.fao.org/4/i1760e/i1760e.pdf

Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. (2010). *Land Administration for Sustainable Development*. ESRI Press. http://esripress.esri.com/display/index.cfm?fuseaction=display&websiteID=165&moduleID=0

WIPO. (2021). Geographical indications: An introduction (2nd ed.). World Intellectual Property Organization. https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4562

BARAJ DEFORMASYONLARININ SENTINEL-1 INSAR ZAMAN SERILERI ILE TAHMINI: LSTM, XGBOOST VE ARIMA YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALIZI

Çağlar BAYIK[1], Ömer Gökberk NARİN[2], Suat COŞKUN[3], Eren Gürsoy ÖZDEMİR[4], Saygın ABDİKAN[5], Füsun BALIK ŞANLI[6]

[1]Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez, Zonguldak, S
[2]Doç. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez, Afyonkarahisar, gokberknarin@aku.edu.tr
[3]Müh., Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Merkez, Bilecik, suatcoskun@hotmail.com
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Bartın Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 74410, Ulus, Bartın, eozdemir@bartin.edu.tr
[5]Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, sayginabdikan@hacettepe.edu.tr
[6]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, fbalik@yildiz.edu.tr

ÖZET

Giriş: *Barajlar, çeşitli amaçlarla kullanılan yapılar arasında yer alır. Barajların izlenmesi, rezervuar yönetimi, yapının sağlamlığı ve güvenliğinin sağlanması, su kullanımının optimize edilmesi, temiz enerji üretiminin teşvik edilmesi önem taşır. Aktif uzaktan algılama teknolojisi Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), rezervuar ve barajların izlenmesi için kullanılmaktadır. Öte yandan, Interferometrik SAR (InSAR) sonuçları, GNSS gibi ölçümlere kıyasla çok daha fazla nokta üretebilir ve yapı yüzeyini kapsayabilir. Böylece, yerinde ölçümler yapılmasına gerek kalmadan yüzey hareketine ilişkin bilgiler elde edilebilir (Maltese vd., 2021). Baraj yönetiminde olası riskleri azaltmak amacıyla, zaman serisi verilerinin tahmin edilmesi önemli rol oynamaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, InSAR zaman serileri için tahmin modellerinin potansiyelini araştırmıştır. Arşivlenmiş verilerdeki zamansal bağımlılıklardan yararlanan Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory – LSTM) kullanılarak doğru tahmin sonuçları elde edilmiştir. Bu konuda oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır, havaalanları (Chen vd., 2021), arazi çökmesi (Radman vd., 2021), kentsel heyelan ve çökme (Abdikan vd., 2023) ve baraj (Abdikan vd., 2025) gibi uygulamalar da dahil olmak üzere, çeşitli yüzeylerdeki yüzey hareketlerinin LSTM yaklaşımı kullanılarak tahminini ele almıştır. Literatürde, LSTM ile Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average – ARIMA) (Yagmur ve Musaoglu, 2023) ve Aşırı Gradyan Artırma (eXtreme Gradient Boosting – XGBoost) (Radman vd., 2021) gibi metotlar ile de karşılaştırmalı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada Atatürk Barajının uydudan bakış doğrultusu boyunca gerçekleşenyer değişme değerleri Sentinel-1 verisi ile üretilmiş olup zaman serisi kestirimi için LSTM, ARIMA ve XGBoost algoritmalarının performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.*

Materyal ve Metot: *Çalışma alanı olarak Atatürk Barajı seçilmiştir. Türkiye'nin doğusunda Fırat Nehri üzerine kurulmuş olan Atatürk Barajı, sadece Türkiye'nin en büyük barajı olmakla kalmayıp, aynı zamanda dünyanın en büyük beşinci barajıdır. Öncelikle hidroelektrik enerji üretimi amacıyla inşa edilen baraj, 1992 yılından beri faaliyettedir ve sulama amacıyla da kullanılmaktadır. Uydu görüntü olarak Sentinel-1 kullanılmıştır. Bu çalışmada Sentinel-1'den üretilen bilgiler (Abdikan vd., 2025) çalışmasından alınmıştır. Üç farklı test alanında sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önceki çalışmaya ek olarak XGBoost ve ARIMA algoritmaları eklenmiştir. Çalışmada zaman serisi kestirimi için kullanılan algoritmalar R programlama dili kullanılarak yapılmıştır. ARIMA, Box–Jenkins yaklaşımı kapsamında auto.arima() fonksiyonu kullanılarak AICc ölçütüne göre otomatik model seçimi gerçekleştirilmiş, stepwise=FALSE ve approximation=FALSE seçenekleri ile tam arama uygulanmıştır. Mevsimsel yapı tespit edildiğinde model otomatik olarak SARIMA biçiminde oluşturulmuştur. LSTM, Dört katmanlı (128–64–32 –16 birim) ve %30 dropout içeren LSTM mimarisi, Adam optimize edicisi (öğrenme oranı=0.001), 500 maksimum epoch, batch boyutu 32 ve erken durdurma (patience=25) ile eğitilmiştir. Girdi olarak 10 gecikmeli değer kullanılmış ve tahminler gerçek gözlemlerin geri beslendiği doğrudan çok adımlı (direct multi-step) strateji ile üretilmiştir. XGBoost, Model, 10 gecikmeli değer, hareketli ortalama ve standart sapma istatistikleri ile takvim ve trend değişkenlerinden oluşturulan özellik matrisi üzerinde η=0.03, max_depth=6 ve 1000 ağaç kullanılarak eğitilmiştir. Tahmin aşamasında gerçek gözlemlerin geri beslendiği doğrudan çok adımlı (direct multi-step) strateji uygulanmıştır. Tüm modeller, verinin %80'i eğitim (11.06.2017 – 13.08.2021) ve %20'si test (25.08.2021 – 20.08.2022) amacıyla kullanılacak şekilde değerlendirilmiş; performans karşılaştırmaları Karesel Ortalama Hata (KOH), metrikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.*

Bulgular: *Elde edilen sonuçlar, LSTM modelinin Test Alanı-1 ve Test Alanı-2'de en düşük hata değerlerini (sırasıyla 1.03 mm/yıl ve 1.22 mm/yıl KOH) elde ederek en başarılı performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Test Alanı-3'te ise en iyi sonuç 1.24 mm/yıl KOH ile XGBoost modeli tarafından elde edilirken, LSTM ve ARIMA modelleri sırasıyla 2.15 mm/yıl ve 2.92 mm/yıl KOH değerlerine ulaşmıştır (Çizelge 1). ARIMA modeli tüm test alanlarında diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek hata değerleri üretmiş, özellikle Test Alanı-3'te performansının belirgin şekilde düştüğü gözlenmiştir (Şekil 1). Bu sonuçlar, makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin genel olarak klasik ARIMA modeline göre daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığını göstermektedir.*

Sonuç: *Çalışma sonuçları, Sentinel-1 tabanlı InSAR zaman serilerinin tahmininde makine öğrenmesi yaklaşımlarının klasik yöntemlere göre daha üstün performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle LSTM modeli, Test Alanı-1 ve Test Alanı-2'de en düşük hata değerlerini elde ederek zamansal bağımlılıkları yakalamada en başarılı yöntem olmuştur. Test Alanı-3'te ise XGBoost modeli daha iyi performans göstermiş, bu durum model başarısının veri yapısına ve bölgesel özelliklere bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymuştur.*

Anahtar Sözcükler: Baraj izleme, interferometrik sentetik açıklıklı radar, Sentinel-1, LSTM

ABSTRACT

TIME SERIES FORECASTING OF DAM DEFORMATION USING SENTİNEL-1 INSAR DATA: A COMPARISON OF LSTM, XGBOOST, AND ARIMA

Introduction: *Dams are among the structures used for various purposes. Monitoring dams is important for reservoir management, ensuring the structural integrity and safety of the dam, optimizing water use, and promoting clean energy production. Synthetic Aperture Radar (SAR), an active remote sensing technology, is used to monitor reservoirs and dams. On the other hand, Interferometric SAR (InSAR) results can generate significantly more data points and cover the structure's surface more comprehensively compared to measurements such as GNSS. Thus, information on surface movement can be obtained without the need for on-site measurements (Maltese et al., 2021). Predicting time-series data plays a crucial role in mitigating potential risks in dam management. Recent studies have explored the potential of forecasting models for InSAR time series. Accurate forecast results have been obtained using Long Short-Term Memory (LSTM), which leverages temporal dependencies in archived data. There are a very limited number of studies on this topic, including those on airports (Chen et al., 2021), land subsidence (Radman et al., 2021), urban landslides and subsidence (Abdikan et al., 2023), and dams (Abdikan et al., 2025). In the literature, LSTM combined with the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) (Yagmur and Musaoglu, 2023) and eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) (Radman et al., 2021). In this study, line of sight (LOS) displacement data for the Atatürk Dam were generated using Sentinel-1 data, and the performance of the LSTM, ARIMA, and XGBoost algorithms for time series forecasting was analyzed comparatively.*

Materials and Methods: *The Atatürk Dam was selected as the study area. Located on the Euphrates River in eastern Turkey, the Atatürk Dam is not only Turkey's largest dam but also the fifth-largest dam in the world. Originally constructed for hydroelectric power generation, the dam has been in operation since 1992 and is also used for irrigation. Sentinel-1 satellite imagery was used. The data used in this study were derived from a previous study (Abdikan et al., 2025) based on Sentinel-1 data. Results were compared across three different test areas. In addition to the methods used in the previous study, this study incorporated the XGBoost and ARIMA algorithms. The algorithms used for time series forecasting in this study were implemented using the R programming language. For ARIMA, automatic model selection was performed using the auto.arima() function within the Box–Jenkins framework based on the AICc criterion, and a full search was conducted with the stepwise=FALSE and approximation=FALSE options. When a seasonal structure was detected, the model was automatically constructed in SARIMA form. LSTM: A four-layer LSTM architecture (128–64–32–16 units) with 30% dropout was trained using the Adam optimizer (learning rate = 0.001), with a maximum of 500 epochs, a batch size of 32, and early stopping (patience = 25). Ten lagged values were used as input, and predictions were generated using a direct multi-step strategy in which actual observations were fed back into the model. XGBoost was trained on a feature matrix composed of calendar and trend variables, along with 10 lagged values, moving average, and standard deviation statistics, using η=0.03, max_depth=6, and 1,000 trees. During the prediction phase, a direct multi-step strategy was applied, with actual observations fed back into the model. All models were evaluated using 80% of the data for training (11.06.2017 – 13.08.2021) and 20% for testing (25.08.2021 – 20.08.2022); performance comparisons were conducted using the Root Mean Squared Error (RMSE) metric.*

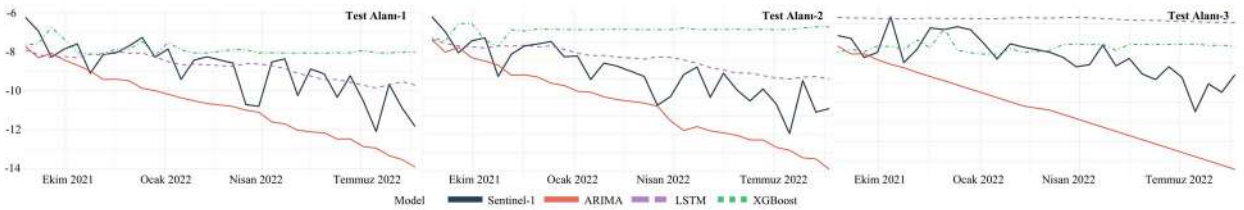
Results: *The findings show that the LSTM model demonstrated the best performance, achieving the lowest error values (1.03 mm/year and 1.22 mm/year RMSE, respectively) in Test Area-1 and Test Area-2. In Test Area-3, however, the best result—1.24 mm/year RMSE—was achieved by the XGBoost model, while the LSTM and ARIMA models reached error values of 2.15 mm/year and 2.92 mm/year RMSE, respectively (Table 1). The ARIMA model produced higher error values compared to other methods in all test areas, and its performance was observed to decline significantly, particularly in Test Area-3 (Figure 1). These results indicate that machine learning-based methods generally provide higher prediction accuracy than the classical ARIMA model.*

Conclusion: *The results of this study show that machine learning approaches demonstrate superior performance compared to classical methods in the estimation of Sentinel-1-based InSAR time series. In particular, the LSTM model achieved the lowest error values in Test Area-1 and Test Area-2, making it the most successful method in capturing temporal dependencies. In Test Area-3, however, the XGBoost model performed better, indicating that model performance may vary depending on the data structure and regional characteristics.*

Keywords: Dam monitoring, Interferometric Synthetic Aperture Radar, Sentinel-1, LSTM

Çizelge 1. Zaman serisi kestirimi sonuçları. Sonuçlar KOH'a göredir birimleri mm/yıl'dır.

	Test Alanı-1	Test Alanı-2	Test Alanı-3
ARIMA	2.11	2.07	2.92
XGBoost	1.70	2.77	1.24
LSTM	1.03	1.22	2.15



Şekil 1. Zaman serisi kestirimi sonuçları.

KAYNAKLAR

Abdikan, S., Coskun, S., Narin, O. G., Ozdemir, E. G., Bayik, C., & Sanli, F. B. (2025). Deep-learning-based interferometric synthetic aperture radar time-series analysis for the monitoring and prediction of dam safety. Structural Health Monitoring, 14759217251381157.

Abdikan, S., Coskun, S., Narin, O. G., Bayik, C., Calò, F., Pepe, A., & Balik Sanli, F. (2023). Prediction of long-term sentinel-1 InSAR time series analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 3-8.

Chen, Y., He, Y., Zhang, L., Chen, Y., Pu, H., Chen, B., & Gao, L. (2021). Prediction of InSAR deformation time-series using a long short-term memory neural network. International journal of remote sensing, 42(18), 6919-6942.

Maltese, A., Pipitone, C., Dardanelli, G., Capodici, F., & Muller, J. P. (2021). Toward a comprehensive dam monitoring: On-site and remote-retrieved forcing factors and resulting displacements (GNSS and PS–InSAR). Remote Sensing, 13(8), 1543.

Mura, J. C., Gama, F. F., Paradella, W. R., Negrão, P., Carneiro, S., De Oliveira, C. G., & Brandão, W. S. 2018. Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of Fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X data. Remote Sensing, 10(10), 1507.

Paliari, I., Karanikola, A., & Kotsiantis, S. (2021, July). A comparison of the optimized LSTM, XGBOOST and ARIMA in Time Series forecasting. In 2021 12th international conference on information, intelligence, systems & applications (IISA) (pp. 1-7). IEEE.

Radman, A., Akhoondzadeh, M., & Hosseiny, B. (2021). Integrating InSAR and deep-learning for modeling and predicting subsidence over the adjacent area of Lake Urmia, Iran. GIScience & Remote Sensing, 58(8), 1413-1433.

Yagmur, N., & Musaoglu, N. (2023, October). The comparison of ARIMA and LSTM in forecasting of long-term surface movements derived from PSINSAR. In Earth Observing Systems XXVIII (Vol. 12685, pp. 227-233). SPIE.

DOĞU ANADOLU FAY ZONU VE CİVARINDAKİ SİSMİK AKTİVİTELERİN YERELEKTRİK DEĞİŞİMLERE ETKİLERİNİN DERİN ÖĞRENME TABANLI ANALİZİ: DEPREM ERKEN UYARI SİSTEMİ ÖN ÇALIŞMASI

Mustafa ULUKAVAK[1]

[1]Doç. Dr., Harran Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63300, Haliliye, Şanlıurfa, mulukavak@harran.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde meydana gelen depremlerin, yerelektrik potansiyel değişimleri ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak önceden tespiti amacıyla geliştirilen spesifik bir derin öğrenme modeline odaklanmaktadır. Yerkabuğundaki sismik aktivite öncesi gerilim birikiminin fiziksel bir dışavurumu olan yerelektrik öncül sinyallerin tespiti, yerkabuğunda meydana gelen mekanik gerilim değişimlerinin piezoelektrik etkiler oluşturması prensibine dayanır (Varotsos ve Alexopoulos, 1984; Freund, 2000). Zaman serilerindeki hem geçmiş hem de gelecekteki zamansal bağımlılıkları eşzamanlı olarak modelleyebilen Çift Yönlü Uzun-Kısa Süreli Bellek (Bi-LSTM) ağ mimarisi bu amaçla kullanılmıştır (Chung vd., 2014; Gers vd., 2000). Modelin girdisini, sismik olmayan gürültülerden Hampel filtresi (3σ eşik değeri) ile arındırılmış ham voltaj verileri, hareketli standart sapmalar ve Z-skor normalizasyonuna tabi tutulmuş 14 farklı öznitelikten oluşan bir matris (14xN boyutlu) oluşturmaktadır.

Söz konusu derin öğrenme modelinin mimarisi, yüksek boyutlu veriyi çift yönlü işleyen 128 birimlik Bi-LSTM katmanını merkezine almaktadır. Ağın sadece gürültülü frekanslara veya tesadüfi verilere odaklanmasını ve zaman serilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları modellerken aşırı öğrenmeyi engellemek için %30 ve %15'lik seyreltme katmanları uygulanmıştır (Yoshua vd., 2019). İlk katmandan gelen rafine edilmiş öznitelikler, 64 birimlik tek yönlü klasik LSTM katmanından geçirilerek tüm zaman serisi dizisini özetleyen özellik vektörlerine dönüştürülmüştür. Karar aşamasında ise tam bağlı katman ve Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılarak, elde edilen sinyaller "Anomali" ve "Anomali Yok" şeklinde sınıflandırılmıştır. Modelin eğitimi, Uyarlanabilir Anlık Tahmin (ADAM) algoritması ile 3600 saniyelik zaman pencereleri kaydırılarak yapılmıştır.

DAFZ üzerinde meydana gelen yerel magnitüdü $M_L \geq 4,0$ büyüklüğündeki sismik olaylar üzerinde eğitilen model, maksimum genlikli yerelektrik anomalilerini %94,42 ile %96,60 arasında değişen genel bir doğrulama başarısı ile tespit etmiştir. Geliştirilen bu derin öğrenme modelinin en güçlü yanlarından biri, yalancı alarm oranını operasyonel seviyede minimize eden yüksek özgüllük (%99) kapasitesidir. Bu oran, sistemin şimşek/yıldırım veya Kp indeksi yüksek ($Kp \geq 4$) güneş patlamaları gibi atmosferik ve jeomanyetik gürültüleri eleyebildiğini ve anomali tespiti konusunda başarı göstergesidir (Tzanis ve Vallianatos, 2001; Ulukavak ve İnanç, 2025).

Modelin zamansal tahmin performansı, sismik anomalileri depremden yaklaşık 4,5 ila 14,5 saat önce istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yakalayabildiğini göstermektedir (Lazaridou-Varotsos, 2013). Çalışma kapsamında 27 aylık kesintisiz veri seti kullanılmış olup, $M_L \geq 4,0$ büyüklüğündeki 97 sismik olay analiz edilmiştir. Veri sızıntısını (data leakage) önlemek ve sınıf dengesizliğinin model performansı üzerindeki etkisini doğru değerlendirebilmek amacıyla eğitim, doğrulama ve test veri setleri zamansal olarak birbirinden ayrılmıştır. Modelin test ve sınıflandırma başarımları, sismik ve çevresel gürültü karakteristiği açısından 5 farklı dönemi (Nisan 2024, Kasım 2024, Mayıs 2025, Ekim 2025 ve Ocak 2026) temsil eden bağımsız test veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Model 3600 saniyelik zaman pencereleriyle değerlendirildiğinde, veri seti toplam 1.288 adet anomali ve 22.450 adet anomali olmayan (normal) örneklemden oluşmaktadır. Veri setindeki bu sınıf dengesizliği, modelin ağırlıklı olarak normal durumları öğrenmesine yol açarak genel doğruluk oranının %94,42 ve özgüllük değerinin %99,48 gibi yüksek seviyelerde çıkmasına neden olmaktadır. Ancak sistemin yalancı alarm üretmeme stratejisi gereği bu yüksek özgüllük değeri kritik ve bilinçli bir tercihtir. Sınıf dengesizliğinin yanıltıcı etkisini gidermek ve azınlık sınıfı olan anomalilerin tespit başarısını daha şeffaf değerlendirmek için hesaplanan genel F1-Skoru ise %21,81 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, DAFZ özelinde doğrudan yerelektrik sinyallerle eğitilen bu Bi-LSTM tabanlı yapay zekâ mimarisi, yenilikçi bir deprem erken uyarı sisteminin ön çalışması olarak önerilmektedir. Kullanılan veriler, 122Y365 numaralı TÜBİTAK projesine aittir.

Anahtar Sözcükler: bi-lstm, deprem erken uyarı, derin öğrenme, doğu anadolu fay zonu, sismik elektrik sinyalleri.

ABSTRACT

DEEP LEARNING-BASED ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SEISMIC ACTIVITIES IN AND AROUND THE EAST ANATOLIAN FAULT ZONE ON GEOELECTRIC VARIATIONS: A PRELIMINARY STUDY FOR AN EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEM

This study focuses on a specific deep learning model developed for the early detection of earthquakes occurring on the East Anatolian Fault Zone (EAFZ) using geoelectric potential changes and deep learning algorithms. The detection of geoelectric

precursor signals, which are a physical manifestation of stress accumulation in the earth's crust prior to seismic activity, is based on the principle that mechanical stress changes in the earth's crust generate piezoelectric effects (Varotsos and Alexopoulos, 1984; Freund, 2000). The Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) network architecture, capable of simultaneously modeling both past and future temporal dependencies in time series, was employed for this purpose (Chung et al., 2014; Gers et al., 2000). The input of the model consists of a matrix (14xN dimensional) comprising 14 different features subjected to moving standard deviations and Z-score normalization, derived from raw voltage data that was purified from non-seismic noise using a Hampel filter (3σ threshold).

The architecture of this deep learning model centers on a 128-unit Bi-LSTM layer that processes high-dimensional data bidirectionally. Dropout layers of 30% and 15% were applied to prevent the network from focusing solely on noisy frequencies or random data, and to avoid overfitting while modeling long-term dependencies in the time series (Yoshua et al., 2019). The refined features from the first layer were passed through a 64-unit unidirectional classical LSTM layer, transforming them into feature vectors that summarize the entire time series sequence. In the decision stage, the obtained signals were classified as "Anomaly" and "No Anomaly" using a fully connected layer and a Softmax activation function. The model was trained using the Adaptive Moment Estimation (ADAM) algorithm by sliding 3600-second time windows.

The model, trained on seismic events with a local magnitude of $M_L \geq 4.0$ occurring on the EAFZ, detected maximum amplitude geoelectric anomalies with an overall validation accuracy ranging from 94.42% to 96.60%. One of the strongest aspects of this developed deep learning model is its high specificity capacity (99%), which minimizes the false alarm rate at an operational level. This rate demonstrates the system's ability to filter out atmospheric and geomagnetic noises, such as lightning strikes or solar flares with a high Kp index ($Kp \geq 4$) and is an indicator of its success in anomaly detection (Tzanis and Vallianatos, 2001; Ulukavak and İnanç, 2025).

The temporal prediction performance of the model shows that it can capture seismic anomalies in a statistically significant manner approximately 4.5 to 14.5 hours before an earthquake (Lazaridou-Varotsos, 2013). The study utilized a continuous 27-month dataset, analyzing 97 seismic events with a magnitude of $M_L \geq 4.0$. To prevent data leakage and properly evaluate the impact of class imbalance on model performance, the training, validation, and test datasets were chronologically separated. The testing and classification evaluations of the model were performed on independent test datasets representing 5 different periods (April 2024, November 2024, May 2025, October 2025, and January 2026) based on seismic and environmental noise variations. Evaluated using 3600-second time windows, the dataset consists of a total of 1,288 anomaly and 22,450 non-anomaly (normal) samples. This class imbalance causes the model to predominantly learn normal conditions, resulting in high overall accuracy (94.42%) and specificity (99.48%) values. However, due to the system's strategy of not generating false alarms, this high specificity is a critical and conscious preference. To mitigate the misleading effect of class imbalance and to more transparently evaluate the detection success of the minority anomaly class, the overall F1-Score was calculated as 21.81%. Consequently, this Bi-LSTM-based artificial intelligence architecture, trained directly with geoelectric signals specifically for the EAFZ, is proposed as a preliminary study for an innovative earthquake early warning system. The data used belongs to the TÜBİTAK project numbered 122Y365.

Keywords: bi-lstm, deep learning, earthquake early warning, east anatolian fault zone, seismic electric signals.

KAYNAKLAR

Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K. ve Bengio, Y., 2014. Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling. *ArXiv*.

Freund, F., 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B5): 11001-11019.

Gers, F.A., Schmidhuber, J. ve Cummins, F., 2000. Learning to forget: Continual prediction with LSTM. *Neural Computation*, 12(10): 2451-2471.

Hadjioannou, D., Vallianatos, F., Eftaxias, K., Hadjicontis, V. ve Nomikos, K., 1993. Subtraction of the telluric inductive component from van measurements. *Tectonophysics*, 224(1-3): 113-124.

Lazaridou-Varotsos, M.S., 2013. *Earthquake Prediction by Seismic Electric Signals: The Success of the VAN Method Over Thirty Years*. Springer.

Tzanis, A. ve Vallianatos, F., 2001. A critical review of electric earthquake precursors. *Annali Di Geofisica*, 44(2): 429-460.

Ulukavak, M. ve İnanç, S.M., 2025. Spectral analysis of possible SES anomalies observed during aftershocks of the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Tectonophysics*, 903: 230703.

Vargemezis, G., Zlotnicki, J. ve Tsokas, G.N., 2001. Energy and polarization of the telluric field in correlation with seismic activity in Greece. *Annals of Geophysics*, 44(2): 205-220.

Varotsos, P. ve Alexopoulos, K., 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I. *Tectonophysics*, 110(1-2): 73-98.

Yoshua, B., Goodfellow, I.J. ve Aaron, C., 2019. *Deep Learning*. MIT Press.

GNSS VADASE YAKLAŞIMI İLE ELDE EDİLEN 1 HZ YER DEĞİŞTİRMELERİNİN KO-SİSMİK ZAMANDA İVMEÖLÇER VERİLERİYLE SPEKTRAL KARŞILAŞTIRILMASI

Muhammed Ali AYTEMÜR[1], Mualla YALÇINKAYA [2],

[1]Öğr. Gör., Bayburt Üniversitesi, Aydıntepe Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 69000 Aydıntepe, Bayburt, muhammedaliaytemur@bayburt.edu.tr
[2]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, mualla@ktu.edu.tr

ÖZET

Büyük magnitüdlü depremler (Mw≥5.9) geniş alanlarda ürettikleri dinamik ko-sismik deformasyonlar ve yüksek yer ivmeleri nedeniyle ciddi can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelen depremlerin (Mw≥5.9) ko-sismik yer değiştirmeleri, 1 Hz örneklemeye aralığına sahip Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) gözlemleri ve broadcast efemerisler kullanılarak VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yöntemi ile belirlenmiş yüksek hızlı (100/200 Hz) örnekleme frekansına sahip ivmeölçer kayıtlarından elde edilen yer değiştirmelerle karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, deprem merkez üssülerine yakın konumda bulunan Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı (TUSAGA-Aktif) istasyonları ile Avrupa Güçlü Yer Hareketi Veri tabanı (ESM) istasyonları kullanılmıştır. İstasyonlarda kaydedilen sismik sinyaller; deprem büyüklüğü, merkez üssü uzaklığı ve yerel zemin koşulları (V_{S30}) dikkate alınarak dalga formu benzerliği, Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio-SNR) ve Büyüklük Karesi Tutarlılığı (Magnitude-Squared Coherence -MSC) ölçütleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiştir. VADASE yöntemiyle elde edilen yer değiştirmelerin bazı bileşenlerde ivmeölçer kayıtlarıyla benzer frekans içeriği ve zaman-alanı davranışı sergileyerek deprem sinyalini temsil edebildiği görülmüştür. GNSS ve ivmeölçer sinyalleri arasında faz ve yön uyumu gözlemlenmiş olup, VADASE yönteminin deprem büyüklüğüne göre yatay yöndeki ko-sismik yer değiştirmelerin tespitinde güvenilir bir yaklaşım sunduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: GNSS-VA, ivmeölçer, MSC, SNR, yer değiştirme

ABSTRACT

SPECTRAL COMPARISON OF 1 HZ DISPLACEMENTS OBTAINED WITH GNSS VADASE APPROACH WITH ACCELEROMETER DATA IN CO-SEISMIC TIME

Great magnitude earthquakes (Mw≥5.9) can cause significant loss of life and property due to the dynamic co-seismic deformations and high ground accelerations they generate over wide areas. In this study, the co-seismic displacements of earthquakes (Mw≥5.9) occurring in Turkey were determined using the VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) method with 1 Hz Global Navigation Satellite System (GNSS) observations and broadcast ephemerides, and compared with displacements derived from accelerometer recordings with high sampling frequencies of 100/200 Hz. The study utilized stations from the Turkish National Permanent GNSS Network (TUSAGA-Active) and the European Strong Motion Database (ESM) located near the earthquake epicenters. The seismic signals recorded at the stations were quantitatively evaluated using waveform similarity, signal-to-noise ratio (SNR), and magnitude-squared coherence (MSC), considering earthquake magnitude, epicentral distance, and local ground conditions (VS30). It has been observed that the displacements obtained using the VADASE method can represent the earthquake signal by exhibiting similar frequency content and time-domain behavior to accelerometer recordings in some components. Phase and directional agreement was observed between GNSS and accelerometer signals, and it was found that the VADASE method offers a reliable approach for detecting co-seismic displacements in the horizontal direction according to earthquake magnitude.

Keywords: accelerometer, displacement, GNSS VADASE, MSC, SNR,

1. GİRİŞ

Deprem yer hareketlerinin doğru bir şekilde izlenmesi, yalnızca sismik analiz için değil, aynı zamanda yapı mühendisliği, toprak dinamiği ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi için de kritik öneme sahiptir. Bu tür hareketlerin belirlenmesinde, özellikle son yıllarda, uzay tabanlı jeodezik sistemler ön plana çıkmıştır. Depremlerin ko-sismik yer değiştirmeleri yaygın olarak ivmeölçerlerle belirlenir. Bu bağlamda, seçilen depremlerin neden olduğu ko-sismik yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla, GNSS istasyonlarına yakın konumda bulunan ve AFAD-TADAS kapsamında işletilen ivmeölçer istasyonlarında deprem sırasında kaydedilen ivme verileri kullanılmıştır. Bu veriler işlenerek ko-sismik yer değiştirme zaman serileri elde edilmiştir. AFAD-TADAS tarafından kullanılan ivmeölçer sistemleri, üç bileşenli ölçümler yapabilen yüksek hassasiyetli kuvvet dengeli sensörlere dayanmaktadır. Üç bileşenli ölçümler yapabilen Mikro-Elektro-Mekanik Sistem (MEMS) ivmeölçerler hem kullanım kolaylığı hem de cihazlara

doğrudan monte edilebilmeleri nedeniyle günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Elektronik ve mikroelektronik devrelerden oldukça farklı olan MEMS cihazları, elektronik ve mekanik bileşenlerin birleşimidir (Fujita, 1997; Mishra vd., 2019; Peng vd., 2017)

Gerçek zamanlı sismik izlemede kullanılan geleneksel GNSS yöntemlerinden Hassas Nokta Konumlandırma (PPP), uzun yakınsama süresi ve hassas yörünge/saat ürünlerine bağımlılığı nedeniyle; GNSS gerçek zamanlı kinematik (RTK) ise deformasyon bölgesi dışında güvenilir bir referans istasyonu ve kısa baz hattı zorunluluğu sebebiyle kısıtlamalara sahiptir. Bu sınırlamalara yanıt olarak, Roma Sapienza Üniversitesi Jeodezi ve Jeomatik Bölümü, Yer Değiştirme Analizi için Varyometrik Yaklaşım Bağımsız Motorunu (VADASE) geliştirmiştir (VADASE) geliştirmiştir (Colosimo vd., 2011). VADASE yaklaşımı, yayınlanan (broadcast) efemeris verilerini ve taşıyıcı faz gözlemlerini kullanarak, ardışık ölçümler arasındaki faz farklarından GNSS alıcısının anlık hız vektörünü ve alıcı saat hatası değişimini doğrudan kestirebilir; böylece hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymadan çalışabilir. Bu bağlamda yöntem, ardışık faz gözlemleri farkını almadan önce iyonosfer etkisinden arındırılmış doğrusal kombinasyonlu faz gözlemlerini oluşturur (Colosimo vd., 2011; Branzanti vd., 2013). Literatürde VADASE'nin sismik yer değiştirmeleri yakalama yeteneğine odaklanan birçok çalışma bulunmasına karşın, yöntemin ivmeölçer verileriyle karşılaştırmalı performansına yönelik kapsamlı analizler sınırlı düzeydedir (Colosimo vd., 2011; Shu vd., 2018a; Bezcioglu vd., 2021; Colosimo 2012).

Varyometrik yaklaşım (VA) literatüründeki çalışmaların önemli bir bölümü, yöntemin sismolojik uygulamalarından ziyade farklı GNSS uydu sistemleri, gerçek zamanlı yörünge ve saat ürünleri ile IGS hassas ürünlerinin çözüm doğruluğu üzerindeki etkilerine odaklanmıştır (Geng vd., 2016; Tesolin vd., 2019; Zang vd., 2020; Shu vd., 2020). Bunun yanında, yöntemin performansı kontrollü sarsıntı masası deneyleri ve yapısal sağlık izleme uygulamaları kapsamında da değerlendirilmiştir (Bezcioğlu vd., 2022a, 2022b, 2024; Moschas ve Stiros, 2011; Xue vd., 2024).

Gerçek deprem kayıtlarına dayalı çalışmalarda ise VADASE' nın performansı çoğunlukla alıcı doğruluğu, yazılım doğrulaması, iyonosferik TEC değişimleri veya yöntemin farklı uygulamalara uyarlanması çerçevesinde ele alınmıştır (Ashcroft vd., 2016; Benedetti vd., 2016; Branzanti vd., 2017; Fratini vd., 2024). VADASE çözümlerinin ivmeölçer kayıtlarıyla karşılaştırıldığı çalışmalar bulunmakla birlikte, bunların önemli bir bölümü tek deprem, sınırlı sayıda istasyon çifti veya bölgesel veri setleriyle sınırlı kalmıştır (Benedetti vd., 2014, 2017; Geng vd., 2016; Hung vd., 2017; Shu vd., 2018b; Nastase vd., 2020). Ayrıca, mevcut çalışmalar sarsma masalarıyla gerçek depremlerin bölgesel veya tek simüle edilmiş sismik verilerine odaklanmakta ve yöntemin performansı farklı jeodinamik ortamlarda kapsamlı bir şekilde değerlendirilmemiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelen Mw≥5.9 büyüklüğündeki depremler kullanılarak, 1 Hz örnekleme frekansına sahip GNSS verilerinden VA yöntemiyle elde edilen ko-sismik yer değiştirmeler ile 100 Hz ve üzeri örnekleme frekansına sahip ivmeölçer kayıtlarından türetilen yer değiştirme zaman serileri karşılaştırılmaktadır. GNSS ve ivmeölçer kayıtlarının doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla zaman referansları senkronize edilmiş ve farklı örnekleme frekanslarından kaynaklanan uyumsuzluk giderilerek ortak bir zaman ekseni oluşturulmuştur. Yöntemin performansı; sinyal-gürültü oranına (Signal-to-Noise Ratio-SNR) bağlı olarak dalga formu benzerliği, çapraz korelasyon katsayıları ile Büyüklük Karesi Tutarlılığı (Magnitude-Squared Coherence-MSC) değerlendirilmiştir. Bu bağlamda çalışma, tekil bir deprem veya bölgesel bir veri setiyle sınırlı kalmaksızın, farklı sismik senaryolarda VA yönteminin gerçek deprem koşullarındaki spektral performansını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİ VE VERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde meydana gelmiş, moment büyüklükleri 5.9≤Mw≤7.7 arasında değişen altı deprem, VADASE yönteminin spektral alandaki performansını farklı sismotektonik koşullar altında değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Deprem kayıtları ve parametreleri, Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilen Türkiye Deprem Kayıt Sistemi/Türk Deprem Veri Merkezi kapsamında sunulan Türk Deprem İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (AFAD-TADAS) üzerinden elde edilmiştir. Deprem merkez üslerine farklı uzaklıklarda bulunan ve mümkün olduğunca yüksek hızlı GNSS istasyonlarıyla aynı veya yakın konumda olan ivmeölçer istasyonları seçilmiştir. Çalışmada kullanılan olaylar; Kahramanmaraş (Pazarcık, 06/02/2023, Mw=7.7; Elbistan, 06/02/2023, Mw=7.6), Gaziantep (Nurdağı, 06/02/2023, Mw=6.6), İzmir (Seferihisar, 30/10/2020, Mw=6.6), Balıkesir (Sındırgı, 27/10/2025, Mw=6.1) ve Malatya (Kale, 16/10/2024, Mw=5.9) depremleridir. Seçilen bu depremler, doğrultu atımlı ve normal faylanma başta olmak üzere farklı faylanma mekanizmaları ile değişken tektonik levha sınır etkileşimlerini içermeketedir (Çizelge 1, Şekil 1).

Çizelge 1. Deprem bilgileri ve faylanma mekanizması.

Depremler	Tarih	Saat (UTC)	Enlem (°)	Boylam (°)	Mw	Derinlik (km)	Tektonik Plakalar ve Mekanizmalar
Kahramanmaraş, Pazarcık	06/02/2023	01:17:35	37.2186	37.0726	7.7	8.6	**Anadolu ve Arap Levhaları:** Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde sol yanal doğrultu atımlı faylanma.
Kahramanmaraş, Elbistan	06/02/2023	10:24:48	38.0134	37.1833	7.6	7.0	**Anadolu Levhası içi:** Çardak Fayı üzerinde sol yanal doğrultu atımlı faylanma.
Gaziantep, Nurdağı	06/02/2023	01:28:15	37.3054	36.9201	6.6	6.2	**Anadolu, Arap ve Afrika Levhaları:** DAFZ-ÖDFZ kesişiminde doğrultu atımlı faylanma.
İzmir, Seferihisar	30/10/2020	11:51:27	37.9051	26.7559	6.6	14.9	**Ege / Anadolu Mikrolevhası:** Batı Anadolu genişleme rejimi, Sisam Fayı üzerinde baskın normal faylanma
Balıkesir, Sındırgı	27/10/2025	19:48:28	39.19694	28.20056	6.1	6.07	**Anadolu Levhası içi:** Simav-Sındırgı graben sisteminde normal faylanma.
Malatya, Kale	16/10/2024	07:46:32	38.36583	38.80861	5.9	10.48	**Anadolu ve Arap Levhaları**: Doğu Anadolu Fay Zonu sol yanal doğrultu atımlı faylanma.

Çizelge 1'de, seçilen depremlerin konumları, büyüklükleri, derinlikleri ve tektonik ortamları da dahil olmak üzere temel özelliklerini özetlemektedir. Tektonik ortamların çeşitliliği, VADASE yönteminin performansının farklı sismik koşullar altında değerlendirilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Seçilen depremlerin merkez üslerinin konumları ve büyüklükleri.

Her bir deprem için için, sürekli gözlem yapan en yakın GNSS istasyonu ve karşılaştırılabilir bir mesafe aralığındaki karşılık gelen bir ivmeölçer istasyonu belirlemiştir. Yer değiştirme genliklerinin güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamak için GNSS ve ivmeölçer istasyonları birbirine oldukça yakın olan istasyonlar seçilmiştir. Bu istasyonların GNSS verileri TUSAGA-Aktif ağından temin edilirken, ivmeölçer kayıtları AFAD-TADAS (AFAD 2023) ile Avrupa Kuvvetli Yer Hareketi Veritabanı (ESM) üzerinden erişilen Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü ağından elde edilmiştir (Çizelge 2) (KOERI 2023; Luzi vd., 2016).

Çizelge 2. GNSS ve ivmeölçer istasyonları ve bu istasyonların merkez üssü ile olan ilişkileri.

Depremler	GNSS İstasyonu	GNSS-Deprem Merkez Üssü Mesafesi (km)	Deprem Merkez Üssü-GNSS Azimut (°)	VS_{30} (m/s)	İvmeölçer İstasyonu	İvmeölçer-Deprem Merkez Üssü Mesafesi (km)	Deprem Merkez Üssü-İvmeölçer Azimut (°)	VS_{30} (m/s)	GNSS-İvmeölçer Mesafesi (km)
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	302	45	633	6201	298	45	357	4
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	145	182	410	7901	145	182	357	0.03
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	48	118	406	2703	47	126	756	6.4
İzmir, Seferihisar	CESM	60.6	320	384	CESE	62	320	384	1.3
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	43	115	579	4504	43	115	336	0.03
Malatya, Kale	ELAZ	50	51	443	2311	43	44	663	9

Deprem merkez üssünden, GNSS ve ivmeölçer istasyonları arasındaki azimut farkı (ΔBAZ) yalnızca 0°- 8° arasında değişmektedir. Böylece bu düşük açısal sapma, her iki sensörün de odak mekanizması radyasyon paternini ve sismik dalga yayılımını neredeyse aynı yayılma doğrultusu boyunca örneklediğini, dolayısıyla yer değiştirme dalga formlarının yön bağımlı etkilerden arındırılarak doğrudan karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca Çizelge 2'de istasyonların büyük çoğunluğu 336–756 m/s kayma dalgası hızı (VS_{30}) aralığında yer alarak çoğunluğu B sınıfı (veya sıkı/kaya zemin) zemindedir. Bu jeolojik farklılık, dalga biçimlerinde gözlemlenen sinyal gürültüsüne ve yükseltme etkilerine katkıda bulunabilir ve potansiyel olarak varyometrik çözümün olması gerekenden farklı olmasına neden olabilir.

3. YÖNTEM

3.1 GNSS VADASE Yöntemi

GNSS varyometrik yaklaşımı, tam sayı faz belirsizliği çözümüne ihtiyaç duymadan ham taşıyıcı faz ölçümlerini işleyerek alıcının anlık hızlarını kestiren bir algoritmaya dayanır. Yeryüzü sabit koordinat sisteminde (ECEF) GNSS alıcı hızlarını belirleyebilen VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yöntemi, Colosimo vd. (2011) tarafından geliştirilmiş olup hız serilerinin zamana göre integraliyle yer değiştirmeleri türetir. Bu yaklaşımda, ardışık epoklar arasındaki iyonosferden arındırılmış (ionosphere-free) taşıyıcı faz farkları temel gözlem büyüklüğü olarak tanımlanır. Kestirilen hızların zaman boyunca integre edilmesiyle yüksek zamansal çözünürlüklü dinamik yer değiştirme zaman serileri oluşturulur. Ayrıca VADASE, faz belirsizliğinin zaman farkıyla elenmesi, sıfır yakınsama (convergence) süresi, tek alıcıyla bağımsız çalışabilme ve gerçek zamanlı harici hassas yörünge/saat düzeltmelerine bağımlı olmama gibi belirgin operasyonel avantajlar sunar. İntegrasyon aşamasında doğrusal olmayan taban çizgisi kaymalarından (baseline drift) etkilenen klasik ivmeölçerlerin aksine VADASE, taban çizgisi bozulması yaşamadan uzun periyotlu ko-sismik yer değiştirme trendlerini doğrudan belirleyebilir. Bu yüzden harici veri akışı ya da merkezi bir veri işleme altyapısına gereksinim duymadan yerel olarak çalışabilmesi sayesinde VADASE, doğrudan GNSS alıcı yazılımlarına gömülü olarak entegre edilme potansiyeline sahiptir. Bu durum; deprem erken uyarı sistemleri, yerel sismik izleme ağları ve yapı sağlığı izleme uygulamaları için güçlü bir operasyonel çözüm sunmaktadır. VADASE' nin zaman farkı alınmış faz gözlemleri ve kurulan matematiksel modelleme, standart GNSS taşıyıcı faz gözlem denklemine dayanmaktadır.

VADASE yönteminde birinci dereceden iyonosferik gecikme hataları, iyonosfersiz (ionosphere-free) doğrusal kombinasyon uygulanarak elenir. Bu yaklaşım, tek frekanslı ve birleştirilmemiş zaman farkı gözlemlerine kıyasla modellenemeyen zamana bağlı iyonosferik değişimlerin neden olduğu uzun periyotlu (sıfır frekansa yakın) yer değiştirme sapmalarını ortadan kaldırır. Ardışık epoklar arasındaki iyonosfersiz faz gözlem farklarının türetilmesiyle elde edilen bu fonksiyonel model, Colosimo (2012) tarafından varyometrik denklem olarak tanımlanmış olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\alpha\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L1}+\beta\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L2}=e_r^s\bullet\Delta\xi_r+c\,\Delta\delta t_r-c\,\Delta\delta t^s+\left[\Delta\rho_r^s\right]_{\mathrm{OR}}+\left[\Delta\rho_r^s\right]_{EtOl}+\Delta T_r^s+\Delta p_r^s+\Delta m_r^s+ \quad (1)$$

Burada λ taşıyıcı faz dalga boyu; r alıcıyı; s uyduyu; ϕ_r^suydu ile alıcı arasındaki faz ölçümünü; c ışık hızını; cδtr alıcı saat hatasını; cδts uydu saat hatasını; Δp_r^s uydu ve alıcı ile ilgili ek etkilerin toplamını, yani; alıcı ve uydu donanım faz sapmalarını, alıcı ve uydu faz merkezi kaymalarını, taşıyıcı faz kaymasını, ayrıca geometrik mesafe ve uydu saati üzerindeki göreceli etkileri; Δm_r^s çoklu yol hatasını ve $\Delta \varepsilon_r^s$ölçüm gürültüsünü ifade eder. ϕ_r^s, Uydu ile alıcı faz ölçümünü, α ve β katsayıları, iyonosfer-free kombinasyonunda L1 ve L2 taşıyıcı faz gözlemlerine uygulanan ağırlık katsayılarını ifade eder. Δ, ardışık ölçüm dönemleri arasındaki gözlem ve model parametrelerinin değişimini ifade eden fark operatörüdür. Katsayılar, yani $\alpha = f_{L1}^2 / \left(f_{L1}^2 - f_{L2}^2\right)$ve $\beta = -f_{L2}^2 / \left(f_{L1}^2 - f_{L2}^2\right)$, $\alpha\left[\lambda \Delta\phi_r^s\right]_{L1} + \beta\left[\lambda \Delta \phi_r^s\right]_{L2}$iyonosferden arındırılmış faz gözlemlerinin zaman farklarını temsil eder. Δ, ardışık ölçüm dönemleri $(t, t+1)$ arasındaki gözlemleri ve model parametrelerini ayıran fark operatörünü ifade eder. $\left[\Delta \rho_r^s\right]_{\mathrm{OR}}$, alıcı ve uydu arasındaki geometrik mesafenin zaman içindeki değişimini ((ρ_r^suydunun yörünge hareketi ve Dünya'nın Dünya merkezli bir çerçevedeki dönüşü nedeniyle) ifade eder. Benzer şekilde, ardışık dönemlerdeki geometrik mesafedeki zaman içindeki değişim, Dünya gelgitleri ve okyanus yüklemesi nedeniyle de meydana gelir ve $\left[\Delta \rho_r^s\right]_{EtOl}$ ile gösterilir. (McCarthy ve Petit, 2004; Fratarcangeli vd., 2018a; Fratarcangeli vd., 2018b). Ek olarak, ECEF'deki alıcının Dünya merkezli konum yer değiştirmesi, 3 boyutlu hız vektörü $\Delta \xi r$, geometrik mesafenin boyutunda değişmesine neden olur; $e_r^s \bullet \Delta \xi_r$burada e_r^s, alıcı yer değiştirme vektörünü gözlem görüş hattına eşlemek için kullanılan alıcıdan uyduya birim vektördür. Zamandaki küçük bir değişikliği dikkate alarak, troposferik gecikmedeki fark basitçe ΔT_r^s, ardışık ölçüm dönemleri arasındaki troposferik gecikme değişimini ifade eder. Küçük zamansal değişimler için troposferik gecikmedeki bu fark formüle edilebilir. $ZTD\left[1/cos\left(Z_r^s(t+1)\right) - 1/cos\left(Z_r^s(t)\right)\right]$ Saastamoinen (1972) modelinden elde edilen hidrostatik ve ıslak bileşenlerin toplamından türetilmiştir. Zenit hidrostatik kısmının hesaplanması için yüzey toplam basınç değerleri, örneğin küresel basınç sıcaklık modeli GPT3'ten (Landskron ve Böhm, 2018) türetilebilir. Z_r^s , alıcıdan uyduya olan zenit açısıdır.

3.2 İvmeölçer Verilerinin Değerlendirilmesi

Yerin dinamik hareketini tespit etmede, yer ve yapılardaki sismik dalgaların genliğini tespit etmek için kullanılan en geçerli yöntemlerden biri, ivmeölçerlerden elde edilen ivme kayıtlarıdır. Bir deprem sırasında ölçülen ivme, depremin yer veya yapılara uyguladığı kuvveti anlamak için önemlidir (Ateş vd., 2019; Kramer 1996; Ates ve Uyanik, 2023; Trifunac 2016). İvmeölçerler, birim zamandaki hız değişimini ölçen, referans noktası gerektirmeyen ve tipik olarak dinamik ölçümler için kullanılan sensörlerdir (Tu vd., 2013).

AFAD-TADAS ve ESM veri merkezinden elde edilen ivmeölçer verilerinin baseline düzeltmesi ve filtreleme işlemleri tamamlanarak sunulmaktadır. İstasyonların filtrelenmiş ivme kayıtları üzerinde her hangi bir filtreleme işlemine gerek kalmamıştır. Bu sinyaller MEMS ivmeölçer kayıtlarından çıktığı için HNE, HNN ve HNZ şeklinde otogonal yönler kullanırlar. Böylece ivme kayıtları ile GNSS sinyalleri aynı yönelimde kullanılabilmektedir. İstasyonlardan elde edilen her bir ivmeölçerin trendden arındırılmış ivme sinyaline "çift entegrasyon" uygulanarak bir yer değiştirme zaman serisi elde edilmelidir. Bu bağlamda, ivme verilerinin çift integrasyonu ile dinamik yer değiştirmeler Denklem(2) ve Denklem(3) kullanılarak elde edilebilir.

$$v(t) = \int_0^t a(t)\,dt + v_0 \tag{2}$$

$$d(t) = \int_0^t v(t)\,dt + d_0 \tag{3}$$

Burada , a, $v_0$ve d_0sırasıyla ilk ivmeyi, ilk hızı ve ilk yer değiştirmeyi temsil eder; t ise zamanı (Chopra 2012; Paziewski vd., 2020) gösterir.

4. GNSS VADASE VE İVMEÖLÇER VERİLERİNİN KO-SİSMİK SPEKTRAL KARŞILAŞTIRILMASI

4.1. GNSS VA İle İvmeölçer Yer Değiştirmelerinin Karşılaştırılması

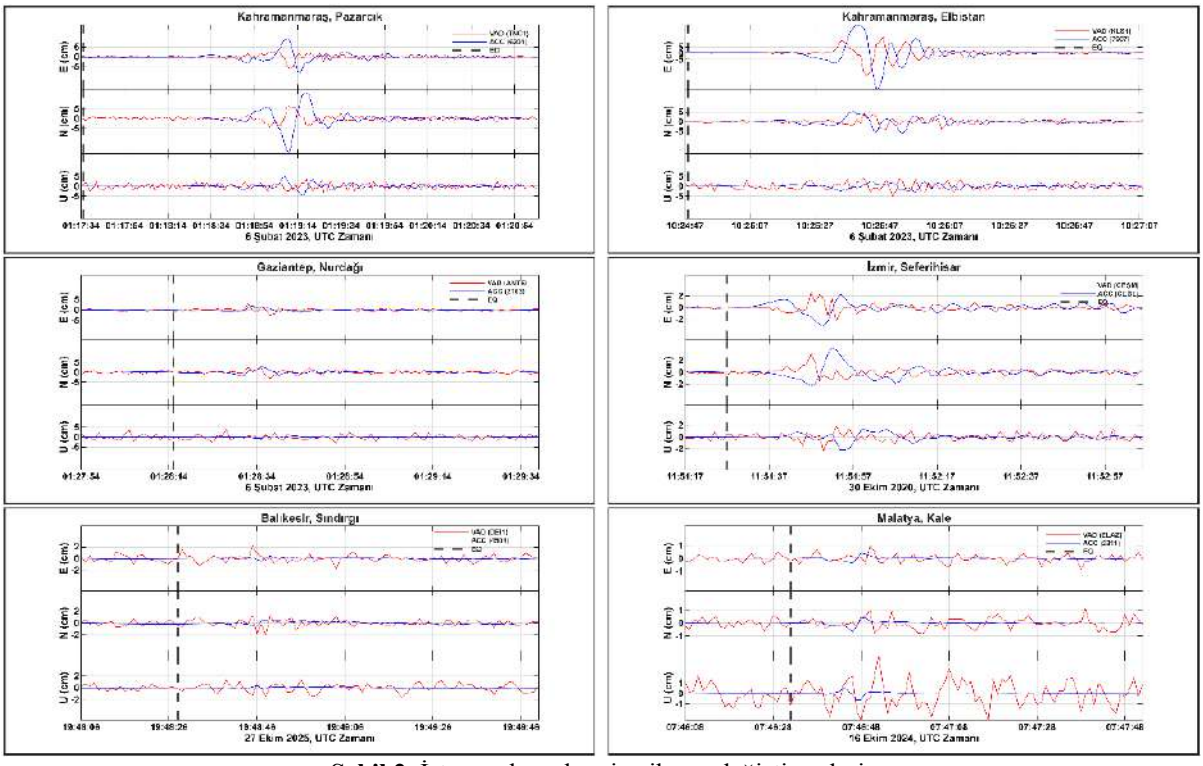
GNSS istasyonlarına ait ölçüm verilerinden ko-sismik hareketler, MATLAB ortamında geliştirilmiş açık kaynaklı PPPH-VA yazılımı ile varyometrik yaklaşım (VA) kullanılarak belirlenmiştir (Bahadur vd., 2023). Böylece Denklem (1)'de sunulan matematiksel model doğrultusunda, GNSS istasyonlarının deprem anındaki üç boyutlu (Doğu-E, Kuzey-N, Düşey-U) dinamik yer değiştirmeleri elde edilmiştir.

AFAD tarafından işletilen ivmeölçer istasyonları, zaman senkronizasyonunu dahili GPS alıcıları vasıtasıyla yüksek duyarlıkla sağlayarak verilerini Evrensel Zaman Koordinatı (UTC) sistemine göre kaydetmektedir. Buna karşılık ham GNSS gözlemleri doğal olarak GPS Zamanı (GPST) ölçeğinde tutulduğundan, GNSS ve ivmeölçer zaman serilerinin başlangıç epokları arasında artık saniye (leap second) kaynaklı bir zaman farkı bulunmaktadır. Zaman serilerini tam olarak senkronize edebilmek amacıyla, GPST'nin UTC'den ileride olduğu süre (artık saniye ofseti), GNSS varyometrik hız ve yer değiştirme epoklarından çıkarılmıştır. Bu işlem sonucunda, VA yöntemiyle türetilen GNSS yer değiştirmeleri ile ivmeölçer kayıtlarından çift integrasyonla elde edilen 1 Hz örnekleme frekanslı yer değiştirme serileri ortak bir zaman ölçeğinde çakıştırılmış ve birbirleriyle doğrudan karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. İstasyonların örnekleme frekans bilgileri.

Depremler	GNSS İstasyonu	GNSS Örnekleme Frekansı (Hz)	İvmeölçer İstasyonu	İvmeölçer Örnekleme Frekansı (Hz)
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	1	6201	200
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	1	7901	200
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	1	2703	200
İzmir, Seferihisar	CESM	1	CESE	200
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	1	4504	100
Malatya, Kale	ELAZ	1	2311	100

Çalışmada kullanılan depremlere ait ko-sismik andaki yer değiştirmeler, TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarında VA yöntemiyle, ivmeölçer istasyonunda ise ivme kayıtları kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. İstasyonların ko-sismik yer değiştirmeleri.

4.2. GNSS Sinyallerinin SNR ve MSC Karşılaştırması

VADASE yönteminde, sismik dalgaların istasyona ulaşmasından önceki arka plan gürültüsünün ko-sismik evredeki yer değiştirme kestirimlerini ne ölçüde etkilediğini sayısal olarak değerlendirmek önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanan ve sismik sinyal seviyesini ortam gürültüsüyle kıyaslayan Sinyal-Gürültü Oranı (SNR_{dB}), aşağıdaki Denklem (4) ile hesaplanmaktadır:

$$SNR_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{RMS_{signal}}{RMS_{noise}}\right) \tag{4}$$

Burada, RMS_{signal} ko-sismik pencere içindeki VA yer değiştirmelerini; RMS_{noise}, ko-sismik anından önceki yer değiştirme değerlerini temsil eder. SNR genellikle desibel cinsinden ifade edilir. Genel olarak, yüksek bir SNR, iyi sinyal netliği ve güvenilirliğini gösterir. Bu çalışmada, zemin ve gözlem gürültüsünün yer değiştirme zaman serileri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, incelenen tüm GNSS istasyonlarının üç bileşeni (E, N, U) için SNR_{dB} değerleri Denklem (4) kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. GNSS istasyonlarının SNR değerleri.

Depremler	GNSS İstasyonu	SNR (dB)		
		Doğu	Kuzey	Düşey
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	13.06	13.70	1.81
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	26.13	11.69	4.70
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	9.02	8.75	0.72
İzmir, Seferihisar	CESM	15.07	13.8	4.46
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	0.06	4.57	5.47
Malatya, Kale	ELAZ	3.94	3.25	4.98

Çizelge 4'te sunulan SNR sonuçları, VADASE yöntemiyle elde edilen eş-sismik yer değiştirme kayıtlarının güvenilirliğini ve bileşen bazlı sinyal dinamiklerini ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında en belirgin sismik sinyal netliği Kahramanmaraş Elbistan depreminde KLS1 istasyonunun Doğu bileşeninde elde edilmiştir. Benzer biçimde, İzmir Seferihisar ve Kahramanmaraş Pazarcık depremlerinde GNSS istasyonlarının yatay bileşenleri, sismik yer hareketinin arka plan ortam gürültüsünden yüksek doğrulukla ayrıştırılabildiğini kanıtlamıştır. Gaziantep Nurdağı depreminde ise ANTE istasyonu yatay bileşenlerde orta düzeyde bir sinyal kalitesi sergilemiştir. Buna karşılık, Balıkesir Sındırgı ve Malatya Kale depremlerinde hesaplanan yatay SNR seviyeleri, sismik hareket genliğinin ortam gürültüsü mertebesine yakın kaldığını ve bu nedenle sinyal çözünürlüğünün sınırlandığını göstermektedir. Bileşen bazlı karşılaştırma yapıldığında; büyük genlikli depremlerde düşey bileşene ait sinyal kalitesinin yatay bileşenlere kıyasla belirgin şekilde düşük kalması, düşey eksendeki klasik gürültü hassasiyetini yansıtmaktadır.

Büyüklük karesi tutarlılığı (Magnitude-Squared Coherence-MSC), iki gerçek veya karmaşık değerli sinyal arasındaki tutarlılığı ölçmek için sinyal işlemenin birçok alanında kullanılmaktadır (Malekpour vd., 2018). VADASE ve ivmeölçer kaynaklı yer değiştirme zaman serileri arasındaki frekans bağımlı benzerliği değerlendirmek amacıyla MSC kullanılmıştır. MSC, iki sinyal arasındaki çapraz güç spektral yoğunluğunun karesinin, ilgili sinyallerin güç spektral yoğunluklarının çarpımına oranı olarak tanımlanır ve Denklem (5)'te verilmiştir.

$$MSC_{xy}(f) = \frac{\left|S_{xy}(f)\right|^2}{S_{xx}(f)\,S_{yy}(f)} \tag{5}$$

Burada Sxy(f), iki sinyal arasındaki çapraz güç spektral yoğunluğunu; Sxx(f) ve Syy(f) ise sırasıyla ivmeölçer ve VA yer değiştirme zaman serilerinin güç spektral yoğunluklarını ifade etmektedir. MSC değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 1 değeri ilgili frekansta iki sinyal arasında tam doğrusal tutarlılığa, 0 değeri ise doğrusal ilişkinin bulunmadığı duruma karşılık gelmektedir. Böylece çalışmada kullanılan VA yöntemi ile ivmeölçerlerden elde edilen 1 Hz'lik zaman serilerinin birbirlerine olan spekral benzerlikleri yüzdelik dilimde hesaplanmıştır. Ayrıca VA zaman serisi ile ivmeden elde edilen yer değiştirme zaman serileri arasındaki benzerlik derecesini ve zaman kaymasını ölçen çaprez korelasyon katsayıları(ÇKK) hesaplanmıştır. Hesaplanan ÇKK değerleri iki sinyal arasındaki istatistiksel bir değerdir. Böylece ko-sismik andaki sinyallerin hareket yönlerindeki uyumu belirlenmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. GNSS VA yöntemiyle belirlenen ko-sismik sinyalin ivmeölçer sinyaliyle MSC karşılaştırılması ve ÇKK değerleri.

Depremler	GNSS İstasyonu	MSC (%)			ÇKK		
		Doğu	Kuzey	Düşey	Doğu	Kuzey	Düşey
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	78.49	81.57	63.25	0.67	0.78	0.46
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	84.73	63.03	55.02	0.82	0.48	0.39
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	70.53	65.54	61.02	0.55	0.50	0.25
İzmir, Seferihisar	CESM	65.08	53.96	63.80	0.52	0.42	0.52
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	57.87	52.29	66.92	0.40	0.51	0.40
Malatya, Kale	ELAZ	43.49	49.97	45.64	0.30	0.50	0.53

Çizelge 5'te VADASE ve ivmeölçer yöntemleriyle elde edilen ko-sismik yer değiştirme zaman serilerinin 0.01–0.5 Hz frekans bandındaki MSC değerleri verilmiştir. Altı deprem ve üç bileşen birlikte değerlendirildiğinde MSC değerlerinin %43.49–84.73 arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek MSC değeri Elbistan depreminde Doğu bileşeninde (%84.73), en düşük değer ise Kale depreminde Doğu bileşeninde (%43.49) elde edilmiştir. Pazarcık depreminde Doğu ve Kuzey bileşenlerinde sırasıyla %78.49 ve %81.57 düzeyindeki yüksek MSC değerleri de iki yöntemin benzer frekans içerikleri ürettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, MSC değerlerinin bileşenler ve depremler arasında belirgin farklılık göstermektedir.

Çizelge 5'te verilen ÇKK değerlerinde, VA ve ivmeölçer yöntemleriyle elde edilen ko-sismik yer değiştirme zaman serileri arasındaki benzerliğin deprem ve bileşene bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. ÇKK değerleri 0.25–0.82 arasında değişmiş ve en yüksek korelasyon Elbistan depreminde Doğu bileşeninde (0.82), en düşük korelasyon ise Nurdağı depreminde Düşey bileşende (0.25) elde edilmiştir. Bazı yatay bileşenlerde yüksek korelasyon değerlerine ulaşılması, VA ve ivmeölçer yöntemleriyle elde edilen yer değiştirme zaman serileri arasında belirgin bir uyumu bulunduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, daha büyük magnitüdlü depremlerde korelasyon değerlerinin daha iyi olduğunu gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelen altı farklı deprem kapsamında tek alıcılı GNSS VA yöntemiyle elde edilen ko-sismik yer değiştirmeler, eş-konumlu veya birbirine yakın ivmeölçer kayıtlarıyla zaman ve frekans ortamında karşılaştırılmıştır. Büyük magnitüdlü depremlerde daha yüksek SNR ve spektral uyum değerleri elde edilmiştir. Özellikle Kahramanmaraş Elbistan (Mw=7.6) ve Pazarcık (Mw=7.7) depremlerinde sinyal kalitesinin ve yöntemler arasındaki uyumun daha belirgin olduğu görülmüştür. Elbistan depreminde KLS1 istasyonunun Doğu bileşeninde elde edilen 26.13 dB SNR, %84.73 MSC ve 0.82 ÇKK değerleri, yüksek genlikli ko-sismik deformasyonların VA yöntemiyle başarılı biçimde belirlenebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, istasyonlar arası mesafe ve yerel zemin koşullarındaki farklılıkların sonuçların yorumlanmasında dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

GNSS ve ivmeölçer istasyonlarının birbirine çok yakın olduğu KLS1–7901 ve DEI1–4504 çiftlerinde yöntemler arasında daha uyum elde edilirken, istasyonlar arasındaki mesafenin arttığı ANTE–2703 ve ELAZ–2311 çiftlerinde uyumun genel olarak azaldığı görülmüştür. Bu durum, istasyonlar arasındaki mekansal ayrımın ve farklı yerel zemin koşullarının iki sensör tarafından kaydedilen yer hareketlerinin karşılaştırılabilirliğini etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle ANTE ve 2703 istasyonları arasındaki VS30 farkının (sırasıyla 406 ve 756 m/s) bu farklılıkların değerlendirilmesinde dikkate alınması gerekmektedir. Orta büyüklükteki Balıkesir Sındırgı (Mw=6.1) ve Malatya Kale (Mw=5.9) depremlerinde ise özellikle yatay bileşenlerde daha düşük SNR değerleri ve buna bağlı olarak daha sınırlı MSC ve ÇKK değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, daha düşük genlikli ko-sismik sinyallerin arka plan gürültüsünden ayrışamaması VA ve ivmeölçer sonuçları arasındaki uyumu olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir. Düşey bileşenlerde SNR değerlerinin yatay bileşenlerden düşük olması, bu bileşende GNSS çözümünün daha fazla gürültü içerebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, düşey bileşenlerde elde edilen orta düzeydeki MSC değerleri, düşey ko-sismik sinyalin tamamen uyumsuz olmadığını, ancak zaman-alanı ve frekans-alanı uyumunun olay ve istasyona bağlı olarak değiştiği görülmüştür. VA yaklaşımının uygun istasyon geometrisi ve yeterli SNR sağlandığında, özellikle yüksek genlikli ko-sismik hareketlerin belirlenmesinde etkili ve güvenilir bir GNSS tabanlı yaklaşım olduğunu tekrar göstermiştir. Bununla birlikte, istasyonlar arası mesafe, yerel zemin koşulları ve sinyal genliği gibi faktörlerin yöntemler arasındaki uyumu etkileyebildiği ve özellikle düşük genlikli depremlerde VA sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkatlice ele alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

AFAD, 2023. Türkiye Deprem Veri Merkezi ve İvme Veritabanı Analiz Sistemi (TADAS). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. https://tadas.afad.gov.tr [Erişim tarihi: 15.08.2026].

Ashcroft, N., Pache, F., Tawk, Y., Cole, A. ve Colosimo, G., 2016. Leica VADASE: First Autonomous GNSS Monitoring Solution. FIG Working Week 2016, Recovery from Disaster, Christchurch, Yeni Zelanda.

Ateş, E., Kuru, T. ve Aydın, R. K., 2019. Deprem Kayıtları Kullanılarak Muğla-Milas Derince Barajının Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(2): 319–338.

Ateş, E. ve Uyanık, O., 2023. Comparison of Acceleration Records Measured at Different Depths. Turk Deprem Arastirma Dergisi, 5(2): 215–232.

Bahadur, B., Bezcioglu, M. ve Yigit, C. O., 2023. PPPH VA: an open source software for real time multi GNSS variometric approach using single and dual frequency observations. GPS Solutions, 28(31): 1-15.

Benedetti, E., Branzanti, M., Biagi, L., Colosimo, G., Mazzoni, A. ve Crespi, M., 2014. Global Navigation Satellite Systems Seismology for the 2012 Mw 6.1 Emilia Earthquake: Exploiting the VADASE Algorithm. Seismological Research Letters, 85(3): 649–656.

Benedetti, E., Branzanti, M., Colosimo, G., Mazzoni, A. ve Crespi, M., 2016. VADASE: State of the art and new developments of a third way to GNSS seismology. International Association of Geodesy Symposia, 142: 59–66.

Benedetti, E., Dermanis, A. ve Crespi, M., 2017. On the feasibility to integrate low-cost MEMS accelerometers and GNSS receivers. Advances in Space Research, 59(11): 2764–2778.

Bezcioglu, M., Karadeniz, B., Yigit, C. O., Dindar, A. A., Tiryakioglu, İ. ve Aktug, B., 2021. Real-Tıme Precıse Poınt Posıtıonıng (RT-PPP) For Capturıng Seısmıc Waveform and Coseısmıc Dısplacement. 6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 13-15 October 2021, GTU, Kocaeli / Turkey.

Bezcioğlu, M., Karadeniz, B., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., Bezir, F. ve Avcı, Ö., 2022a. Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi. Harita Dergisi, 167: 1–11.

Bezcioglu, M., Yigit, C. O., Mazzoni, A., Fortunato, M., Dindar, A. A. ve Karadeniz, B., 2022b. High-Rate (20 Hz) Single-Frequency GPS/GALILEO Variometric Approach for Real-Time Structural Health Monitoring and Rapid Risk Assessment. Advances in Space Research, 70(5): 1388–1405.

Bezcioğlu, M., Bahadur, B., Bozdoğan, E., Dindar, A. A., Akpınar, B., Nohutcu, M. ve Yiğit, C. Ö., 2024. Düşük maliyetli ve tek frekanslı çoklu GNSS gözlemlerine dayalı varyometrik yaklaşımın düşey dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyetinin incelenmesi. Harita Dergisi, 172: 1–16.

Branzanti, M., Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A., 2013. GPS near-real-time coseismic displacements for the Great Tohoku-oki earthquake. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(2): 372–376.

Branzanti, M., Colosimo, G. ve Mazzoni, A., 2017. Variometric approach for real-time GNSS navigation: First demonstration of Kin-VADASE capabilities. Advances in Space Research, 59(11): 2750–2763.

Chopra, A. K., 2012. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering. 4. basım, Pearson Education.

Colosimo, G., 2012. Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine. Doktora tezi, Sapienza University, Roma.

Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A., 2011. Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B11).

Fratarcangeli, F., Savastano, G., D'Achille, M.C., Mazzoni, A., Crespi, M., Riguzzi, F., Devoti, R. ve Pietrantonio, G., 2018a. VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the central Italy 2016 earthquakes. Remote Sensing, 10(8): 1201.

Fratarcangeli, F., Ravanelli, M., Mazzoni, A., Colosimo, G., Benedettin, E., Branzanti, M., Savastano, G., Verkhoglyadova, O., Komjathy, A. ve Crespi, M., 2018b. The variometric approach to real-time high-frequency geodesy. Satellite Positioning for Geoscience, 29: 95-108.

Fratini, R., De Pace, A. M., Fortunato, M., Ravanelli, M., Crespi, M. ve Mazzoni, A., 2024. GNSS VarioPy: A Comprehensive Tool for Enhancing Early-Warning Systems for Geophysical and Atmospheric Events Through GNSS Permanent Stations Networks. Proceedings of the ION 2024 Pacific PNT Meeting, syf: 46–53.

Fujita, H., 1997. A decade of MEMS and its future. Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, syf: 1–7.

Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., Li, H., Shi, C. ve Liu, J., 2016. Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake. Geophysical Research Letters, 43(1): 161–167.

Hung, H. K., Rau, R. J., Benedetti, E., Branzanti, M., Mazzoni, A., Colosimo, G. ve Crespi, M., 2017. GPS Seismology for a moderate magnitude earthquake: Lessons learned from the analysis of the 31 October 2013 ML 6.4 Ruisui (Taiwan) earthquake. Annals of Geophysics, 60(5): S0553.

KRDAE, 2023. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM), İstanbul. http://www.koeri.boun.edu.tr [Erişim tarihi: 15.08.2026].

Kramer, S. L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.

Landskron, D. ve Böhm, J., 2018. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. Journal of Geodesy, 92(4): 349–360.

Luzi, L., Puglia, R., Russo, E., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., Lanzano, G., Çeken, U., Clinton, J., Costa, G., Duni, L., Farzanegan, E., Gueguen, P., Ionescu, C., Kalogeras, I., Özener, H., Pesaresi, D., Sleeman, R., Strollo, A. ve Zare, M., 2016. Engineering Strong Motion Database: A Platform to Access Pan-European Accelerometric Data. Seismological Research Letters, 87(4): 987–997.

Malekpour, S., Gubner, J. A. ve Sethares, W. A., 2018. Measures of generalized magnitude-squared coherence: Differences and similarities. Journal of the Franklin Institute, 355(5): 2932-2950.

McCarthy, D. D. ve Petit, G., 2004. IERS Conventions (2003). International Earth Rotation and Reference Systems Services (IERS).

Mishra, M. K., Dubey, V., Mishra, P. ve Khan, I., 2019. MEMS technology: a review. Journal of Engineering Research Reports, 4(1): 1–24.

Moschas, F. ve Stiros, S., 2011. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. Engineering Structures, 33(1): 10–17.

Nastase, E. I., Muntean, A., Nistor, S., Grecu, B. ve Tataru, D., 2020. GPS Processing Tools For Better Impact Assessment of Earthquakes in Romania. Romanian Reports in Physics, 72: 1-12.

Paziewski, J., Kurpinski, G., Wielgosz, P., Stolecki, L., Sieradzki, R., Seta, M., Oszczak, S., Castillo, M. ve Martin-Porqueras, F., 2020. Towards Galileo + GPS seismology: Validation of high-rate GNSS-based system for seismic events characterisation. Measurement, 166: 108236.

Peng, C., Chen, Y., Chen, Q, Yang, J., Wang, H., Zhu, X., Xu, Z. ve Zheng, Y., 2017. A new type of tri-axial accelerometers with high dynamic range MEMS for earthquake early warning. Computer and Geosciences, 100: 179-187.

Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. AGU Book Series: Geophysical Monograph Series, syf: 247–251.

Shu, Y., Fang, R., Li, M., Shi, C., Li, M. ve Liu, J., 2018a. Very high-rate GPS for measuring dynamic seismic displacements without aliasing: performance evaluation of the variometric approach. GPS Solutions, 22(4): 121.

Shu, Y., Fang, R., Geng, J., Zhao, Q. ve Liu, J., 2018b. Broadband Velocities and Displacements From Integrated GPS and Accelerometer Data for High-Rate Seismogeodesy. Geophysical Research Letters, 45(17): 8939–8948.

Shu, Y., Fang, R., Liu, Y., Ding, D., Qiao, L., Li, G. ve Liu, J., 2020. Precise coseismic displacements from the GPS variometric approach using different precise products: Application to the 2008 MW 7.9 Wenchuan earthquake. Advances in Space Research, 65(10): 2360–2371.

Tesolin, F., Vitti, A., Mazzoni, A. ve Crespi, M., 2019. Impact of Galileo data on the solutions of the variometric approach for displacement analysis. Advances in Space Research, 63(9): 3053–3061.

Trifunac, M. D., 2016. Site conditions and earthquake ground motion – A review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90: 88–100.

Tu, R., Wang, R., Ge, M., Walter, T. R., Ramatschi, M., Milkereit, C., Bindi, D. ve Dahm, T., 2013. Cost-effective monitoring of ground motion related to earthquakes, landslides, or volcanic activity by joint use of a single-frequency GPS and a MEMS accelerometer. Geophysical Research Letters, 40(15): 3825–3829.

Xue, C., Guo, J., Jiang, S., Wang, Y., Guo, Y. ve Li, J., 2024. Performance Characteristics of Newly Developed Real-Time Wave Measurement Buoy Using the Variometric Approach. Journal of Marine Science and Engineering, 12(11): 2032.

Zang, J., Xu, C. ve Li, X., 2020. Scaling earthquake magnitude in real time with high-rate GNSS peak ground displacement from variometric approach. GPS Solutions, 24(4): 1–10.

GÖKÇEADA KIYI HEYELANINDA UZUN DÖNEMLİ DEFORMASYON VE YÜZEY DEĞİŞİMLERİNİN ÇOK KAYNAKLI UYDU VERİLERİ İLE ANALİZİ

Fatih BURSALI[1], R. Cüneyt ERENOĞLU[2], Ahmet Batuhan POLAT[3], Oya ERENOĞLU[4]

[1]Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Doğal Afetlerin Risk Yönetimi Anabilim Dalı, Çanakkale, fatihbursali41@gmail.com
[2] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, ceren@comu.edu.tr
[3] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, abpolat@comu.edu.tr
[4] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Coğrafya Eğitimi Bölümü, Çanakkale, o_turkdonmez@comu.edu.tr

ÖZET

Heyelanlar, yamaç dengesinin bozulması sonucunda meydana gelen ve yerleşim alanları, ulaşım ağları ile kıyı ekosistemleri üzerinde önemli etkiler oluşturabilen doğal afetler arasında yer almaktadır. Özellikle kıyı bölgelerinde gelişen heyelanlar; denizel aşındırma, litolojik özellikler, hidrolojik koşullar ve sismik aktivitelerin ortak etkisi altında şekillenmektedir (Cruden ve Varnes, 1996). Son yıllarda radar ve optik uydu teknolojilerindeki gelişmeler, geniş alanlarda meydana gelen yavaş yüzey hareketlerinin uzun dönemli olarak izlenebilmesine olanak sağlamıştır. Sentetik Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), milimetre–santimetre ölçeğindeki yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri haline gelirken, optik uydu görüntüleri yüzey morfolojisinde ve arazi örtüsünde meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde önemli katkılar sunmaktadır (Massonnet ve Feigl, 1998; Hooper vd., 2012; Crosetto vd., 2016). Ege Bölgesi, Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki karmaşık tektonik etkileşimler nedeniyle Akdeniz havzasının en aktif sismik bölgelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Papazachos ve Comninakis, 1971; McKenzie, 1978). Bu kapsamda, 24 Mayıs 2014 tarihinde Kuzey Ege Denizi'nde meydana gelen Mw 6,9 büyüklüğündeki deprem bölge genelinde önemli yer hareketlerine neden olmuştur. Deprem kaynaklı heyelanlar ve uzun dönemli yamaç instabiliteleri birçok araştırmada rapor edilmiş olup, özellikle büyük depremler sonrasında yamaçların uzun yıllar boyunca deformasyon göstermeye devam edebildiği bilinmektedir (Keefer, 1984; Fan vd., 2019). Deprem episantrına yakın konumda bulunan Gökçeada kıyılarında sonraki yıllarda belirginleşen kütle hareketleri, bölgenin uzun dönemli deformasyon davranışının araştırılmasını gerekli kılmıştır. Bu çalışmada, Gökçeada'da yer alan bir kıyı heyelanının 2015–2026 yılları arasındaki zamansal ve mekânsal gelişimi radar ve optik uydu verilerinin birlikte kullanıldığı çok kaynaklı bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, InSAR zaman serileri ile belirlenen deformasyonların optik uydu görüntülerinden elde edilen yüzey değişimleriyle birlikte değerlendirilerek heyelanın uzun dönemli evriminin ortaya konulmasıdır. Radar tabanlı deformasyon analizlerinde 2015–2026 dönemine ait Sentinel-1 SAR görüntülerinden yararlanılmıştır. Sentinel-1 görüntülerinden oluşturulan interferogramlar kullanılarak Küçük Baz Açıklığı Alt Kümesi (Small Baseline Subset-SBAS) yaklaşımına dayalı InSAR zaman serisi analizi gerçekleştirilmiştir. İnterferometrik işlem sürecinde görüntülerin eşleştirilmesi, uygun interferogram çiftlerinin oluşturulması, topoğrafik faz bileşeninin giderilmesi, faz açma, atmosferik ve yörüngesel etkilerin azaltılması ve zaman serisi çözümleme aşamaları uygulanmıştır. Elde edilen zaman serileri üzerinden heyelan sahasındaki uzun dönemli doğrultu görüşü (Line of Sight-LOS) deformasyonları incelenmiş ve heyelanın farklı kesimlerini temsil eden kontrol noktalarının zamansal deformasyon davranışları karşılaştırılmıştır. Radar analizlerini desteklemek ve heyelanın yüzeyde meydana getirdiği morfolojik değişimleri belirlemek amacıyla çok zamanlı optik uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Ardışık yıllara ait görüntüler kullanılarak normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (dNDVI), fark çıplak toprak indeksi (dBSI) ve fark normalize edilmiş yanma oranı (dNBR) hesaplanmıştır. Heyelan sınırlarının belirlenmesinde tek bir spektral indeks yerine, dNDVI, dBSI ve dNBR sonuçlarında ortak olarak belirginleşen yüzey değişimleri birlikte değerlendirilmiştir. Bitki örtüsü kaybı, çıplak zemin artışı ve yüzey karakterindeki değişimin mekânsal olarak örtüştüğü alanlar tarihsel optik görüntülerde gözlenen morfolojik değişimlerle karşılaştırılarak heyelandan etkilenen alanlar belirlenmiştir. Bu alanlar yıllara göre sayısallaştırılarak heyelanın alansal gelişimi ve yüzey değişim miktarları hesaplanmıştır. Tarihsel uydu görüntülerinin incelenmesi sonucunda çalışma alanında 2013 yılı öncesinde belirgin bir heyelan morfolojisinin bulunmadığı görülmüştür. Buna karşın 2016 yılı görüntülerinde ilk belirgin yüzey değişim izleri gözlenmiş, 2019 yılı itibarıyla heyelan geometrisi daha açık şekilde ortaya çıkmış ve 2024–2025 döneminde kıyıya doğru ilerleyen geniş bir kütle hareketi karakteri belirlenmiştir. Bu gözlemler, çalışma alanındaki yamaç instabilitesinin 2014 sonrası dönemde belirginleştiğini göstermektedir. InSAR zaman serileri incelendiğinde heyelan sahasında seçilen kontrol noktalarının tamamında sürekli ve negatif yönlü bir deformasyon eğilimi belirlenmiştir. 2015 yılında yaklaşık +30 ila +40 mm seviyelerinde bulunan LOS değerlerinin 2026 yılına gelindiğinde yaklaşık -60 ila -70 mm seviyelerine ulaştığı gözlenmiştir. Böylece çalışma dönemi boyunca 100 mm'den fazla kümülatif LOS değişimi meydana geldiği belirlenmiştir. Zaman serilerindeki süreklilik, hareketin ani bir olaydan ziyade uzun yıllara yayılan yavaş bir deformasyon karakterine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, çalışma alanında aktif fakat düşük hızlı bir heyelan mekanizmasının bulunduğuna işaret etmektedir. Optik görüntülerden elde edilen sonuçlar da InSAR bulgularını desteklemektedir. Yıllık değişim analizleri sonucunda heyelandan etkilenen alanın 2015–2016 döneminde yaklaşık 0,48 ha olduğu, 2025–2026 döneminde ise yaklaşık 1,55 ha seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Böylece yaklaşık 11 yıllık süreç içerisinde heyelandan etkilenen alanda üç kata yakın bir büyüme meydana gelmiştir. Kümülatif değişim eğrisi özellikle 2020–2024 yılları arasında alansal genişlemenin belirginleştiğini göstermektedir. Heyelanın zamansal gelişimini daha ayrıntılı değerlendirmek amacıyla 2015–2026 döneminde optik uydu görüntülerinden elde edilen yıllık yüzey değişim alanları dönemsel olarak gruplandırılmıştır. Faz ayrımı belirli bir tetikleyici olay tarihine göre değil, ardışık yıllar arasında hesaplanan yüzey değişimlerinin zamansal dağılımını ve değişim yoğunluğunu karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2015–2018 dönemi Faz-I, 2018–2021 dönemi Faz-II ve 2021–2026 dönemi Faz-III olarak tanımlanmıştır. Fazlar için hesaplanan değerler toplam heyelan alanını değil, ilgili dönemlerde meydana gelen yıllık yüzey değişim alanlarının ortalamasını ifade etmektedir. Faz-I döneminde ortalama yüzey değişim alanı 0,571 ha, Faz-II döneminde 0,530 ha ve Faz-III döneminde ise 0,397

ha olarak hesaplanmıştır. İlk iki fazda daha yüksek yüzey değişim değerleri gözlenirken Faz-III'te ortalama yüzey değişim miktarında göreceli bir azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte InSAR zaman serilerinde deformasyon eğiliminin devam etmesi, yüzeyde gözlenen alansal değişim miktarındaki azalmaya rağmen kütle hareketinin günümüzde de aktifliğini sürdürdüğünü göstermektedir.

Spektral indeks analizleri, heyelan sahasının farklı dönemlerde farklı yüzey değişim özellikleri sergilediğini ortaya koymuştur. Özellikle 2020–2021 ve 2025–2026 dönemlerinde dNDVI, dBSI ve dNBR sonuçlarında belirginleşen değişimlerin yüzey örtüsündeki dönüşüm ve zemin hareketlerinin yoğunlaştığı alanlarla mekânsal uyum gösterdiği belirlenmiştir. Optik görüntülerde belirlenen değişim alanlarının InSAR ile tespit edilen deformasyon zonlarıyla genel olarak örtüşmesi, radar ve optik uydu gözlemlerinin birbirini desteklediğini göstermektedir. Çalışmadan elde edilen tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, tarihsel uydu görüntüleri çalışma alanındaki heyelan morfolojisinin 2014 sonrası dönemde belirginleştiğini göstermektedir. Ancak mevcut bulgular 2014 Kuzey Ege Depremi ile heyelanın gelişimi arasında doğrudan bir nedensellik kurmak için yeterli olmayıp, gözlenen zamansal ilişki bölgedeki yamaç instabilitesinin değerlendirilmesi açısından dikkat çekicidir. InSAR zaman serileri ve optik değişim analizleri, Gökçeada kıyısında günümüzde de aktifliğini sürdüren yavaş hareketli bir heyelan bulunduğunu ortaya koymuştur. InSAR gözlemleri çalışma döneminde 100 mm'den fazla kümülatif LOS değişimi gösterirken, optik uydu görüntüleri heyelandan etkilenen alanın yaklaşık üç kat genişlediğini ortaya koymuştur. Radar ve optik uydu verilerinin bütünleşik kullanımı sayesinde deformasyon miktarı ile yüzeyde meydana gelen morfolojik değişimler birlikte izlenebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çok kaynaklı uydu verilerinin kıyı heyelanlarının uzun dönemli gelişiminin belirlenmesi ve aktifliğinin izlenmesinde etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Gökçeada, Heyelan, InSAR, Uzaktan Algılama,

LONG-TERM MONITORING OF DEFORMATION AND SURFACE CHANGES IN THE GOKÇEADA COASTAL LANDSLIDE USING MULTI-SOURCE SATELLITE OBSERVATIONS

ABSTRACT

Landslides are among the most significant natural hazards resulting from slope instability and can have considerable impacts on settlements, transportation networks, and coastal ecosystems. Coastal landslides, in particular, are controlled by the combined effects of marine erosion, lithological characteristics, hydrological conditions, and seismic activity (Cruden and Varnes, 1996). Recent advances in radar and optical satellite technologies have enabled the long-term monitoring of slow-moving surface deformation over large areas. Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) has become a widely used technique for detecting surface deformation at millimeter-to-centimeter scales, while optical satellite imagery provides valuable information for identifying changes in surface morphology and land cover (Massonnet and Feigl, 1998; Hooper et al., 2012; Crosetto et al., 2016). The Aegean Region is considered one of the most seismically active areas in the Mediterranean basin due to the complex tectonic interactions between the African and Eurasian plates (Papazachos and Comninakis, 1971; McKenzie, 1978). In this context, the Mw 6.9 earthquake that occurred in the North Aegean Sea on 24 May 2014 caused significant ground motion across the region. Earthquake-induced landslides and long-term slope instabilities have been reported in numerous studies, and slopes affected by major earthquakes may continue to exhibit deformation for many years after the seismic event (Keefer, 1984; Fan et al., 2019). The mass movements that became increasingly evident along the coasts of Gökçeada, located close to the earthquake epicentral region, highlight the need to investigate the long-term deformation behavior of the area. In this study, the spatial and temporal evolution of a coastal landslide on Gökçeada between 2015 and 2026 was investigated using a multi-source approach integrating radar and optical satellite data. The primary objective was to reveal the long-term evolution of the landslide by jointly evaluating deformation derived from InSAR time-series analysis and surface changes identified from multi-temporal optical satellite imagery. Sentinel-1 SAR imagery acquired between 2015 and 2026 was used for radar-based deformation analysis. Interferograms generated from Sentinel-1 acquisitions were processed using a Small Baseline Subset (SBAS) InSAR time-series approach. The interferometric processing workflow included image co-registration, selection and generation of suitable interferometric pairs, removal of the topographic phase component, phase unwrapping, mitigation of atmospheric and orbital effects, and time-series inversion. The resulting time series were used to investigate long-term Line-of-Sight (LOS) deformation within the landslide area, and the temporal deformation patterns of control points representing different parts of the landslide were compared. Multi-temporal optical satellite imagery was additionally used to support the radar-based analysis and to identify morphological changes associated with the landslide. The difference Normalized Difference Vegetation Index (dNDVI), difference Bare Soil Index (dBSI), and difference Normalized Burn Ratio (dNBR) were calculated from images acquired in consecutive years. Rather than relying on a single spectral index, landslide-affected areas were identified by jointly evaluating surface changes that were consistently evident in the dNDVI, dBSI, and dNBR results. Areas characterized by spatially coincident vegetation loss, increased bare-ground exposure, and changes in surface characteristics were compared with morphological changes observed in historical optical imagery. The landslide-affected areas were subsequently delineated for each period, allowing their spatial development and annual surface-change areas to be quantified. Analysis of historical satellite imagery showed that no distinct landslide morphology was evident in the study area prior to 2013. In contrast, the first clear indications of surface disturbance became visible in imagery from 2016. The landslide geometry became more clearly defined by 2019, while imagery from 2024–2025 revealed a broader mass-movement pattern extending toward the coastline. These observations indicate that slope instability in the study area became increasingly evident during the post-2014 period. The InSAR time series revealed a continuous negative deformation trend at all selected control points within the landslide area. LOS displacement values of approximately +30 to +40 mm in 2015 decreased to approximately -60 to -70 mm by 2026, indicating a cumulative LOS change exceeding 100 mm over the study period. The persistent nature of the time-series trend suggests that the observed movement is not associated with a single abrupt event but instead represents slow deformation continuing over several years. This behavior indicates an active, slow-moving

landslide mechanism within the study area. The results derived from optical satellite imagery also support the InSAR observations. Annual change analysis showed that the landslide-affected area was approximately 0.48 ha during 2015–2016 and increased to approximately 1.55 ha during 2025–2026. Thus, the affected area expanded by nearly threefold over the approximately 11-year observation period. The cumulative change curve further indicates that the spatial expansion became particularly pronounced between 2020 and 2024. To further evaluate the temporal evolution of the landslide, annual surface-change areas derived from optical satellite imagery for the 2015–2026 period were grouped into distinct temporal phases. The phase classification was not based on the timing of a specific triggering event; instead, it was designed to compare the temporal distribution and intensity of surface changes calculated between consecutive years. Accordingly, 2015–2018 was defined as Phase I, 2018–2021 as Phase II, and 2021–2026 as Phase III. The values calculated for these phases represent the mean annual surface-change area within each period rather than the total landslide area. The mean surface-change area was calculated as 0.571 ha for Phase I, 0.530 ha for Phase II, and 0.397 ha for Phase III. Higher surface-change values were observed during the first two phases, whereas a relative decrease occurred during Phase III. Nevertheless, the persistence of deformation in the InSAR time series indicates that the mass movement remains active despite the relative reduction in the magnitude of surface changes observed in the optical imagery. The spectral-index analyses further revealed temporal variations in the surface characteristics of the landslide area. Changes identified in the dNDVI, dBSI, and dNBR results were particularly pronounced during the 2020–2021 and 2025–2026 periods and showed spatial consistency with areas characterized by land-cover transformation and enhanced ground movement. The general spatial agreement between surface-change areas identified from optical imagery and deformation zones detected by InSAR demonstrates that the radar and optical observations provide complementary evidence of ongoing slope instability. When all findings are evaluated together, historical satellite imagery indicates that the landslide morphology in the study area became increasingly evident during the post-2014 period. However, the available evidence is insufficient to establish a direct causal relationship between the 2014 North Aegean earthquake and the subsequent development of the landslide; nevertheless, the observed temporal association is noteworthy in terms of regional slope instability. The combined InSAR time-series and optical change analyses reveal an active, slow-moving coastal landslide on Gökçeada that continues to exhibit deformation. InSAR observations indicate more than 100 mm of cumulative LOS change over the study period, while optical satellite imagery shows an approximately threefold increase in the landslide-affected area. The integrated use of radar and optical satellite data enables both surface deformation and morphological changes to be monitored within a unified framework. These findings demonstrate the potential of multi-source satellite observations as an effective approach for assessing the long-term evolution and ongoing activity of coastal landslides..

Keywords: Gökçeada, Landslide, InSAR, Remote Sensing

KAYNAKLAR

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375–2383.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide Types and Processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., USA.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., Crippa, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89.

Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A.J., Van Westen, C.J., Xu, C., 2019. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards. Nature Reviews Earth & Environment, 1(12), 582–597.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8–20.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M., 2012. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation. Tectonophysics, 514–517, 1–13.

Keefer, D.K., 1984. Landslides Caused by Earthquakes. Geological Society of America Bulletin, 95(4), 406–421.

Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(7), 1377–1386.

Lu, P., Stumpf, A., Kerle, N., Casagli, N., 2004. Object-Oriented Change Detection for Landslide Rapid Mapping. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1(4), 261–264.

Martha, T.R., Kerle, N., Van Westen, C.J., Jetten, V., Kumar, K.V., 2010. Characterising Spectral, Spatial and Morphometric Properties of Landslides for Semi-Automatic Detection Using Object-Oriented Methods. Geomorphology, 116(1–2), 24–36.

Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441–500.

McKenzie, D., 1978. Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt: The Aegean Sea and Surrounding Regions. Geophysical Journal International, 55(1), 217–254.

Papazachos, B.C., Comninakis, P.E., 1971. Geophysical and Tectonic Features of the Aegean Arc. Journal of Geophysical Research, 76(35), 8517–8533.

Raspini, F., Bianchini, S., Ciampalini, A., Del Soldato, M., Solari, L., Novali, F., Casagli, N., 2018. Continuous Semi-Automatic Monitoring of Slow-Moving Landslides by Satellite Radar Interferometry. Remote Sensing, 10(4), 653.

Solari, L., Del Soldato, M., Raspini, F., Bianchini, S., Casagli, N., 2020. A Sentinel-1 Based Hot-Spot Analysis for Landslide Monitoring. Remote Sensing, 12(18), 2966.

YERALTI DOĞAL GAZ DEPOLAMA TESİSİNİN INSAR TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ

Ahmet Batuhan POLAT[1], Füsun BALIK ŞANLI[2], Özgün AKÇAY[1]

[1]Arş. Gör., Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 17200, Çanakkale, abpolat@comu.edu.tr , akcay@comu.edu.tr
[2]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, fbalik@yildiz.edu.tr

ÖZET

Yeraltı doğal gaz depolama tesisleri, mevsimsel doğal gaz talep değişimlerinin dengelenmesi ve enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahip altyapı sistemleridir. Düşük talep dönemlerinde yeraltına enjekte edilen doğal gaz, yüksek tüketimin yaşandığı dönemlerde geri çekilerek enerji arzının sürekliliği sağlanmaktadır. Ancak bu enjeksiyon ve çekim çevrimleri rezervuar basıncında önemli değişimlere neden olmakta ve bu basınç değişimleri zamanla yeryüzünde ölçülebilir deformasyonlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle yeraltı doğal gaz depolama tesisleri çevresinde meydana gelen yüzey hareketlerinin uzun dönemli olarak izlenmesi; rezervuar güvenliği, altyapı bütünlüğü ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin en önemli enerji altyapılarından biri olan Tuz Gölü Yeraltı Doğal Gaz Depolama Tesisi çevresinde meydana gelen yüzey deformasyonları 2018–2025 yılları arasını kapsayan yedi yıllık dönemde İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (InSAR) zaman serisi analizleri kullanılarak incelenmiştir. Tuz mağaralarında gerçekleştirilen doğal gaz depolama faaliyetlerinin yüzey deformasyonları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve deformasyonu kontrol eden temel mekanizmaların ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yükselen (ascending) ve alçalan (descending) yörüngelere ait toplam 1156 adet Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılmıştır. Görüntüler, SBAS (Small Baseline Subset) yöntemi ile analiz edilmiştir. Atmosferik faz gecikmelerinin giderilmesi amacıyla ERA5 analiz verileri kullanılmıştır. Ayrıca yükselen ve alçalan yörünge sonuçları birlikte değerlendirilerek deformasyonun düşey ve yatay bileşenleri ayrıştırılmıştır. Elde edilen hız haritaları ve zaman serisi analizleri, depolama tesisi çevresinde belirgin yüzey deformasyonlarının meydana geldiğini göstermektedir. Çalışma alanında özellikle depolama mağaralarının bulunduğu bölgelerde yıllık yaklaşık 6 cm'ye ulaşan düşey deformasyonlar tespit edilmiştir. Bileşen ayrıştırma sonuçları deformasyonun büyük ölçüde düşey hareketlerden oluştuğunu, yatay deformasyonların ise daha sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Seçilen temsil noktalarında gerçekleştirilen zaman serisi analizleri, doğal gaz enjeksiyon ve çekim çevrimleri ile yüzey deformasyonları arasında belirgin bir zamansal uyum bulunduğunu göstermektedir. Özellikle doğal gaz çekiminin yoğun olduğu dönemlerde çökme hızlarının arttığı, enjeksiyon dönemlerinde ise çökmenin yavaşladığı veya yükselme davranışlarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Yüzey deformasyonlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla InSAR zaman serileri; doğal gaz depolama miktarları, yeraltı su seviyesi, yağış, sıcaklık ve atmosferik basınç verileri ile birlikte değerlendirilmiştir. Böylece deformasyonların yalnızca operasyonel süreçlerle değil, aynı zamanda çevresel parametrelerle de ilişkisi kapsamlı olarak incelenmiştir. Parametreler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla Pearson ve Spearman korelasyon analizleri uygulanmıştır. İlk aşamada yeraltı suyu seviyeleri ile deformasyon arasında oldukça yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Ancak her iki veri setinin de benzer uzun dönemli azalma eğilimleri göstermesi nedeniyle, gerçek fiziksel ilişkiyi ortaya koyabilmek amacıyla trend arındırma (detrend) analizi gerçekleştirilmiştir. Detrend işlemi sonrasında yeraltı suyu ile deformasyon arasındaki korelasyonların önemli ölçüde zayıfladığı belirlenmiştir. Buna karşılık doğal gaz depolama miktarları ile deformasyon arasındaki ilişkinin trend arındırılmış verilerde de korunması, yüzey deformasyonlarının temel olarak rezervuar basıncındaki değişimlerden kaynaklandığını göstermektedir. Sonuç olarak bu çalışma, Tuz Gölü Yeraltı Doğal Gaz Depolama Tesisi çevresinde gözlenen yüzey deformasyonlarının temel belirleyicisinin doğal gaz enjeksiyon ve çekim süreçlerine bağlı rezervuar basınç değişimleri olduğunu ortaya koymaktadır. Yeraltı suyu seviyeleri ve diğer çevresel parametrelerin deformasyon üzerindeki etkilerinin ikincil düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Çok zamanlı InSAR analizleri, çevresel ve operasyonel veri setlerinin bütünleşik değerlendirilmesi ile bu çalışma, yeraltı doğal gaz depolama tesislerinin güvenli ve sürdürülebilir yönetimi için uygulanabilir ve kapsamlı bir izleme yaklaşımı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: arazi yüzey deformasyonu, interferometrik sentetik açıklıklı radar, yeraltı doğal gaz depolama tesisi, zaman serisi analizi.

ABSTRACT

MONITORING OF THE UNDERGROUND NATURAL GAS STORAGE FACILITY USING INSAR TECHNIQUES

Underground natural gas storage facilities are critical components of energy infrastructure, ensuring energy security by balancing seasonal fluctuations in natural gas demand. During periods of low demand, natural gas is injected into underground reservoirs, whereas during periods of high consumption it is withdrawn to maintain a continuous energy supply. However, these cyclic injection and withdrawal operations cause significant variations in reservoir pressure, which may induce measurable surface deformation over time. Therefore, long-term monitoring of ground movements around underground natural gas storage facilities is essential for reservoir safety, infrastructure integrity, and environmental sustainability. In this study, surface deformation surrounding the Tuz Gölü Underground Natural Gas Storage Facility, one of Türkiye's most important energy infrastructures, was investigated using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) time-series analysis covering the period from 2018 to 2025.

The primary objective was to determine the effects of natural gas storage operations within salt caverns on surface deformation and to identify the mechanisms controlling the observed ground movements. A total of 1,156 Sentinel-1 SAR images acquired from both ascending and descending orbits were processed using the Small Baseline Subset (SBAS) technique. Atmospheric phase delays were corrected using ERA5 reanalysis data. Furthermore, ascending and descending observations were jointly analyzed to decompose the deformation into vertical and horizontal displacement components. The resulting deformation velocity maps and time-series analyses revealed significant surface deformation around the storage facility. Vertical deformation of up to approximately 6 cm/year was detected in areas surrounding the underground storage caverns. The component decomposition indicated that vertical displacement constitutes the dominant deformation component, while horizontal displacement remains comparatively limited. Time-series analyses conducted at representative monitoring points demonstrated a clear temporal correspondence between surface deformation and natural gas injection–withdrawal cycles. In particular, subsidence accelerated during periods of intensive gas withdrawal, whereas deformation rates decreased or slight uplift was observed during gas injection periods. To investigate the factors controlling surface deformation, InSAR-derived time series were compared with natural gas storage volumes, groundwater levels, precipitation, temperature, and atmospheric pressure records. This integrated approach enabled a comprehensive assessment of both operational and environmental influences on the observed deformation. Pearson and Spearman correlation analyses were performed to quantify the relationships among the investigated parameters. Initial analyses indicated strong correlations between groundwater levels and surface deformation. However, because both datasets exhibited similar long-term decreasing trends, detrending analysis was applied to distinguish genuine physical relationships from trend-driven correlations. Following detrending, the correlations between groundwater levels and deformation decreased substantially, whereas the relationship between natural gas storage volumes and deformation remained evident. These findings indicate that the observed surface deformation is primarily controlled by reservoir pressure variations associated with natural gas injection and withdrawal operations. Overall, the results demonstrate that reservoir pressure changes represent the dominant mechanism governing surface deformation at the Tuz Gölü Underground Natural Gas Storage Facility, while groundwater fluctuations and other environmental variables play a secondary role. By integrating multi-temporal InSAR analysis with operational and environmental datasets, this study provides a comprehensive and practical framework for monitoring underground natural gas storage facilities and supports their safe and sustainable long-term management.

Keywords: ground surface deformation, interferometric synthetic aperture radar, time series analysis, underground natural gas storage facility.

GÖRSEL-DİL MODELLERİ ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ İHA GÖRÜNTÜLERİNDEN KENTSEL ENVANTERİ ÇIKARABİLİR Mİ? YOLO-WORLD VE SAM 3 KARŞILAŞTIRMASI

Batuhan KILIÇ[1], Onur Can BAYRAK[2]

[1]Dr., Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, batuhankilic@firat.edu.tr
[2]Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, onurcb@yildiz.edu.tr

ÖZET

Kentsel mekânın güncel, ayrıntılı ve konumsal doğruluğu yüksek envanteri; kent planlaması, altyapı ve varlık yönetimi, kaçak yapı denetimi ile afet hazırlığı açısından kritik öneme sahiptir. İnsansız hava aracı (İHA) ile üretilen çok yüksek çözünürlüklü (yer örnekleme aralığı, YÖA ≈ 1–5 cm) uydu görüntüleri, kentsel nesnelerin ayrıntılı biçimde konumlandırılmasına ve belgelenmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu verilerden otomatik envanter çıkarımı, denetimli öğrenme yöntemlerinin sınıfa özgü etiketli veri gereksinimi nedeniyle sınırlıdır; bu yöntemler yalnızca eğitim verisindeki tanımlı sınıfları kapsamakta, güncel veya az temsil edilen kentsel nesne türlerine genellenebilmesi için kapsamlı yeniden etiketleme ve eğitim gerektirmektedir. Bu çalışmada, sınıfa özgü yeniden eğitim gerektirmeden doğal dil komutlarıyla çalışabilen görsel-dil temelli temel modellerin kentsel envanter çıkarımındaki başarısı incelenmiştir. Açık kelime dağarcıklı nesne tespiti için gerçek zamanlı You Only Look Once-World (YOLO-World), açık kelime dağarcıklı semantik segmentasyon için ise yeni nesil bir temel model olan Segment Anything Model 3 (SAM 3) kullanılmış; bina, yol ve yeşil alan gibi alansal örtü sınıfları ile ağaç, araç ve kentsel alan sınıfı gibi ayrık nesneler üzerinde karşılaştırmalı doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre SAM 3, bina sınıfında %84,8, yol sınıfında %77,6 ve yeşil alan sınıfında %74,2 IoU değerleriyle yüksek başarım sağlamıştır. Nesne tespitinde araç sınıfı her iki yöntemde de yüksek doğruluğa (AP50 sırasıyla %77,6 ve %92,1) ulaşırken, geometrik ve anlamsal olarak heterojen bir sınıf olan kentsel alan nesnesi kategorisinde doğruluk belirgin şekilde düşük kalmıştır (AP50 sırasıyla %7,2 ve %11,5). Bulgular, görsel-dil modellerinin İHA görüntülerinden kentsel envanter çıkarımında dikkate değer bir potansiyel taşıdığını, buna karşın küçük ve semantik açıdan karmaşık düzende bulunan nesnelerde komut mühendisliği ve sonrası filtreleme adımlarını zorunlu kıldığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: açık kelime dağarcığı, görsel-dil modeli, kentsel envanter, obje tespiti, semantik segmentasyon

ABSTRACT

CAN VISION-LANGUAGE MODELS EXTRACT URBAN INVENTORY FROM VERY HIGH-RESOLUTION UAV IMAGERY? A COMPARISON OF YOLO-WORLD AND SAM 3

Up-to-date, detailed and positionally accurate inventories of urban space are of critical importance for city planning, infrastructure and asset management, the monitoring of unauthorized construction, and disaster preparedness. Very high resolution imagery acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs), with ground sampling distances (GSD) of approximately 1–5 cm, allows urban objects to be located and documented in fine detail. The automated extraction of inventories from such data, however, remains constrained by the class-specific labelled data that supervised learning methods require: these methods cover only the classes defined in the training data, and generalizing them to emerging or under-represented urban object types entails extensive re-annotation and retraining. This study examines the performance of vision-language foundation models, which operate through natural language prompts and require no class-specific retraining, in urban inventory extraction. You Only Look Once-World (YOLO-World) was employed for real-time open-vocabulary object detection and Segment Anything Model 3 (SAM 3), a next-generation foundation model, for open-vocabulary semantic segmentation. Comparative accuracy analyses were carried out on areal cover classes such as buildings, roads and green spaces, as well as on discrete objects including trees, vehicles and urban objects. SAM 3 achieved a strong performance, with IoU values of 84.8% for buildings, 77.6% for roads and 74.2% for green spaces. In object detection, the vehicle class reached high accuracy with both methods (AP50 of 77.6% and 92.1%, respectively), whereas accuracy remained markedly low for the urban object category, which is heterogeneous in both geometric and semantic terms (AP50 of 7.2% and 11.5%, respectively). The findings indicate that vision-language models hold considerable promise for urban inventory extraction from UAV imagery, while also showing that small and semantically complex objects make prompt engineering and post-processing filtering steps indispensable.

Keywords: object detection, open vocabulary, semantic segmentation, urban inventory, vision-language model

1. GİRİŞ

Kentsel mekân, sürekli ve hızlı bir dönüşüm içindedir; bu dinamizm, kentsel varlıklara ilişkin güncel ve konumsal doğruluğu yüksek envanter bilgisine olan gereksinimi kalıcı biçimde artırmaktadır. Bina, yol ve yeşil alan gibi alansal örtü sınıflarının yanı sıra ağaç, araç ve kentsel alan öğeleri (aydınlatma direği, rögar kapağı, trafik levhası vb.) gibi

ayrık nesnelerin konumu ve niteliği; kent planlaması, altyapı ve varlık yönetimi, kaçak yapı denetimi ile afet öncesi/sonrası değerlendirmeler için temel girdi oluşturmaktadır. İHA platformlarıyla elde edilen çok yüksek çözünürlüklü görüntüler, ticari uydu ve klasik hava fotoğraflarına kıyasla belirgin ölçüde yüksek bir ayrıntı düzeyi sunmakta ve söz konusu nesnelerin santimetre ölçeğinde ayırt edilmesine ve belgelenmesine olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, geleneksel denetimli öğrenme tabanlı nesne tespiti ve segmentasyon yöntemleri, yalnızca eğitim verisinde yer alan önceden tanımlanmış sınıfları hedef almakta; güncel veya az temsil edilen kentsel nesne tipleri üzerinde genelleyebilmek için maliyetli ve zaman alıcı bir yeniden etiketleme ve eğitim süreci gerektirmektedir. Son yıllarda, büyük ölçekli görüntü-metin çiftleri üzerinde ön eğitilen görsel-dil modelleri (Vision-Language Model, VLM), bu darboğazı aşmaya yönelik güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır. CLIP benzeri karşıtsal hizalama üzerine kurulu bu modeller, görsel içeriği metinsel anlamla ortak bir gömülü uzayda eşleştirerek doğal dil komutlarıyla yönlendirilebilen açık kelime dağarcıklı (open-vocabulary) tespit ve segmentasyon yeteneği kazandırmaktadır. Böylece sınıfa özgü yeniden eğitim gerektirmeden isteğe bağlı metinsel kategorileri sıfır-örnekli (zero-shot) olarak tanıyabilmektedir (Feng vd., 2025; Tao vd., 2025).

Bu çalışmanın amacı, iki farklı temel model ailesini, gerçek zamanlı açık sözcük dağarcıklı bir tespit modeli olan YOLO-World (Cheng vd., 2024) ile yönlendirilebilir kavram segmentasyonu (promptable concept segmentation) yeteneği sunan yeni nesil SAM 3 modelini (Carion vd., 2025), çok yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinden kentsel alan envanterinin çıkarımı bağlamında karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Çalışma, herhangi bir sınıfa özgü eğitim yapılmaksızın, sıfır-örnekli temel modellerin kentsel dokümantasyonda ne ölçüde kullanılabilir olduğunu; alansal örtü sınıfları ile ayrık nesneler arasındaki başarım farklarını ve açık kelime dağarcıklı yaklaşımların pratik sınırlarını nicel olarak ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. KURAMSAL ALTYAPI VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1 Açık Kelime Dağarcıklı Nesne Tespiti

Açık kelime dağarcıklı nesne tespiti, nesne konumlandırma ile metinsel kavram hizalamasını birleştirerek eğitim sırasında görülmemiş sınıflara genelleme yapmayı hedefler. Bu alanın öncü çalışmalarından GLIP, nesne tespiti ile öbek konumlandırmayı (phrase grounding) ortak bir çerçevede birleştirmiş (Li vd., 2022a); RegionCLIP ise CLIP'in bölge düzeyindeki zayıf hizalamasını gidermek için bölge-metin eşleşmesine dayalı bir ön eğitim yaklaşımı önermiştir (Zhong vd., 2021). Etiketli veri kısıtını aşmaya yönelik olarak bilgi damıtımı (ViLD; Gu vd., 2022), görüntü düzeyli denetimle büyük dağarcık (Detic; Zhou vd., 2022), ve kelimeyle zenginleştirilmiş paralel ön eğitim (DetCLIP; Yao vd., 2022) gibi stratejiler geliştirilmiştir. Sonraki çalışmalar; dondurulmuş VLM'ler üzerine tespit (F-VLM; Kuo vd., 2023), bölge-kelime hizalaması (CoDet; Ma vd., 2023), erken yoğun hizalama (EdaDet; Shi ve Yang, 2023), komut öğrenme (DetPro; Du vd., 2022), bölge-farkında ön eğitim (RO-ViT; Kim vd., 2023), doğrusal sınıflandırma (LP-OVOD; Pham vd., 2024), ve komut güdümlü dönüştürücüler (Prompt-OVD; Song ve Bang, 2023) gibi çeşitli yönelimleri kapsamıştır. Görsel-dönüştürücü (Vision Transformer, ViT) tabanlı OWL-ViT (Minderer vd., 2022) ve onun kendi kendine eğitimle ölçeklenen sürümü OWLv2 (Minderer vd., 2023) ile transformer temelli Grounding DINO (Liu vd., 2024) bu ailenin güçlü örneklerindendir. Bu çalışmada tespit için tercih edilen YOLO-World ise YOLO mimarisini açık sözcük dağarcıklı yeteneklerle donatarak gerçek zamanlı çıkarım sağlamaktadır (Cheng vd., 2024).

2.2 Açık Kelime Dağarcıklı ve Sıfır-Örnekli Semantik Segmentasyon

Piksel düzeyinde açık kelime dağarcıklı anlayış, dil güdümlü segmentasyonu bir sınıflandırma yerine karşıtsal hizalama problemi olarak ele alan LSeg ile ivme kazanmıştır (Li vd., 2022b). Önerilen maskeleri sınıflandırmak için önceden eğitilmiş VLM'lerden yararlanan iki-akışlı temel yaklaşımlar (Xu vd., 2022; Ding vd., 2022) zamanla ondalık maske-sınıf etkileşimini iyileştiren yöntemlere (DeOP; Han vd., 2023), ve maliyet toplama tabanlı uyarlamaya (CAT-Seg; Cho vd., 2024) evrilmiştir. Dondurulmuş CLIP üzerine yan-adaptör ağı (SAN; Xu vd., 2023), tek donmuş evrişimli CLIP (FC-CLIP; Yu vd., 2023), basit kodlayıcı-çözücü (SED; Xie vd., 2024), ve gömme dengeleme (EBSeg; Shan vd., 2024) bu yönelimin çeşitliliğini yansıtmaktadır. Sıfır-örnekli segmentasyon tarafında ise MaskCLIP (Ding vd., 2023), ZegCLIP (Zhou vd., 2023), SegCLIP (Luo vd., 2023), evrensel sıfır-örnekli segmentasyon için ilkel üretim (PADing; He vd., 2023), kademeli gömme hizalaması (Cascade-CLIP; Li vd., 2024) ve yalnızca görüntü-metin çiftlerinden metne dayalı maske üretimi (TCL; Cha vd., 2023) öne çıkan çalışmalardır. Bu birikim, alansal örtü sınıflarının dağarcık-bağımsız biçimde segmentasyonu için olgunlaşmış bir kuramsal ve yöntemsel zemin sağlamaktadır.

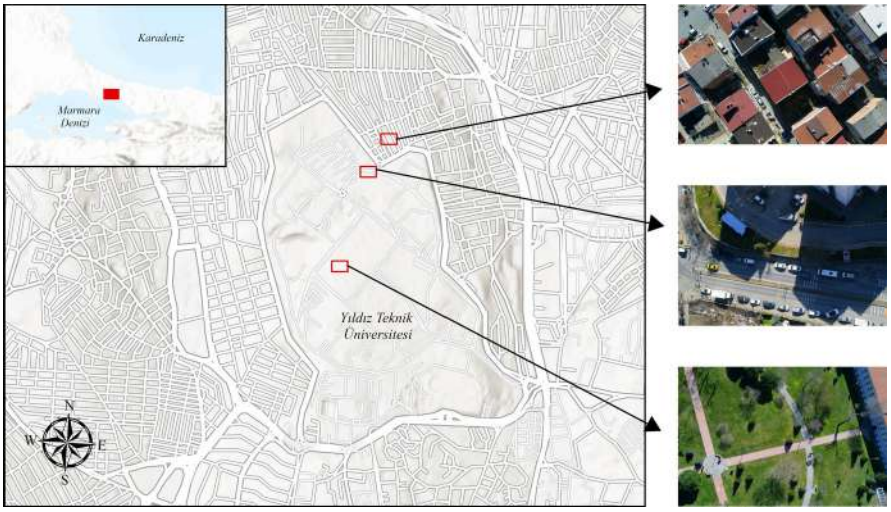
2.3 Uzaktan Algılama ve İHA Görüntülerinde Görsel-Dil Modelleri

Görsel-dil modellerinin doğal görüntülerdeki başarısı, bu modellerin uzaktan algılama alanına uyarlanmasını hızlandırmıştır. Ancak bakış açısı, ölçek ve nesne dağılımı bakımından ortaya çıkan alan farkı (domain gap), doğrudan aktarımı sınırlamakta ve alana özgü çözümler gerektirmektedir. Çok algılayıcılı görüntü anlama için EarthGPT (Zhang vd., 2024) ile uzaktan algılamaya özgü diyalog yeteneği kazandıran GeoChat (Kuckreja vd., 2024) bu yönelimin öncüleridir. Modellerin coğrafi görevlerdeki başarımını sistematik biçimde ölçmek için GEOBench-VLM (Danish vd., 2025) ve hava görüntülerinden üç boyutlu coğrafi akıl yürütmeyi değerlendiren Geo3DVQA (Tsujimoto vd., 2026) gibi ölçütler geliştirilmiştir. Kentsel ölçekte ise çok görünümlü eşgüdümlü modelleme (CityVLM; Wang vd., 2026a) ve uydu görüntülerinden kentsel sosyo-anlamsal segmentasyon (Wang vd., 2026b) dikkat çekmektedir. İHA verisine özgü olarak; büyük dil ve görsel modellerini birleştiren LLVM-drone çerçevesi (Hu vd., 2025), görülmemiş kategorilerin çok görünümlü açık kelime dağarcıklı segmentasyonu (Huang vd., 2025) ve eğik bakış açısı ile aşırı ölçek değişimlerini ele alan İHA akıl yürütme segmentasyonu (PixDLM; Ke vd., 2026) önerilmiştir. İHA görüntülerinde açık kelime dağarcıklı tespiti derleyen çalışmalar da bu alanın hızla olgunlaştığını göstermektedir (Zhou vd., 2025). Buna karşın, santimetre ölçekli İHA görüntülerinden kentsel nesne envanterinin yeni nesil yönlendirilebilir kavram modelleriyle çıkarılması ve bu yaklaşımın gerçek zamanlı tespit yöntemleriyle karşılaştırılması görece az incelenmiştir. Bu çalışma, söz konusu boşluğa katkı sunmayı amaçlamaktadır.

3. VERİ VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma alanı, İstanbul'da yer alan Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Davutpaşa Kampüsü ile yakın çevresini kapsamaktadır (Şekil 1). Veri seti, İHA ile nadir bakışta elde edilmiş ve yaklaşık 1,3 cm YÖA'ya sahip çok yüksek çözünürlüklü görüntülerden oluşmaktadır. Alan içerisinde iki farklı nesne grubu ele alınmıştır. Birinci grup, "Bina", "Yol" ve "Yeşil alan" gibi sürekli ve homojen arazi yüzeylerinden oluşmaktadır. İkinci grup ise konumu ve sayısı kentsel envanter açısından önem taşıyan münferit unsurları kapsamakta olup "Ağaç" ve "Araç" sınıflarının yanı sıra elektrik direği, aydınlatma elemanı, trafo ve bilgilendirme/trafik levhası gibi öğeleri bir araya getiren heterojen bir "Kentsel Alan Nesnesi" sınıfını içermektedir. Etiketleme, sürekli yüzeyler için semantik segmentasyon, münferit unsurlar için ise nesne tespiti biçiminde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı ve örnek görüntüler

3.2 Görsel-Dil Tabanlı İş Akışı ve Doğruluk Ölçütleri

Önerilen iş akışında iki temel model, doğal dil komutlarıyla yönlendirilerek hazır (eğitimsiz) biçimde çalıştırılmıştır. Ayrık nesnelerin tespitinde YOLO-World modeline sınıf adları metinsel komut olarak verilmiş ve gerçek zamanlı açık kelime dağarcıklı tespit ile sınırlayıcı kutular üretilmiştir. Aynı ayrık nesneler, kısa isim öbeği komutlarıyla SAM

3'ün yönlendirilebilir kavram segmentasyonu kullanılarak da tespit edilmiş; böylece iki farklı temel model, tespit başarımı bakımından doğrudan karşılaştırılmıştır. Bina, yol ve yeşil alan gibi alansal örtü sınıflarının çıkarımında ise SAM 3'ün semantik segmentasyon çıktıları esas alınmıştır. SAM 3, bir kavrama ait tüm örnekleri tek bir komutla tespit edip maskeleyebilmesi ve kavram düzeyinde yönlendirilebilmesi bakımından, tekil nesne odaklı önceki SAM sürümlerinden ayrışmaktadır (Carion vd., 2025).

Nesne tespiti başarımı, 0,5 kesişim/birleşim (Intersection over Union, IoU) eşiğinde belirlenen doğru pozitif (TP), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) sayıları üzerinden hesaplanan kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru ile ortalama kesinlik (AP@0,5 ve AP@0,5–0,95) ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Semantik segmentasyon başarımı ise aynı ölçütlerin piksel düzeyindeki karşılıkları ve IoU değeri üzerinden ölçülmüştür. Sınıflar arası genel başarım, tespit için mAP, segmentasyon için mIoU değerleriyle sunulmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

SAM 3 ile gerçekleştirilen anlamsal segmentasyon sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur. Alansal örtü sınıfları içinde en yüksek başarım bina sınıfında elde edilmiş (IoU = 0,85; F1 = 0,92); bunu yol (IoU = 0,78) ve Yeşil alan (IoU = 0,74) sınıfları izlemiştir. Önplan sınıflarına ait ortalama IoU değeri 0,79 olup, arka plan dâhil edildiğinde ortalama 0,72 düzeyindedir. Bu sonuçlar, herhangi bir sınıfa özgü eğitim yapılmaksızın, doğal dil komutlarıyla çalışan bir temel modelin kentsel alansal örtü envanterini yüksek doğrulukla çıkarabildiğini göstermektedir. Yeşil alan sınıfında yüksek duyarlılığa (0,93) karşın görece düşük kesinlik (0,79), bu sınıfın ağaç gölgeleri ve karışık dokularla sınır bölgelerinde fazla-kestirime yatkınlığına işaret etmektedir.

Çizelge 1. SAM 3 ile semantik segmentasyon doğruluk değerleri (sınıf bazında)

Sınıf	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skor	IoU
Bina	0,947	0,891	0,918	0,848
Yol	0,908	0,843	0,874	0,776
Yeşil alan	0,789	0,926	0,852	0,742
Arka plan	0,723	0,665	0,693	0,530
Ortalama (önplan)	0,881	0,887	0,881	0,789

Ayrık nesnelerin tespitine ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Araç sınıfı, her iki modelde de en güvenilir biçimde tespit edilen sınıf olmuş; SAM 3 bu sınıfta AP@0,5 = 0,92 ile YOLO-World'ün 0,78 değerinin üzerine çıkmıştır. Ağaç sınıfında iki model arasındaki fark çok daha belirgindir: YOLO-World bu sınıfı büyük ölçüde ıskalamış (duyarlılık = 0,04; AP@0,5 = 0,01), buna karşılık SAM 3 önemli ölçüde daha yüksek başarım (duyarlılık = 0,58; AP@0,5 = 0,42) sağlamıştır. Kentsel alan nesnesi sınıfı ise her iki model için de en zorlu kategori olmuştur; düşük kesinlik değerleri ve çok sayıda yanlış pozitif (YOLO-World'de 56 referans nesneye karşılık 616 kestirim), açık sözcük dağarcıklı modellerin küçük ve semantik açıdan belirsiz nesnelerde aşırı-kestirime eğilimini ortaya koymaktadır. Sınıf ortalamalarında SAM 3 (mAP@0,5 = 0,49; mAP@0,5–0,95 = 0,23), YOLO-World'e (mAP@0,5 = 0,29; mAP@0,5–0,95 = 0,18) kıyasla üstün bulunmuştur.

Çizelge 2. YOLO-World ve SAM 3 ile nesne tespiti doğruluk değerlerinin karşılaştırması (@0,5 IoU eşiği)

Sınıf	Model	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skor	AP@0,5	AP@0,5–0,95
Ağaç	YOLO-World	0,318	0,038	0,067	0,015	0,008
	SAM 3	0,434	0,581	0,497	0,420	0,184
Araç	YOLO-World	0,322	0,830	0,464	0,776	0,493
	SAM 3	0,770	0,940	0,847	0,921	0,485
Kentsel alan nesnesi	YOLO-World	0,044	0,482	0,080	0,072	0,045
	SAM 3	0,049	0,339	0,086	0,115	0,031
Ortalama (mAP)	YOLO-World	–	–	–	0,287	0,182
	SAM 3	–	–	–	0,485	0,233

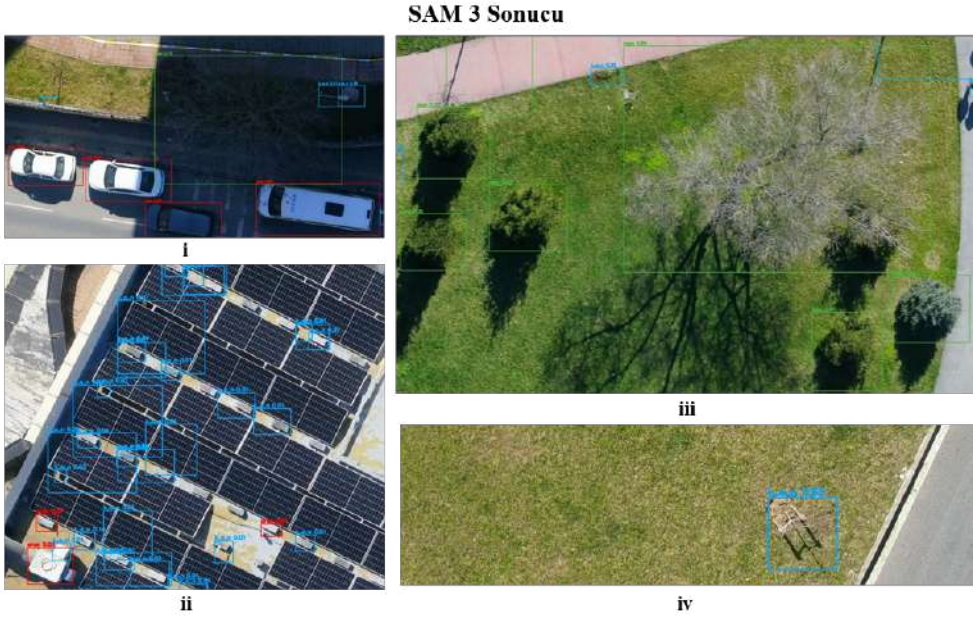
Şekil 2' de SAM 3 yöntemine ait örnek görsel sonuçlar gösterilmiştir. Buradaki örnekler, çalışmanın amacına uygun olacak şekilde farklı tip kentsel alan yapılarını temsil edecek biçimde seçilmiştir. Örneğin, Şekil 2-i gölgeli, kentsel alan nesnelerinin yoğun olduğu büyük bir bina ve çevresini; Şekil 2-ii kentsel yeşil alanların olduğu bir bölgeyi; Şekil 2-iii bitişik nizamlı yoğun bir yerleşim bölgesini; Şekil 2-iv ise kentsel alan nesnelerinin, gölge etkisinin, kentsel yeşil alanların ve bitişik nizamlı yapıların olduğu bütüncül bir bölgeyi temsil etmektedir.

Görsel sonuçlar etiketlerle kıyaslandığında hedef sınıflara ait segmentasyon işleminin etiketle örtüştüğünü ancak bina gölgelerinin altındaki Yol ve Yeşil Alan veya Arkaplan sınıflarının hatalı olarak sınıflandırıldığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak, Yol sınıfına ait pikseller de bu sınıf üzerindeki araç ve yayaların sınır bilgisini her ne kadar tamamen ayıramamış olsa da yol piksellerini ayırmıştır.



Şekil 2. SAM 3 ile semantik segmentasyona ait örnek görsel sonuçlar

Şekil 3' de ise YOLO-World' e göre daha yüksek AP@0,5 değerine ulaşan SAM 3' e ait nesne tespiti sonuçları yer almaktadır.



Şekil 3. SAM 3 ile nesne tespitindeki örnek görsel sonuçlar

Şekil 3-i' de Araç, Ağaç ve Kentsel Alan Nesnesi sınıfları başarıla tespit edilmiş olup Şekil 3-ii' de ise Kentsel Alan Nesnesi sınıfına ait olmayan güneş panellerinin tespiti; SAM 3 modelinin performansını önemli ölçüde azaltmıştır. 0,115 değerindeki AP@0,5 skorunun temel gerekçesi bu gibi durumlar olup SAM 3 modelinin doğrudan kullanımı için özelleştirilmesi gerektiğinin ayrı bir kanıtı niteliğindedir. Şekil 3-iii' de Ağaç sınıfındaki tespitler kentsel yeşil alanlarda bu yöntemlerin peyzaj işleri için kullanılabileceğini göstermekte iken Şekil 3-iv' de ağaçtaki herekten kaynaklanan hatalı sınıflandırma sonucu gibi örnekler modelin performansını düşürmüş olup 0,420 AP@0,5 gibi göreceli olarak düşük bir değerdeki sayısal sonucun elde edilmesini gerekçelendirmektedir.

Bulgular bütüncül olarak değerlendirildiğinde üç temel çıkarım öne çıkmaktadır. Birincisi, alansal örtü sınıfları (bina, yol, yeşil alan) SAM 3 ile herhangi bir ek eğitim gerektirmeden yüksek doğrulukla ayrılabilmekte; bu durum temel modellerin kentsel alansal envanter çıkarımında doğrudan kullanılabileceğini göstermektedir. İkincisi, ayrık nesne tespitinde başarım güçlü biçimde sınıfa bağımlıdır: belirgin geometriye ve yüksek karşıtlığa sahip araçlar güvenilir biçimde tespit edilirken, küçük ölçekli ve görsel açıdan heterojen kentsel donatı öğelerinde yüksek duyarlılığa karşılık oldukça düşük kesinlik elde edilmiştir. Kesinlik ile duyarlılık arasındaki bu dengesizlik, açık kelime dağarcıklı sistemlerin bilinen bir sınırlılığıdır (Feng vd., 2025; Zhou vd., 2025) ve komut mühendisliği, örnek tabanlı yönlendirme ile güven eşiğine dayalı filtreleme adımlarının gerekliliğine işaret etmektedir. Üçüncüsü, SAM 3'ün hem segmentasyon hem de tespit görevlerinde YOLO-World'e kıyasla daha tutarlı sonuçlar vermesi, iki görevi birleştiren ve kavram düzeyinde yönlendirilebilen temel modellerin kentsel dokümantasyon için umut verici bir yön oluşturduğunu düşündürmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çok yüksek çözünürlüklü İHA görüntülerinden kentsel alan envanterinin çıkarımında görsel-dil temelli iki temel model, YOLO-World ve SAM 3, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; nesne tespiti ve semantik segmentasyon doğrulukları birlikte incelenmiştir. SAM 3, alansal örtü sınıflarında ortalama 0,79'luk ön plan IoU değeriyle güçlü bir segmentasyon başarımı sergilemiş, ayrık nesne tespitinde ise YOLO-World'e kıyasla belirgin biçimde üstün sonuçlar vermiştir (mAP@0,5: 0,49'a karşı 0,29). Araç gibi geometrisi belirgin nesneler güvenilir biçimde çıkarılabilirken, kentsel alan öğeleri gibi küçük ölçekli ve semantik açıdan belirsiz nesneler her iki model için de en büyük zorluğu oluşturmuştur.

Bulgular, sınıfa özgü etiketli veri ve yeniden eğitim gerektirmeden çalışan temel modellerin kentsel envanter çıkarımı ve dokümantasyonu açısından dikkate değer bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Öte yandan küçük nesnelerde elde edilen düşük kesinlik değerleri, uygulamada komut mühendisliği, örnek tabanlı yönlendirme, güven eşiği ayarı ve son işlem filtrelemesi gibi iyileştirmeleri zorunlu kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda tespit ve segmentasyon başlıklarının birleştirilmesi, çok ölçekli değerlendirme, alana özgü ince ayar (fine-tuning), daha geniş bir kentsel nesne kümesi üzerinde doğrulama ve elde edilen çıktıların Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamına doğrudan aktarımı ele alınacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Yazarlar, Ülke Harita Mühendislik İnşaat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tüzel kişiliğine ve çalışanlarına İHA görüntülerinin toplanmasını sağladıkları için teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Carion, N., Gustafson, L., Hu, Y. T., Debnath, S., Hu, R., Suris, D., ..., ve Feichtenhofer, C., 2025. Sam 3: Segment anything with concepts. *arXiv preprint,* arXiv:2511.16719.

Cha, J., Mun, J., ve Roh, B., 2023. Learning to generate text-grounded mask for open-world semantic segmentation from only image-text pairs. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* syf: 11165-11174.

Cheng, T., Song, L., Ge, Y., Liu, W., Wang, X., ve Shan, Y., 2024. Yolo-world: Real-time open-vocabulary object detection. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, syf: 16901-16911.

Cho, S., Shin, H., Hong, S., Arnab, A., Seo, P. H., ve Kim, S., 2024. Cat-seg: Cost aggregation for open-vocabulary semantic segmentation. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* syf: 4113-4123.

Danish, M., Munir, M.A., Shah, S.R.A., Kuckreja, K., Khan, F.S., Fraccaro, P., ..., ve Khan, S., 2025. Geobench-vlm: Benchmarking vision-language models for geospatial tasks. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV),* syf: 7132-7142.

Ding, J., Xue, N., Xia, G. S., ve Dai, D., 2022. Decoupling zero-shot semantic segmentation. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 11583-11592.

Ding, Z., Wang, J., ve Tu, Z., 2023. Open-vocabulary universal image segmentation with maskclip. *arXiv preprint,* arXiv:2208.08984.

Du, Y., Wei, F., Zhang, Z., Shi, M., Gao, Y., ve Li, G., 2022. Learning to prompt for open-vocabulary object detection with vision-language model. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 14084-14093.

Feng, Y., Liu, Y., Yang, S., Cai, W., Zhang, J., Zhan, Q., Huang, Z., Yan, H., Wan, Q., Liu, C., Wang, J., Lv, J., Liu, Z., Shi, T., Liu, Q., ve Wang, Y., 2025. Vision-Language Model for Object Detection and Segmentation: A Review and Evaluation. *arXiv preprint,* arXiv:2504.09480.

Gu, X., Lin, T.Y., Kuo, W., ve Cui, Y., 2022. Open-vocabulary object detection via vision and language knowledge distillation. *arXiv preprint,* arXiv:2104.13921.

Han, C., Zhong, Y., Li, D., Han, K., ve Ma, L., 2023. Open-vocabulary semantic segmentation with decoupled one-pass network. *In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV),* syf: 1086-1096.

He, S., Ding, H., ve Jiang, W., 2023. Primitive generation and semantic-related alignment for universal zero-shot segmentation. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 11238-11247.

Hu, Y., Zhou, Y., Zhu, Z., Yang, X., Zhang, H., Bian, K., ve Han, H., 2025. LLVM-drone: A synergistic framework integrating large language models and vision models for visual tasks in unmanned aerial vehicles. *Knowledge-Based Systems*, 114190.

Huang, B., Li, J., Luan, W., Tan, J., Li, C., ve Huang, L., 2025. Expanding open-vocabulary understanding for uav aerial imagery: A vision–language framework to semantic segmentation. *Drones*, 9(2): 155.

Ke, S., Mei, Y., Wu, C., Zheng, Y., Ji, J., Cao, L., ve Ji, R., 2026. PixDLM: A Dual-Path Multimodal Language Model for UAV Reasoning Segmentation. *arXiv preprint,* arXiv:2604.15670.

Kim, D., Angelova, A., ve Kuo, W., 2023. Region-aware pretraining for open-vocabulary object detection with vision transformers. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 11144-11154.

Kuckreja, K., Danish, M.S., Naseer, M., Das, A., Khan, S., ve Khan, F.S., 2024. Geochat: Grounded large vision-language model for remote sensing. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 27831-27840.

Kuo, W., Cui, Y., Gu, X., Piergiovanni, A.J., ve Angelova, A., 2022. F-vlm: Open-vocabulary object detection upon frozen vision and language models. *arXiv preprint,* arXiv:2209.15639.

Li, L. H., Zhang, P., Zhang, H., Yang, J., Li, C., Zhong, Y., ..., ve Gao, J., 2022a. Grounded language-image pre-training. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* syf: 10965-10975.

Li, B., Weinberger, K.Q., Belongie, S., Koltun, V., ve Ranftl, R., 2022b. Language-driven semantic segmentation. *arXiv preprint,* arXiv:2201.03546.

Li, Y., Li, Z., Zeng, Q., Hou, Q., ve Cheng, M.M., 2024. Cascade-clip: Cascaded vision-language embeddings alignment for zero-shot semantic segmentation. *arXiv preprint,* arXiv:2406.00670.

Liu, S., Zeng, Z., Ren, T., Li, F., Zhang, H., Yang, J., ..., ve Zhang, L., 2024. Grounding dino: Marrying dino with grounded pre-training for open-set object detection. In *European conference on computer vision,* Cham: Springer Nature Switzerland, syf: 38-55.

Luo, H., Bao, J., Wu, Y., He, X., ve Li, T., 2023. Segclip: Patch aggregation with learnable centers for open-vocabulary semantic segmentation. *In International Conference on Machine Learning,* PMLR, syf: 23033-23044.

Ma, C., Jiang, Y., Wen, X., Yuan, Z., ve Qi, X., 2023. Codet: Co-occurrence guided region-word alignment for open-vocabulary object detection. *Advances in neural information processing systems*, 36, syf: 71078-71094.

Minderer, M., Gritsenko, A., Stone, A., Neumann, M., Weissenborn, D., Dosovitskiy, A., ..., ve Houlsby, N., 2022. Simple open-vocabulary object detection. *In European conference on computer vision,* Cham: Springer Nature Switzerland, syf: 728-755.

Minderer, M., Gritsenko, A., ve Houlsby, N., 2023. Scaling open-vocabulary object detection. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36, syf: 72983-73007.

Pham, C., Vu, T., ve Nguyen, K., 2024. Lp-ovod: Open-vocabulary object detection by linear probing. *In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV),* syf: 779-788.

Shan, X., Wu, D., Zhu, G., Shao, Y., Sang, N., ve Gao, C., 2024. Open-vocabulary semantic segmentation with image embedding balancing. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* syf: 28412-28421.

Shi, C., ve Yang, S., 2023. Edadet: Open-vocabulary object detection using early dense alignment. *In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision (ICCV),* syf: 15724-15734.

Song, H., ve Bang, J., 2023. Prompt-guided transformers for end-to-end open-vocabulary object detection. *arXiv preprint,* arXiv:2303.14386.

Tao, L., Zhang, H., Jing, H., Liu, Y., Yan, D., Wei, G., ve Xue, X., 2025. Advancements in Vision–Language Models for Remote Sensing: Datasets, Capabilities, and Enhancement Techniques. *Remote Sensing*, 17(1): 162.

Tsujimoto, M., Wang, J., Xuan, W., ve Yokoya, N., 2026. Geo3dvqa: Evaluating vision-language models for 3d geospatial reasoning from aerial imagery. *In 2026 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV),* IEEE, syf: 4994-5003.

Wang, J., Xuan, W., Qi, H., Chen, Z., Chen, H., Zheng, Z., ..., ve Yokoya, N., 2026a. CityVLM: Towards sustainable urban development via multi-view coordinated vision–language model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 232: 62-74.

Wang, Y., Wang, Y., Dai, R., Wang, Y., Liu, K., Chu, X., ve Li, Y., 2026b. Urban socio-semantic segmentation with vision-language reasoning. *arXiv preprint,* arXiv:2601.10477.

Xie, B., Cao, J., Xie, J., Khan, F. S., ve Pang, Y. 2024. Sed: A simple encoder-decoder for open-vocabulary semantic segmentation. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 3426-3436.

Xu, M., Zhang, Z., Wei, F., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., ve Bai, X., 2022. A simple baseline for open-vocabulary semantic segmentation with pre-trained vision-language model. *arXiv preprint,* arXiv:2112.14757.

Xu, M., Zhang, Z., Wei, F., Hu, H., ve Bai, X., 2023. Side adapter network for open-vocabulary semantic segmentation. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 2945-2954.

Yao, L., Han, J., Wen, Y., Liang, X., Xu, D., Zhang, W., ..., ve Xu, H., 2022. Detclip: Dictionary-enriched visual-concept paralleled pre-training for open-world detection. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, syf: 9125-9138.

Yu, Q., He, J., Deng, X., Shen, X., ve Chen, L.C., 2023. Convolutions die hard: Open-vocabulary segmentation with single frozen convolutional clip. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36, syf: 32215-32234.

Zhang, W., Cai, M., Zhang, T., Zhuang, Y., ve Mao, X. 2024. EarthGPT: A universal multimodal large language model for multisensor image comprehension in remote sensing domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-20.

Zhong, Y., Yang, J., Zhang, P., Li, C., Codella, N., Li, L. H., ..., ve Gao, J., 2021. Regionclip: Region-based language-image pretraining. *arXiv preprint,* arXiv:2112.09106.

Zhou, X., Girdhar, R., Joulin, A., Krähenbühl, P., ve Misra, I., 2022. Detecting twenty-thousand classes using image-level supervision. *In European conference on computer vision,* Cham: Springer Nature Switzerland, syf: 350-368.

Zhou, Z., Lei, Y., Zhang, B., Liu, L., ve Liu, Y. 2023. Zegclip: Towards adapting clip for zero-shot semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR),* syf: 11175-11185.

Zhou, Y., Li, J., Congyang, O., Yan, D., Haokui, Z., ve Xizhe, X., 2025. Open-vocabulary object detection in UAV imagery: A review and future perspectives. *Drones*, 9(8): 557.

MOBİL HARİTALAMA TEKNOLOJİLERİ KULLANILARAK MEZARLIK BİLGİ SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI VE CBS ENTEGRASYONU

Can Ekin Yıldız[1], Hüseyin Candan[2], Savaş Çolak[2], Özge Tuştaş Dalgıç[1], Doğukan Ünlü[2], Kayra Çelikkaya[2], Murat Tuna Gürbüz[1]

[1] ESC Mühendislik A.Ş., Adana, Türkiye
[2] İntelli Yazılım A.Ş., Ankara, Türkiye

ÖZ

Mezarlık alanları, belediyelerin uzun dönemli olarak yönetmek, güncel tutmak ve sürdürülebilir biçimde işletmekle yükümlü olduğu önemli kentsel envanter alanlarından biridir. Mezar yerlerinin doğru konumlandırılması, defin süreçlerinin planlanması, mevcut mezarların izlenmesi ve vatandaşlara sunulan mezar sorgulama hizmetlerinin etkili bir biçimde yürütülmesi için günce ve güvenilir mekansal verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel metodlar ile yapılan mezarlık envanter çalışmalarının, zaman ve iş gücü gerektiren süreçlerden oluşması özellikle büyük ölçekli mezarlıklarda veri bütünlüğü ve güncelliğin sürdürülebilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, mobil haritalama teknolojilerinden yararlanılarak üç boyutlu nokta bulutu ve 360º panoramik görüntülerin birlikte toplanması ve bu verilerin Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı bir Mezarlık Bilgi Sistemi ile bütünleştirilmesi ele alınmıştır.

Elde edilen veriler kullanılarak mezar yerleri, mezarlık sınırları, yollar, idari yapılar, çeşme, bank, çöp kovası gibi envanterler sayısallaştırılmış ve mekansal ve sözel veriler bir CBS veri modeli içerisinde ilişkilendirilerek bütünleşik bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında geliştirilen web tabanlı Mezarlık Bilgi Sistemi ile mekansal veriler, panoramik görüntüler ve öznitelik bilgilerinin tek bir platform üzerinden yönetilmesi sağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, mobil haritalama teknolojilerinin büyük ölçekli mezarlık alanlarında hızlı veri toplama, kapsamlı arşiv oluşturma, envanter üretimi ve CBS entegrasyonu açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi Bilgi Sistemleri, Envanter Yönetimi, Mezarlık Bilgi Sistemi, Mobil Haritalama

ABSTRACT

Cemetery areas are among the important urban inventory assets that municipalities are responsible for managing, maintaining up to date, and operating sustainably over the long term. Accurate and reliable spatial data are required for the precise positioning of burial plots, planning burial processes, monitoring existing graves, and effectively providing grave inquiry services to citizens. Cemetery inventory studies conducted using traditional methods involve time- and labor-intensive processes, making it difficult to maintain data integrity and currency, particularly in large-scale cemeteries.

This study addresses the integrated collection of three-dimensional point clouds and 360° panoramic imagery using mobile mapping technologies, and the integration of these data into a Geographic Information System (GIS)-based Cemetery Information System.

Using the collected data, burial plots, cemetery boundaries, roads, administrative buildings, fountains, benches, waste bins, and other inventory elements were digitized. Spatial and attribute data were associated within a GIS data model, resulting in the creation of an integrated database.

The web-based Cemetery Information System developed within the scope of the study enables the management of spatial data, panoramic imagery, and attribute information through a single platform.

The results demonstrate that mobile mapping technologies offer significant advantages in terms of rapid data collection, comprehensive archiving, inventory generation, and GIS integration in large-scale cemetery areas.

Keywords: Cemetery Information System, Geographic Information Systems, Inventory Management, , Mobile Mapping

1. GİRİŞ

Mezarlıklar, yalnızca defin işlemlerinin gerçekleştirildiği alanlar olmayıp aynı zamanda belediyelerin uzun süreli olarak yönetmek, güncel tutmak ve çeşitli idari süreçler kapsamında takip etmek durumunda olduğu önemli kentsel envanter alanlarıdır. Etkin bir yönetim için mezar yerlerinin mekansal ve öznitelik bilgilerinin doğru biçimde kayıt altına alınması ve bu bilgilerin güncel tutulması gerekmektedir (Kocaman, 2012; Akar ve Yetgin, 2018).

Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen mezarlık envanter çalışmaları çoğunlukla arazi ölçmeleri, manuel veri toplama, mevcut kayıtların güncellenmesi ve saha kontrollerine dayanmaktadır. Bu işlemler, çalışma alanının büyüklüğüne ve envanter yoğunluğuna bağlı olarak önemli miktarda zaman ve iş gücü gerektirebilmektedir. Özellikle geniş alanlara yayılan mezarlıklarda her bir mezar için konumsal ve sözel bilgilerin birlikte yönetilmesi, geleneksel yöntemlerin operasyonel açıdan yetersiz kalmasına neden olabilmektedir (Kocaman, 2012; Akar ve Yetgin, 2018).

Coğrafi Bilgi Sistemleri, bu tür problemlerin çözümünde mekansal ve sözel verilerin aynı veri altyapısı içerisinde bütünleşik olarak yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Mezarlık bilgi sistemleri aracılığı ile mezar yerlerinin konumlarının sorgulanması, defin süreçlerinin planlanması, boş mezar alanlarının belirlenmesi, envanter yönetimi ve karar destek süreçlerinin yürütülmesi mümkün hale gelmektedir (Akar ve Yetgin, 2018). Bu nedenle mezarlık yönetiminde dijital veri üretimi ve CBS tabanlı uygulamaların kullanımı giderek önem kazanmaktadır.

Mobil haritalama sistemlerinin gelişmesiyle birlikte büyük alanların kısa sürede üç boyutlu olarak taranması ve yüksek çözünürlüklü panoramik görüntülerle birlikte toplanması mümkün hale gelmiştir. LiDAR teknolojisine dayalı üç boyutlu nokta bulutu üretimi ile 360º panoramik görüntülerin aynı veri toplama sürecinde elde edilebilmesi, özellikle karmaşık kentsel alanların sayısallaştırılmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Mobil haritalama teknolojilerinin kent bilgi sistemleri, yol envanteri ve altyapı yönetimi gibi farklı uygulama alanlarında kullanıldığı çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur (Zhang ve ark., 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, mobil haritalama teknolojileri kullanılarak bir mezarlık alanına ait üç boyutlu nokta bulutu ve 360º derece panoramik görüntü verilerinin elde edilmesi, bu veriler üzerinden mezarlık envanterinin oluşturulması ve elde edilen mekansal ve sözel verilerin web tabanlı bir Mezarlık Bilgi Sistemi içerisinde bütünleştirilmesidir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

Çalışma kapsamında yaklaşık 700.000 m2 büyüklüğünde ki 6 farklı mezarlık ele alınmıştır. Çalışma alanı içerisinde mezar yerlerinin yanı sıra yollar, idari yapılar, çeşmeler, banklar, çöp kutuları vb çeşitli kentsel donatı ve mezarlık envanteri bulunmaktadır.

Çalışmanın temel veri kaynaklarını mobil haritalama sistemi ile elde edilen üç boyutlu nokta bulutu ve 360o panoramik görüntüler oluşturmaktadır. Saha taraması sırasında bu iki veri türü eş zamanlı olarak elde edilmiş ve daha sonraki ofis çalışmalarında birlikte değerlendirilmiştir.

Sahada veri toplama işlemleri Alman NavVis VLX marka giyilebilir mobil haritalama cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerinde bulunan Velodyne marka iki LiDAR sensörünün toplam veri toplama kapasitesi sn'de 600.000 nokta atışı seviyesindedir (Şekil 1). Bu yüksek veri toplama kapasitesi, mezarlık alanındaki mezar geometrileri ve diğer envanter unsurlarının ayrıntılı biçimde kayıt altına alınmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 1. NavVis VLX mobil haritalama cihazı.

Proje kapsamında müşteri bilgi gizliliği gereklilikleri nedeniyle, çalışma alanını tanımlayacak ve müşteri bilgilerini işaret edecek ayrıntılı konum bilgileri paylaşılmamıştır.

3. YÖNTEM

Çalışmada veri üretim süreci; saha veri toplama, saha öncesi planlama, nokta bulutu prosesleri, mekansal veri üretimi, mevta bilgilerinin elde edilmesi, veri ilişkilendirme ve web tabanlı CBS entegrasyonu olmak üzere birbirini takip eden aşamalardan oluşturulmuştur.

3.1. Mobil Haritalama ile Saha Veri Toplama

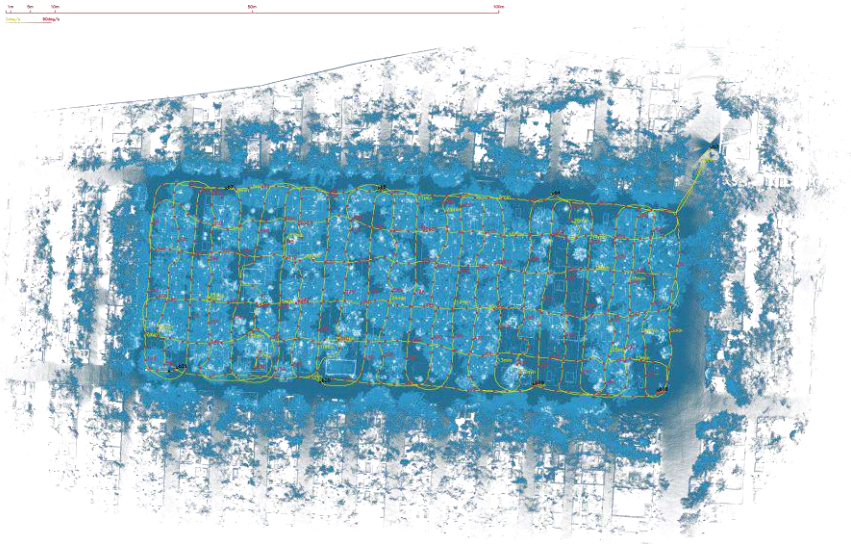
Çalışmanın ilk aşamasında yaklaşık 700.000 m2 toplam alana sahip 6 farklı mezarlık alanı NavVis VLX giyilebilir mobil haritalama cihazı ile taranmış, günlük ortalama 20.000 m2 tarama gerçekleştirilerek tüm saha çalışmaları 38 gün içerisinde tamamlanmıştır.

Saha çalışması esnasında nokta bulutu ve panoramik görüntüler eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Bu şekilde yalnızca mekansal veriler değil, çalışma alanındaki nesnelerin öznitelik bilgilerinin de arşivlenmesi sağlanmıştır.

Saha çalışmaları ilk olarak ofis ortamında planlanmış, sahanın fiziki durumuna göre bazı rota değişiklikleri yapılmıştır. Veri setleri 20-25 dakikalık parçalar halinde düzenlenmiştir.

3.2. Konumlandırma ve GPS Verilerinin Kullanımı

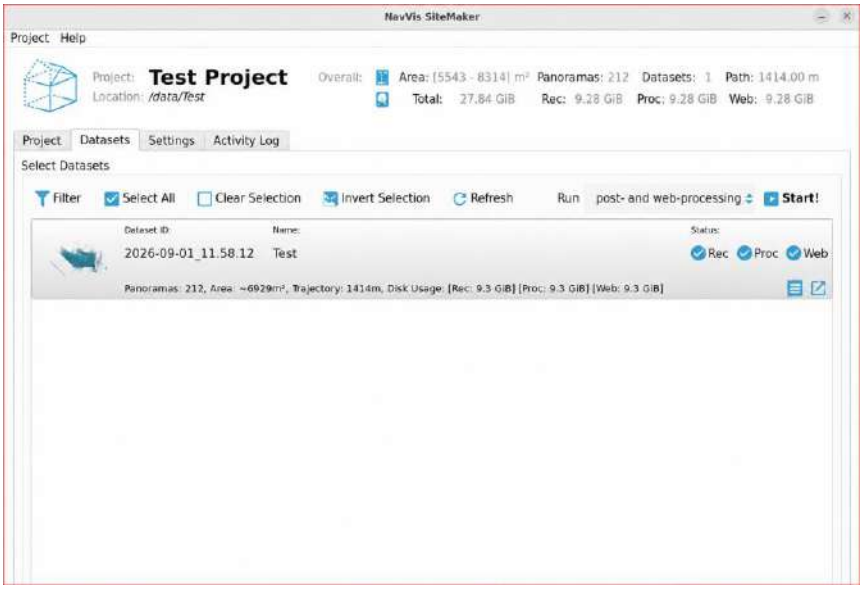
Mobil haritalama verilerinin konumlandırılması ve saha içerisinde tutarlı bir mekansal veri altyapısının oluşturulması amacıyla Core GPS verilerinden yararlanılmıştır. Bununla birlikte mezarlık alanlarının fiziksel koşulları ve sinyal bozucu elektrik hattı, trafo gibi etkenler sebebiyle bazı bölgelerde GPS sinyal sürekliliğinin sağlanmasında güçlüklerle karşılaşılmıştır. Ancak alınan çok sayıda GPS verisi ile tüm alanlar yüksek doğrulukla konumlandırılmıştır.



Şekil 2. Saha tarama çalışmaları sonucu elde edilen ve nokta bulutu, kontrol noktaları ve tarama alanını gösteren harita.

3.3. Veri İşleme (Proses) Aşaması

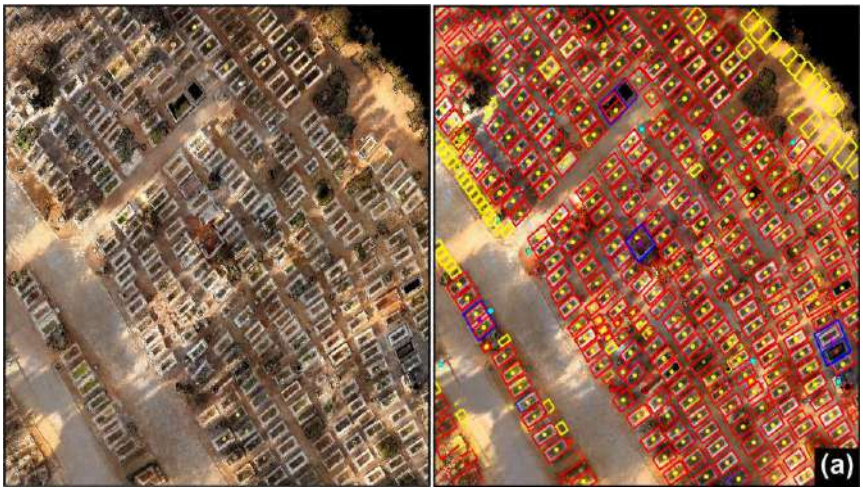
Saha çalışmaları ile eş zamanlı olarak verilerin sunuculara aktarılması gerçekleştirilmiş ve iNavVis On Prem Proses yazılımı ile veri işleme çalışmaları yapılmıştır (Şekil 3). Toplamda 40 günlük bir sürede tüm nokta bulutu ve panoramik görüntülerin işlenmesi ve konumlandırılması tamamlanmış, veri sayısallaştırma ve öznitelik bilgilerinin girilmesi için mekansal veri kaynağı haline getirilmiştir.



Şekil 3. NavVis On-Prem Veri İşleme yazılımı arayüzü.

3.4. Sayısallaştırma ve Öznitelik Bilgilerinin Toplanması

Proses işlemleri tamamlanan nokta bulutu verileri kullanılarak mezarlık alanlarında bulunan farklı envanter unsurları sayısallaştırılmıştır. Bu kapsamda mezar yerleri, mezarlık sınırları, yollar, idari yapılar, çeşmeler, banklar, çöp kutuları ve diğer envanter unsurları mekansal veri katmanları olarak oluşturulmuştur.



Mezar	Ad	Soyad	Cinsiyet	Doğum Tarihi 1 (Ü	Ölüm Tarihi 1 (Ebe	Doğum Tarihi 2 (Ü	Ölüm Tarihi 2 (Ö	Mezar Yeri	Mezar Taşı	Açıklama
	*****	*****	Erkek	18-12-20	03-01-21			Çocuk	Mermer	
	*****	*****	Kadın	01-01-03	04-10-23			Yetişkin	Mermer	
					?		?	Yetişkin	Beton	Mezar taşı yok
	*****	*****	Erkek	10-01-50	04-08-20			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek	02-05-90	16-07-06			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Kadın	01-10-28	28-05-06			Yetişkin	Mermer	
					?		?	Yetişkin	Taş	Mezar taşı yok
	*****	*****	Kadın		??.1981		??.2005	Yetişkin	Beton	
					?		?	Yetişkin	Beton	Mezar taşı okunamadı
	*****	*****	Kadın	28-01-46	07-01-06			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek		??.1922		?	Yetişkin	Mermer	Çalılardan dolayı okunamadı
					?		?	Yetişkin	Beton	Çalılardan dolayı okunamadı
	*****	*****	Erkek		?		?	Yetişkin	Mermer	Çalılardan dolayı okunamadı
	*****	*****	Erkek		24-12-06	??.1934		Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek	07-08-29	24-01-07			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Kadın		15-04-07	??.1933		Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek		?		?	Yetişkin	Mermer	Mezar taşı okunamadı
	*****	*****	Erkek		15-09-07	??.1942		Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek	12-04-63	27-09-07			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Kadın	07-11-02	01-06-08			Çocuk	Mermer	
	*****	*****	Erkek		24-12-16	??.1952		Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek	16-01-29	16-05-17			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Kadın	29-03-30	20-02-25			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Erkek		?		?	Yetişkin	Taş	
	*****	*****	Kadın		?		?.04.2007	Yetişkin	Mermer	Mezar taşı okunamadı
	*****	*****	Erkek	15-11-49	12-04-07			Yetişkin	Mermer	
	*****	*****	Kadın		26-03-06	?		Yetişkin	Mermer	
					?		?	Çocuk	Taş	Mezar taşı yok
	*****	*****	Erkek	29-09-35	18-02-07			Yetişkin	Mermer	

(b)



Şekil 4. Sayısallaştırma, veri üretim ve öznitelik bilgileri. (a) nokta bulutu ile sayısallaştırma, (b) panoramik görüntülerden toplanan mevta bilgileri, (c) panoramik görüntü

Elde edilen nokta bulutu verileri üçüncü parti yazılımlara aktarılmış; mezar poligonları ile diğer mezarlık envanterlerinin çizimleri bu veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Panoramik görüntüler ile sayısallaştırılmış mezara ait mevta bilgileri toplanmış ve mezar yeri-mevta ilişkisi kurulmuştur (Şekil 4).

Mevta kayıtları kapsamında ad, soyad, doğum tarihi, ölüm tarihi, cinsiyet, mezar yeri durumu, mezar numarası ve projede tanımlanan diğer ilgili alanlar değerlendirilmiştir.

6 aylık süren sayısallaştırma ve öznitelik toplama işlemleri sonucunda 127.000 mezar çizimi ve 138.000 adet mevta bilgisi oluşturulmuştur.

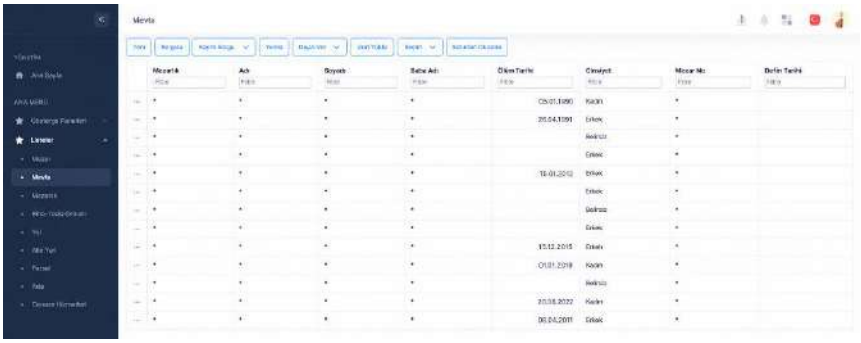
3.5. Web Tabanlı Mezarlık Bilgi Sistemi

Çalışmanın son aşamasında üretilen mekansal veriler ve ilgili öznitelik verileri, nokta bulutu ve panoramik görüntüler, proje kapsamında geliştirilen web tabanlı Mezarlık Bilgi Sistemi'ne aktarılmıştır (Şekil 5).



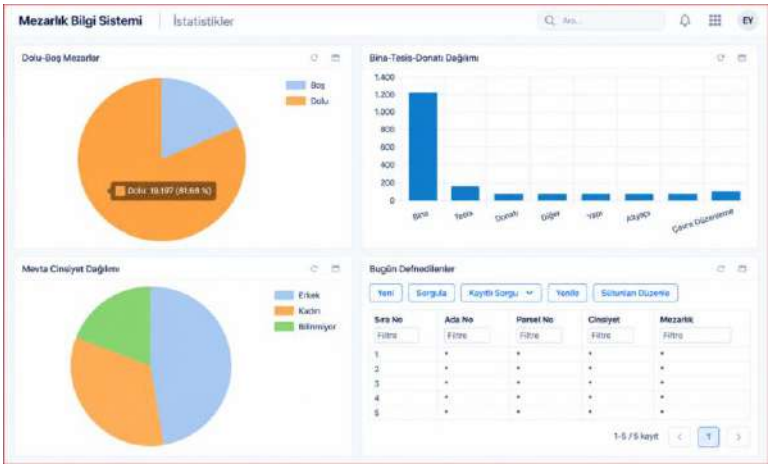
Şekil 5. Web tabanlı mezarlık bilgi sistemi yazılımı açılış sayfası.

Tüm verinin sisteme aktarılması 15 gün sürmüş ve böylece tüm çalışmanın kurumsal kullanıma açılması sağlanmıştır.



Şekil 6. Ana menü sayfası ve örnek mevta bilgileri sekmesi.

Sistem üzerinden kullanıcıların mezar yerlerini harita üzerinde görüntülemesi, ilgili mezara ait panoramik görüntülere erişmesi, mevta bilgilerini sorgulaması ve gerekli güncellemeleri gerçekleştirmesi, yeni mezar yeri çizim ve mevta bilgisi kaydetme işlemleri mümkün hale gelmiştir. Bunun yanında mezarlık içerisindeki aile yeri, yapı, donatı ve diğer envanter unsurları da sistem üzerinden izlenebilmekte ve güncellenebilmektedir (Şekil 6).



Şekil 7. İstatistik menüsü.

Web tabanlı bu sistem aynı zamanda kurumun mevcut Yönetim Bilgi Sistemi ile entegre çalışarak sistemin sadece mekansal boyutta kalmayıp aynı zamanda idari işlerde de kullanılabilirliğini sağlamıştır.



Şekil 8. Örnek harita ve panoramik görüntü.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, 700.000 m2 alana sahip 6 mezarlığın 38 gün gibi kısa bir sürede taranabilmiş olmasıdır. Klasik metodlarda 1 saat içerisinde 70-75 civarı mezarın köşe noktalarının koordinat bilgisi alınabilmekte, mevta bilgileri için ayrıca fotoğraf çekimi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmanın konusu olan mobil haritalama teknolojisi sayesinde 1 saat içerisinde ortalama 370 mezarın konumsal verisi toplanabilmekte ve mevta bilgileri için ilave bir çalışma ihtiyacı bulunmamaktadır. Bu da saha çalışma süresi olarak % 75'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir.

Ayrıca geleneksel yöntemlerde mezarlık envanterinin oluşturulması için farklı zamanlarda gerçekleştirilen saha kontrolleri ve manuel veri toplama işlemleri önemli miktarda iş günü gerektirmektedir. Mobil haritalama yaklaşımında ise geniş alanların tek bir saha çalışması kapsamında üç boyutlu nokta bulutu ve panoramik görüntülerle kayıt altına alınması, sonraki veri üretim çalışmalarının önemli ölçüde ofis ortamında yürütülmesine olanak sağlamaktadır.

Saha çalışmaları sonucunda yüksek yoğunluklu nokta bulutu verisi, konumsal olarak aynı hassaslıkta panoramik görüntüler ile bi raraya gelmiş ve dijital bir arşiv elde edilmiştir. Bu arşiv, sonraki süreçlerde gerçekleştirilen ofis

tabanlı veri üretim çalışmalarının temel kaynağını oluşturmuştur. Aynı zamanda yoğun nokta bulutu verisi, sayısallaştırma çalışmalarında hem mekansal hem de fiziksel doğruluk için önemli bir kriter olmaktadır.

Altı aylık sayısallaştırma dönemi sonunda:

- 127.000 adet mezar geometrisi
- 138.000 adet mevta öznitelik bilgisi

Oluşturularak sisteme aktarılmıştır.

Bunun yanı sıra, mezarlık sınırları, ada/parsel verileri, yollar, idari yapılar, çeşmeler, çöp kutuları ve diğer envanter unsurlarının da sisteme aktarılmasıyla yalnızca mezar yerlerini kapsayan bir veri seti yerine, bütünleşik bir mezarlık envanteri oluşturulmuştur. Klasik yöntemlerle, bu derece kapsamlı bir dijital arşiv oluşturmanın zamansal ve ekonomik açıdan maliyeti çok yüksek olmaktadır.

Üretilen tüm verilerin web tabanlı sistem üzerinde yönetilmesi sayesinde kurum personelinin mezarlık alanına ait mekansal ve sözel verilere tek bir platform üzerinden erişmesi sağlanmıştır. Kullanıcılar harita üzerinden mezar konumlarını görüntüleyebilmekte, ilgili panoramik görüntülere erişebilmekte ve her türlü sözel öznitelik bilgisini sorgulayabilmektedir.

Saha çalışmaları sırasında GPS sinyal kesintileri, mezarlık alanının bazı bölümlerindeki düzensiz mezar yerleşimi, mezarlık alanlarındaki yeşil alanların bakım durumu, saha çalışmasında karşılaşılan zorluklardır.

Bir diğer önemli tartışma konusu, veri üretim sürecinin standartlaştırılmasıdır. Farklı kullanıcılar tarafından gerçekleştirilen sayısallaştırma çalışmalarının ortak bir yazılım ve veri modeli üzerinden yürütülmesi, veri bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır. Web tabanlı Mezarlık Bilgi Sistemi sayesinde kurum personelinin takip, sorgulama ve veri güncelleme işlemleri daha düzenli ve hızlı biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mobil haritalama teknolojileri kullanılarak yaklaşık 700.000 m2 büyüklüğündeki 6 mezarlık alanının üç boyutlu nokta bulutu ve 360o panoramic görüntülerle sayısal olarak kayıt altına alınması ve elde edilen verilerin CBS tabanlı bir Mezarlık Bilgi Sistemi içerisinde bütünleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen veriler, NavVis On Prem proses yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen 30 günlük veri işleme çalışmalarının ardından ofis ortamında sayısallaştırılmış ve 15 günlük veri aktarım süreci ile web tabanlı sisteme kazandırılmıştır.

Toplamda 6 ay gibi kısa bir süre içerisinde 127.000 mezar, 138.000 mevta bilgisi ile mezarlık alanlarına ait mezarlık sınırı, ada/parsel, mezarlık yolları ve mezarlık envanteri sayısallaştırma çalışmaları tamamlanmış ve sisteme yüklenmiştir.

Proje deneyimine dayalı değerlendirmeye göre, geleneksel yöntemlere kıyasla saha çalışması süresinde % 75 oranında bir kazanç elde edilmiştir.

LiDAR sensörlerinden çıkan yoğun nokta bulutu verisi ile mezar geometrilerinin ve diğer envanterlerinin hem konum hem de fiziki tespitlerinin yüksek doğrulukla tamamlanmasını sağlamıştır. Yine aynı sistemin önemli bir parçası olarak panoramik görüntü elde edilmesi, mevta ve diğer öznitelik bilgilerinin ofis ortamında oluşturulmasını sağlamıştır.

Geliştirilen web tabanlı Mezarlık Bilgi Sistemi yazılımı ile, elde edilen tüm veriler bir CBS veri modeli içerisinde ilişkilendirilmiş ve kurum personelinin mezar sorgulama, takip, planlama ve veri güncelleme işlemlerini daha düzenli ve hızlı biçimde gerçekleştirmesini sağlamıştır.

Çalışmanın sonucunda mobil haritalama, 3 boyutlu nokta bulutu, panoramik görüntü, CBS ve web tabanlı yazılım teknolojilerinin birlikte kullanılmasının, mezarlık yönetiminde kapsamlı bir dijital dönüşüm altyapısı sağlayabildiği değerlendirilmiştir.

Geliştirilen yaklaşımın sadece mezarlık çalışmaları ile sınırlı kalmayıp, benzer veri toplama, sayısallaştırma ve web tabaklı bilgi sistemi uygulamalarının, kurumların diğer ihtiyaçları için de kullanılabileceği düşünülmektedir.

6. Kaynaklar

Akar, Ş., & Yetgin, D. (2018). Mezarlık Otomasyon Projesi. UZAL-CBS Bildiriler Kitabı. İstanbul Büyükşehir Belediyesi/İSBAK

Kocaman, S. (2012). Akıllı kent haritaları: Dinar Mezarlık Bilgi Sistemi örneği. Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Zhang, Y., Kang, J., & Sohn, G. (2023). PVL-Cartographer: Panoramic Vision-Aided LiDAR Cartographer-Based SLAM for Maverick Mobile Mapping System. Remote Sensing, 15(13), 3383.

DOCKER İLE KONUMSAL VERİ İŞLEME MİMARİSİ

Rıdvan ÖZTÜRK[1], Orhan KURT[2]

[1]Harita Mühendisi 41380, Umuttepe, Kocaeli, r10.ozturkridvan@gmail.com
[2]Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41380, Umuttepe, Kocaeli, orhan.kurt@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi'ndeki elektrikli araç şarj altyapısı ihtiyacını karşılamak ve transit güzergahlardaki menzil sorununu çözmek amacıyla, Docker konteynerizasyon teknolojisi ile ölçeklenebilir, izole bir konumsal veri işleme mimarisi geliştirilmiştir. Geleneksel donanım ve işletim sistemi bağımlılıklarını ortadan kaldıran bu modüler sistem; Python tabanlı otonom veri entegrasyonu, PostgreSQL/PostGIS destekli mekânsal veritabanı yönetimi ve QGIS tabanlı bir mimari sunmaktadır. Optimum yer seçimi için belirlenen eğim, ana yollara mesafe, enerji altyapısına yakınlık, nüfus yoğunluğu ve sosyal donatı alanları gibi yüksek hacimli mekânsal veriler, Analitik Hiyerarşi Süreci ve Çok Kriterli Karar Analizi ağırlıklarıyla bu veri hattı üzerinden dinamik olarak işlenmiştir. Konteyner ortamında çalışan veritabanı seviyesindeki topolojik indekslemeler, mekânsal SQL sorguları ve QGIS üzerindeki ağırlıklı doğrusal çakıştırma analizleri sonucunda bölge genelinde 150 optimum şarj istasyonu konumu üretilmiştir. Üretilen konumlara uygulanan 50 km yarıçaplı doğrusal tampon analizlerinde, transit güzergahların büyük bir oranının kapsandığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen bu yenilikçi ve platform bağımsız mimari, büyük mekânsal verilerin yüksek performansla işlenmesini güvence altına alarak, gelecekteki akıllı şehir ve ulaşım planlaması yatırımları için taşınabilir bir karar destek altyapısı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Docker, Konumsal Veri İşleme, PostGIS, Elektrikli Araç Şarj İstasyonu, Çok Kriterli Karar Analizi.

ABSTRACT

SPATIAL DATA PROCESSING ARCHITECTURE WITH DOCKER

In this study, to meet the electric vehicle charging infrastructure needs in the Marmara Region and address range anxiety on transit routes, a scalable, isolated spatial data processing architecture has been developed using Docker containerization. Eliminating traditional hardware and operating system dependencies, this modular system offers a comprehensive solution featuring Python-based autonomous data integration, PostgreSQL/PostGIS-supported spatial database management, and a QGIS-based platform. High-volume spatial data determined for optimal location selection, such as slope, distance to main roads, proximity to energy infrastructure, population density, and social amenity areas, were dynamically processed through this data pipeline using Analytic Hierarchy Process and Multi-Criteria Decision Analysis weights. As a result of database-level topological indexing running in the container environment, spatial SQL queries, and weighted linear overlay analyses on QGIS, 150 optimal charging station locations were generated across the region. Service area analyses with a 50 km linear buffer radius applied to the generated locations demonstrated that a significant portion of the transit routes is covered. By ensuring the high-performance processing of large spatial datasets, this innovative and platform-independent architecture provides a portable decision support infrastructure for future smart city and transportation planning investments.

Keywords: Docker, Spatial Data Processing, PostGIS, Electric Vehicle Charging Station, Multi-Criteria Decision Analysis.

1. GİRİŞ

Günümüzde konumsal veri, mühendislik projelerinde yalnızca bir yer belirleme aracı değil, karmaşık karar destek süreçlerinin temel bileşeni olarak kabul edilmektedir. Özellikle sürdürülebilir ulaşım stratejileri kapsamında elektrikli araç (EA) kullanımının küresel ölçekte artması, bu araçların enerji ihtiyacını karşılayacak şarj altyapılarının optimum lokasyonlarda tesis edilmesini zorunlu kılmaktadır. Şarj istasyonlarının konumlandırılması süreci; topoğrafik yapı (eğim), ulaşım ağlarına erişilebilirlik, nüfus yoğunluğu ve sosyal donatı alanlarına yakınlık gibi çok boyutlu kriterlerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren mekansal bir analiz problemidir.

Bu konum bilgileri ve çevresel kriterler, modern veri yönetim sistemlerinde ilişkisel mekansal veritabanları (PostGIS) ile saklanmakta ve katmanlı yapılar halinde işlenmektedir. Mevcut şarj altyapısı yatırımlarının büyük bir bölümü, anlık talebin yüksek olduğu şehir içi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Ancak, şehirler arası ulaşımda menzil sorunun ortadan kaldırılması ve kesintisiz bir transit akışın sağlanması için ana arterler ve otoyol ağları üzerindeki konumlandırma stratejileri kritik bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi devlet ve otoyol ağları üzerinde en uygun şarj istasyonu lokasyonlarının belirlenmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) tabanlı bir model önerilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem mimarisi; Python, Docker ve PostGIS teknolojileri kullanılarak bütünleşik bir konumsal veri işleme hattı üzerine kurgulanmıştır. Elde edilen veriler, QGIS ortamında tampon ve çakıştırma analizlerine tabi tutularak mevcut istasyonların konumsal dağılımı ile karşılaştırılmış; sayısal uygulama üzerinden tartışılarak sonuçlara gidilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin ulaşım ve lojistik açısından en yoğun aksını oluşturan Marmara Bölgesi'ndeki devlet ve otoyol ağları üzerinde, elektrikli araç şarj istasyonları için en uygun lokasyonların konumsal analiz yöntemleriyle belirlenmesidir. Çalışma, mevcut yatırımların şehir içi odaklı yapısını eleştirerek, transit ulaşım ağlarındaki menzil sorununu giderecek yeni bir konumsal modelleme sunmayı hedeflemektedir. Bu modelin oluşturulmasında, geleneksel manuel planlama yaklaşımları yerine, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile desteklenen Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) mekanizmaları kullanılmıştır. Çalışmanın mühendislik bilimine ve sektöre sunduğu en büyük önem; eğim, yola mesafe, nüfus ve sosyal donatı alanları gibi mekansal kriterlerin, Python, Docker ve PostGIS gibi modern açık kaynaklı sistemler üzerinde kurulan bütünleşik bir konumsal veri işleme mimarisi ile analiz edilmesidir. Bu yenilikçi mimari, yüksek hacimli mekansal verilerin hızlı, izole ve dinamik bir şekilde işlenmesine olanak tanıyarak gelecekteki akıllı şehir ve ulaşım planlaması projeleri için teknik bir altlık oluşturmaktadır

1.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmanın uygulama alanı olarak Türkiye'nin sosyo-ekonomik, sanayi ve demografik açıdan en yoğun bölgesi olan Marmara Bölgesi seçilmiştir. Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan stratejik konumu, bölgeyi yalnızca ulusal değil, uluslararası lojistik ve ulaşım ağlarının da merkezi haline getirmektedir. Kuzey Marmara Otoyolu, Anadolu Otoyolu (O-4) ve İstanbul-İzmir Otoyolu (O-5) gibi ana arterlerin yanı sıra Osmangazi ve Yavuz Sultan Selim gibi kritik köprü geçişlerini barındıran bölge, günlük araç hareketliliğinin ve transit geçişlerin en yüksek olduğu coğrafi alandır.

Elektrikli araç kullanım oranlarının ülke genelinde en yüksek paya sahip olduğu bu bölgede, mevcut şarj istasyonlarının büyük bir kısmı İstanbul, Bursa ve Kocaeli gibi metropollerin kent merkezlerinde toplanmıştır. Ancak bölge içindeki iller arası yoğun transit trafik ve sanayi bölgeleri arasındaki kesintisiz ulaşım ihtiyacı, otoyol güzergahlarındaki şarj altyapısı eksikliğini belirgin bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle Marmara Bölgesi, şehir içi yoğunlaşma ile transit otoyol eksikliği arasındaki konumsal dengesizliğin analiz edilebilmesi ve menzil endişesinin çözümü için geliştirilen konumsal veri işleme mimarisinin test edilmesi amacıyla en ideal çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

1.2 Konumsal Veri İşleme Süreçlerinde Docker Konteynerizasyonunun Rolü

Modern coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve konumsal yazılım geliştirme süreçlerinde karşılaşılan en büyük engellerden biri, işletim sistemi ve donanım farklılıklarından doğan kütüphane çakışmaları ve sürüm uyumsuzluklarıdır. Literatürde ve sektörde "benim bilgisayarımda çalışıyordu" problemi olarak bilinen bu durumu ortadan kaldırmak ve araştırmanın bilimsel tekrarlanabilirliğini kanıtlamak amacıyla, bu çalışmanın teknik omurgası tamamen Docker konteyner teknolojisi üzerine inşa edilmiştir.

Geleneksel, lisanslı ve monolitik CBS yazılımlarının aksine Docker; uygulamaları, işletim sistemi kütüphanelerini, sistem araçlarını ve çevresel ayarları "konteyner" adı verilen, birbirinden izole edilmiş sanal paketler halinde sunar.

Bu proje kapsamında geliştirilen konumsal veri mimarisinde, mekansal analizlerin yükünü çeken PostgreSQL (PostGIS) veritabanı ve veri dönüştürme işlemlerini üstlenen Python çalışma ortamı, tek bir docker-compose.yml dosyası üzerinden entegre bir şekilde ayağa kaldırılmıştır.

Bu yapılandırma sayesinde veritabanı portları, kullanıcı yetkilendirmeleri ve konumsal veri depolama alanları dinamik olarak, ana işletim sisteminden tamamen bağımsız bir şekilde tanımlanmıştır. Konteynerizasyon yaklaşımı, projenin taşınabilirliğini maksimize ederek, Marmara Bölgesi'ne ait büyük ölçekli ve yüksek boyutlu vektör verilerin (yol ağları, sosyal donatı alanları vb.) işlenmesinde donanım kaynaklarının (RAM, CPU) en verimli şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Docker mimarisi, ağır mekansal SQL sorguları ile Python tabanlı ETL (Extract, Transform, Load) süreçleri arasında kesintisiz ve yüksek performanslı bir veri akışı sağlayarak projenin analiz gücünü doğrudan artırmıştır.

1.3 Konumsal Veri İşleme Sistem Mimarisi

Çalışmanın sistem mimarisi, yüksek performanslı ve tekrarlanabilir bir analiz süreci sunmak amacıyla üç ana katman halinde Docker konteynerizasyon ortamında kurgulanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Konumsal Veri İşleme Mimarisi (Öztürk, 2026).

Temel sistemi oluşturan bu izole yapı sayesinde, projenin taşınabilirliği artırılarak donanım veya işletim sistemi bağımlılıkları tamamen ortadan kaldırılmıştır. Veri akış süreci, Uygulama Katmanında yer alan Python ile başlamaktadır ; burada GeoPandas ve Pandas kütüphaneleri kullanılarak karmaşık konumsal veriler otomatik olarak çekilir, temizlenir ve dönüştürülür. Analize hazır hale getirilen bu veriler doğrudan Veritabanı Katmanına, yani PostgreSQL ve PostGIS ortamına aktarılır. Bu aşamada yoğun ulaşım ve sosyal donatı verisi topolojik olarak indekslenir ve ST_Buffer, ST_Distance gibi mekansal SQL sorguları ile büyük bir hızla işlenir. Son olarak, veritabanında işlenen bu veriler kesintisiz bir akışla veri işleme ve görselleştirme katmanına, QGIS'e ulaşır. QGIS yazılımı üzerinde, önceden Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle belirlenmiş matematiksel ağırlıklar sisteme entegre edilir ve ağırlıklı doğrusal çakıştırma uygulanarak Marmara Bölgesi için optimum şarj istasyonu uygunluk haritaları elde edilir.

1.4 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Uygulaması ve Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Çalışmada, potansiyel şarj istasyonu alanlarının uygunluk derecelerini belirlemek amacıyla beş temel kriter kullanılmıştır: eğim,enerji ulaşılabilirliği,ana ulaşım ağlarına (devlet yolları ve otoyollar) mesafe, sosyal donatı alanlarına yakınlık ve nüfus yoğunluğu. AHP metodolojisi kapsamında, bu kriterlerin birbirlerine karşı üstünlükleri Saaty'nin 1-9 önem ölçeği kullanılarak değerlendirilmiş ve ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

Çalışmanın ana odak noktası transit ulaşım ağlarındaki menzil sorunun giderilmesi olduğundan, kriter ağırlıklandırılmasında klasik şehir içi analizlerinden farklı bir yaklaşım izlenmiştir. Bu doğrultuda, "ana yollara

mesafe" ve otoyol kenarlarındaki "sosyal donatı alanlarına yakınlık" kriterlerine en yüksek önem dereceleri atanırken, transit ulaşım için görece daha az kritik olan "nüfus yoğunluğu" kriterinin ağırlığı daha düşük tutulmuştur. İkili karşılaştırma matrisinin özvektör hesaplamaları sonucunda her bir kriterin nihai ağırlık yüzdesi elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmelerin mantıksal güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla Tutarlılık Oranı hesaplanmış ve bu değerin literatürde kabul edilebilir üst sınır olan 0.10 değerinin altında olduğu teyit edilmiştir.

1.5 Ağırlık Çakıştırma

Geliştirilen KKDS'de,farklı birimlere sahip olan raster katmanlar öncelikle normalize edilmiş ,AHP ile belirlenen ağırlık katsayıları kullanılarak ağırlıklı çakıştırma modeli kaynak alınmıştır. Her pikselin uygunluk skoru (S), denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S=\sum_{i=1}^{n} W_i \times C_i \times \prod_{j=1}^{m} R_j \quad (1)$$

Bu denklemede geçen diğer parametreler, W_i: i numaralı kritere ait AHP ağırlık katsayısı, C_i: R_i: i numaralı kriterin normalize edilmiş konumsal değerini, numaralı kısıtlayıcı faktörü (örneğin, bu yüzeyleri için 0, karalar için 1 olan Boolean maskesi), n: kriter sayısını (sayısal uygulamada 5 adet), m: kısıtlayıcı faktör sayısını ifade etmektedir.

1.6 Konumsal Analizler PostGIS ve QGIS Entegrasyonu

AHP aşamasında belirlenen kriter ağırlıkları, geliştirilen veri işleme mimarisi üzerinden mekansal katmanlara uygulanmıştır. İlgili veri setleri, Python betikleri aracılığıyla temizlenip dönüştürülerek (ETL süreçleri) Docker üzerinde çalışan PostGIS veritabanına yüklenmiştir. Mekansal ilişkilerin hızlı ve doğru bir şekilde kurulabilmesi için PostGIS ortamında topolojik düzeltmeler yapılmış ve konumsal indeksler oluşturulmuştur.

Konumsal analizlerin görselleştirilmesi ve çakıştırma (overlay) işlemleri için açık kaynak kodlu QGIS yazılımı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle Marmara Bölgesi otoyol ve devlet yolları katmanlarına farklı yarıçaplarda tampon (buffer) analizleri uygulanarak etki alanları belirlenmiştir. Ardından eğim, çekim merkezleri ve nüfus katmanları piksel tabanlı olarak yeniden sınıflandırılmış ve AHP ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı çakıştırma (Weighted Overlay) işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda bölge genelindeki optimum şarj istasyonu alanlarını gösteren uygunluk haritaları üretilmiştir. Analizin son aşamasında, üretilen bu model sonuçları ile halihazırda faaliyette olan mevcut elektrikli araç şarj istasyonlarının nokta verileri aynı koordinat sisteminde üst üste bindirilerek, mevcut yatırımların konumsal dağılımı sorgulanmıştır

2. SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde; karar kriterlerinin ağırlıklandırılması, konumsal analizler ve üretilen uygunluk haritaları sunulmaktadır. Ayrıca modelin önerdiği optimum şarj istasyonu lokasyonları, hizmet alanları ve mevcut istasyon altyapısıyla yapılan karşılaştırma sonuçları incelenmiştir Çalışma kapsamında belirlenen beş ana kriterin (eğim, yola mesafe, enerji altyapısına yakınlık, sosyal donatı alanları ve nüfus yoğunluğu) birbirlerine göre önem dereceleri, transit ulaşım dinamikleri dikkate alınarak puanlanmıştır. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi sonucunda en yüksek ağırlık değeri, çalışmanın temel hipotezi olan "transit otoyol ulaşımında menzil sorununun giderilmesi" prensibiyle doğru orantılı olarak "ana ulaşım ağlarına mesafe" kriterine atanmıştır(%42.5). İkinci en yüksek ağırlık (%27.3), istasyon kurulum maliyetlerini ve hızlı şarj (DC) kapasitesini doğrudan etkileyen "Enerji Altyapısına Yakınlık" kriterine verilmiştir. Bunu sırasıyla kullanıcılar için vakit geçirecekleri "Sosyal Donatı Alanları" (%17.7), inşaat zorluklarını ifade eden "Topoğrafik Eğim" (%8.4) ve transit geçişte daha az kritik rol oynayan "Nüfus Yoğunluğu" (%4.2) izlemiştir. Kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 1'de sunulmuştur (Çizelge 1).

Geliştirilen modelde en yüksek ağırlığa sahip olan ulaşım ağı verileri, başlangıçta vektör formatında (EPSG:4326) temin edilmiştir. Ancak konumsal analizlerin metrik tabanlı ve piksel bazlı yürütülebilmesi için bu veriler öncelikle projeksiyon dönüşümüne tabi tutularak EPSG:32635 (UTM Zone 35N) koordinat sistemine aktarılmıştır. Ardından Rasterizasyon işlemi ile 100x100 metre çözünürlüğe sahip piksellere dönüştürülmüş, analiz yüzeyi oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi.Not: Köşegen hücreler (1) kriterin kendisiyle karşılaştırmasını; sarı sütun normalize ağırlık vektörünü (w) göstermektedir}.

Kriter	YM	EA	SDA	Eğim	NY	w (ağırlık)
Yola Mesafe (YM)	1	2	3	5	7	0.425
Enerji Altyapısı (EA)	1/2	1	2	4	6	0.273
Sosyal Donatı Alanları (SDA)	1/3	1/2	1	3	5	0.177
Eğim	1/5	1/4	1/3	1	3	0.084
Nüfus Yoğunluğu (HY	1/7	1/6	1/5	1/3	1	0.042
Sütun Toplamı	2.176	3.917	6.533	13.333	22.000	1.000

Çizelge 2. Normalize Edilmiş İkili Karşılaştırma Matrisi {Her sütun değeri, ilgili sütunun toplamına bölünerek normalize edilmiştir. Her satırın ortalaması kriter ağırlığını (w) vermektedir}.

Kriter	YM	EA	SDA	Eğim	NY	w (ağırlık)
Yola Mesafe	0.460	0.511	0.459	0.375	0.318	0.425
Enerji Altyapısı	0.230	0.255	0.306	0.300	0.273	0.273
Sosyal Donatı	0.153	0.128	0.153	0.225	0.227	0.177
Eğim	0.092	0.064	0.051	0.075	0.136	0.084
Nüfus Yoğunluğu	0.066	0.043	0.031	0.025	0.045	0.042

Çizelge 3. Ağırlıklı Toplam Vektörü ve λ Hesabı {Aw, orijinal matrisin ağırlık vektörü (w) ile çarpımıdır. λ=Aw / w değerlerinin ortalaması λmax'i verir}.

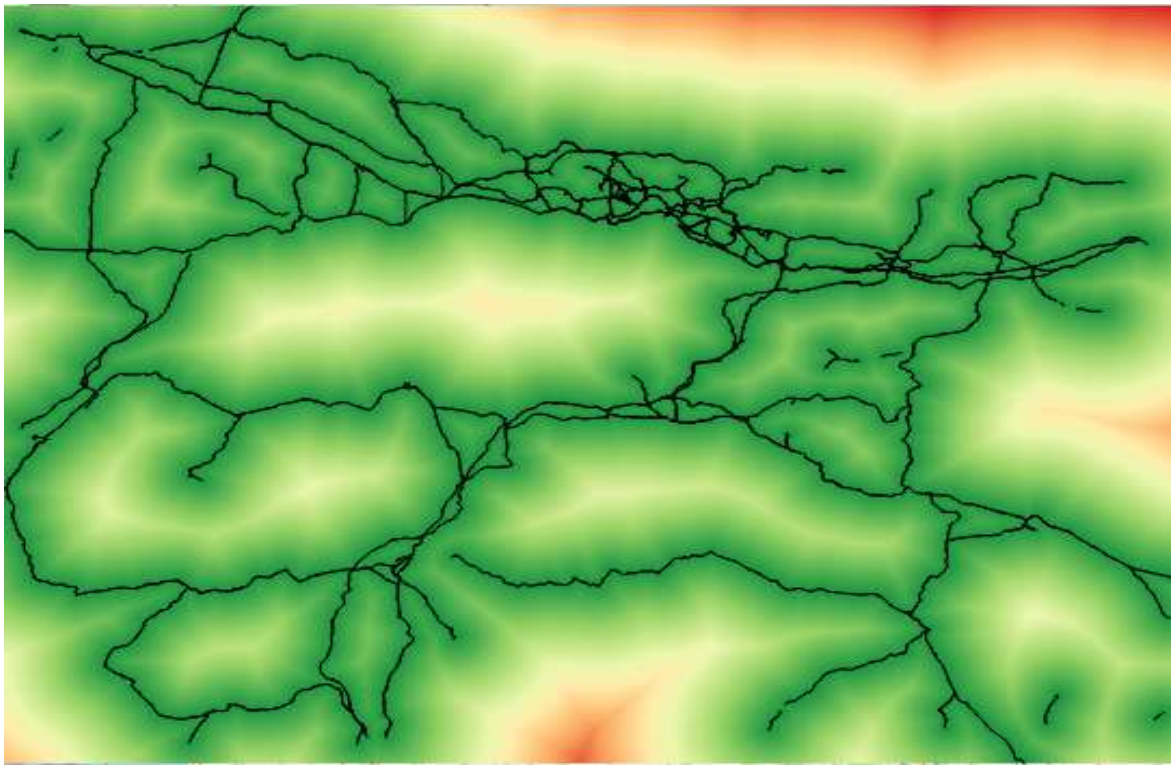
Kriter	Ağırlık (w)	Aw vektörü	λ = Aw / w
Yola Mesafe	0.4245	2.2129	5.2128
Enerji Altyapısı	0.2728	1.4251	5.2243
Sosyal Donatı	0.1772	0.9153	5.1642
Eğim	0.0836	0.4214	5.0387
Nüfus Yoğunluğu	0.0419	0.2113	5.0482
Ortalama (λmax)			5.1376

Çizelge 4. Tutarlılık Oranı (CR) Hesabı {Not: CR = 0.0307 < 0.10 koşulu sağlandığından ikili karşılaştırma matrisi matematiksel olarak tutarlıdır ve model geçerlidir (Saaty, 1980)}.

λmax	5.1376
n (kriter sayısı)	5
CI = (λmax − n) / (n−1)	0.0344
RI (n=5 için)	1.12
CR = CI / RI	0.0307
Kabul sınırı	< 0.10
Sonuç	Model geçerlidir

Oluşturulan raster yüzey üzerinde Öklid Mesafesi tabanlı yakınlık analizi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda, çalışma alanındaki her bir pikselin ana arterlere olan gerçek kuş uçuşu mesafesi (metre cinsinden) hesaplanmıştır. Elde edilen sürekli mesafe verileri, AHP puanlama matrisiyle uyumlu hale getirilmesi amacıyla "Reclassify"

(Yeniden Sınıflandırma) yöntemine tabi tutulmuştur (Şekil 2). Bu doğrultuda; ana yollara 0-500 metre mesafedeki alanlar 10 (en yüksek uygunluk), 500-2000 metre aralığı 7, 2000-5000 metre aralığı 4 ve 5000 metreden uzak alanlar 1 puan alacak şekilde normalize edilmiştir. Bu puanlama stratejisi, şarj istasyonlarının otoyol kullanıcıları için erişilebilirliğini maksimize etmeyi hedeflemektedir.



Şekil 2. Ulaşım Ağlarına Yakınlık Haritası (Öztürk, 2026).

Çalışma alanına ait Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verisi üzerinden üretilen eğim haritası, şarj istasyonu kurulum maliyetleri ve lojistik erişilebilirlik kriterlerine göre yeniden sınıflandırılmıştır. Yapılan analiz sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

Çok Uygun Alanlar (Yeşil - 0° - 5°): Bölgenin büyük bir kısmını, özellikle Trakya Havzası, Güney Marmara ovaları ve kıyı şeritlerini kapsamaktadır. Bu alanlar, düşük eğim değerleri sayesinde inşaat maliyetlerinin minimum olduğu ve ağır vasıta/binek araç erişiminin en kolay sağlandığı bölgelerdir. Analiz modelinde bu bölgelere en yüksek uygunluk puanı olan 10 puan verilmiştir.

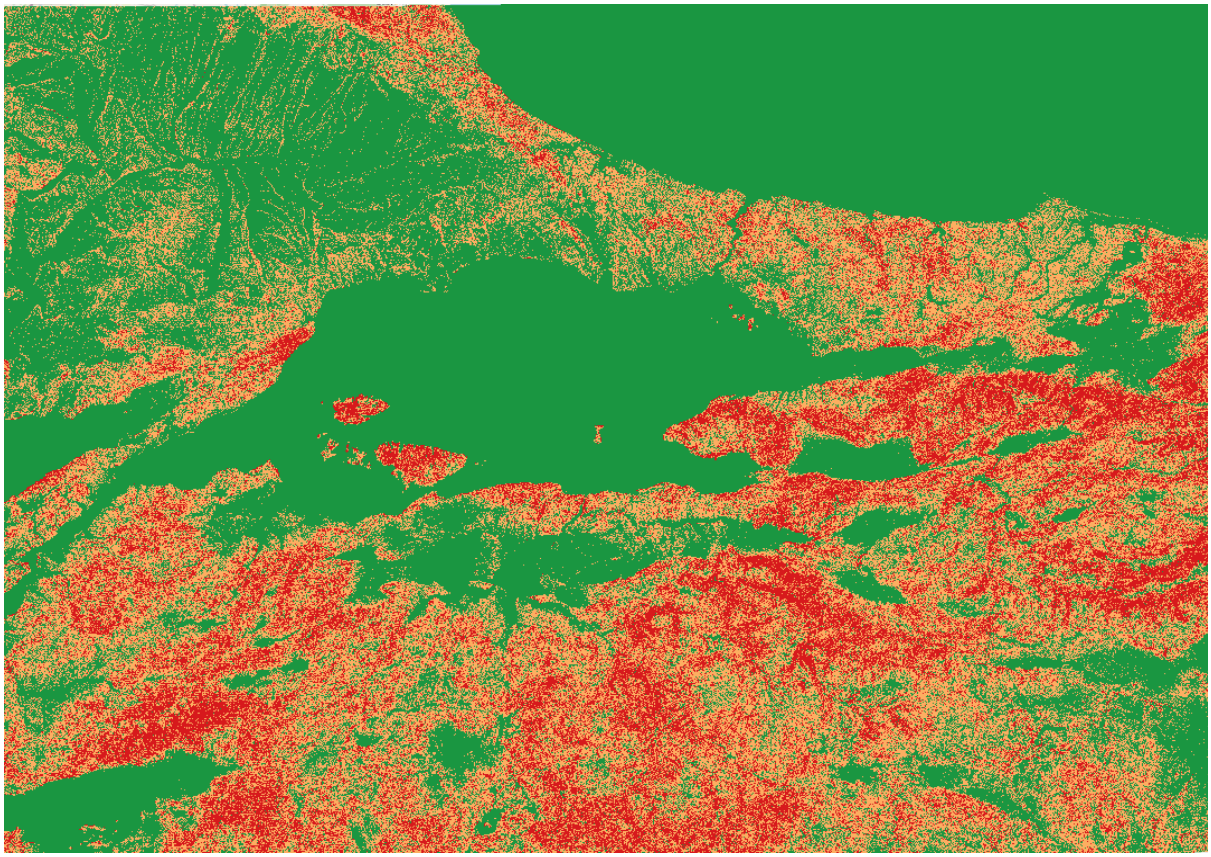
Orta Uygun Alanlar (Sarı/Turuncu - 5° - 15°): Geçiş bölgelerini ve hafif engebeli arazileri temsil etmektedir. Bu alanlar teknik olarak kuruluma uygun olmakla birlikte, zemin hazırlığı çalışmaları gerektirebileceği için orta derece uygunluk puanı olan 5 puan ile değerlendirilmiştir.

Uygun Olmayan Alanlar (Kırmızı - >15°): Yıldız Dağları, Samanlı Dağları ve Uludağ gibi yüksek eğimli kütleleri kapsamaktadır. 15 derecenin üzerindeki eğimler, hem sürüş güvenliği hem de istasyon kurulumu için gereken düzleme (teraslama) maliyetleri nedeniyle "düşük uygunluk" sınıfına alınmış ve 1 puan ile sınırlandırılmıştır.

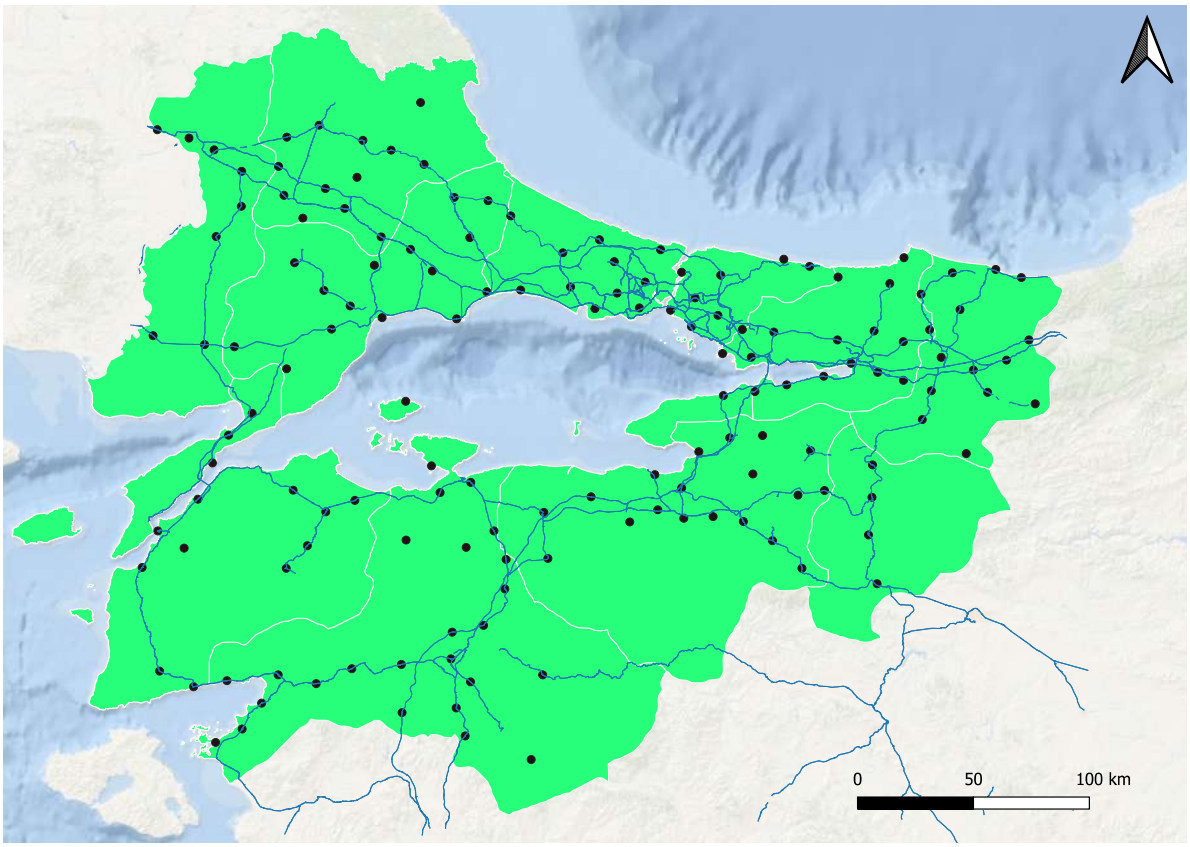
Sonuç olarak; topografik yapı Marmara Bölgesi'nin genelinde (özellikle ana ulaşım akslarının geçtiği düzlüklerde) şarj istasyonu kurulumu için oldukça elverişli bir zemin sunmaktadır. Dağlık kesimler ise doğal bir faktör olarak analiz modeline dahil edilmiştir.

AHP aşamasında elde edilen ağırlıkların beş konumsal katmana uygulanmasıyla Ağırlıklı Çakıştırma (Weighted Overlay) işlemi gerçekleştirilmiş ve Marmara Bölgesi elektrikli araç şarj istasyonları nihai uygunluk haritası üretilmiştir (Şekil 3). Üretilen bu haritada, yeşil tona sahip pikseller yeni istasyon kurulumu için topografik ve lojistik açıdan en uygun alanları temsil ederken, kırmızı tonlar uygun olmayan bölgeleri göstermektedir(Şekil 3). Harita incelendiğinde, özellikle İstanbul-İzmir Otoyolu (O-5) ve Kuzey Marmara Otoyolu güzergahlarındaki belirli

dinlenme tesisleri ve kavşak noktalarının en yüksek uygunluk skorlarını aldığı görülmektedir.

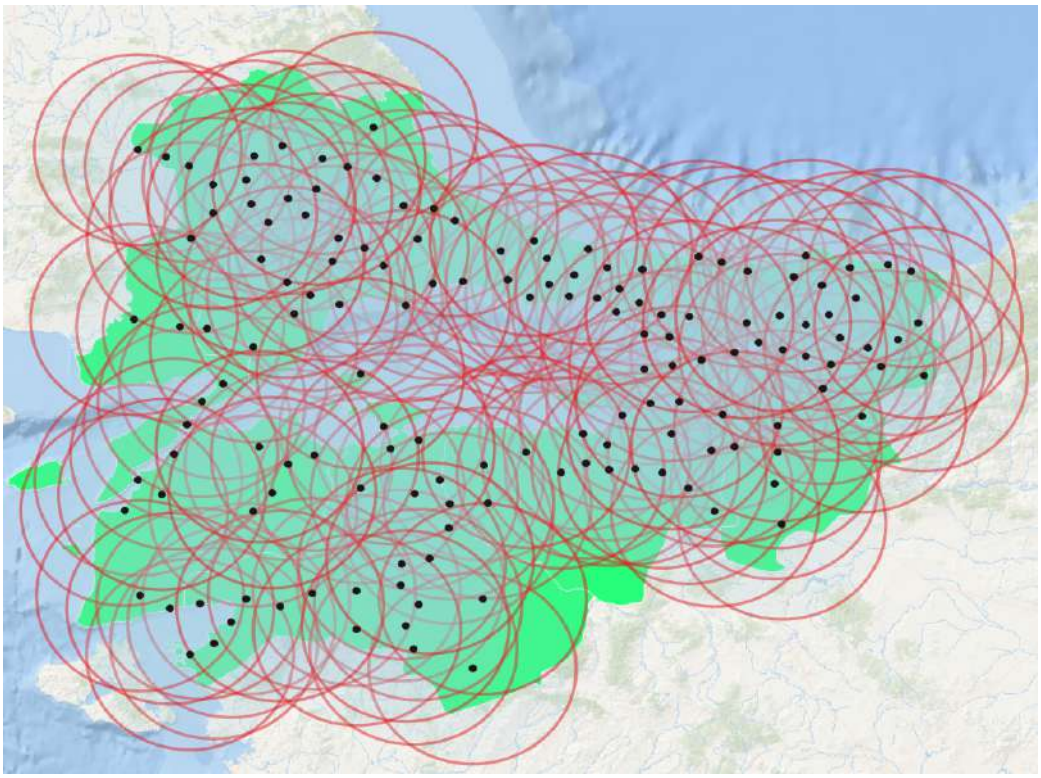


Şekil 3. Topoğrafik Eğim Analizi ve EAŞİ Uygunluk Sınıflandırması Haritası (Öztürk, 2026).



Şekil 4. Geliştirilen Konumsal Veri İşleme Modeli İle Belirlenen Optimal EAŞİ Lokasyonları (Öztürk, 2026).

Çalışma kapsamında kurgulanan Konumsal Karar Destek Sistemi (KKDS) uyguluanarak, Marmara Bölgesi genelinde elektrikli araç şarj istasyonları için en uygun lokasyonlar belirlenmiştir(Şekil4). Topografik (Eğim), lojistik (Enerji Altyapısına Yakınlık), demografik (Nüfus Yoğunluğu), sosyo-ekonomik ve mekansal (Maksimum 50 km Mesafe) kısıtların Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımıyla değerlendirilmesi neticesinde, Şekil 4'de sunulan 150 adet optimum istasyon noktası elde edilmiştir. Elde edilen bu lokasyonlar, istasyonların şehirlerarası transit geçişlerin sağlandığı ana otoyol ve karayolu akslarında kesintisiz, sürdürülebilir ve verimli bir şarj ağı altyapısı oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 4).



Şekil 5. Önerilen Şarj İstasyonlarının Hizmet Menzili ve Kapsama Alanı Haritası (Öztürk, 2026).

Geliştirilen KKDS modelinin elektrikli araç kullanıcılarındaki "menzil sorununu" giderme başarısını test etmek amacıyla, seçilen 150 optimum noktaya hizmet alanı (Buffer) analizi uygulanmıştır. Maksimum menzil kısıtı dikkate alınarak her bir istasyon için 50 kilometrelik etki çapı oluşturulmuştur. Şekil 5'de sunulan kapsama alanı haritası incelendiğinde, Marmara Bölgesi'ndeki ana otoyol ağının tamamının (O-5, Kuzey Marmara vb.) istasyonların etki alanları içerisinde kaldığı ve güzergahlar üzerinde "kör nokta" oluşmadığı görülmüştür (Şekil 5).

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi ölçeğinde elektrikli araç şarj istasyonları için en uygun alanların belirlenmesi problemi, modern bir konumsal veri işleme mimarisi üzerinden ele alınmıştır. Sürecin teknik omurgasını oluşturan Docker, PostGIS ve Python entegrasyonu; büyük hacimli konumsal verilerin donanım kısıtlarına takılmadan, yüksek performansla, ölçeklenebilir ve izole bir ortamda işlenmesini sağlamıştır. Kurulan AHP modelinde transit ulaşım ağlarına öncelik verilerek, çalışmanın temel çıkış noktası olan otoyollardaki "menzil sorunu"nun çözümüne yönelik mekânsal bir sonuç üretilmiştir. Geliştirilen bu açık kaynaklı konumsal altyapı, farklı coğrafi bölgelere veya elektrikli ağır vasıtalar gibi alternatif ulaşım modlarına kolaylıkla uyarlanabilecek esnekliğe sahiptir. Mevcut çalışmada istasyonların etki alanları doğrusal tampon analiziyle modellenmiş olup, bu durum çalışmanın bir kısıtı olarak değerlendirilebilir. Gelecek çalışmalarda, elde edilen bu optimum konumlar üzerinde gerçek yol ağına dayalı topolojik erişim analizleri gerçekleştirilecek ve transit güzergâhlardaki kapsama oranları kesin olarak doğrulanacaktır. Sisteme elektrik şebekesi kapasiteleri ve dinamik trafik verilerinin de entegre edilmesi, modelin karar verme gücünü daha da artıracaktır. Sonuç olarak bu çalışma ile mekânsal analiz prensipleri modern veri bilimi mimarisiyle entegre edilmiş; bölgesel ölçekli e-mobilite altyapı planlamaları için taşınabilir ve platform bağımsız bir konumsal karar destek sistemi inşa edilmiştir.

KAYNAKLAR

Öztürk, R., 2026, Konumsal Veri İşleme Mimarisi ile Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi: Marmara Bölgesi Örneği, *Bitirme Çalışması*, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

Saaty, T. L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process,* McGraw-Hill, New York.

URL 1: QGIS Development Team (2026). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Erişim tarihi: 5 Haziran 2026, https://qgis.org.

URL 2: OpenStreetMap Contributors (2026). Marmara Bölgesi Ulaşım Ağları ve Sosyal Donatı Verileri. Erişim tarihi: 5 Haziran 2026, https://www.openstreetmap.org.

URL 3: Docker Inc. (2026). Docker Containerization Platform & Tools. Erişim tarihi: 5 Haziran 2026, https://www.docker.com/.

URL 4: Python Software Foundation (2026). Python Language Reference. Erişim tarihi: 5 Haziran 2026, https://www.python.org/.

URL 5: OpenTopography (2026). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global Digital Elevation Model. National Science Foundation (NSF). Erişim tarihi: 5 Haziran 2026, https://portal.opentopography.org/

VERİ KISITLI BÖLGELERDE TAŞKIN ERKEN UYARISI İÇİN MEVSİMSEL KIRILGANLIK ÇERÇEVESİ

Sertaç KANTEKİN[1], Melek HOROZ[2],

[1] Globetech Coğrafi Bilgi Teknolojileri Ltd. Şti., Beytepe, Ankara, sertac.kantekin@globetech.com.tr
[2] Globetech Coğrafi Bilgi Teknolojileri Ltd. Şti., Beytepe, Ankara, melek.horoz@globetech.com.tr

ÖZET

Taşkınlar, iklim değişikliği ve artan hidrolojik düzensizlikler nedeniyle tarım alanları üzerinde önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Uzaktan algılama tabanlı taşkın çalışmalarının büyük bölümü afet sonrası hasar tespitine odaklanmakta; afet öncesi öngörü ise hem kritik izleme aylarındaki yoğun bulutluluk hem de havza ölçeğinde yüksek çözünürlüklü hidrolojik gözlem eksikliği nedeniyle güçleşmektedir. Bu çalışmada, veri kısıtı bulunan havzalar için Sentinel-2 zaman serisi analizi ile hidro-meteorolojik verileri bütünleştiren, Z-skoru tabanlı bir Mevsimsel Kırılganlık İndeksi geliştirilmiş ve bu indeks HAND (Height Above Nearest Drainage) tabanlı topografik duyarlılık haritalamasıyla birleştirilmiştir.

Çalışma alanı Tokat ilindeki Almus Barajı Havzası'dır. Baraj su yüzeyi, havza ölçeğinde ölçülemeyen toprak doygunluğunun yerine geçen bir makro-gösterge olarak kullanılmıştır. 2020–2026 dönemine ait bulutsuz Sentinel-2 MSI L2A görüntülerinden MNDWI ile su maskeleri üretilmiş, ardışık görüntü çiftleri arasında piksel bazlı değişim tespiti uygulanmış ve 53 bulutsuz periyot elde edilmiştir. Her yıl için 1 Aralık – 30 Nisan penceresinden üç öncü gösterge (Kümülatif Kış Girdisi, Birikme Hızı, Bahar Nabzı) türetilmiş; göstergeler Z-skorlarına dönüştürülerek ağırlıklı biçimde birleştirilmiştir. Yeniden standartlaştırılmış indeks, 2020–2026 serisinde yalnızca 2026 yılını Aşırı kategorisinde (≥ 1.5σ) işaretlemiş; 20 Mayıs 2026'da gerçekleşen taşkın bu öngörüyü doğrulamıştır. İkinci kolda SRTM türevli HAND rasterı, taşkın sonrası Sentinel-2 görüntüsünden üretilen gerçek su altı tarım alanı (96 729 piksel) ile veri güdümlü olarak kalibre edilmiş; en yüksek CSI değerini (0.104) veren 1 m eşiği seçilerek beş sınıflı bir duyarlılık yüzeyi üretilmiştir. Sınıflandırma, mansaptaki 2 982 kadastro parseli üzerinde ayrıca sınanmış ve parsel ölçeğinde %46,5 kesinlik, %70,1 duyarlılık, %56,9 genel doğruluk ve 0.170 Kappa değerleri elde edilmiştir.

Sonuçlar, az sayıda gözlemlenmiş olay bulunan havzalarda ikili sınıflandırma yerine anomali tespitinin işlevsel bir alternatif olduğunu; ücretsiz optik uydu verisi ve açık yeniden analiz ürünleriyle kurulan bir veri füzyonu zincirinin afet öncesinde mevsimlik bir uyarı sinyali üretebildiğini göstermektedir. Üretilen katmanlar, tarım sigortacılığında hasar tespiti ve prim farklılaştırması ile kadastro kayıtlarının çevresel maruziyet bilgisiyle zenginleştirilmesi için doğrudan kullanılabilir bir altlık oluşturmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Anomali tespiti, HAND modeli, parsel bazlı maruziyet, Sentinel-2 zaman serisi, taşkın erken uyarısı

ABSTRACT

SEASONAL VULNERABILITY FRAMEWORKS FOR FLOOD EARLY WARNING IN DATA-SCARCE REGIONS

Floods cause substantial economic losses in agricultural areas under climate change and increasing hydrological irregularity. Most remote sensing-based flood studies focus on post-event damage assessment; pre-event forecasting remains difficult because of persistent cloud cover during the critical monitoring months and the absence of high-resolution hydrological observations at catchment scale. This study develops a Z-score based Seasonal Vulnerability Index that fuses Sentinel-2 time-series analysis with hydro-meteorological data for data-scarce catchments and integrates it with HAND (Height Above Nearest Drainage) based topographic susceptibility mapping.

The study area is the Almus Dam catchment in Tokat, Türkiye. The dam water surface is used as a macro-proxy for catchment soil saturation, which cannot be measured directly at this scale. Water masks were derived with MNDWI from cloud-free Sentinel-2 MSI L2A imagery for 2020–2026, pixel-based change detection was applied between consecutive image pairs, and 53 cloud-free periods were obtained. Three leading indicators (Cumulative Winter Input, Accumulation Rate, Spring Pulse) were extracted from the 1 December – 30 April window of each year, converted to Z-scores and combined with weights. The re-standardized index flagged only 2026 as Extreme (≥ 1.5σ) within the 2020–2026 series; the flood of 20 May 2026 confirmed this signal. In the second branch, an SRTM-derived HAND raster was calibrated in a data-driven manner against the observed inundated cropland (96,729 pixels) extracted from post-flood Sentinel-2 imagery; the 1 m threshold yielding the highest CSI (0.104) was selected to produce a five-class susceptibility surface. The classification was further tested on 2,982 cadastral parcels downstream, giving 46.5% precision, 70.1% recall, 56.9% overall accuracy and a Kappa of 0.170 at parcel scale.

The results show that anomaly detection is a workable alternative to binary classification in catchments with few observed events, and that a data-fusion chain built on free optical imagery and open reanalysis products can generate a seasonal warning signal

before the event. The resulting layers provide a directly usable base layer for damage assessment and premium differentiation in agricultural insurance, and for enriching cadastral records with environmental exposure information.

Keywords: Anomaly detection, early flood warning, HAND model, parcel-based exposure, Sentinel-2 time series

1. GİRİŞ

Taşkınlar; aşırı yağışlar, hızlı kar erimeleri ve arazi kullanımındaki değişimler gibi etkenlerle akarsu veya diğer su kütlelerinin yatak kapasitesini aşması sonucu meydana gelen yıkıcı hidrolojik afetlerdir. Küresel ölçekte yapılan bir analize göre, 2000–2018 yılları arasında gerçekleşen 913 büyük taşkın doğrudan 255 ile 290 milyon kişiyi etkilemiş ve taşkına maruz kalan nüfus oranı yüzyılın başından bu yana %24 artmıştır (Tellman vd., 2021). Türkiye'de ise Afet Veri Tabanı kayıtlarına göre, 1960–2014 yılları arasında yaşanan 1 076 taşkın olayı 795 can kaybına ve yaklaşık 800 milyon ABD doları doğrudan ekonomik zarara neden olmuştur (Koç ve Thieken, 2018). 2015–2020 dönemine ait güncel değerlendirmeler, bu afetlerin yol açtığı hasarda tarım sektörünün en çok etkilenen alanlardan biri olduğunu açıkça göstermektedir (Koç vd., 2021). Günümüzde uzaktan algılama teknolojileri; taşkın yayılımının haritalanması, etkilenen arazi örtülerinin belirlenmesi ve tarımsal zararların değerlendirilmesinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır (Tay vd., 2020; Nhangumbe vd., 2023; Qamer vd., 2024; Das vd., 2026). Ancak literatürdeki çalışmalar ağırlıklı olarak iki ana eksende yoğunlaşmaktadır:

- Afet sonrasında uydu görüntüleri üzerinden yapılan hasar tespiti çalışmaları
- Çok sayıda tarihsel gözleme ihtiyaç duyan karmaşık tahmin ve modelleme çalışmaları.

Özellikle ilkbahar aylarında beklenen taşkınları önceden öngörebilmek, iki temel yapısal kısıt nedeniyle oldukça zordur. İlk olarak, kritik izleme aylarındaki yoğun bulutluluk optik uydu verilerindeki sürekliliği kesintiye uğratmaktadır. İkinci olarak, havza ölçeğinde toprak nemini gözlemleyecek sensör ağlarının kurulum ve işletme maliyetleri birçok bölge için ulaşılmazdır.

Bu zorluklara, özellikle kısıtlı veriye sahip havzalarda karşılaşılan üçüncü bir problem eklenir: gözlemlenmiş tarihsel taşkın olaylarının yetersizliği. Örneğin bu çalışmada incelenen havzada, yalnızca bir büyük taşkın olayı kaydedilmiştir. Böylesi bölgelerde, klasik ikili (taşkın var/yok) sınıflandırma modelleri –lojistik regresyon ya da rastgele orman gibi– yapısal olarak elverişsizdir. Çünkü bu denetimli öğrenme algoritmaları güvenilir bir karar sınırı çizebilmek için çok sayıda pozitif ve negatif örneğe ihtiyaç duyar; az sayıda veriyle eğitildiklerinde aşırı uyum (overfitting) riski taşır ve belirsizlik tahminleri üretemezler (Chandola vd., 2009).

Bu yapısal engelleri aşmak amacıyla, çalışmanın merkezî metodolojisi anomali tespiti üzerine inşa edilmiştir. Anomali tespiti, "gözlenen mevcut durum, çok yıllı normal davranıştan ne kadar sapıyor?" sorusuna odaklanır. Az sayıda taşkın olayıyla dahi verimli çalışabilen bu yöntem, çıktı olarak standartlaştırılmış bir sapma değeri ürettiği için son derece şeffaf ve yorumlanabilirdir; aynı zamanda süreçte durağanlık (stationarity) varsayımını gerektirmez (Sankarasubramanian ve Lall, 2003; Chandola vd., 2009).

Havzanın taşkın öncesi durumundan yola çıkarak mevsimlik öngörülerde bulunmak literatürde bilinen bir yaklaşımdır. Ne var ki, bu yaklaşımlar çoğunlukla akım gözlem istasyonlarından alınan uzun süreli ve güvenilir verilere dayanır. Örneğin Avrupa'daki istasyonlarda yapılan bir çalışmada, havza ıslaklığının taşkın olasılığını tahmin etmede en güçlü gösterge olduğu tespit edilmiştir (Steirou vd., 2022). Benzer şekilde, havzanın öncül durumu ve depolama kapasitesi taşkın potansiyelinin belirleyicisi olarak kabul görmüştür (Ettrick vd., 1987; Reager ve Famiglietti, 2009). Ancak veri kısıtlı havzalarda bu tür uzun süreli akım gözlemlerine ulaşmak çoğu zaman mümkün değildir.

Bu noktada çalışmamız, literatürdeki yaklaşımlardan iki önemli boyutta ayrılmaktadır:

1. Alternatif Havza Islaklığı Kestirimi: Akım gözlem istasyonlarına bağımlı kalmak yerine, havza ıslaklığı doğrudan baraj su yüzeyi alanı üzerinden ve tamamen ücretsiz optik uydu verileri kullanılarak kestirilmektedir.
2. Veri Güdümlü HAND Kalibrasyonu: Veri kısıtlı bölgelerde topografik duyarlılığı belirlemede sıkça başvurulan HAND (Height Above Nearest Drainage) yönteminde (Nobre vd., 2011; Garousi-Nejad vd., 2019), çoğunlukla literatürden alınan sabit eşikler kullanılır. Bu çalışmada ise eşik değeri, bizzat gözlemlenen taşkın yayılımından veri güdümlü olarak öğrenilmiş ve kalibre edilmiştir.

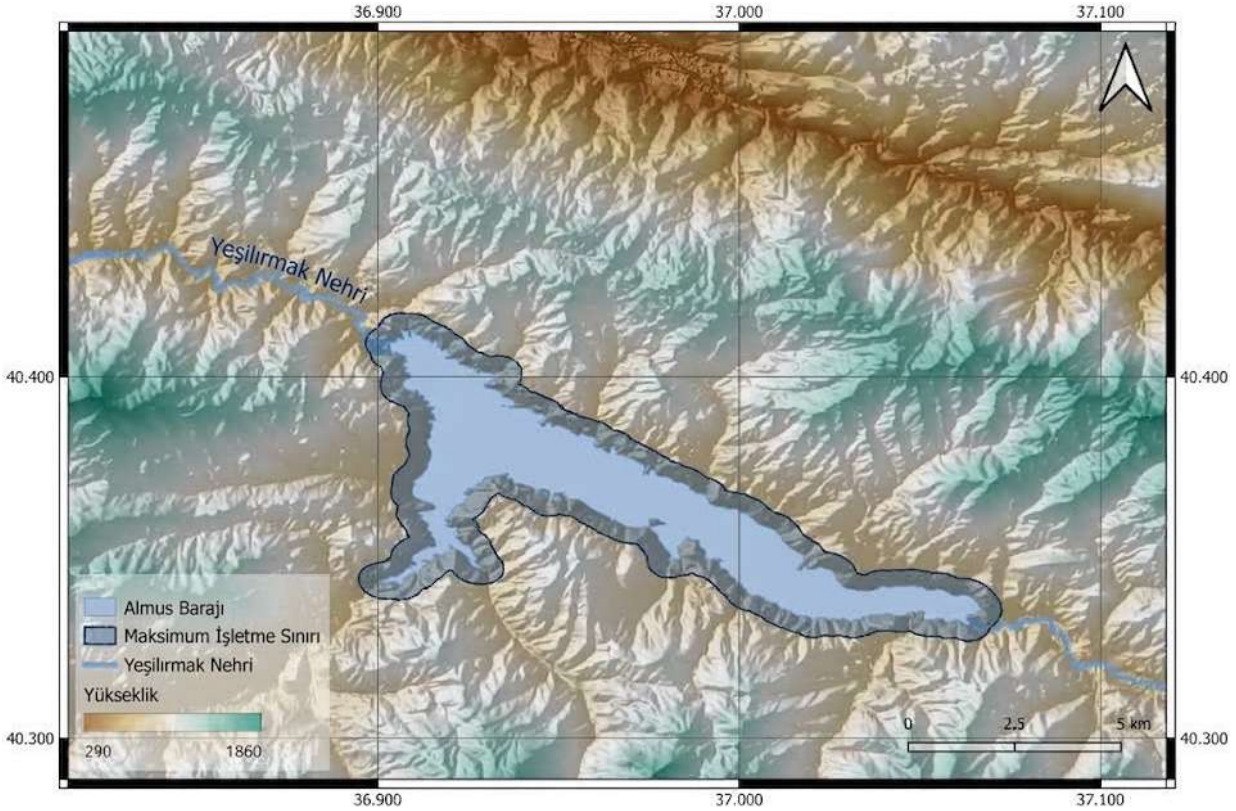
Zaman serisi anomali tespitiyle elde edilen zamansal verinin, HAND tabanlı durağan topografik indeksleme ile aynı çerçevede birleştirilip sonuçların doğrudan kadastro parselleriyle ilişkilendirilmesi, bilgimiz dâhilinde literatürde daha önce ele alınmamış özgün bir yaklaşımdır. Özetle bu çalışma, afet sonrası haritalamanın ötesine geçerek veri kısıtlı havzalarda taşkın potansiyelini olaydan aylar önce öngörebilen hibrit bir erken uyarı çerçevesi sunmaktadır. Bu kapsamda; bulutluluk kaynaklı düzensiz uydu gözlemlerinin süre normalizasyonuyla taşkın öncü göstergesine dönüştürülmesi ve topografik duyarlılığı temsil eden HAND eşiğinin gerçek taşkın verisiyle kalibre edilmesi literatüre

sunulan başlıca katkılardır. Son aşamada ise zamansal mevsimsel indeks ve konumsal HAND duyarlılık verileri kadastro parselleri düzeyinde bütünleştirilerek, tarım sigortacılığı ve risk yönetimi uygulamalarında doğrudan kullanılabilecek eyleme dönüştürülebilir karar destek altlıkları elde edilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Tokat iline bağlı Almus ilçesinde, Yeşilırmak Havzası'nın üst kollarından biri üzerinde yer alan Almus Barajı Havzası'dır (Şekil 1). Baraj enerji üretimi ve taşkın kontrolü amacıyla işletilmekte olup mansabında Turhal ve Amasya yönünde geniş tarım ovaları bulunmaktadır. Havza, egemen arazi örtüsü olarak tarım arazileri ve orman alanlarını barındırmakta; karasal-geçiş iklim özelliği göstermekte ve ilkbahar kar erimeleriyle eş zamanlı yoğun yağışlar nedeniyle mevsimsel taşkın duyarlılığı taşımaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı: Almus Barajı, barajın maksimum işletme sınırı ve Yeşilırmak. Altlık: SRTM türevli gölgeli kabartma ve yükseklik (290–1860 m).

Çalışmada iki farklı mekânsal ölçek kullanılmaktadır ve bunlar birbirinin yerine geçmez: anomali analizi memba havzasında (Almus Barajı Havzası), taşkın etkisi ve parsel analizi ise mansaptaki Turhal ovasında yürütülmüştür. Memba havzasında ölçülen hidrolojik birikim, mansap ovasında gerçekleşen taşkının öncülüdür.

Almus Barajı, havza ölçeğinde toprak doygunluğunu ve taban akışını yansıtan bir makro-gösterge olarak seçilmiştir. Havza ölçeğinde toprak nemi sensör ağlarının kurulumu ve bakımı birçok havzada olduğu gibi Almus için de maliyet-etkin değildir; buna karşılık baraj su seviyesi, havzanın toplam su depolama durumunu yansıtan ve uydu ile izlenebilen fiziksel bir makro-sensör işlevi görmektedir (Ettrick vd., 1987; Sankarasubramanian ve Lall, 2003; Reager ve Famiglietti, 2009).

2.2 20 Mayıs 2026 Taşkın Olayı

Mayıs 2026'da aşırı sağanak yağışlar ve kar erimesine bağlı olarak Almus Barajı'nda hızlı bir su seviyesi yükselmesi gözlenmiştir. Uydu görüntüleri ve hidrolojik veriler, barajın 18 Mayıs 2026'da kritik işletme eşiğine yaklaştığını ve 20 Mayıs 2026'da %100 doluluk seviyesine ulaştığını göstermektedir. Aynı tarihte gerçekleştirilen kontrollü su tahliyeleri ve artan yüzey akışı sonucunda Yeşilırmak Havzası boyunca önemli bir taşkın olayı meydana gelmiş; yapılan açıklamalara göre yaklaşık 60 000 dekar tarım arazisi su altında kalmıştır.

Almus Barajı kapaklarının 2010–2026 yılları arasında hiç açılmadığı ve ilk kez Nisan 2026'da su tahliyesi yapıldığı bilgisine ulaşılmıştır; bu bilgi DSİ Bölge Müdürlüğü yetkilileriyle yapılan görüşmelerde teyit edilmiştir. On altı yıl

boyunca tahliye gerektirmemiş bir barajın aynı sezonda hem tahliyeye zorlanması hem de %100 doluluğa ulaşması, 2026 hidrolojik yılının seri içindeki istisnai konumunu bağımsız biçimde desteklemektedir.

2.3 Veri Setleri

Çalışmada birbirinden farklı zaman aralıklarına sahip üç ana veri kaynağı kullanılmıştır. Aralıkların farklı olması, her veri türünün analizdeki işlevinden kaynaklanmaktadır; bu ayrım Tablo 1'de açıkça verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan veri setleri ve zaman aralıkları.

Veri	Kaynak	Aralık	Çözünürlük	Analizdeki işlevi
Sentinel-2 MSI L2A	ESA Copernicus	2020–2026	10 m (B3), 20 m (B11)	Su yüzeyi çıkarımı, değişim tespiti, taşkın yayılımı
Aylık yağış ve kar erimesi	ERA5-Land	2019–2026	~9 km	Kümülatif girdi ve birikme hızı; klimatolojik normal
Sayısal yükseklik modeli	SRTM	Tek dönem	30 m	HAND rasterının türetilmesi
Kadastro parselleri	TKGM parsel sorgu	2026	Vektör	Parsel bazlı maruziyet ve doğrulama

Hidro-klimatik serinin 2019'da başlamasının nedeni, 2020 hidrolojik yılına ait erken dönem penceresinin (1 Aralık 2019 – 30 Nisan 2020) tamamlanabilmesidir. Uydu değişim istatistikleri ise ardışık görüntü çiftleri gerektirdiğinden 2020'de başlar. Dolayısıyla indeks, yedi hidrolojik yıl (2020–2026) üzerinden hesaplanmaktadır.

- Sentinel-2 MSI: Çalışmada, L2A atmosferik düzeltme seviyesindeki görüntülerden yararlanılmıştır. Su yüzeylerinin belirlenmesinde kullanılan MNDWI hesabı için Yeşil (B3, 10 m çözünürlük) ve SWIR-1 (B11, 20 m çözünürlük) bantları tercih edilmiş; mekânsal uyumu sağlamak amacıyla B11 bandı en yakın komşu yöntemiyle 10 m çözünürlüğe yeniden örneklenmiştir.
- ERA5-Land: İklimsel veriler için aylık toplam yağış ve kar erimesi değerleri kullanılmıştır. Yeniden analiz ürünlerinin yüksek çözünürlüklü yerel istasyon gözlemlerine kıyasla taşıdığı belirsizliklerin etkisini azaltmak amacıyla, mutlak değerler yerine yıllar arası göreli sapmalar (Z-skorları) hesaplanarak kullanılmıştır.
- Kadastro Parselleri: TKGM Parsel Sorgu altyapısından Turhal ve Pazar ilçelerine ait toplam 2 982 parsel verisi elde edilmiştir. Bu örneklem tüm çalışma alanını değil, taşkından doğrudan etkilenmesi beklenen mansap (aşağı havza) kesimini kapsamaktadır.

3. YÖNTEM

Çalışmada iki paralel metodolojik kol izlenmiştir (Şekil 2). Birinci kol, Almus Barajı'ndaki hidrolojik önkoşulların mevsimsel olarak izlenmesi ve Z-skoru tabanlı anomali tespiti yoluyla taşkın öncü sinyallerinin belirlenmesini; ikinci kol, HAND rasterı kullanılarak topografik taşkın duyarlılık haritasının üretilmesini ve her iki kolun çıktılarının kadastro parselleriyle ilişkilendirilmesini kapsamaktadır.

Uydu görüntülerinin işlenmesi — su indeksi hesabı, bulut maskeleme ve piksel bazlı değişim tespiti — GLOBEOS platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Z-skoru hesapları, indeks birleştirme, HAND türetimi ve parsel çakıştırma işlemleri ayrı bir Python/CBS ortamında yürütülmüştür.

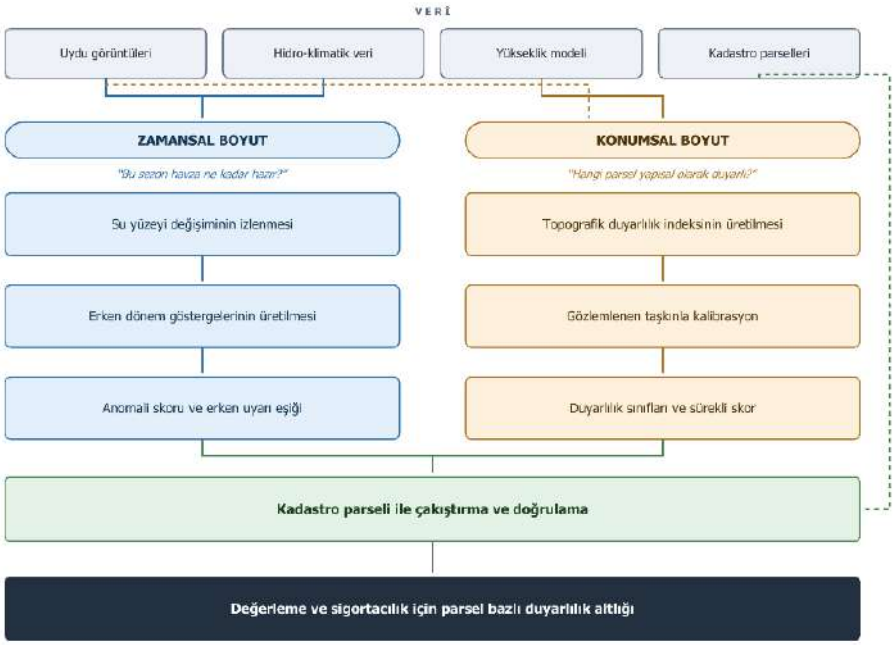
3.1 Sentinel-2 Ön İşleme ve Bulutluluk Yönetimi

Optik veride bulutluluk, bu çalışmanın en belirleyici kısıtıdır: erken dönem penceresi (Aralık–Nisan) Türkiye'nin karasal-geçiş iklim kuşağında yılın en bulutlu dönemine denk gelmektedir. Bulutluluk üç aşamalı olarak ele alınmıştır.

- Piksel düzeyinde maskeleme: Her sahnede s2cloudless bulut olasılık bandı ile L2A ürününün Sahne Sınıflandırma katmanı (SCL) birlikte kullanılmıştır. SCL' de bulut (orta ve yüksek olasılık), ince bulut (cirrus), bulut gölgesi, kar/buz ve doygun/hatalı piksel olarak etiketlenen sınıflar analiz dışı bırakılmıştır. Kar/buz sınıfının dışlanması, kar örtüsünün MNDWI' de su benzeri yüksek değerler üretmesi nedeniyle kritik önemdedir.
- Sahne düzeyinde eleme: Baraj işletme maskesi içindeki geçerli (maskelenmemiş) piksel oranı belirli bir eşiğin altında kalan sahneler analiz dışı bırakılmış; yalnızca işletme maskesinin tamamına yakınının gözlenebildiği sahneler "bulutsuz gözlem" sayılmıştır. Bu nedenle zaman serisi düzenli aylık aralıklarla değil, düzensiz uzunlukta periyotlarla ilerlemektedir.

- Düzensiz aralıkların telafisi: Gözlem aralıklarının eşit olmaması, ham piksel değişim sayılarını doğrudan karşılaştırılamaz kılar. Bu nedenle her aralıktaki net su kazanımı, aralığın süresine (ay) bölünerek bir su yüzeyi genişleme hızı (piksel·ay^{-1}) elde edilmiştir. Süre normalizasyonu, uzun bulutlu boşluklardan sonra gelen bir gözlemin yapay olarak yüksek bir sıçrama gibi görünmesini engeller.

Bu üç aşamalı yaklaşımın kabul ettiği kısıt şudur: bulutlu dönemlerde meydana gelen kısa süreli su yüzeyi dalgalanmaları gözlenemez. Dolayısıyla "Bahar Nabzı" göstergesi, gerçek en yüksek genişleme hızının değil, gözlenebilen en yüksek genişleme hızının bir kestirimidir.



Şekil 2. Yöntem akış şeması. Sol kol zamansal boyutu (havzanın o sezondaki hidrolojik hazır olma durumu), sağ kol konumsal boyutu (parselin yapısal taşkın duyarlılığı) üretir; iki kolun çıktıları kadastro parseli üzerinde birleştirilir.

3.2 MNDWI ile Su Yüzeyi Çıkarımı ve Değişim Belirleme

Barajdaki su yüzeyi değişimlerinin izlenmesi amacıyla Modifiye Edilmiş Normalize Fark Su İndeksi kullanılmıştır:

$$MNDWI = \frac{Yeşil - SWIR - 1}{Yeşil + SWIR - 1} = \frac{B3 - B11 - 1}{B3 + B11 - 1} \quad (1)$$

MNDWI, yapay yüzeylerin baskın olduğu alanlarda NDWI' ye kıyasla su/kara ayrımını güçlendirmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Su/kara ayrımı için eşik uygulanmış ve elde edilen ikili su maskesi, barajın maksimum işletme sınırı poligonuyla (Şekil 1) kırpılmıştır. Bu kırpma, göl dışındaki mevsimlik su birikintilerinin ve akarsu yataklarının sinyale karışmasını engeller.

Ardışık bulutsuz görüntü çiftleri arasında piksel bazlı değişim tespiti uygulanarak her piksel üç sınıftan birine atanmıştır: su kaybı (−1), değişim yok (0) ve su kazanımı (+1). 2020–2026 döneminde bu şekilde 53 değişim periyodu elde edilmiştir. Her periyot için net su kazanımı, kazanım ve kayıp piksel sayılarının farkı olarak hesaplanmıştır.

3.3 Erken Dönem Göstergelerinin Türetilmesi

Taşkınlar genellikle tek bir ani yağıştan ziyade kış aylarındaki kümülatif birikimin sonucudur. Bu nedenle her yıl için bir önceki yılın 1 Aralık tarihinden ilgili yılın 30 Nisan tarihine kadar olan dönem "erken dönem" olarak tanımlanmıştır. Aylık toplam su girişi:

$$Toplam\ \ Su\ \ Girişi\ \ (mm) = Yağış\ \ (mm) + Kar\ \ Erimesi\ \ (mm) \quad (2)$$

Erken dönem için üç gösterge üretilmiştir:

Kümülatif Kış Girdisi (mm): Erken dönemdeki ayların toplam su girişlerinin toplamı; su girişi eğrisinin altında kalan alan. Havzaya giren toplam su hacmini ve dolayısıyla potansiyel yüzey akışını temsil eder.

Birikme Hızı: Kümülatif su girişi serisine uygulanan birinci derece polinom uyumunun eğimi. Suyun aydan aya ne hızda biriktiğini gösterir; aynı toplam girdi yavaş geldiğinde zemin emebilirken, hızlı geldiğinde emilemez.

Bahar Nabzı (piksel·ay^{-1}): Erken dönem penceresindeki bulutsuz aralıklar içinde gözlenen en yüksek pozitif su yüzeyi genişleme hızı. Yalnızca net su kazanımının pozitif olduğu aralıklar dikkate alınır. Net toplam kazanım yerine tekil en yüksek sıçramanın kullanılmasının nedeni, havzadaki ani yüzey akışını yakalamaktır.

Üçüncü gösterge, kar erimesi hidrolojisindeki "bahar nabzı başlangıcı" (spring pulse onset) kavramının rezervuar ölçekli bir izdüşümü olarak yorumlanır; kar erimesi kaynaklı akışın ani başlangıcı ve akım zamanlamasının iklimsel olarak öne kayması literatürde geniş biçimde ele alınmıştır (Cayan vd., 2001; Stewart vd., 2005). Fiziksel olarak baraj bir depolama kabı gibi davranır: havza doygunken (düşük depolama açığı) gelen suyun büyük kısmı yüzey akışına dönüşür ve baraja hızla ulaşır (Ettrick vd., 1987; Reager ve Famiglietti, 2009).

3.4 Z-skoru Anomali Çerçevesi ve Kırılganlık İndeksi

Üç gösterge, yedi hidrolojik yıl (2020–2026) boyunca hesaplanan ortalama ve standart sapmalar kullanılarak Z-skorlarına dönüştürülür:

$$Z = (\text{Değer} - \text{Ortalama}) / \text{Standart Sapma} \quad (3)$$

Bu yaklaşım, hidrolojik süreçlerde durağanlık varsayımının reddine dayanır; her yılın metriği çok yıllı dağılıma göre konumlandırılarak anomali olarak ölçülür (Sankarasubramanian ve Lall, 2003). Z-skorları ağırlıklı olarak birleştirilir:

$$\text{Kırılganlık İndeksi} = 0.35 \cdot Z\_\text{Kümülatif} + 0.15 \cdot Z\_\text{Birikme} + 0.50 \cdot Z\_\text{Düzeltilmiş\_Akış} \quad (4)$$

Modelde kullanılan ağırlık yapısı, indeksi iki ana bloğa eşit olarak ayırmaktadır:

Meteorolojik Girdi Bloğu (Ağırlık: 0.50): Havzaya ne kadar ve ne hızda su girdiğini temsil eder.

Hidrolojik Yanıt Bloğu (Ağırlık: 0.50): Havzanın bu girdiyi ne ölçüde yüzey akışına dönüştürdüğünü gösterir.

Bu eşit bölüşüm; taşkın oluşumunun tek başına yalnızca girdilerle ya da tek başına havza durumuyla açıklanamayacağı, ikisinin etkileşimine dayandığı gerçeğini yansıtmaktadır (Ettrick vd., 1987; Sankarasubramanian ve Lall, 2003; Reager ve Famiglietti, 2009).

Meteorolojik Girdi Bloğu (0.35 / 0.15 Bölüşümü): Meteorolojik blok içindeki dağılım (Kümülatif Girdi: 0.35, Birikme Hızı: 0.15) iki temel gerekçeye dayanır:

Kavramsal Dayanak: Bu bileşen, hidrolojik yanıtın hızını (flashiness) ölçmektedir. Güncel çerçeveler, ani taşkın şiddetini nitelerken sadece büyüklüğü değil, değişim hızını da temel bir eksen olarak ele alır (Li vd., 2023).

Ampirik Dayanak: Bu bileşen diğer değişkenlerden büyük ölçüde bağımsız bilgiler taşımaktadır. Nitekim Bahar Nabzı'nın Kümülatif Girdi ile korelasyonu r = 0.56, Birikme Hızı ile korelasyonu ise r = 0.66'dır.

Hesaplanan bu ağırlıklı ham indeks, eşik değerlerle kıyaslanabilmesi amacıyla yeniden standartlaştırılarak Tablo 2'de verilen kategorilere ayrılır.

Tablo 2. Duyarlılık kategorileri.

Kategori	Yeniden standartlaştırılmış indeks
*Aşırı (*Extreme*)*	≥ 1.5
*Yüksek (*High*)*	0.5 – 1.5
*Orta (*Moderate*)*	−0.5 – 0.5
*Düşük (*Low*)*	< −0.5

Hesaplamalar sonucunda "Aşırı" eşiğini aşan yıllar bir Erken Uyarı İşareti alır.

Geliştirilen indeks yalnızca yedi hidrolojik yıllık görece kısa bir zaman serisine dayandığından (n = 7), hesaplanan örneklem standart sapması yapısal olarak yüksek bir belirsizlik barındırmaktadır. Bu kısıt nedeniyle, elde edilen Z-skorlarına klasik anlamda bir p-değeri veya istatistiksel güven aralığı atfetmek uygun görülmemiştir. Çalışmada Z-skorları bir hipotez testi istatistiği olmaktan ziyade yıllar arası göreli konumlandırma ölçüsü olarak işlev görmekte; 1.5σ değeri ise katı bir istatistiksel anlamlılık düzeyi yerine pragmatik ve operasyonel bir karar eşiği olarak konumlandırılmaktadır.

3.4 HAND Tabanlı Duyarlılık Haritalaması ve Doğrulama Metrikleri

Her pikselin en yakın dere yatağına olan düşey mesafesini ifade eden HAND (Height Above Nearest Drainage) yöntemi, düşük veri gereksinimi nedeniyle topografik taşkın duyarlılığının haritalanması için kullanılmıştır (Nobre vd., 2011; Garousi-Nejad vd., 2019). Bu katman dinamik hidrolojik süreçleri içermediğinden, doğrudan bir taşkın tahmini değil taşkına yapısal yatkınlığın konumsal bir göstergesidir. Modelin sınıf eşikleri, literatürden sabit bir değer almak yerine taşkın sonrası Sentinel-2 gözlemlerinden elde edilen gerçek su altı pikselleriyle eşleştirilerek veri güdümlü biçimde kalibre edilmiştir.

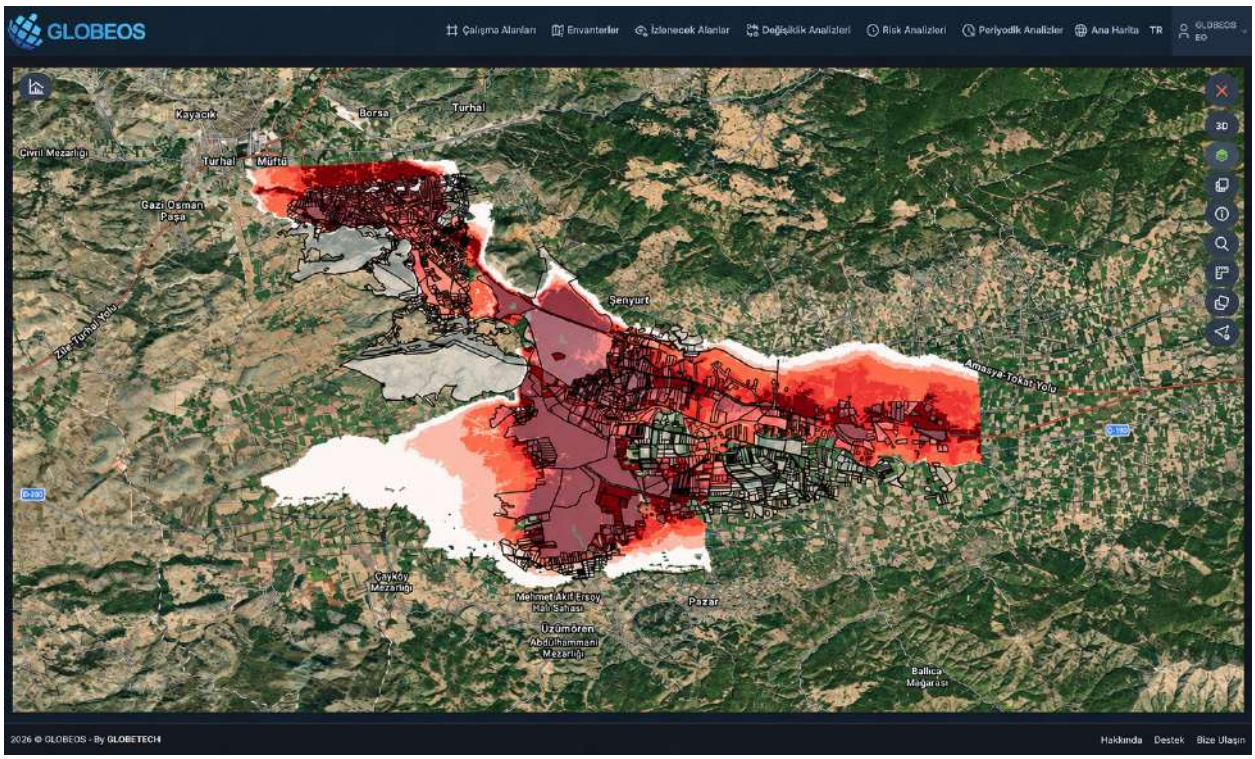
Çalışmanın doğrulama aşaması doğrudan kadastro parselleri üzerinde kurgulanmıştır. Her parsel için alan payı en yüksek olan HAND sınıfı "baskın sınıf" olarak kabul edilmiş ve baskın sınıfı 4 veya 5 olan parseller "yüksek duyarlılık" öngörüsü almıştır (Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Birliği Konseyi, 2007). Gerçek taşkın gözlemine göre, su altında kalan alanının toplam parsel alanına oranı %10'u aşan parseller ise "gerçekte su altında" olarak etiketlenmiştir.

Performans değerlendirmesinde Kesinlik (Precision = TP / [TP + FP]), Duyarlılık (Recall = TP / [TP + FN]), Kritik Başarı İndeksi (CSI = TP / [TP + FP + FN]), F1-Skoru, Genel Doğruluk (OA) ve Kappa istatistikleri kullanılmıştır. Ancak taşkın çalışmalarında taşkına maruz kalmayan (doğru negatif, TN) alanların oransal olarak aşırı yüksek olması OA gibi metrikleri yanıltıcı biçimde yükselttiğinden, doğru negatifleri hesaba katmayan CSI ve Duyarlılık ölçütleri birincil performans göstergeleri olarak temel alınmıştır.

3.4 Kadastro Parseli ile Bütünleştirme

İki analiz kolunun çıktıları kadastro parselleriyle kesiştirilmiştir. HAND tabanlı duyarlılık sınıfları ve sürekli skor parsellere aktarılmış; ayrıca gözlenen su altında kalan pikseller aynı parsellerle çakıştırılarak her parsel için fiilen su altında kalan alan miktarı ve oranı hesaplanmıştır. Her parsel için üretilen öznitelikler şunlardır: toplam parsel alanı (m^2/dekar), taşkına maruz kalan alan, taşkın maruziyet oranı (%), baskın duyarlılık sınıfı (1–5) ve ortalama duyarlılık skoru (0–100).

Bu işlem, statik kadastro kayıtlarının çevresel afet bilgisiyle zenginleştirilmesini (cadastral parcel enrichment) sağlar. Ancak zenginleştirme yalnızca konumsal duyarlılığı parsele kalıcı bir öznitelik olarak yazabilmektedir; mevsimlik olarak değişen indeks, zamandan bağımsız bilgi taşımak üzere tasarlanmış klasik kadastro veri modeline doğrudan oturmaz.

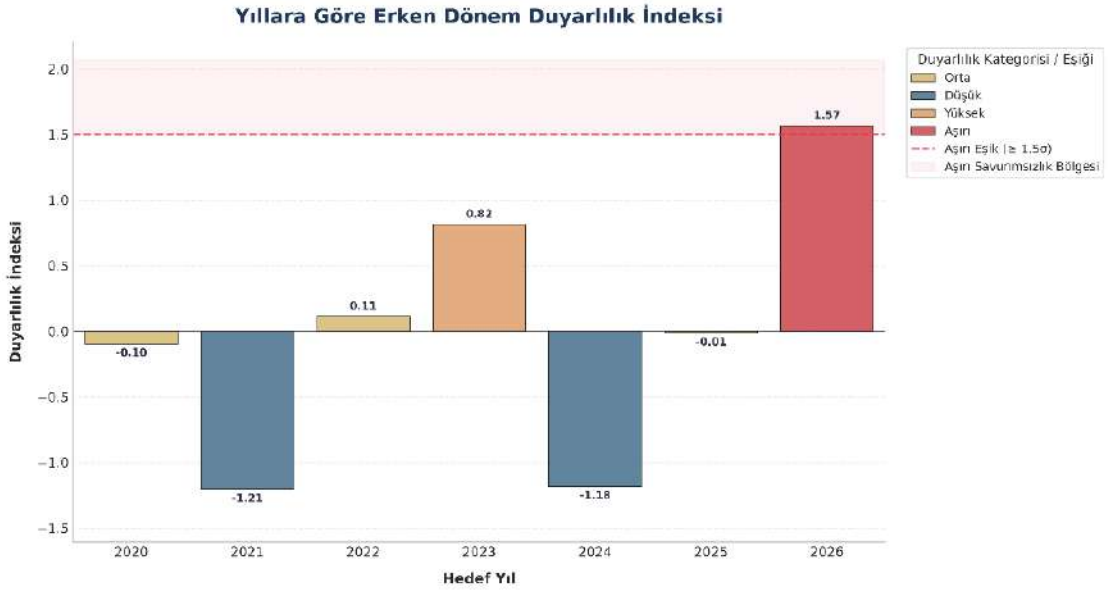


Şekil 3. GLOBEOS platformu üzerinde MNDWI ve HAND modelleri kullanılarak kadastro parselleriyle entegre taşkın yayılım ve duyarlılık haritası arayüzü

4. BULGULAR

4.1 Mevsimsel Kırılganlık İndeksi ve Erken Uyarı Sinyali

Z-skorlarının ağırlıklı birleşimi ve yeniden standartlaştırılması sonucunda elde edilen indeks değerleri Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Yıl bazında Mevsimsel Kırılganlık İndeksi (yeniden standartlaştırılmış Z-skoru). Kesikli çizgi Aşırı kategorisinin 1.5σ eşiğini, taralı alan Aşırı duyarlılık bölgesini göstermektedir.

İndeks, 2020–2026 serisinde yalnızca 2026 yılında Aşırı eşiğini aşmaktadır (1.57). İkinci sırada yer alan 2023 yılı 0.82 ile Yüksek kategorisinde kalmakta, eşiğin belirgin biçimde altında bulunmaktadır. 2021 (−1.21) ve 2024 (−1.18) yılları Düşük; 2020 (−0.10), 2022 (0.11) ve 2025 (−0.01) yılları Orta kategoriye girmektedir.

Bu dağılımın iki yönü dikkate değerdir. Birincisi, 2026'yı ayırt eden şey herhangi bir göstergedeki tekil bir uç değer değil, üç göstergenin eşzamanlı olarak uç değer almasıdır. 2023'te Bahar Nabzı serinin ikinci en yüksek değerini (61 024) ve Birikme Hızı üçüncü en yüksek değerini almasına karşın Kümülatif Girdi'nin ortalama düzeyde kalması, indeksin bu yılı Aşırı olarak işaretlememesine yol açmıştır. Bu davranış, taşkın oluşumunun öncül havza durumu ile tetikleyicinin birlikte gerçekleşmesine bağlı olduğu yönündeki fiziksel kavrayışla tutarlıdır.

İkincisi, çalışma döneminde gözlemlenmiş büyük ölçekli tek taşkın olayı 2026 yılına aittir ve indeks bu yılı — ve yalnızca bu yılı — Aşırı olarak işaretlemiştir. Dolayısıyla geriye dönük değerlendirmede (backtesting) yanlış alarm üretilmemiştir. Bu sonuç, yedi yıllık bir seriye ve tek bir gözlemlenmiş olaya dayandığından istatistiksel bir başarım ölçütü olarak değil, yaklaşımın işlerliğine dair bir gösterge olarak yorumlanmalıdır.

4.2 Taşkın Yayılımı ve Parsel Bazlı Sonuçlar

Taşkın öncesi ve sonrası Sentinel-2 görüntülerinin MNDWI haritaları üzerinden karşılaştırılmasıyla, tarım alanlarında yaklaşık 9673 dekar taşkın alanı (96729 piksel) tespit edilmiştir. Optik verideki bulutluluk ve sığ su örtüsünün hızlı çekilmesi gibi kısıtlar nedeniyle bu değer, sahada raporlanan hasar alanının bağımsız olarak doğrulanabilen alt sınırını oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında üretilen HAND tabanlı duyarlılık modelinin sınıf eşikleri, tespit edilen bu gerçek taşkın yayılımı kullanılarak kalibre edilmiş ve yüksek duyarlılığı temsil eden Sınıf 5 için üst sınır 1 m olarak saptanmıştır. Modelin nihai başarımı doğrudan kadastro parselleri üzerinden test edilmiştir.

Kalibre edilmiş HAND sınıflandırması (Sınıf 4+5 = yüksek duyarlılık), mansaptaki 2347 geçerli parsele uygulanmıştır (Şekil 4).

Parsel bazlı değerlendirme sonucunda %46.5 kesinlik, %56.9 genel doğruluk (OA) ve 0.170 Kappa değerleri elde edilmiştir. Bu metrikler tek başına modelin başarısız olduğu izlenimi verse de, bu durum taşkından etkilenmeyen parsellerin (1432 adet) açık ara çoğunlukta olmasından ve OA gibi metriklerin bu dengesiz dağılımı ödüllendirmesinden kaynaklanmaktadır. Oysa erken uyarı sistemlerinde asıl maliyet tahmin edilemeyen taşkın parselleridir. Bu nedenle doğru negatifleri hesaba katmayan metrikler incelendiğinde, modelin %70.1 Duyarlılık

(Recall) ve 0.388 Kritik Başarı İndeksi (CSI) ile gerçekte su altında kalan parsellerin büyük bir bölümünü başarıyla işaretlediği görülmektedir.

5. TARTIŞMA

Geliştirilen bu yaklaşım, literatürdeki hidrolojik modeller ve denetimli makine öğrenmesi uygulamalarıyla kıyaslandığında, bir hidrodinamik modelin doğrudan yerine geçmeyi hedeflememektedir. Aksine, veri ve bütçe kısıtları nedeniyle karmaşık modellerin kurulamadığı havzalar için tasarlanmış, akım gözlem istasyonlarına ihtiyaç duymayan, şeffaf ve düşük maliyetli bir alternatiftir. Yaklaşımın en güçlü yanları veri gereksiniminin azlığı, mevsimlik öngörü ufku sunması ve anomali tespiti çerçevesinin doğası gereği durağanlık varsayımına ihtiyaç duymamasıdır. Buna karşılık, havza ölçeğinde çalışması ve kısa zaman serisi (n = 7) nedeniyle belirsizlik kestiriminin sınırlı olması yöntemin temel zayıflıklarıdır. HAND tabanlı konumsal haritalama bu çözünürlük sorununu kısmen telafi etse de tek faktörlü ve durağan bir yapı arz etmesi bakımından dinamik tetikleyicileri kapsamamaktadır.

Bu yöntemin farklı havzalara başarılı biçimde uyarlanabilmesi için birtakım temel ön koşullar mevcuttur. İlk olarak, havza depolama durumunun uydudan izlenebilen ve mevsimsel olarak anlamlı biçimde değişen sığ bir su yüzeyine (baraj veya göl) yansıması elzemdir; zira dik kenarlı derin rezervuarlarda alan değişimi, hacim değişimini yeterince temsil edemez. İkinci olarak, özellikle erken dönem penceresinde kış birikimini takip edebilmek adına yılda en az birkaç bulutsuz optik gözlem aralığı elde edilebilmelidir; sürekli bulutlu bölgelerde Sentinel-1 SAR entegrasyonu zorunludur. Ayrıca yöntemin mantığı, kar erimesi ve kümülatif yağışların belirleyici olduğu kış birikimi kaynaklı taşkın rejimlerine dayanmaktadır; ani yaz sağanakları için erken dönem birikimi zayıf bir öncü olacaktır. Son olarak, anlamlı bir "normal" tanımı yapabilmek için (bu çalışmadaki n = 7 örneği gibi) asgari bir gözlem yılı serisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapısal koşullar sağlandığı takdirde, gerekli verilerin küresel ölçekte ücretsiz olmasından dolayı yöntemin transferi kolaydır. Ancak topografik duyarlılığı belirleyen HAND eşiğinin her havzanın kendi vadi morfolojisine göre yeniden kalibre edilmesi bir zorunluluktur.

Bu ön koşullara ek olarak çalışmanın bazı içsel kısıtları da göz önünde bulundurulmalıdır. Optik veri bağımlılığı nedeniyle bulutlu dönemlerde gerçekleşen su yüzeyi dalgalanmalarının yakalanamaması, Bahar Nabzı değerinin gerçek bir maksimumu değil yalnızca gözlenebilen maksimumu temsil etmesine yol açar. Benzer şekilde, ağırlık atamalarının şu aşamada uzman değerlendirmesine dayanması (ileride AHP/ANP gibi yöntemlerle iyileştirilmesi planlanmaktadır), yeniden analiz verilerindeki (ERA5-Land) uzaysal belirsizlikler, HAND modelinin %21'lik parsel kapsama boşluğu ve parsel büyüklüklerinden bağımsız eşit ağırlıklı metrik hesaplamaları yöntemin diğer sınırlılıklarıdır.

Tüm bu sınırlılıklara rağmen üretilen katmanlar, tarım sigortacılığı ve kadastro sistemleri için doğrudan eyleme dönüştürülebilir karar destek altlıkları sunmaktadır. Tarım sigortacılığında parsel bazlı maruziyet oranları hasar tespiti süreçlerini hızlandırabilir; mevsimsel Kırılganlık İndeksi ise prim farklılaştırmasında tetikleyici bir mekanizma olarak değerlendirilebilir (Nguyen vd., 2024). Kadastro sistemlerinde ise elde edilen konumsal duyarlılık katmanları, statik parsel kayıtlarını çevresel afet maruziyeti yönünden zenginleştirmektedir. Bununla birlikte, parsel bazlı tahmin kesinliğinin (%46,5) henüz tek başına otomatik bir prim/değer kararına gerekçe oluşturacak kadar yüksek olmadığı unutulmamalı; elde edilen göstergeler uzman kararını destekleyen parametreler olarak konumlandırılmalıdır. Daha da önemlisi, bu bilgilerin kurumsal entegrasyonunda karşılaşılan yapısal bir darboğaz bulunmaktadır. Statik kadastro modelleri, mevsimsel olarak değişen indeksler gibi dinamik ve zaman boyutlu (*valid-time*) verileri doğrudan barındırmaya elverişli değildir. Bu kurumsal entegrasyon boşluğunun aşılması; LADM uyumlu zaman boyutlu veri modellerinin geliştirilmesini (Flores-Rozas, 2026), havza ölçeğindeki sinyallerin parsel düzeyine indirgenme kurallarının netleştirilmesini ve bu dinamik bilgilerin hangi usullerle yorumlanacağına dair mevzuat altyapısının oluşturulmasını gerektirmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, veri kısıtı bulunan havzalarda taşkın duyarlılığının afet öncesinde mevsimlik olarak öngörülmesi için Sentinel-2 zaman serisi analizi ile hidro-meteorolojik verileri bütünleştiren bir çerçeve geliştirilmiş ve HAND tabanlı topografik duyarlılık haritalamasıyla birleştirilmiştir.

Baraj su yüzeyinin havza doygunluğu için makro-gösterge olarak kullanılabileceği gösterilmiş; bulutluluk kaynaklı düzensiz gözlem aralıkları süre normalizasyonuyla ele alınmıştır. Z-skoru tabanlı indeks 2020–2026 serisinde yalnızca 2026 yılını Aşırı kategorisinde işaretlemiş, 20 Mayıs 2026 taşkını bu sinyali doğrulamıştır. HAND rasterı gözlemlenen taşkın yayılımıyla veri güdümlü olarak kalibre edilmiş (eşik = 1 m, CSI = 0.104) ve elde edilen sınıflandırma 2 347 kadastro parseli üzerinde sınanarak %70,1 duyarlılık ve 0.170 Kappa değerleri raporlanmıştır. Metrikler arasındaki ayrışma, dengesiz sınıf dağılımlarında metrik seçiminin sonucun yorumunu belirlediğini göstermektedir.

Çalışmanın uygulamaya dönük çıktısı, tarım sigortacılığında hasar tespiti ile prim farklılaştırması ve kadastro kayıtlarının çevresel maruziyet bilgisiyle zenginleştirilmesi için kullanılabilir bir parsel bazlı veri katmanıdır. Gelecek

çalışmalarda Sentinel-1 SAR verisinin dâhil edilerek bulut kısıtının aşılması, bileşen ağırlıklarının AHP veya bulanık ANP ile türetilmesi, çok faktörlü ve olasılıksal bir duyarlılık modeline geçilmesi ve mevsimlik değişen göstergelerin kurumsal veri modellerine taşınabilmesi için zaman boyutlu öznitelik yapılarının geliştirilmesi öngörülmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladığı teknik altyapı, GLOBEOS platformu ve kurumsal destek için Globetech Coğrafi Bilgi Teknolojileri Ltd. Şti.'ne teşekkür ederiz. Ayrıca çalışmada kullanılan Sentinel-2 MSI verileri için Avrupa Uzay Ajansı (ESA) Copernicus Programı'na, ERA5-Land verileri için Copernicus İklim Değişikliği Servisi'ne (C3S) ve kadastro parseli verilerinin temini için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'ne (TKGM) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. **Cayan, D. R., Dettinger, M. D., Kammerdiener, S. A., Caprio, J. M. ve Peterson, D. H.,** 2001. Changes in the Onset of Spring in the Western United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 82(3): 399-415.

2. **Chandola, V., Banerjee, A. ve Kumar, V.,** 2009. Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys, 41(3): 1-58.

3. **Das, P. K., Ranga, V., Kumar, T., Pandey, S. B. ve Pathak, S.,** 2026. Severity Assessment of Heavy Rainfall-Induced Mid-Season Adversity Under a Satellite-Based Crop Insurance Program: A Framework. Agronomy, 16(2): 123.

4. **Ettrick, T. M., Mawdsley, J. A. ve Metcalfe, A. V.,** 1987. The influence of antecedent catchment conditions on seasonal flood risk. Water Resources Research, 23(3): 481-488.

5. **Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Birliği Konseyi,** 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj [Erişim tarihi: 09.09.2026].

6. **Flores-Rozas, D.,** 2026. From Earth Observation to Land Administration: Structuring Sentinel-1 Flood Information Within an ISO 19152 (LADM) Multipurpose Cadastre. Land, 15(3): 452.

7. **Garousi-Nejad, I., Tarboton, D. G., Aboutalebi, M. ve Torres-Rua, A. F.,** 2019. Terrain Analysis Enhancements to the Height Above Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method. Water Resources Research, 55(10): 7983-8009.

8. **Koç, G. ve Thieken, A. H.,** 2018. The relevance of flood hazards and impacts in Turkey: What can be learned from different disaster loss databases? Natural Hazards, 91(1): 375-408.

9. **Koç, G., Natho, S. ve Thieken, A. H.,** 2021. Estimating direct economic impacts of severe flood events in Turkey (2015-2020). International Journal of Disaster Risk Reduction, 58: 102222.

10. **Li, Z., Gao, S., Chen, M., Zhang, J., Gourley, J. J., Wen, Y., Yang, T. ve Hong, Y.,** 2023. Introducing Flashiness-Intensity-Duration-Frequency (F-IDF): A New Metric to Quantify Flash Flood Intensity. Geophysical Research Letters, 50(23): e2023GL104992.

11. **Nguyen, V. D., Aerts, J., Tesselaar, M., Botzen, W., Kreibich, H., Alfieri, L. ve Merz, B.,** 2024. Exploring the use of seasonal forecasts to adapt flood insurance premiums. Natural Hazards and Earth System Sciences, 24(8): 2923-2937.

12. **Nhangumbe, M., Nascetti, A. ve Ban, Y.,** 2023. Multi-Temporal Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 MSI Data for Flood Mapping and Damage Assessment in Mozambique. ISPRS International Journal of Geo-Information, 12(2): 53.

13. **Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M. ve Saleska, S.,** 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology, 404(1-2): 13-29.

14. **Qamer, F. M., Abbas, S., Ahmad, B., Hussain, A. ve Ismail, M.,** 2024. A framework for multi-sensor satellite data to evaluate crop production losses: the case study of 2022 Pakistan floods. Scientific Reports, 14(1): 5824.

15. **Reager, J. T. ve Famiglietti, J. S.,** 2009. Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE. Geophysical Research Letters, 36(23): L23402.

16. **Sankarasubramanian, A. ve Lall, U.,** 2003. Flood quantiles in a changing climate: Seasonal forecasts and causal relations. Water Resources Research, 39(5): 1134.

17. **Steirou, E., Gerlitz, L., Sun, X., Apel, H., Agarwal, A. ve Totz, S.,** 2022. Towards seasonal forecasting of flood probabilities in Europe using climate and catchment information. Scientific Reports, 12: 13514.

18. **Stewart, I. T., Cayan, D. R. ve Dettinger, M. D.,** 2005. Changes toward Earlier Streamflow Timing across Western North America. Journal of Climate, 18(8): 1136-1155.

19. **Şenocak, S. ve Acar, R.,** 2026. Integration of Snowmelt Runoff Model (SRM) with GIS and Remote Sensing for Operational Forecasting in the Kırkgöze Watershed, Turkey. Water, 18(3): 335.

20. **Tay, C. W. J., Yun, S.-H., Chin, S. T., Bhardwaj, A., Jung, J. ve Hill, E. M.,** 2020. Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan. Scientific Data, 7: 100.

21. **Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A. ve Slayback, D. A.,** 2021. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. Nature, 596(7870): 80-86.

PLAN KARARLARI VE MÜLKİYET VERİLERİNİN E-PLAN OTOMASYON SİSTEMİ ÜZERİNDE BÜTÜNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR MODEL ÖNERİSİ*

Engin TÜRKMEN[1], Mehmet ALKAN[2]

[1]Sinop Belediyesi, Belediye Başkan Yardımcısı, 57000, Merkez, Sinop, enginturkmen2007@gmail.com
[2]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, alkan@yildiz.edu.tr

ÖZET

Şehir ve şehirleşme alanlarında mekânsal planlama süreçlerinde alınan kararların etkin bir şekilde uygulanabilmesi, plan verileri ile mülkiyet bilgilerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Türkiye'de kullanılan e-Plan Otomasyon Sistemi, plan verilerinin dijital ortamda üretilmesi, saklanması ve paylaşılmasına olanak sağlamakla birlikte, taşınmazların mülkiyet yapısı, hakları ve kısıtlamalarına ilişkin bilgileri doğrudan içermemektedir. Bu durum, plan kararlarının taşınmazlar üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, plan kararları ile mülkiyet verilerinin e-Plan Otomasyon Sistemi üzerinde bütünleşik olarak yönetilebilmesine yönelik bir veri modeli önerilmektedir. Çalışma kapsamında Türkiye'de kullanılan e-Plan sistemi ile kadastro bilgi altyapıları olan TAKBİS, MEGSİS ve TUCBS incelenmiş; ayrıca uluslararası standartlar ve Arazi İdaresi Temel Modeli (LADM) yaklaşımı değerlendirilmiştir. Mevcut sistemlerin analiz edilmesi sonucunda planlama süreçlerinde ihtiyaç duyulan temel kadastral bileşenler belirlenmiş ve bu bileşenlerin plan verileri ile ilişkilendirilmesine yönelik kavramsal bir model geliştirilmiştir.

Önerilen model; parsel, mülkiyet, hak ve kısıtlamalar ile plan kararları olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Model sayesinde kullanıcıların yalnızca plan kararlarına değil, bu kararların etkilediği taşınmazlara, mülkiyet yapılarına ve taşınmazlar üzerindeki hukuki durumlara da erişebilmesi amaçlanmaktadır. Böylece planlama ve arazi yönetimi süreçlerinde veri bütünlüğünün artırılması, kurumlar arası birlikte çalışabilirliğin desteklenmesi ve karar verme süreçlerinin daha etkin hale getirilmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak önerilen modelin, Türkiye'de dijital planlama uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı, planlama ve kadastro sistemleri arasındaki veri entegrasyonunu güçlendireceği ve taşınmaz odaklı planlama anlayışının geliştirilmesine destek olacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Sözcükler: e-Plan, Kadastro, Mekânsal Planlama, Mülkiyet Verisi.

ABSTRACT

A MODEL PROPOSAL FOR THE INTEGRATION OF PLANNING DECISIONS AND PROPERTY OWNERSHIP DATA WITHIN THE E-PLAN AUTOMATION SYSTEM

For planning decisions to be implemented effectively within spatial planning processes, planning data and property ownership information need to be evaluated together in city areas. Although the e-Plan Automation System used in Türkiye enables the digital production, storage, and sharing of planning data, it does not directly incorporate information related to property ownership structures, rights, and restrictions associated with land parcels. This limitation makes it difficult to comprehensively analyse the impacts of planning decisions on individual properties.

This study proposes a data model aimed at enabling the integrated management of planning decisions and property ownership data within the e-Plan Automation System. Within the scope of the study, the e-Plan system currently used in Türkiye and cadastral information infrastructures, namely the Land Registry and Cadastre Information System (TAKBIS), the Spatial Real Estate System (MEGSIS), and the National Geographic Information System of Türkiye (TUCBS), were examined. In addition, international standards and the Land Administration Domain Model (LADM) approach were evaluated. Based on the analysis of existing systems, the fundamental cadastral components required for planning processes were identified, and a conceptual model was developed to establish relationships between these components and planning data. The proposed model consists of four main components: parcels, ownership, rights and restrictions, and planning decisions. Through this model, users are expected to access not only planning decisions but also the affected properties, ownership structures, and legal conditions associated with those properties. In this way, the model aims to enhance data integrity in planning and land administration processes, support interoperability among institutions, and improve the effectiveness of decision-making processes. As a result, the proposed model is expected to contribute to the advancement of digital planning practices in Türkiye, strengthen data integration between planning and cadastral systems, and support the development of a property-oriented planning approach.

Keywords: e-Plan, Cadastre, Spatial Planning, Property Ownership Data.

* Bu çalışma, Engin TÜRKMEN'in Prof. Dr. Mehmet ALKAN danışmanlığında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırladığı "Türkiye Kadastrosuna Yönelik E-Plan Tasarımının Geliştirilmesi" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

1. GİRİŞ

Mekânsal planlama, gelecekteki arazi kullanımına yönelik kararların üretildiği ve arazi kaynaklarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesini amaçlayan çok disiplinli bir süreçtir. Bu süreçte kullanılan verilerin güvenilir, güncel, erişilebilir ve birlikte çalışabilir olması, plan kararlarının başarısını doğrudan etkilemektedir (Yılmaz ve Alkan, 2023). Bu alandaki en kapsamlı girişimlerden biri olan INSPIRE Arazi Kullanımı veri spesifikasyonu, plan kararlarını, arazi kullanım zonlarını ve düzenleyici hükümleri ortak veri nesneleriyle tanımlamaktadır (European Commission, 2014). Arazi idaresi; araziye ilişkin hakların, değer ve kullanım bilgilerinin belirlenmesi, kaydedilmesi ve paylaşılması süreci olarak tanımlanmaktadır (Steudler, 2004; UN-ECE, 1996). Bu alanda ISO 19152 Arazi İdaresi Temel Modeli (LADM), arazi üzerindeki hak, kısıtlama, sorumluluk ve mülkiyet ilişkilerini standart bir kavramsal model içerisinde temsil etmektedir (ISO, 2012). Ancak LADM'nin ilk sürümü plan kararlarını ayrı bir bileşen olarak içermemekte; bu nedenle plan kararlarının veri modeli içinde bağımsız bir paket olarak ele alınması önerilmektedir (Yılmaz ve Alkan, 2022; Yılmaz vd., 2023).

Uluslararası çalışmalar, parselin temel mekânsal birim olduğunu ve mülkiyet, hak ve kısıtlamaların bu birim üzerinden ilişkilendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Sarıçiçek vd., 2019). LADM'nin Johannesburg, Kanada–Fransa ve Kıbrıs uygulamaları ise modelin farklı hukuki ve kurumsal yapılara uyarlanabildiğini ortaya koymuştur (Elia vd., 2013; Pouliot vd., 2013; Tjia ve Coetzee, 2013). Avustralya'da ICSM tarafından geliştirilen ePlan Protokolü, kadastral ölçü verilerinin LandXML tabanlı standart bir yapıda aktarılmasını sağlayarak e-Plan sistemlerinin yalnızca plan kararlarını değil kadastral veriyi de kapsayabileceğini ortaya koymuştur (Cumerford, 2010). Planlama destek sistemleri yaklaşımına dayanan (Geertman ve Stillwell, 2003) Logan, Sidney (NSW Planning Portal) ve Vancouver gibi uygulamalarda planlama süreçlerinin dijitalleştirilmesi verimlilik, şeffaflık ve yenilik açısından önemli kazanımlar sağlamıştır (Hersperger vd., 2022). Bununla birlikte bu uygulamaların mülkiyet verisiyle ilişkisi çoğunlukla görüntüleme ve sorgulama düzeyinde kalmaktadır.

Türkiye'de e-Plan Otomasyon Sistemi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilerek 19 Aralık 2019'da hizmete sunulmuştur (ÇŞİDB, t.y.). Sistemin hukuki dayanağını 3194 sayılı İmar Kanunu ile mekânsal strateji planından uygulama imar planına uzanan hiyerarşik plan kademelenmesini tanımlayan Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği oluşturmaktadır (Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği, 2014). Teknik altyapıyı oluşturan Plan GML, ISO 19100 serisi ve OGC standartlarına uygun, geometri, öznitelik, metaveri ve topoloji bilgisini birlikte tutan XML tabanlı bir veri modelidir (Hanbay vd., 2022). Ulusal Plan GML şemaları Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemi Yürütme Kurulu kararıyla yürürlüğe girmiş ve plan işlem numarası alınırken planların bu formatta yüklenmesi zorunlu hâle gelmiştir (TCBS Yürütme Kurulu, 2020). Ne var ki mevcut veri yapısı plan kararlarına odaklanmakta; hisseli mülkiyet, irtifak hakları, şerhler, beyanlar ve kamulaştırma bilgileri gibi taşınmazın hukuki durumunu belirleyen veriler sistemde yer almamaktadır. Bu çalışmanın amacı, söz konusu boşluğu gidermek üzere plan kararları ile kadastral bilgilerin bütünleşik biçimde yönetilmesine olanak sağlayan kadastral tabanlı bir e-Plan veri modeli önermektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırma, tasarım ve geliştirme odaklı bir modelleme çalışması olarak dört aşamada yürütülmüştür: (i) e-Plan, TAKBİS, MEGSİS ve TUCBS veri yapılarının incelenmesiyle mevcut durum analizi, (ii) planlama süreçlerinde ihtiyaç duyulan kadastral bileşenlerin belirlendiği gereksinim analizi, (iii) kavramsal veri modelinin geliştirilmesi ve (iv) modelin UML sınıf diyagramları, örnek sorgu senaryoları ve kullanıcı arayüzleri üzerinden değerlendirilmesi. Planlama verisi olarak Plan GML yapısı, plan lejantları, plan notları ve plan fonksiyonları; mevzuat verisi olarak 3194 sayılı İmar Kanunu, Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği, 3402 sayılı Kadastro Kanunu ve ilgili ikincil düzenlemeler incelenmiştir.

Kadastro altyapısı açısından TAKBİS'in tapu sicili bileşeni yaklaşık 25 milyon parsel için büyük ölçüde tamamlanmış, ancak farklı üretim teknikleri, ölçekler ve koordinat sistemlerinden kaynaklanan veri kalitesi sorunları nedeniyle kadastral harita bileşeni yalnızca 3,5 milyon parseli kapsayabilmiştir (Aydınoğlu ve İnan, 2014). Bu tespitler üzerine başlatılan TAKBİS 2020 Projesi, LADM ve TUCBS ile uyumlu, çok amaçlı bir veri altyapısı hedeflemektedir (Dursun vd., 2019). MEGSİS, kadastro müdürlüklerindeki CAD tabanlı verileri merkezi bir sistemde toplayarak tapu bilgileriyle eşleştirmekte ve WMS/WFS servisleri aracılığıyla 770 kurumla paylaşmaktadır (Toker, 2015); ancak bir sunum platformu olarak tasarlandığından plan verilerini yönetmemektedir. TUCBS kapsamında ise Tapu-Kadastro teması tanımlanmış, Plan veri grubu için standart geliştirme çalışmaları sürmektedir (Yomralıoğlu ve Aydınoğlu, 2014). Model tasarımında nesne yönelimli modelleme yaklaşımı benimsenmiş, LADM'nin harici sınıf yapısının dış kaynaklı verilerin kadastral altyapıya bağlanmasına olanak tanıması (Polat, 2017) kavramsal çerçeve olarak esas alınmıştır.

3. ÖNERİLEN VERİ MODELİ VE BULGULAR

Gereksinim analizi sonucunda dört katmanda toplam 50 öznitelik belirlenmiştir: Parsel (16), Mülkiyet (8), Hak ve Kısıtlamalar (13) ve Plan Kararları (13). Parsel katmanı; il, ilçe, mahalle, ada-parsel numarası, tapu alanı, geometri,

koordinat sistemi, kadastro durumu ve taşınmaz niteliği gibi bilgileri içermekte ve planlama kararlarının uygulandığı en küçük mekânsal birim olması nedeniyle modelin merkezinde yer almaktadır. Mülkiyet katmanı malik türü, mülkiyet şekli, hisse oranı, pay/payda ve edinme sebebini; Hak ve Kısıtlamalar katmanı irtifak, üst hakkı, geçit hakkı, şerh, beyan, koruma alanı, kamulaştırma ve tahsis kayıtlarını; Plan Kararları katmanı ise plan türü, fonksiyon, emsal (KAKS), TAKS, yükseklik, kat adedi, yoğunluk, plan notu, onay tarihi ve yürürlük durumunu temsil etmektedir. Katmanlar Parsel_ID birincil anahtarı üzerinden bire-çok (1:N) ilişkilerle bağlanmakta; böylece bir parselin birden fazla malik, hak/kısıtlama ve plan kararı kaydıyla ilişkilendirilmesi mümkün olmaktadır. Modelin LADM ile kavramsal ilişkisi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen veri modeli ile ISO 19152 (LADM) arasındaki kavramsal ilişki

Önerilen model	ISO 19152 (LADM)	Açıklama
Parsel	LA_SpatialUnit	Mekânsal birimi temsil eder; diğer katmanların bağlandığı temel birimdir.
Mülkiyet	LA_Party + LA_BAUnit	Malik ve temel idari birim bilgileri.
Hak ve Kısıtlamalar	LA_RRR	Hak, kısıtlama ve sorumluluklar.
Plan Kararları	Doğrudan tanımlanmamıştır	Bu çalışmada önerilen ek katman.

Modelin işlevselliğini göstermek üzere dört sorgu grubunda (parsel, mülkiyet, hak-kısıtlama ve plan kararı) toplam 12 örnek senaryo hazırlanmıştır. Örneğin "sit alanı, taşkın riski ve kamulaştırma kısıtı bulunmayan parseller" sorgusu hak-kısıtlama ve parsel katmanlarını; "kentsel dönüşüm alanında bulunan ve mülkiyet ihtilafı olmayan parseller" sorgusu plan, mülkiyet ve hak-kısıtlama katmanlarını birlikte kullanmaktadır. "2025 sonrasında kat adedi 5'in üzerine çıkarılan parseller" sorgusu ise eski ve yeni plan değerlerini karşılaştırarak plan değişikliklerinin parsel ölçeğinde zamansal olarak izlenebileceğini göstermektedir. Farklı veri kaynaklarının ortak bir model altında ilişkilendirilmesi, amaca uygun arazi yönetimi yaklaşımının temel ilkeleriyle (Enemark vd., 2014), plan değişikliklerinin zamansal izlenebilirliği ise geleceğin kadastro vizyonuyla (Bennett vd., 2010) örtüşmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mevcut sistem analizi, e-Plan Otomasyon Sistemi'nin plan verilerinin standart biçimde üretilmesi ve paylaşılmasında önemli bir altyapı sunduğunu, ancak kadastral bileşenler açısından yetersiz kaldığını göstermiş ve bu yönüyle araştırmanın ilk hipotezini (H1) desteklemiştir. Geliştirilen model, parsel, mülkiyet, hak ve kısıtlamalar ile plan kararlarının ortak bir yapıda temsil edilebileceğini (H2) ve Plan GML, TUCBS veri temaları ve LADM dikkate alınarak ulusal mekânsal veri altyapısıyla birlikte çalışabilir biçimde tasarlanabileceğini (H3) kavramsal düzeyde ortaya koymuştur. Modelin gerçek kurum verileriyle sınanmamış olması ve iki boyutlu kadastro yaklaşımına dayanması çalışmanın temel sınırlılıklarıdır. Gelecek çalışmalarda modelin e-Plan ile TAKBİS ve MEGSİS arasında gerçek zamanlı veri paylaşımını destekleyecek şekilde pilot kurumlarda uygulanması, kat mülkiyeti ile yer altı ve yer üstü haklarını kapsayacak biçimde üç ve dört boyutlu kadastro modellerine genişletilmesi (Gürsoy Sürmeneli vd., 2022) ve belediyeler, harita mühendisleri ve şehir plancılarıyla kullanılabilirlik çalışmalarının yürütülmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aydınoğlu, A. Ç. ve İnan, H. İ. (2014). Developing land registry and cadastre base data model for land management applications. FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, Malezya, 16–21 Haziran 2014, Bildiri No. 7250.

Bennett, R., Rajabifard, A., Kalantari, M., Wallace, J. ve Williamson, I. (2010). Cadastral futures: Building a new vision for the nature and role of cadastres. FIG Congress 2010, Sydney, Avustralya, 11–16 Nisan 2010.

Cumerford, N. (2010). The ICSM ePlan protocol, its development, evolution and implementation. FIG Congress 2010 – Facing the Challenges, Building the Capacity, Sydney.

ÇŞİDB (t.y.). e-Plan otomasyon sistemleri. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü. https://cbs.csb.gov.tr/e-plan-otomasyon-sistemleri-i-102080 (Erişim: 23.05.2026).

Dursun, İ., Aslan, M. ve Sarıyüz, F. (2019). AİTM kapsamında TAKBİS 2020 projesi. TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 23–25 Ekim 2019, Ankara.

Elia, E., Zevenbergen, J., Lemmen, C. ve van Oosterom, P. (2013). The land administration domain model (LADM) as the reference model for the Cyprus land information system (CLIS). Survey Review, 45(329), 100–110. doi:10.1179/1752270611Y.0000000034.

Enemark, S., Bell, K. C., Lemmen, C. ve McLaren, R. (2014). Fit-for-purpose land administration (2. bs., FIG Publication No. 60). Copenhagen: International Federation of Surveyors (FIG).

European Commission (2014). INSPIRE data specification on land use – Technical guidelines. European Commission Joint Research Centre.

Geertman, S. ve Stillwell, J. (Ed.). (2003). Planning Support Systems in Practice. Heidelberg: Springer.

Gürsoy Sürmeneli, H., Alkan, M. ve Koeva, M. (2022). Design and implementation of a 4D cadastral legal model for Turkish land administration infrastructure based on LADM. Geocarto International, 37(26), 12096–12118. doi:10.1080/10106049.2022.2063410.

Hanbay, R., Yılmaz, P., Bilgin, G., Bayar, D. Y. ve Bayraktar, H. (2022). Akıllı planlar: Plan GML veri modeli. VIII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2022), 17–19 Kasım 2022, Ankara.

Hersperger, A. M., Thurnheer-Wittenwiler, C., Tobias, S., Folvig, S. ve Fertner, C. (2022). Digitalization in land-use planning: Effects of digital plan data on efficiency, transparency and innovation. European Planning Studies, 30(12), 2537–2553. doi:10.1080/09654313.2021.2016640.

ISO (2012). ISO 19152:2012 Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM). Geneva: International Organization for Standardization.

Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği (2014). Resmî Gazete, 14 Haziran 2014, Sayı: 29030.

Polat, Z. A. (2017). Arazi yönetiminin tapu ve kadastro işlemlerine yönelik harici veri modeli tasarımı ve uygulaması (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pouliot, J., Vasseur, M. ve Boubehrezh, A. (2013). How the ISO 19152 Land Administration Domain Model performs in the comparison of cadastral systems: A case study of condominium/co-ownership in Quebec (Canada) and Alsace Moselle (France). Computers, Environment and Urban Systems, 40, 68–78. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2012.08.006.

Sarıçiçek, İ., Yener, A. Y. ve Bank, E. (2019). Türkiye arazi yönetim modelinin LADM, TUCBS, INSPIRE ve TAKBİS kapsamında mukayesesi. Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara.

Steudler, D. (2004). A framework for the evaluation of land administration systems (Doktora tezi). University of Melbourne, Melbourne, Australia.

TCBS Yürütme Kurulu (2020). Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemi Yürütme Kurulu'nun 20.08.2020 tarihli ve 3 sayılı kararı. Resmî Gazete, 18 Eylül 2020, Sayı: 31248 (Mükerrer).

Tjia, D. ve Coetzee, S. (2013). Application of the land administration domain model to the city of Johannesburg land information system. South African Journal of Geomatics, 2(3), 260–279.

Toker, K. (2015). Türkiye'de çeşitlerine göre kadastro süreçlerinin analizi. Proceedings of the World Cadastre Summit 2015, ss. 436–444, İstanbul.

UN-ECE (1996). Land Administration Guidelines – With Special Reference to Countries in Transition. New York ve Geneva: United Nations. ECE/HBP/96.

Yılmaz, O. ve Alkan, M. (2022). Arazi idaresi temel modeli planlama paketi geliştirilmesi için Türkiye mekânsal planlama sisteminin incelenmesi. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 9(2), 150–165. doi:10.9733/JGG.2022R0011.T.

Yılmaz, O. ve Alkan, M. (2023). The joint spatial planning data model. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W6-2022, 387–390. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-2022-387-2023.

Yılmaz, O., Gürsoy Sürmeneli, H. ve Alkan, M. (2023). Spatial-land use planning system data model proposal for edition II of LADM. Geocarto International, 38(1), 2284278. doi:10.1080/10106049.2023.2284278.

Yomralıoğlu, T. ve Aydınoğlu, A. Ç. (2014). Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ve BB'ler için coğrafi veri altyapısı. Arazi Yönetimi Çalıştayı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

14 MAYIS 2024 JEOMANYETİK FIRTINASININ MUTLAK GNSS KONUM DOĞRULUĞUNA ETKİSİNİN IGS İSTASYONLARI KULLANILARAK İNCELENMESİ

Ayşen ASLAN[1], Leyla ÇAKIR[2], Ertan GÖKALP[3],

[1]Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, aysenaslan@ktu.edu.tr
[2]Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, lcakir@ktu.edu.tr
[3]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, ertan@ktu.edu.tr

ÖZET

Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), jeodezik uygulamalardan mühendislik projelerine kadar birçok alanda yüksek doğruluklu konum belirleme olanağı sağlamaktadır. GNSS sinyallerinde bulununan Uydu Saati Hataları, Yörünge (Efemeris) Hataları, Troposferik Gecikme, Çoklu Yol (Multipath) Etkisi, Uydu Geometrisi, Alıcı Gürültüsü, Uydu Geometrisi, Sinyal Kesilmesi gibi hatalar konum belirleme doğruluğunu ciddi oranda etkilemektedir. Ayrıca GNSS sinyalleri, özellikle yoğun güneş aktivitesi dönemlerinde iyonosferde meydana gelen düzensizliklerden önemli ölçüde etkilenebilmekte ve hataları jeomanyetik bir fırtına etkisinin olmadığı bir güne kıyasla çok daha arttırmakta ve konum doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, 14 Mayıs 2024 tarihinde meydana gelen ve son yılların en şiddetli jeomanyetik fırtınalarından biri olan hava olayının GNSS nokta konum doğruluğu üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında GPS uyduları kullanılmıştır. MATLAB ortamında hazırlanan grafikler hem Sakin Güne hemde Fırtınalı Güne ait olmak üzere uydu bazlı oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, güneş patlamasının yaşandığı gün ROTI değerlerinde belirgin anomaliler oluştuğunu ve standart gürültüden arındırılmış koordinat bileşenlerinde (Kuzey, Doğu, Düşey) geometrik sapmalara yol açtığını göstermiştir. Bu tür yüksek çözünürlüklü analizler, GNSS tabanlı altyapı yönetimleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında haritalandırılan gerçek zamanlı hassas konumlandırma uygulamaları için kritik altlık oluşturmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Güneş Patlaması, IGS, İyonosfer, ROTI, sTEC.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE MAY 14, 2024 GEOMAGNETIC STORM ON ABSOLUTE GNSS POSITIONING ACCURACY USING IGS STATIONS

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) provide highly accurate positioning capabilities in many fields, from geodetic applications to engineering projects. Errors in GNSS signals, such as satellite clock errors, orbital (ephemeris) errors, tropospheric delay, multipath effect, satellite geometry, receiver noise, and signal interruption, significantly affect the accuracy of positioning. However, GNSS signals can be significantly affected by irregularities in the ionosphere, especially during periods of intense solar activity, increasing errors much more than on a day without a geomagnetic storm and negatively impacting location accuracy. This study aims to investigate the effect of the geomagnetic storm event that occurred on May 14, 2024, one of the most severe in recent years, on GNSS point position accuracy. GPS satellites were used in this study. The graphs, prepared in MATLAB, were created based on satellite data for both calm and stormy days. The findings indicate that significant anomalies occurred in the ROTI values on the day of the solar flare and that these anomalies caused geometric deviations in the standard noise-subtracted coordinate components (North, East, Vertical). Such high-resolution space weather analyses provide a critical foundation for GNSS-based infrastructure management and real-time precision positioning applications mapped in Geographic Information Systems (GIS) environments.

Keywords: Solar Flare, IGS, Ionosphere, ROTI, sTEC.

1. GİRİŞ

Konumsal verilerin doğruluğu, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), hassas haritalama, deformasyon izleme ve mühendislik uygulamalarının güvenilirliği açısından temel bir gerekliliktir. Bu konumsal verilerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan mutlak konum belirleme, herhangi bir referans istasyonuna ihtiyaç duymadan tek bir GNSS alıcısı ile konum koordinatlarının belirlenmesini sağlamaktadır. Ancak mutlak konum belirleme doğruluğu, GNSS sinyallerinin atmosferde yayılımı sırasında oluşan çeşitli hata kaynaklarından etkilenmektedir. Özellikle yoğun güneş aktivitesi sonucunda meydana gelen güneş patlamaları ve buna bağlı gelişen jeomanyetik fırtınalar sonucunda iyonosferde meydana gelen elektron yoğunluğu değişimleri, GNSS sinyallerinde gecikmelere ve düzensizliklere neden olarak konum doğruluğunu olumsuz yönde

etkileyebilmektedir. Güneş patlamalarının GPS doğruluğuna etkisi, yüksek enerjili parçacıkların Dünya'ya ulaşarak manyetik alanımızda dalgalanmalara ve manyetik fırtınalara neden olmasıdır. (Umar,vd. 2023)

Bu nedenle, bu türde hava olaylarının mutlak GNSS konum doğruluğu üzerindeki etkilerinin araştırılması, uzaktan algılama ve CBS tabanlı uygulamalarda kullanılan konumsal verilerin güvenilirliğinin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ağına ait üç farklı istasyon kullanılmıştır. Güneş Patlamasını görmek amacıyla üç farklı bölgeden istasyonlar seçilmiştir Amerika Birleşik Devletleri'nin Colorado eyaletinde bulunan AMC400USA, Güney Amerika'nın kuzeybatısında yer alan Kolombiya'nın başkenti Bogota'da bulunan BOGT00COL ve Kuzey Kutup Dairesi içerisinde, Grönland'ın kuzeybatı kıyısında bulunan THU200GRL istasyonları üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Güneş patlaması etkisini görebilmek amacıyla her bir istasyon için herhangi bir patlamanın olmadığı Sakin Gün ve Patlama Günü olarak iki farklı güne ait RINEX verileri kullanılmıştır. Kullanılan RINEX verilerinden sTEC, ROTI ve Konum Sapma Grafikleri elde edilmiştir. Güneş patlamasının konumda etkisini daha net görebilmek amacıyla Geometry-Free Kombinasyonu kullanılmıştır.

$$\Phi_{GF} = I_{L2} - I_{L1} + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + b_{GF} + \varepsilon_{GF} \quad (1)$$

Bu kombinasyon ile zamana bağlı grafik çizildiğinde düz veya çok hafif eğimli bir çizgi elde edilir. Çünkü iyonosfer yavaş değişir. Eğer sinyalde anlık bir kesinti (uydunun ağaç arkasında kalması vb.) olursa tam sayı değerleri aniden değişir ve grafikte sert bir dikey sıçrama görülür.

Çalışmada kullandığımız Geometry-Free kombinasyonu, L1 ve L2 faz ölçümlerinin birbirinden çıkarılmasıyla uydu-alıcı geometrisini, saat hatalarını ve troposferik etkiyi tamamen ortadan kaldırır (Hofmann-Wellenhof vd., 2008). Bu problemin çözümü ve verideki doğrusal olmayan eğilimlerin temizlenmesi amacıyla lokal zaman pencerelerinde doğrusal yaklaşımlar sunan (Jakowski vd., 2011) bir filtreleme yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan ilgili IGS istasyonlarına ait, verilerin Geometry-Free kombinasyonu ile iyonosferik gecikmelerin hesaplanması ve analiz edilmesi süreçlerinde MATLAB (Versiyon R2025b, The MathWorks Inc., Natick, MA, USA) yazılımı kullanılmıştır.

2.1 Verilerin Temini

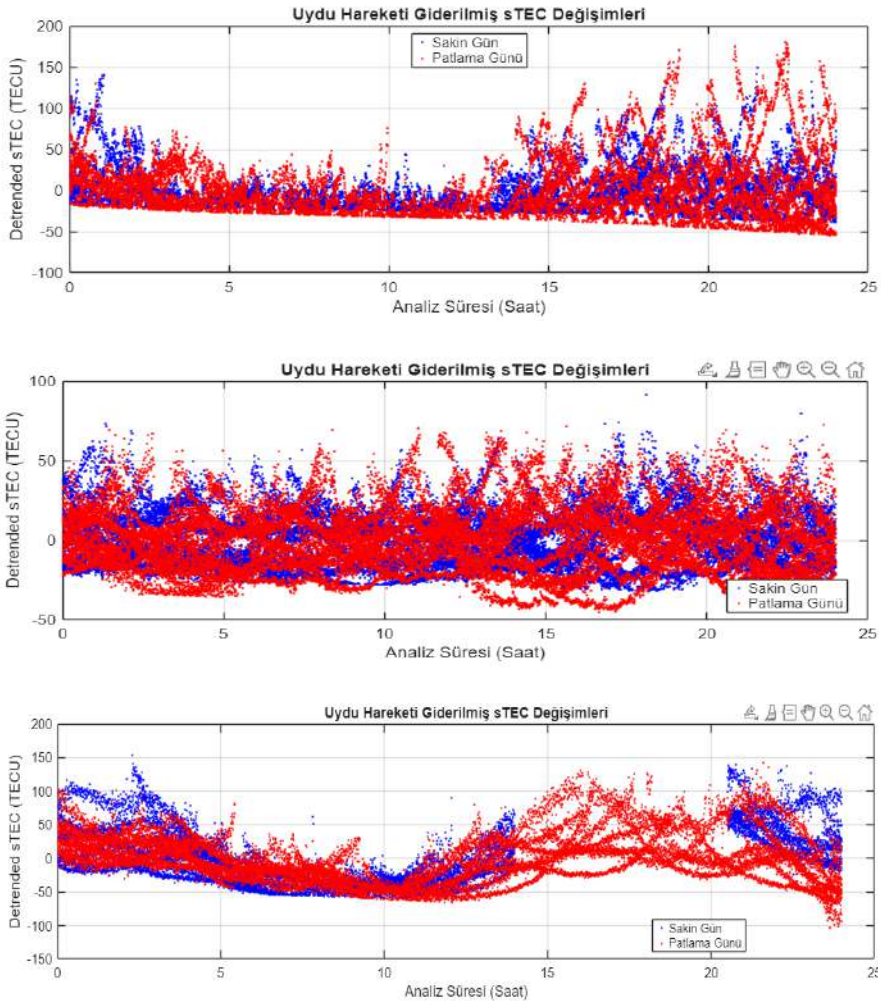
Çalışma kapsamında seçmiş olduğumuz üç farklı istasyondan ikisinin konumları itibari ile kutup dairelerine yakın ve bir diğer istasyonun ise ekvator civarında seçilmesine dikkat edilmiştir (**Şekil 1.**). Bu üç farklı istasyonda yapılan güneş patlamasının yaşandığı Fırtınalı gün olarak adlandırılan 14 Mayıs 2024 tarihine ait IGS verileri ve herhangi bir güneş patlamasının iyonosfer tabakasına etkisinin olmadığı Sakin Gün olarak adlandırılan 8 Nisan 2024 tarihine ait ölçümler IGS üzerinden elde edilerek patlama etkisi her bir istasyon için gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında, analizlerde GPS uyduları kullanılmıştır.



Şekil 1.

2.2 sTEC ve ROTI Değişim Analizi

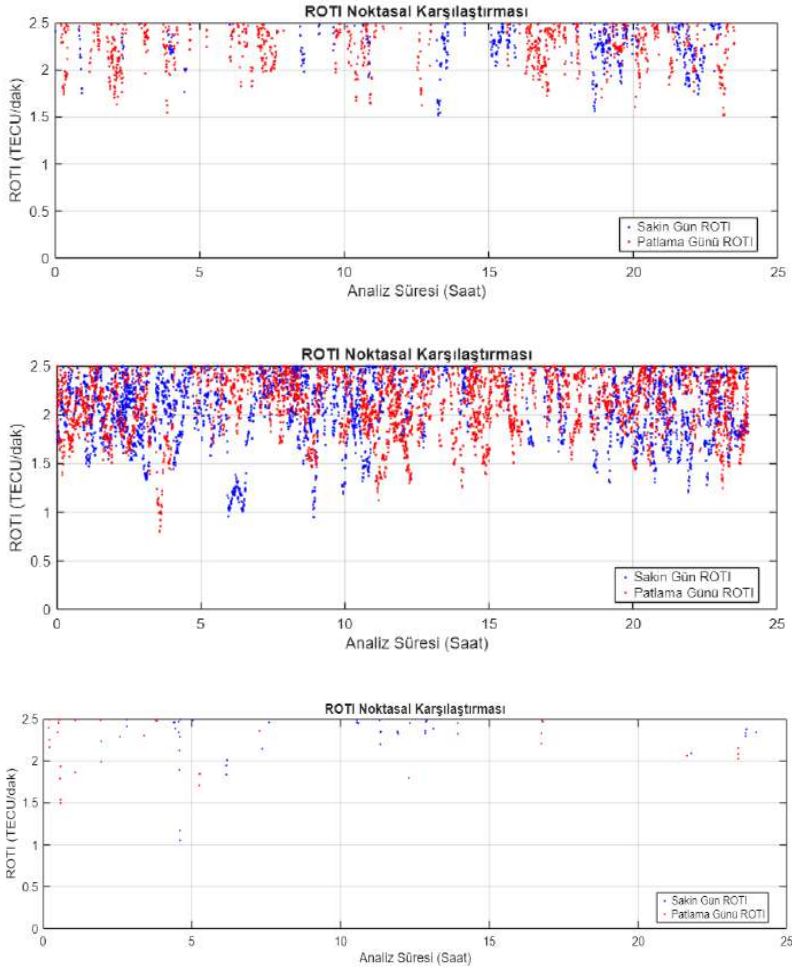
sTEC iyonosfer tabakasındaki elektron yoğunluğunu ifade eden bir parametredir. GNSS uydusundan çıkan sinyalin, yeryüzündeki alıcıya ulaşırken izlediği eğik hat (slant path) boyunca karşılaştığı toplam elektron miktarıdır. İyonosfer tabakası, uydudan gelen sinyalleri geciktirerek veya hızlandırarak GNSS ölçümlerinde iyonosferik gecikme hatasına yol açar. Jeodezide santimetre veya milimetre hassasiyetinde konum belirleyebilmek için sTEC değerleri hesaplanır ve bu sayede atmosferik hatalar düzeltilir. Çalışmamızda sırasıyla her bir istasyon için elde ettiğimiz sTEC grafikleri aşağıdaki gibidir. (Şekil 2.; Sırasıyla AMC400USA, THU200GRL ve BOGT00COL istasyonlarının GPS uyduları kullanılarak elde edilmiş sTEC grafikleri.)



Şekil 2:Sırasıyla AMC400USA, THU200GRL ve BOGT00COL istasyonlarının GPS uyduları kullanılarak elde edilmiş sTEC grafikleri

Herbir istasyon için grafikler incelendiğinde Sakin Güne ait olan mavi noktalarda sTEC değerleri Patlama Gününe ait sTEC değerlerine göre çok daha dar bir bantta, kararlı ve sakin bir seyir izlediği görülmektedir. Özellikle 15. saat ile 24. saatler arasında sTEC değerlerinde çok ciddi saçılmalar, ani dikey gidiş-gelişler ve genlik (amplitude) artışları gözlemlenmektedir. Kırmızı çizgilerin mavi çizgilerden saparak yukarı doğru yaptığı bu ani sıçramalar, güneş patlamasının iyonosferdeki serbest elektron yoğunluğunu aniden tetiklediğini, grafikler üzerinden bizlere göstermektedir.

ROTI ise iyonosfer tabakasındaki düzensizlikleri ve sinyal bozulmalarını ölçmek için kullanılan "Rate of TEC Index" (Toplam Elektron İçeriği Değişim Oranı İndeksi) teriminin kısaltmasıdır. Güneş Patlamaları ve jeomanyetik fırtınalar yeryüzüne ulaşan uydu sinyallerinde ani kırılmalara neden olur. ROTI bu dalgalanmaların boyutunu ölçer. (Şekil 3.; Sırasıyla AMC400USA, THU200GRL ve BOGT00COL istasyonlarının GPS uyduları kullanılarak elde edilmiş ROTI grafikleri.)



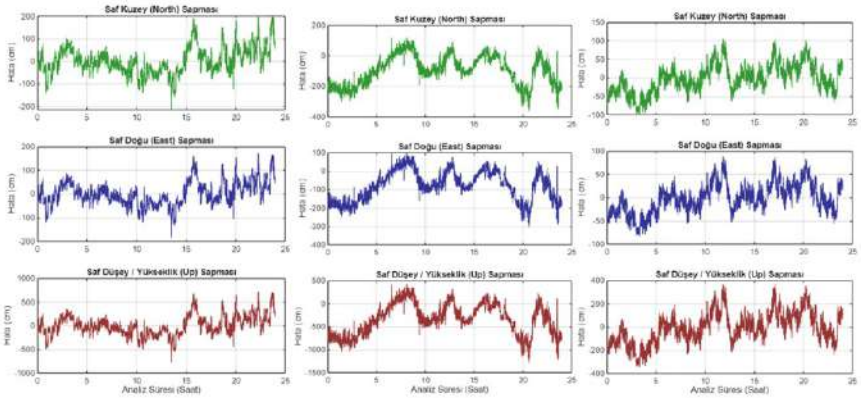
Şekil 3. Sırasıyla AMC400USA, THU200GRL ve BOGT00COL istasyonlarının GPS uyduları kullanılarak elde edilmiş ROTI grafikleri

Sakin Güne ait Mavi noktalara bakıldığında ani sıçramalar olmasa da iyonosferin kendi doğal yapısı gereği (özellikle ekvatoral veya yüksek enlemlerde ya da lokal çoklu yansıma -multipath- etkileri nedeniyle) mavi noktalarda da bir miktar gürültü/saçılma görünmektedir.

Patlama Günü ise üst paneldeki sTEC dalgalanmalarıyla eş zamanlı olarak kırmızı noktalar 2.5 TECU/dk sınırına kadar (tavan değerlere) çok yoğun bir şekilde tırmandığı gözlemlenmektedir. Bu sayede iyonosferin homojen yapısının patlamayla birlikte tamamen bozulduğunu ve sinyallerde yüksek düzeyde faz düzensizliği oluştuğunu matematiksel olarak elde edilen ROTI grafikleri göstermektedir.

3. SONUÇLAR

Yapılan analizlere göre Güneş Patlamasının konum doğruluğuna etkisini görmek için grafikler hazırlanmıştır.



Şekil 4. AMC400USA, BOGT00COL ve THU200GRL istasyonlarına ait Güneş patlamasından kaynaklanan Kuzey, Doğu ve Düşey yönlü konum sapmaları.

Elde edilen bulgular, güneş patlamasının meydana geldiği fırtınalı günde güneş patlamasından dolayı iyonosferde meydana gelen elektron yoğunluğunun arttığı ve bunun iyonosferde keydedilen TEC değerine önemli ölçüde yansıdığı belirlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda hazırlanan TEC ve ROTI grafiklerinde ise Fırtınalı Gün'de Sakin Güne kıyasla belirgin anomalilerin oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca standart kod ve faz gürültüsünden arındırılmış Kuzey, Doğu ve Düşey koordinat bileşenlerinde Kuzey'de 1.69m, Doğu'da 1.41m ve Düşey'de 5.94m konum sapmalarının meydana geldiğini göstermiştir. Bu tür yüksek çözünürlüklü uzay iklimi analizleri, CBS tabanlı altyapı yönetimleri hassas ve gerçek zamanlı konumlandırma uygulamaları için kritik önem taşımaktadır. Bu çalışma doğrultusunda Güneş Patlamasının olduğu bir günde jeodezik ölçüm yapılması durumunda kullanılan alıcının Float çözüm yapma ihtimali olabileceği ve bu durumunda elde edilen koordinat değerlerinde çok fazla sapmalara neden olacağı ve yanlış hesaplamaların yapılabileceği belirlenmiştir.

Unutulmamalıdır ki Güneş patlamalarının GNSS sinyalleri üzerindeki iyonosferik etkileri, gözlem yapılan istasyonun jeomanyetik konumu ve patlama anındaki yerel saati (lokal zaman) ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada ele alınan anomali anının, istasyonun güneşe doğrudan bakan yüzünde (gündüz kuşağında) gerçekleşmesi, sinyal yolu üzerindeki serbest elektron üretimini en üst düzeye çıkarmıştır. İstasyonun ekvator/kutup dinamiği ile birleşen bu zamanlama faktörü; sTEC grafiklerinde gözlemlenen ani sıçramalara **(Paula ve Jonah, 2022),** iyonosferin homojen yapısının bozularak sinyal kalitesinin düşmesine ve neticesinde taşıyıcı faz ölçülerinde ciddi sinyal kopukluklarına (loss of lock) zemin hazırlamıştır **(Maksimov vd., 2024)**. Bu durum, uydu jeodezisinde yüksek doğruluklu konum belirleme süreçlerinin uzay iklimi şartlarından ne derece etkilendiğini açıkça ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A. ve McClusky, S. C. (2018). *GAMIT Reference Manual, Release 10.7*. Massachusetts Institute of Technology.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E. (2008). *GNSS–Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.

International GNSS Service [IGS]. (2026). *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format - Version Standards*. IGS Central Bureau.

Jakowski, N., Hoque, M. M. ve Mayer, C. (2011). A new method for linear detrending and sTEC calculation in ionospheric modeling. *Journal of Geodesy*, 85(11), 801-815.

Maksimov, D. S., Shlyk, S. V. ve Ivanov, I. I. (2024). Solar Flares in the 25th Cycle of Activity: Effect on Ionospheric Disturbance and GNSS Signal Strength. *Cosmic Research*, 63(1), 125─135.

Paula, E. R., Jonah, O. F. ve Kherani, E. A. (2022). Solar Flare and Radio Burst Effects on GNSS Signals and the Ionosphere During September 2017. *Radio Science*, 57(10), 1-14.

Takasu, T. (2013). *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning* (Sürüm 2.4.2) [Bilgisayar yazılımı]. rtklib.com

The MathWorks Inc. (2024). *MATLAB* (Sürüm R2024a) [Bilgisayar yazılımı]. mathworks.com

Umar, S., Tiryaki, M. ve Erdoğan, H. (2023). Farklı şiddetlerde meydana gelen güneş aktivitesinin GPS-PPP doğruluğu üzerindeki etkisinin bölgesel olarak araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (veya DergiPark üzerindeki tam adı)*, 13(x), xx-xx. *[Not: Dergipark bir veri tabanıdır, hakemlerin puan kırmaması için yayının çıktığı asıl dergi adını ve sayfa numaralarını eklemeniz iyi olur]*

Vandierendonck, A., Jacques, L. ve Warnant, R. (2025). *Ionospheric Effects on GNSS Performance*. HAL Open Science, 1-18.

SWOT UYDUSUNDAN HAVZA NEHİR DEŞARJI TAHMİNİ İÇİN FİZİK-DESTEKLİ DENETİMSİZ ÖĞRENME

Yunus KAYA[1]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Harran Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63050, Haliliye, Şanlıurfa, yunuskaya@harran.edu.tr

ÖZET

Nehir deşarjının küresel ölçekte izlenmesi; su kaynakları yönetimi, taşkın riski değerlendirmesi ve ekohidrolojik süreçlerin iklim değişikliği altında doğru biçimde ilişkilendirilmesi için temel bir girdi oluşturur. Yüzey suyu gözlem ağlarının dünya genelinde hızla seyrekleşmesi ise geniş nehir havzalarını, deşarjın doğrudan ölçülemediği ölçümsüz havza konumuna sürüklemektedir (Pavelsky vd., 2014). Bu çalışmanın amacı, herhangi bir yerinde kalibrasyon verisine gerek duymadan Yüzey Suyu ve Okyanus Topografyası (SWOT) uydu gözlemlerinden nehir deşarjını, yatak batimetrisini ve pürüzlülük katsayısını eş zamanlı olarak kestirebilen fizik temelli bir çerçeve geliştirmek ve bu çerçevenin farklı hidro-iklimsel rejimlerdeki geçerliliğini küresel ölçekte sınamaktır.

NASA-CNES iş birliğiyle yörüngeye yerleştirilen SWOT misyonu, Ka-bant Radar İnterferometresi (KaRIn) aracılığıyla nehirlerin su yüzeyi yüksekliğini, genişliğini ve eğimini iki boyutlu olarak ölçebilmektedir (Biancamaria vd., 2016). Ancak uydu deşarjı doğrudan gözlemleyemez: Manning-Strickler bağıntısındaki bilinmeyen yatak kesit alanı (A_0) ve pürüzlülük katsayısı (n) nedeniyle deşarj kestirimi, yapısal olarak yetersiz belirlenmiş ve eşfinaliyet (equifinality) sorunu barındıran bir ters problem olarak kalır. MetroMan gibi mevcut algoritmalar bu belirsizliği yerinde ölçüm verisi ya da tarihi öncül bilgilerle çözmekte, dolayısıyla gerçek anlamda ölçümsüz havzalarda uygulanabilirliklerini kaybetmektedir (Durand vd., 2023; Andreadis vd., 2025).

Bu çalışmada geliştirilen Fizik Destekli Denetimsiz Öğrenme (PIUL) çerçevesi, yerinde kalibrasyon verisi yerine evrensel hidrolik yasaları doğrudan optimizasyon sürecine gömmektedir. Yöntem, olası (A_0, n) parametre uzayını 50.000 Monte Carlo senaryosuyla örneklemekte; her senaryoyu Kütle Korunumu Yasası ve İstasyonda Hidrolik Geometri (AHG) kuvvet-yasa ilişkilerinden oluşan iki fizik denetçisi üzerinden puanlamaktadır. Bu iki kısıt, bileşik bir amaç fonksiyonuna gömülerek Bayes çerçevesinde bir olabilirlik skoru üretilmekte; en düşük fiziksel hatayı veren parametre kombinasyonu maksimum a posteriori (MAP) tahmini olarak seçilmektedir. Menderesli ve örümlü kanal kesimlerinde statik merkez hattından kaynaklanan eğim önyargılarını gidermek amacıyla, nehir talveg hattı boyunca kümülatif jeodezik mesafeyi hesaplayan yeni bir Jeodezik Uzaklık Temelli Eğim (GDBS) algoritması geliştirilip çerçeveye entegre edilmiştir (Franze vd., 2025; Ledauphin vd., 2025).

Çerçevenin doğrulanması amacıyla SWOT Level 2 High-Rate River Single-Pass (L2_HR_RiverSP_2.0) ürünü kullanılarak, Arktik'ten tropiklere ve kurak bölgelere uzanan 14 büyük nehir havzası analiz edilmiştir: nival rejimli Lena, Ob, İrtiş ve Yukon; tropikal Amazon, Purus, Madeira, Kasai ve Nijer; kurak ya da düzenlenmiş Nil, Orange, Missouri, Mississippi ve White River. Doğrulama için USGS ve GRDC istasyonlarından elde edilen günlük yerinde ölçüm kayıtları referans alınmış, veri noktası sayısı havza başına 35 ile 163 arasında değişmiştir.

Analiz sonuçları, havzaların büyük bölümünde AHG ilişkisinin yüksek doğrulukla yeniden üretildiğini göstermektedir ($R^2 > 0,85$); Kasai ($R^2 = 0,93$) ve Nijer ($R^2 = 0,90$) nehirleri en güçlü uyumu sergilemiştir. Kalibrasyon verisi kullanılmadan kurtarılan kuvvet-yasa üsteli ($b \approx 0,30$), Leopold ve Maddock'un (1953) klasik çalışmasında tanımlanan doğal alüvyal kanal aralığıyla örtüşerek modelin gerçek kanal morfolojisini öğrendiğini kanıtlamaktadır. Lena Nehri'nde buz erimesiyle tetiklenen ilkbahar sel dalgası ve yaklaşık 28.000 m^3/s'lik zirve deşarjı, yüksek zamansal sadakatle yeniden inşa edilmiştir. Buna karşın Amazon ($R^2 = 0,53$) ve Rio Madeira ($R^2 = 0,52$) gibi geniş ve düşük eğimli tropikal sistemlerde performans göreli olarak daha zayıf kalmış; bu durum, kinematik dalga varsayımının geri-su etkilerinin baskın olduğu ortamlarda zayıfladığını göstermiştir. Nil Nehri'nde gözlemlenen yüksek üstel değer ($b \approx 0,73$) ise baraj operasyonlarının kanal morfolojisi üzerindeki etkisini doğru biçimde yansıtmaktadır.

Bu çalışma, fiziksel yasaları veriye dayalı kalibrasyonun yerine ikame ederek eşfinaliyet sorununu kalibrasyon gerektirmeden çözen ölçeklenebilir bir çerçeve sunmaktadır. Geliştirilen yöntem, SWOT misyonunu dünyanın ölçümsüz nehir havzaları için işlevsel bir küresel sanal akım gözlem ağına dönüştürme potansiyeli taşımakta; su güvenliği, taşkın risk yönetimi ve iklim değişikliğine uyum politikaları için kritik bir veri altyapısı oluşturmaktadır.

Anahtar Sözcükler: deşarj tahmini, hidrolik geometri, ölçümsüz havzalar, SWOT misyonu

ABSTRACT

PHYSICS-INFORMED UNSUPERVISED LEARNING FOR RIVER DISCHARGE ESTIMATION FROM SWOT SATELLITE DATA

Global monitoring of river discharge is a foundational input for water resources management, flood risk assessment, and the correct attribution of ecohydrological change under a shifting climate. The rapid decline of in-situ gauging networks worldwide, however, has left vast river basins in an ungauged condition, where discharge cannot be measured directly (Pavelsky et al., 2014). The purpose of this study is to develop a physics-based framework capable of simultaneously retrieving river discharge, channel bathymetry, and roughness from Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite observations without any in-situ calibration data, and to test the validity of this framework across contrasting hydro-climatic regimes at global scale.

The NASA-CNES SWOT mission measures river Water Surface Elevation (WSE), width, and slope in two dimensions through its Ka-band Radar Interferometer (KaRIn) (Biancamaria et al., 2016). The mission, however, does not observe discharge directly. Because the Manning-Strickler equation contains two unobserved unknowns, the bathymetric cross-sectional area (A0) and the roughness coefficient (n), discharge retrieval remains a structurally ill-posed inverse problem affected by equifinality. Existing

algorithms such as MetroMan resolve this ambiguity through in-situ calibration or historical priors, which renders them inapplicable in truly ungauged basins (Durand et al., 2023; Andreadis et al., 2025).

The Physics-Informed Unsupervised Learning (PIUL) framework developed in this study embeds universal hydraulic laws directly into the optimisation process rather than relying on ground-truth calibration. The algorithm samples the plausible (A0, n) parameter space through 50,000 Monte Carlo scenarios, scoring each against two physics supervisors: the Mass Conservation Law and the At-a-Station Hydraulic Geometry (AHG) power-law relation. These constraints are embedded in a composite objective function to generate a likelihood score within a Bayesian framework, and the parameter combination yielding the lowest physical error is selected as the Maximum A Posteriori (MAP) estimate. To correct slope biases arising from static centrelines in sinuous and braided channels, a novel Geodesic Distance-Based Slope (GDBS) algorithm was developed and integrated into the framework, computing cumulative geodesic distance along the true river thalweg (Franze et al., 2025; Ledauphin et al., 2025).

The framework was validated using the SWOT Level 2 High-Rate River Single-Pass (L2_HR_RiverSP_2.0) product across 14 major river basins spanning Arctic, tropical, and arid regimes: the nival Lena, Ob, Irtysh, and Yukon; the tropical Amazon, Purus, Madeira, Kasai, and Niger; and the arid or regulated Nile, Orange, Missouri, Mississippi, and White River. Daily in-situ discharge records from USGS and GRDC served as the reference dataset, with the number of valid observations per reach ranging from 35 to 163.

The results show that the AHG relationship is reproduced with high fidelity across most basins ($R^2 > 0.85$), with the Kasai ($R^2 = 0.93$) and Niger ($R^2 = 0.90$) rivers showing the strongest agreement. The width-discharge exponent recovered without calibration ($b \approx 0.30$) converges with the natural alluvial channel range established by Leopold and Maddock (1953), confirming that the model learns real channel morphology rather than fitting statistical noise. In the Lena River, the spring freshet triggered by ice break-up and the peak discharge of approximately 28,000 m^3/s were reconstructed with high temporal fidelity. Performance was comparatively weaker in wide, low-gradient tropical systems such as the Amazon ($R^2 = 0.53$) and Rio Madeira ($R^2 = 0.52$), where the kinematic wave assumption loses validity under backwater-dominated conditions. The elevated exponent observed for the Nile ($b \approx 0.73$) correctly reflects the influence of dam operations on channel morphology.

This study presents a scalable framework that resolves the equifinality problem through physical law rather than data-driven calibration. The proposed method has the potential to transform the SWOT mission into a functional, global virtual stream gauge network for the world's ungauged river basins, providing a critical data infrastructure for water security, flood risk management, and climate adaptation policy.

Keywords: discharge estimation, hydraulic geometry, SWOT mission, ungauged basins

KAYNAKLAR / REFERENCES

Andreadis, K. M., Coss, S. P., Durand, M., Gleason, C. J., Simmons, T. T., Tebaldi, N., ... & Yadav, B. (2025). A first look at river discharge estimation from SWOT satellite observations. Geophysical Research Letters, 52(9), e2024GL114185.

Biancamaria, S., Lettenmaier, D. P., & Pavelsky, T. M. (2016). The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. In Remote sensing and water resources (pp. 117-147). Springer.

Durand, M., Gleason, C. J., Pavelsky, T. M., Frasson, R. P. de M., Turmon, M., David, C. H., ... & Wang, J. (2023). A framework for estimating global river discharge from the SWOT satellite mission. Water Resources Research, 59(4), e2021WR031614.

Franze, S. E., Koehn, S., Chewning, C., & Nielsen, K. (2025). Braided rivers from SWOT: Water surface dynamics over the Brahmaputra river. Geophysical Research Letters, 52(22), e2025GL116488.

Fu, L. L., Pavelsky, T., Cretaux, J. F., Morrow, R., Farrar, J. T., Vaze, P., ... & Dibarboure, G. (2024). The SWOT mission: A breakthrough in radar remote sensing. Geophysical Research Letters, 51(4), e2023GL107652.

Ledauphin, T., Garambois, P. A., Larnier, K., Azzoni, M., Emery, C., Picot, N., ... & Yesou, H. (2025). Assessing SWOT hydraulic visibility on the Rhine. Earth and Space Science, 12(7), e2025EA004309.

Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications (Vol. 252). US Government Printing Office.

Pavelsky, T. M., Durand, M. T., Andreadis, K. M., Beighley, R. E., Paiva, R. C., Allen, G. H., & Miller, Z. F. (2014). Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations. Journal of Hydrology, 519, 1516-1525.

SDGSAT-1 GLIMMER YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GECE IŞIKLARI VERİLERİYLE KENTSEL YAPI VE AYDINLATMA TÜRLERİNİN ANALİZİ: TRABZON ÖRNEĞİ

Rabia Beyza TÜRKMEN[1] Sima AYDIN[2], Fethullah Polat[3], Funda YÜZLÜKOĞLU[4], Kazım KABA[5], İlham NASIROĞLU[6], Cahit YEŞİLYAPRAK[7,8], H. Mustafa KANDIRMAZ[9]

[1]Ögr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, rabiabeyza.turkmen23@ogr.atauni.edu.tr
[2]Ögr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, sima.aydin22@ogr.atauni.edu.tr
[3]YL Ögr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, fethullah.polat24@ogr.atauni.edu.tr
[4]Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fizik Bölümü, 45140, Yunusemre, Manisa, funda.aksoy@cb.edu.tr
[5]Dr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, kazimkaba@atauni.edu.tr
[6]Dr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü ,25240, Yakutiye, Erzurum, inasir@atauni.edu.tr
[7]Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, cahity@atauni.edu.tr
[8]Türkiye Ulusal Gözlemevleri, DAG, 25240, Yakutiye, Erzurum
[9]Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, Fizik Bölümü, 01250, Sarıçam, Adana, mkandirmaz@cu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, yeni nesil uzaktan algılama uydusu SDGSAT-1 Glimmer çok bantlı gece ışığı verileri kullanılarak Trabzon ilinin kentsel yapısı, sokak aydınlatma teknolojileri ve ekolojik ışık kirliliği hassasiyeti analiz edilmiştir. 12 Eylül 2025 tarihli Glimmer RGB verileri, 500 m çözünürlüklü VIIRS verisiyle kentsel ve kırsal alt bölgeler bazında karşılaştırılmış; Glimmer uydusunun sahte ışık kirliliğine yol açan ışık taşması (sensör doygunluğu) etkilerini giderdiği ve iki uydu arasında mavi spektrumda uyuşmazlıklar olduğu doğrulanmıştır. Glimmer RGB bantlarından geliştirilen spektral oranlama modeliyle Trabzon'un yapay ışık kaynakları; Sodyum buharlı, beyaz ışık ve kırmızı ışık olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma verileri Open Street Map arazi kullanım katmanlarıyla çakıştırılarak kaynak atıf analizi gerçekleştirilmiş; modern beyaz ışık aydınlatmalarının konut (%40.83) ve sanayi (%7.94) alanlarında yoğunlaştığı saptanmıştır. Ayrıca Öklid mesafe dönüşümü yöntemiyle beyaz ışık kaynaklarının korunan doğal alanlara mesafesi analiz edilmiş; Trabzon'daki toplam beyaz ışık aydınlatmasının %71.67'sinin korunan alanlara 0-500 m mesafede kritik risk kuşağında yer aldığı ve doğal alan sınırları içinde doğrudan 2.734 adet yapay ışık ihlali noktası bulunduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, kentsel enerji tasarrufu ve ekolojik sürdürülebilirlik odaklı akıllı aydınlatma planlamasında yüksek çözünürlüklü gece ışığı verilerinin karar destek potansiyelini kanıtlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: akıllı aydınlatma, ekolojik risk, gece ışıkları, SDGSAT-1 Glimmer, Trabzon.

ABSTRACT

ANALYSIS OF URBAN STRUCTURE AND LIGHTING TYPES USING SDGSAT-1 GLIMMER HIGH-RESOLUTION NIGHTTIME LIGHTS DATA: A CASE STUDY OF TRABZON

In this study, the urban structure, street lighting technologies, and ecological light pollution sensitivity of Trabzon province were analyzed using the new generation sustainable development satellite SDGSAT-1 Glimmer multispectral nighttime lights data. The Glimmer RGB data dated September 12, 2025, was compared with 500 m resolution VIIRS data on an urban and rural sub-regional basis; confirming that the Glimmer sensor eliminated the light bleeding (sensor saturation) effects and revealed spectral mismatches (blue light gap) in the blue spectrum. Artificial light sources of Trabzon were classified into High-Pressure Sodium, White LED, and Red Light using a spectral rationing model developed from Glimmer RGB bands. Land cover attribution analysis was performed by overlaying the classification results with Open Street Map land-use layers, showing that modern white LED lighting is concentrated in residential (40.83%) and industrial (7.94%) zones. Furthermore, the distance of white LED sources to protected natural areas was analyzed using the Euclidean distance transform method; revealing that 71.67% of the total white LED lighting in Trabzon is located within the critical risk zone (0-500 m) from protected areas, with 2,734 active light violation points directly inside the boundaries. The results prove the decision support potential of high-resolution nighttime lights data in smart lighting planning focused on urban energy conservation and ecological sustainability.

Keywords: ecological risk, nighttime lights, SDGSAT-1 Glimmer, smart lighting, Trabzon.

1.GİRİŞ

Gece ışıkları (NTL) insanlığın modernleşmesinden bu yana şehirlerin ve kırsal alanların yerleşim, ulaşım, ticari ve güvenlik gibi nedenlerle aydınlatılmasıyla birlikte gelişmiştir. Günümüzde NTL insan faaliyetlerinin gözlemlendiği

her noktada görülmektedir. Bu sayede gece ekonomik faaliyetlerin devam edebilmesi veya güvenlik problemlerinin ortadan kaldırılması sağlanmıştır. Ancak gece aydınlatma sistemlerinin aşırı veya yanlış miktarda kullanılması gibi nedenlerle, gökyüzü arka planındaki doğal parlaklık artışına neden olarak ışık kirliliği sorununu ortaya çıkarmaktadır (Falchi vd., 2016). Bu aydınlatmanın sağladığı olumlu özelliklerin yanı sıra neden olduğu kirliliğin çevreye ve insan sağlığına birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır (Falchi vd., 2011).

NTL'nin neden olduğu ışık kirliliği etkilerini haritalandırmak, doğal gökyüzü parlaklığına sahip koruma statüsündeki alanların tehdit seviyelerinin, yerleşim alanlarında ekolojik ve insan yaşamını olumsuz etkileyen kaynakların tespit edilmesi için gereklidir (Longcore & Rich, 2004). Uydu verilerinin kapsayıcılığı, geniş zamansal ve yüksek uzamsal çözünürlükleri sayesinde detaylı haritalar sunmaları nedeniyle ışık kirliliği çalışmalarında temel veri kaynaklarıdır (Mander vd., 2023). Bununla birlikte literatürde yaygın olarak kullanılan VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) sensörü 500-900 nm spektral aralığa sahip 500 metre çözünürlüklü ve güvenilir veri sağlayan cihazdır (Mander vd., 2023). Ancak 500 nm'den daha kısa dalga boyuna duyarsız olması nedeniyle özellikle şehir merkezi gibi Beyaz LED (WLED) kullanımının yaygın olduğu bölgelerde, bu ışık türlerinin saptanamamasına neden olmaktadır (S. Liu vd., 2024).

Bu çalışmada Birleşmiş Milletler 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na hizmet eden SDGSAT-1 (Sustainable Development Science Satellite-1) uydusunda bulunan Glimmer sensöründen elde edilen yüksek çözünürlüklü veriler kullanılmıştır (*Overview - SDGSAT-1 OPEN SCIENCE PROGRAM*, t.y.). Işık kirliliğini ve kirlilik kaynaklarını haritalandırırken Glimmer sensörünün sahip olduğu yüksek çözünürlük sayesinde kirlilik kaynaklarının konumu ve Mavi, Yeşil, Kırmızı kanallarıyla aydınlatma türlerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Trabzon ilinde bulunan doğal koruma alanları ve insan faaliyeti kapsamında aydınlatılmış alanların SDGSAT-1 Glimmer sensörü ile haritalandırılması gerçekleştirilmiştir**.** Amaç doğrultusunda doğal koruma alanlarına tehlike oluşturan kirlilik türleri, mesafeleri ve ekolojik riskleri ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca il sınırları içerisinde beyaz LED (WLED), kırmızı LED (RLED) ve yüksek buharlı sodyum (HPS) aydınlatma türlerinin kaynakları araştırılmıştır.

2. VERİ VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak, Karadeniz Bölgesi'nin doğusunda yer alan ve dik topografik yapısı ile doğrusal kıyı kentleşmesinin tipik bir örneğini sunan Trabzon ili seçilmiştir (Enlem: 40.5^0–41.1^0 K, Boylam: 39.1^0–40.5^0 D). Trabzon, dar bir kıyı şeridine sıkışmış yüksek yoğunluklu kentsel çekirdeği (Akçaabat, Ortahisar, Yomra, Arsin), kuzey-güney doğrultulu derin vadi karayolu koridorları (Maçka, Araklı, Of) ve güneyindeki ekolojik olarak hassas milli park ve orman sınırları ile yapay ışık sızıntısı ve kentsel saçılma analizleri için önemli coğrafi özellikler barındırmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu

2.2. Kullanılan Veri Setleri

Araştırmada SDGSAT-1 Glimmer RGB, VIIRS NTL (VNP46A2) ve OpenStreetMap (OSM) ana ve yardımcı veri setleri kullanılmıştır. SDGSAT-1 Glimmer verisi 12 Eylül 2025 tarihinde kaydedilen çok bantlı gece ışığı görüntüsüdür. Görüntü; Kırmızı (615-690 nm), Yeşil (515-590 nm) ve Mavi (445-515 nm) olmak üzere üç spektral banda ve 40 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir. VIIRS NTL (VNP46A2) verisi, Suomi-NPP uydusu üzerinde yer alan VIIRS sensörünün 12 Eylül 2025 tarihli, atmosferik olarak düzeltilmiş günlük gece ışığı ürünüdür. 500 m mekânsal çözünürlüğe sahip olan bu veri, radyometrik doğrulama amacıyla kullanılmıştır. OSM platformunun Geofabrik servisinden elde edilen Türkiye geneli güncel vektör katmanlarıdır (Geofabrik GmbH., 2025). Bu veri setinden Trabzon ili sınırlarına ait karayolu ağı, arazi kullanımı ve ticari ilgi noktaları yardımcı veri olarak entegre edilmiştir.

2.3. Veri Ön İşleme ve Veri İşleme

Farklı uzaysal ve radyometrik çözünürlüğe sahip veri setlerinin birbiriyle uyumlu çalışabilmesi için öncelikle geometrik koordinatlandırma yapılmış ve tüm katmanlar Coğrafi Koordinat Sistemi (WGS84 - EPSG:4326) projeksiyonuna dönüştürülmüştür. İki uydu arasındaki piksel bazlı korelasyon analizlerinde, yüksek çözünürlüklü Glimmer pikselleri, VIIRS piksel geometrisine (500 m) yeniden örnekleme (average resampling) yöntemiyle indirgenmiştir. Haritalama ve CBS çakıştırma analizlerinde ise Glimmer verisinin orijinal çözünürlüğü (40 m) korunmuştur. Doğrulama aşamasında bölge ayrımı için VIIRS radyans değerleri (R_{VIIRS}) referans alınmıştır. $R_{VIIRS}<0.2$ nW/cm^{2}sr arka plan (gürültü; analiz dışı tutulmuştur), $02<R_{VIIRS}<10.0$ nW/cm^{2}sr kırsal/yarı-kentsel alan, $R_{VIIRS}>10.0$ nW/cm^{2}sr kentsel alan (merkez) olarak tanımlanmıştır.

Glimmer RGB bantlarının piksel değerleri kullanılarak aydınlatma teknolojilerinin sınıflandırılması için üç aşamalı bir algoritma uygulanmıştır. Piksellerin insan gözü duyarlılığına eşdeğer gri tonlama parlaklığı (Y) standart parlaklık formülüyle (J. Liu vd., 2026) hesaplanmıştır:

$$Y = 0.2989 * R_{kırmızı} + 0.5870 * R_{yeşil} + 0.1140 * R_{mavi} \quad (1)$$

Gürültü ve karanlık alanları yapay ışıklardan ayırmak için dinamik bir eşik değeri (T) formüle edilmiştir:

$$T = \mu + 0.5 * \sigma \quad (2)$$

Burada μ geçerli piksellerin ortalama parlaklığını, σ ise geçerli standart sapmasını temsil etmektedir. $Y > T$ şartını sağlayan pikseller aktif yapay ışık kaynağı olarak kabul edilmiştir. Aktif ışık pikselleri, yeşil banda göre spektral oranları (bg ve rg) hesaplanarak sınıflandırılmıştır:

$$bg = \frac{R_{mavi}}{R_{yeşil} + \epsilon} \text{ ve } rg = \frac{R_{kırmızı}}{R_{yeşil} + \epsilon} \quad (3)$$

Burada ϵ sıfıra bölme hatasını engellemek için kullanılan çok küçük bir sabittir. Sınıf atama kuralları (Jia vd., 2024): $bg > 0.57$ WLED, $rg > 9.0$ RLED ve diğer tüm aktif ışık pikselleri sodyum buharlı aydınlatmadır. Bu ayrım iddiasının fiziksel temeli, aydınlatma teknolojilerinin (HPS, WLED, RLED) yaydıkları ışığın spektral dağılım özellikleri ile Glimmer görüntüleyicisinin bant aralıkları arasındaki uyuşmaya dayanmaktadır. HPS sarı/kırmızı spektrumdaki karakteristik emisyon tepeleri sensörün kırmızı (615-690 nm) bandında yoğunlaşırken, modern WLED yüksek enerjili emisyon pikleri mavi (445-515 nm) bantla örtüşmektedir (S. Liu vd., 2024). Bu spektral hassasiyet, lamba tiplerinin bant oranlama yöntemiyle ayırt edilebilmesini sağlamaktadır.

Sınıflandırılan yapay gece ışıklarının fonksiyonel kentsel alanlarla ilişkisini kurmak amacıyla hiyerarşik rasterizasyon ve Öklid mesafe dönüşüm modeli kurulmuştur. OSM veri tabanından süzülen vektör katmanlar, kentsel aydınlatmanın fiziksel öncelikleri dikkate alınarak hiyerarşik bir sıra ile Glimmer çözünürlüğünde rasterize edilmiştir. Yollar ve ticari noktaları kentsel alanlarda daha doğru temsil edilmesi amacıyla 20'şer metre tamponlanarak poligona dönüştürülmüştür. Rasterizasyon öncelik sırası, konut, sanayi, ticari alanlar ve tamponlanmış yol ağı şeklinde kurgulanmıştır. Trabzon genelindeki WLED ışık kaynaklarının, tescilli doğal sit, milli park ve orman alanlarına olan uzaklık tehdidini ölçmek amacıyla Öklid mesafe dönüşümü algoritması uygulanmıştır. Korunan alan sınırları rasterize edilerek ikili bir maske ($M_{korunan}=1$, $M_{diğer}=0$) oluşturulmuştur. Bu maskenin tersi üzerinde piksel bazlı mesafe dönüşümü hesaplanmış ve piksel boyutu metre dönüşüm katsayısıyla çarpılarak her pikselin en yakın doğal koruma alanına olan metre cinsinden mesafesi (D) haritalandırılmıştır. Elde edilen mesafeler $D\leq500$ m "kritik risk", $500<D\leq2000$ m "yüksek risk", $2000<D\leq5000$ m "orta risk" ve $D>5000$ m "düşük risk" sınıflarına bölünmüştür. Ayrıca doğal alan maskesi ($M_{korunan}=1$) ile aktif yapay ışık maskesinin ($Y>T$) doğrudan kesiştiği alanlar coğrafi olarak saptanarak ışık ihlali noktaları olarak haritalandırılmıştır.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

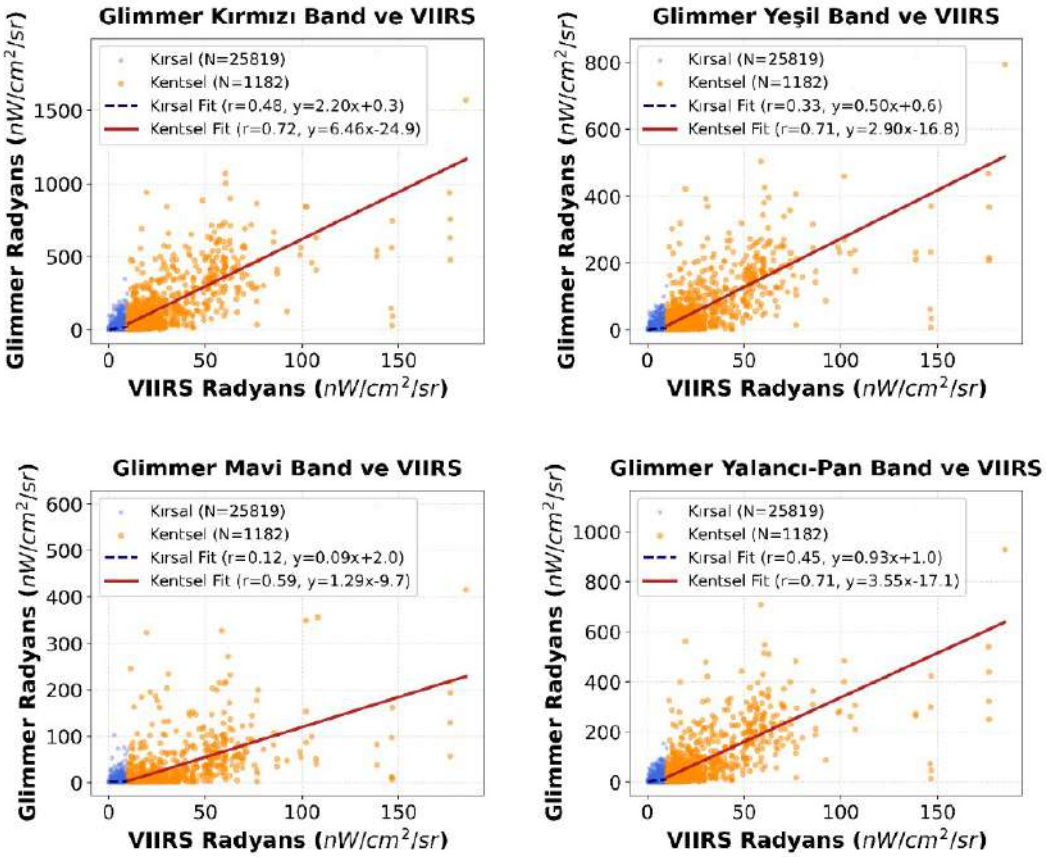
Bu bölümde, SDGSAT-1 Glimmer çok bantlı gece ışığı verileri ile VIIRS NTL verileri arasındaki radyometrik ve mekânsal ilişkiler Trabzon çalışma alanı özelinde incelenmiştir. İki farklı çözünürlükteki sensörün kentsel ve kırsal alanlardaki davranış farklılıklarını ortaya koymak amacıyla veri kümesi, VIIRS radyasyon değerlerine göre iki alt bölgeye (Kentsel ≥10 nW/cm^{2}sr ve Kırsal <10 nW/cm^{2}sr) ayrılmıştır. Spektral bantlar bazında gerçekleştirilen karşılaştırmalı regresyon analizleri ve veri dağılımları Şekil 2 ve Tablo 1'de sunulmuştur.

3.1. İstatistiksel Karşılaştırma ve Spektral Ayrışma

Trabzon ili genelindeki 27.001 doğrulanmış piksel üzerinden yürütülen regresyon analizleri, tek başına tüm çalışma alanı üzerinden yapılan değerlendirmelerin, yerel kentsel ve kırsal aydınlatma karakteristiklerini tam olarak yansıtmadığını göstermektedir. Tablo 1 ve Şekil 2 incelendiğinde, çalışma alanının "Kentsel" ve "Kırsal/Yarı-Kentsel" olarak iki alt sınıfa ayrıştırılmasının, sensörlerin mekânsal ve radyometrik hassasiyetlerindeki gerçek eğilimleri nicel olarak ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Genel alan korelasyonlarında (Tüm Alan) Pearson r katsayıları mavi bant hariç oldukça yüksek seviyelerde seyretmektedir (Kırmızı: r=0.785, Yeşil: r=0.761, Yalancı-Pan: r=0.773). Bu durum, geniş coğrafi sınırlarda piksel değer aralığının genişlemesinden kaynaklanan yapay bir korelasyon artışını yansıtmaktadır. Ancak alt bölgeler bazında yapılan analizler, uydular arası uyuşmazlığın ve kentsel aydınlatma tiplerinin spektral ayrışmasının yerel ölçekte çok farklı dinamiklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Kentsel alt bölgede (N=1182 piksel) Glimmer Kırmızı, Yeşil ve Yalancı-Pan bantlarının VIIRS NTL ile yüksek bir korelasyon gösterdiği (r≈0.71−0.72) tespit edilmiştir. Bu durum, SDGSAT-1 Glimmer çok bantlı verilerinin, kentsel alanlardaki genel ışık emisyonunu VIIRS standardıyla yüksek bir tutarlılıkla modellediğini doğrulamaktadır. Buna karşın, kentsel alanlarda RMSE değerlerinin oldukça yüksek çıkması (Kırmızı: 219.64 nW/cm^{2}sr, Yalancı-Pan: 108.75 nW/cm^{2}sr) dikkat çekicidir. Şekil 2'deki dağılım grafiklerinde görüleceği üzere, Glimmer Kırmızı bandında 1500 nW/cm^{2}sr seviyesine ulaşan yoğun kentsel tepe pikselleri, VIIRS piksellerinin kaba çözünürlük alanında (500 m) ortalamasının alınması sonucu sönümlenmektedir. Bu durum, regresyon doğrusu çevresinde dikine genişleyen bir saçılım ve dolayısıyla yüksek mutlak hata (RMSE) değerlerine yol açmaktadır. Kentsel alandaki regresyon eğimlerinin her bantta kırsal alana göre dik olması (Kırmızı: 6.46, Yeşil: 2.90, Yalancı-Pan: 3.55), yüksek çözünürlüklü Glimmer sensörünün yerel parlak kentsel kaynakları yakalamadaki yüksek hassasiyetini nicel olarak kanıtlamaktadır.

Kırsal alt bölgede (N=25819 piksel) incelendiğinde, belirlilik katsayılarının (R^2) dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Kırsal aydınlatmanın düşük yoğunluklu ve parçalı yapısı, piksellerin arka plan gürültü sınırına yakın kümelenmesine neden olmakta, bu da doğrusal korelasyon gücünü zayıflatmaktadır. Ancak mutlak hata bazında kırsal bölge RMSE değerleri (Kırmızı: 9.40 nW/cm^{2}sr, Yeşil: 3.31 nW/cm^{2}sr) oldukça düşüktür; bu da her iki sensörün düşük ışık seviyelerinde radyometrik olarak birbirine yakın ölçümler yaptığını göstermektedir. Mavi bant verileri kırsal alanda r=0.116 değeri ile neredeyse tamamen uyumsuz bir yapı sergilemektedir. Bu sonuç, Trabzon'un kırsal yerleşimlerinde kullanılan geleneksel yüksek basınçlı sodyum lambaların mavi spektrumda emisyon yapmaması ve VIIRS NTL'nin mavi dalga boyuna karşı olan duyarsızlığı ile açıklanmaktadır. Kent merkezinde ise mavi bant korelasyonu r=0.591 değerine yükselmesi, kıyı şeridindeki yeni nesil beyaz LED dönüşümünün Glimmer tarafından başarıyla ayırt edildiğini ancak VIIRS'ın bu mavi ışık sinyalini algılayamadığını kanıtlamaktadır. Glimmer RGB bantlarının aritmetik ortalamasıyla sentezlenen Yalancı-Pan bandı, VIIRS NTL ile her iki bölgede de kararlı bir ilişki sergilemiştir. Bu bulgu, sentez pankromatik ürünün, geniş bantlı gece ışığı analizlerinde VIIRS verisine yüksek mekânsal çözünürlüklü bir alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Trabzon çalışma alanında SDGSAT-1 Glimmer spektral bantları ile VIIRS NTL değerleri arasındaki doğrusal regresyon ve kentsel-kırsal dağılım analizleri.

Tablo 1. Trabzon İli Genelinde SDGSAT-1 Glimmer Spektral Bantları ve VIIRS NTL Değerlerinin Alt Bölge (Kentsel ve Kırsal) Bazlı Karşılaştırmalı Regresyon Analizi İstatistikleri.

Spektral Sınıf	Bölge Sınıfı	Piksel Sayısı (N)	Pearson Korelasyon Katsayısı (r)	Belirlilik Katsayısı (R^2)	RMSE (nW/cm^2sr)	Regresyon Denklemi
Kırmızı Band	Tüm Alan	27001	0.785	0.616	46.87	y=5.76x−7.25
	Kentsel	1182	0.718	0.516	219.64	y=6.46x−24.94
	Kırsal	25819	0.483	0.233	9.40	y=2.20x+0.34
Yeşil Band	Tüm Alan	27001	0.761	0.579	17.85	y=2.44x−3.67
	Kentsel	1182	0.712	0.507	83.91	y=2.90x−16.75
	Kırsal	25819	0.328	0.107	3.31	y=0.50x+0.56
Mavi Band	Tüm Alan	27001	0.624	0.389	8.86	y=1.01x−0.07
	Kentsel	1182	0.591	0.349	40.65	y=1.29x−9.67
	Kırsal	25819	0.116	0.014	2.53	y=0.09x+2.00
Yalancı-Pan Band	Tüm Alan	27001	0.773	0.597	23.10	y=3.07x−3.66
	Kentsel	1182	0.714	0.510	108.75	y=3.55x−17.12
	Kırsal	25819	0.447	0.199	4.08	y=0.93x+0.97

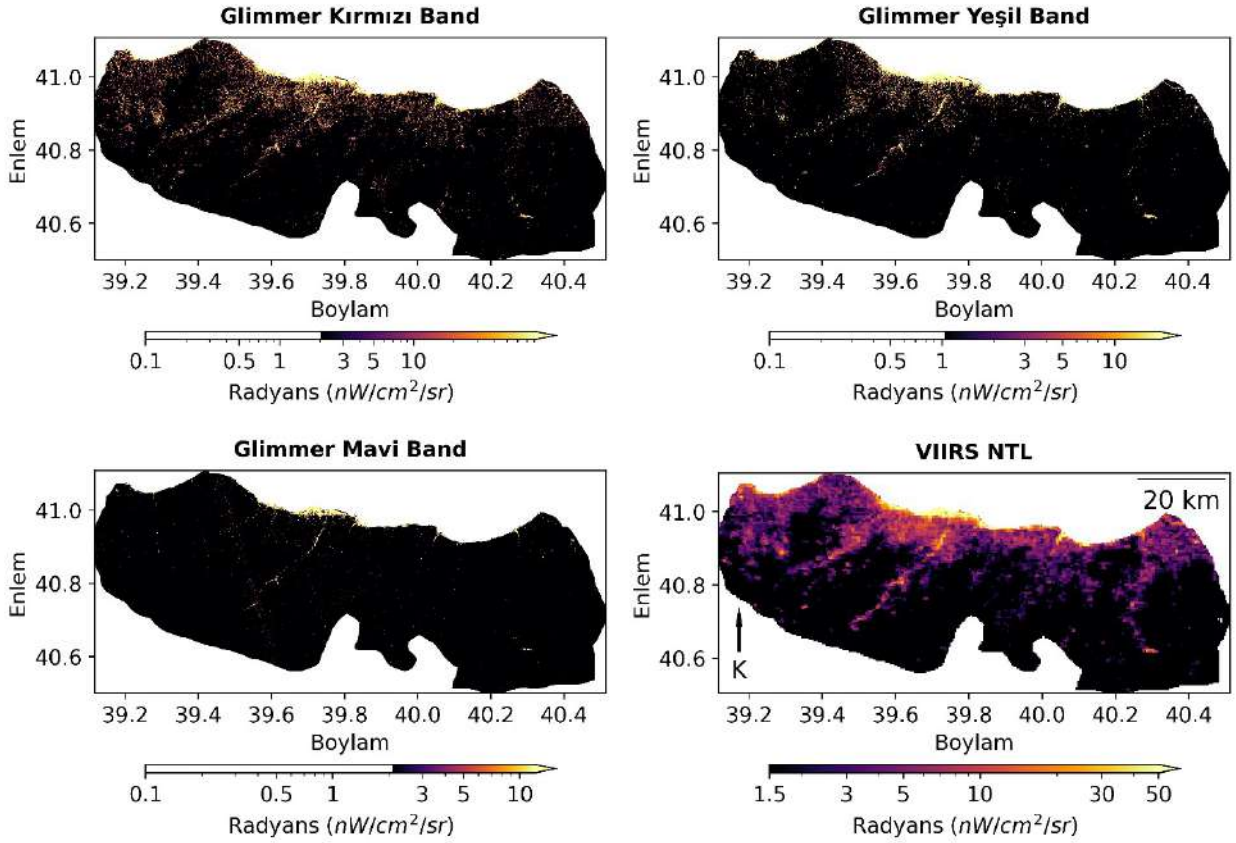
3.2. Gece Işığı Haritalarının Mekânsal ve Spektral Değerlendirmesi

Şekil 3'te sunulan haritalar incelendiğinde, Trabzon'un kentsel morfolojisi ve aydınlatma yapısı hakkında Glimmer görüntülerinin sunduğu yüksek mekânsal keskinlik ile VIIRS görüntüsündeki ışık taşması etkisi detayları açığa çıkmaktadır. VIIRS haritasında, Trabzon'un güneyindeki dağlık ve yerleşik nüfus barındırmayan yüksek rakımlı bölgeler bile turuncu-kırmızı tonlarda (0.1-1 nW/cm^2sr) ışıklı görünmektedir. Oysa Glimmer panellerinde bu alanlar tamamen siyahtır (ışıksız). VIIRS verisindeki bu durum, ışık taşması ve atmosferik saçılmalardan kaynaklanır. Kıyıdaki aşırı parlak ışıklar, kaba çözünürlüklü VIIRS piksellerinde çevreye doğru yayılır ve dağlık alanları da yapay olarak ışıklı gösterir. Glimmer ise yüksek mekânsal çözünürlüğü sayesinde gerçek kentsel sınırları çizmekte, sahte ışık kirliliği kaynaklı hatalı tespitleri elemektedir.

Glimmer Kırmızı Bandının kapsama alanı diğer Glimmer bantlarından belirgin şekilde geniştir. Sahil şeridinin yanı sıra, güneye doğru uzanan tüm vadi içi yolları (örneğin Maçka vadisi, Yomra vadisi, Araklı/Karadere vadisi ve Of/Solaklı vadisi) kılcal damarlar gibi kırmızı bantta aydınlanmıştır. Bu, Trabzon'un iç kesimlerindeki karayollarında ve kırsal yerleşimlerinde hala sodyum buharlı (sarı-turuncu-kırmızı spektrumlu) geleneksel lambaların baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Glimmer Yeşil bandındaki aydınlık piksellerin ise kıyıdaki ana kentsel merkezlerde yoğunlaştığı görülmektedir. İç vadilerde kırmızı banda kıyasla belirgin bir sönümlenme sergilemektedir. Bu bant, metal halide veya karma aydınlatma sistemlerinin kullanıldığı geçiş bölgelerini temsil etmektedir. Glimmer Mavi band haritasında ise ışık yayılım alanı oldukça sınırlı olup sadece kıyı şeridindeki kentsel çekirdeklerde (Ortahisar/Trabzon Merkez, Akçaabat Merkez, Yomra kentsel alanı) ve karayolu üzerinde çok ince, kesintili bir hat olarak görünmektedir. Bu durum, Trabzon'da enerji verimli, mavi-zengin spektrumlu LED dönüşümünün henüz sadece ana kentsel merkezler ve birincil ulaşım aksları ile sınırlı kaldığını, kırsal ve alt kademe kentsel alanlara nüfuz etmediğini gösterir.

Kırmızı bantta Trabzon merkezinden güneye doğru inen en belirgin ve en uzun ışık çizgisi Maçka-Gümüşhane karayolu koridorudur. Nitekim bu hat, Yeşil bantta sadece Maçka ilçe merkezine kadar uzanabilmekte, Mavi bantta ise tamamen kaybolmaktadır. Bu durum, tarihi ticaret yolunun aydınlatma altyapısının spektral imzasını açıkça ortaya koymaktadır. Akçaabat'tan Of ilçesine kadar uzanan sahil şeridi, tüm bantlarda sürekli bir hat oluşturmaktadır. Ancak Mavi bant incelendiğinde, bu hattın homojen olmadığı, kesintili (noktasal) yapıda olduğu görülür. Bu da sahil yolunun

aydınlatılmasında farklı belediyelerin veya kurumların farklı lamba teknolojileri (LED ve HPS) kullandığının mekânsal bir kanıtıdır. Trabzon il sınırları genelinde gerçekleştirilen spektral analizler, kentsel aydınlatma altyapısının mekânsal hiyerarşisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 3'te görüleceği üzere, Glimmer Kırmızı bandı, sahil şeridinin yanı sıra Maçka ve Solaklı gibi iç vadilere uzanan kılcal ulaşım ağlarını ve kırsal yerleşimleri başarıyla haritalandırmıştır. Buna karşın, modern LED dönüşümünün bir göstergesi olan Glimmer Mavi bandı aydınlatması, yalnızca Ortahisar ve Akçaabat gibi birincil kentsel merkezlerde ve sahil otoyolunun belirli kesimlerinde sınırlı kalmıştır.



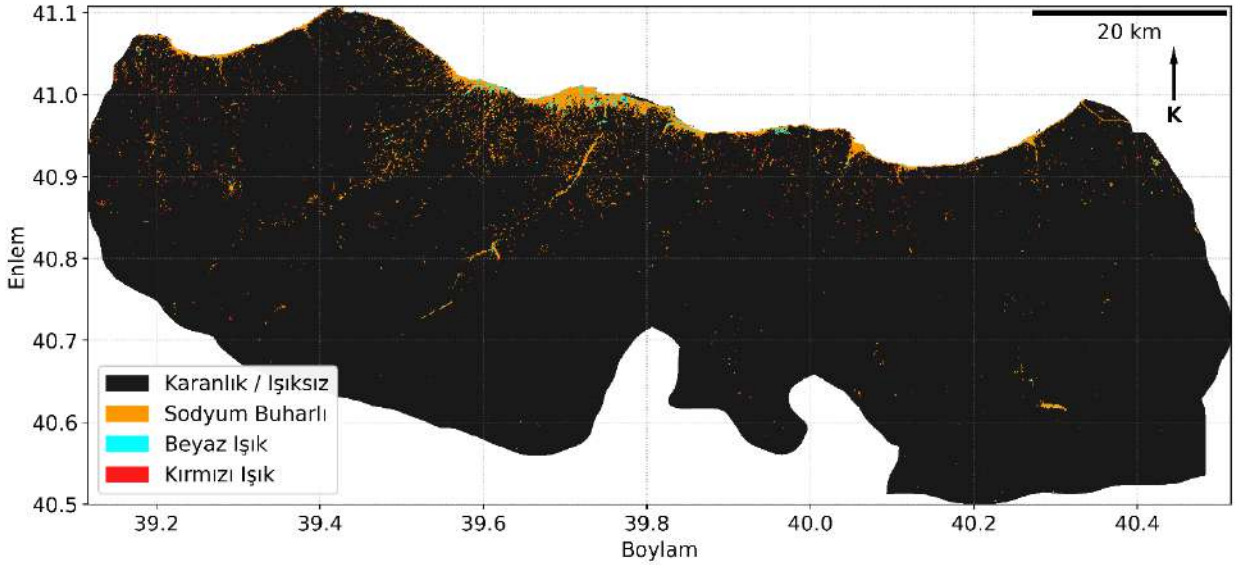
Şekil 3. Glimmer bantları ile VIIRS NTL görüntülerinin Trabzon ili ölçeğindeki mekânsal dağılım haritaları. (Görselleştirmede düşük yoğunluklu alanların netliği için logaritmik ölçeklendirme kullanılmıştır.)

3.3. Lamba Türlerinin Spektral Sınıflandırılması ve Dağılım Analizi

Trabzon genelindeki yapay ışık kaynaklarının spektral karakteristiklerine göre sınıflandırılması sonucu elde edilen mekânsal dağılım Şekil 4'te, bu dağılıma ait detaylı alan ve lamba oranı istatistikleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2 verileri incelendiğinde, Trabzon ili kara sınırları içindeki piksellerin %97.47'sinin Karanlık/Işıksız sınıfında yer aldığı görülmektedir. Bu yüksek oran, Trabzon'un dik ve engebeli topoğrafyasının (özellikle güney kesimlerdeki Zigana ve Kalkanlı dağ silsileleri) yerleşime uygun olmamasının doğal bir sonucudur. Kentsel gelişimin ve yapay aydınlatma altyapısının, sahil şeridindeki dar düzlükler ile kuzey-güney doğrultulu derin vadi tabanlarında (Maçka, Yomra, Solaklı vadileri) doğrusal bir hat üzerinde sıkıştığı Şekil 4'teki mekânsal dağılımda net bir şekilde izlenebilmektedir. Aktif olarak aydınlatılmış pikseller (N=85.983) içinde yapılan değerlendirmede, HPS lambaların %75.90'lık ezici bir oranla kentsel aydınlatmada mutlak hakimiyete sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4'te turuncu/sarı renk ile temsil edilen bu sınıf, Trabzon'un ikincil ve üçüncül yol ağlarında, mahalle aralarında ve kırsal vadi bağlantılarında hala geleneksel HPS aydınlatma altyapısının birincil tercih olduğunu göstermektedir.

Modern, yüksek enerji verimliliğine ve mavi-zengin spektruma sahip WLED aydınlatmanın, aydınlatılmış alanlar içindeki payı %7.22 olarak hesaplanmıştır. Haritada, açık mavi renkli beyaz ışık piksellerinin homojen dağılmadığı, aksine belirli kentsel düğüm noktalarında yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu yoğunlaşma bölgeleri, Ortahisar'da kent içi ana caddeler, meydan ve yeni kentsel dönüşüm alanları, Akçaabat ve Yomra Merkezlerinde yoğun nüfuslu kentsel çekirdekler, Arsin Organize Sanayi Bölgesinde endüstriyel tesislerin yoğun güvenlik ve çevre aydınlatmaları, sahil karayolunda belirli kavşaklar ve modernizasyon uygulanan transit geçiş noktalarıdır. Bu dağılım, Trabzon'da akıllı/modern aydınlatma dönüşümünün henüz başlangıç-orta aşamada olduğunu ve öncelikli olarak ekonomik aktivitenin ve kentsel yoğunluğun yüksek olduğu merkezlerde konumlandırıldığını göstermektedir.

Aydınlatılmış alanlar içinde %16.88'lik önemli bir paya sahip olan kırmızı ışık sınıfı önemli bir bulgudur. Spektral oran analizinde kırmızı bileşenin yeşile oranının çok yüksek olduğu alanları temsil eden bu sınıfın fiziksel varlığı ömrünü tamamlamaya yakın veya düşük verimli eski tip sodyum buharlı lambalara, şehir içi tarihi/kültürel alanlarda, parklarda veya sahil yürüyüş yollarında tercih edilen sıcak-sarı/turuncu spektrumlu yeni nesil aydınlatmalara ve liman ve havalimanı çevresindeki kırmızı spektrumlu yüksek yoğunluklu uyarı ve sinyalizasyon ışıklarına dayanmaktadır. Glimmer sensörünün, standart sodyum buharlı (%75.90) ile bu kırmızımsı spektrumu (%16.88) başarıyla ayrıştırabilmesi, çok bantlı gece ışığı verilerinin kentsel aydınlatma tiplerini ve bunların ekolojik/teknolojik kalitesini izlemedeki yüksek başarısını göstermektedir.



Şekil 4. Spektral oranlama yöntemiyle üretilen Trabzon ili sokak lamba tipi sınıflandırma haritası.

Tablo 2. Trabzon ili genelindeki gece ışığı sınıflandırma alanı ve lamba türü oransal dağılım istatistikleri

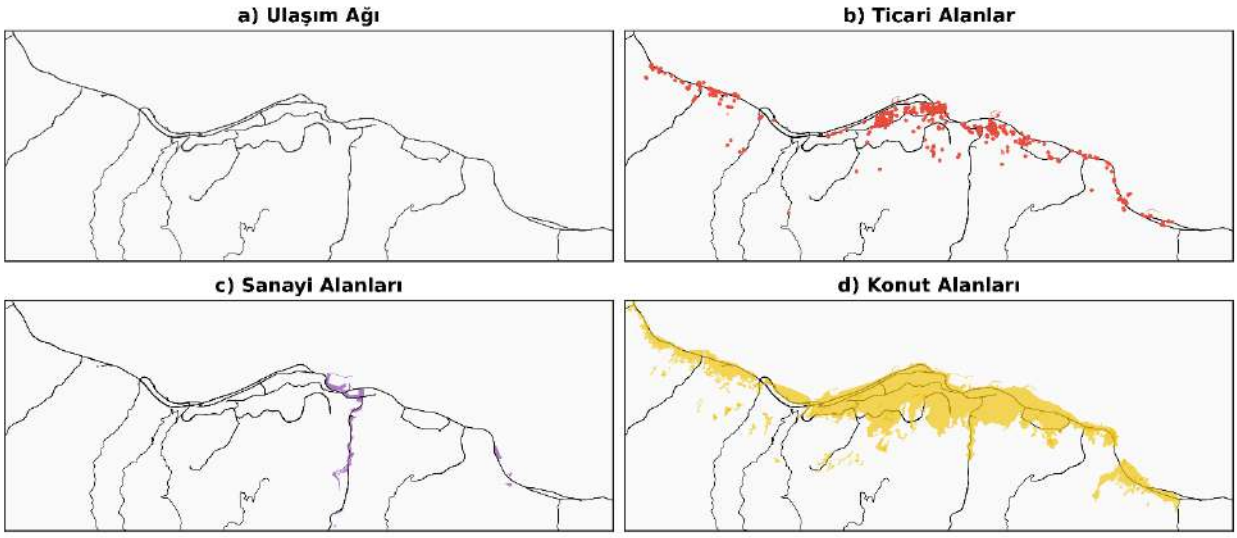
Aydınlatma Sınıfı	Piksel Sayısı (N)	Kara Alanı Oranı (%)	Aydınlatılmış Alan (%)
Karanlık/Işıksız	3,315,336	97.47	0
Sodyum Buharlı	65,261	1.92	75.90
Beyaz Işık	6,206	0.18	7.22
Kırmızı Işık	14,516	0.43	16.88

3.4. Gece Işığı Teknolojilerinin Arazi Kullanım Alanlarına Göre Analizi

Trabzon kentsel koridorunda tespit edilen gece ışığı teknolojilerinin hangi kentsel işlev alanlarından kaynaklandığını nicel olarak ortaya koymak amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5, Trabzon ilinin arazi sınıflarını ve Tablo 3 hesaplanan analizleri sunmaktadır. Geleneksel sodyum buharlı aydınlatmanın kentsel kompozisyonu incelendiğinde, bu ışık kaynağının %22.17'sinin doğrudan ana karayolu ağlarına (Yollar), %22.32'sinin ise Konut alanlarına atfedildiği görülmektedir. Bu sonuç, Trabzon'un geleneksel mahalle dokularında ve transit ulaşım akslarında (Sahil yolu ve iç vadi bağlantıları) sodyum buharlı lambaların hala temel aydınlatma unsuru olduğunu göstermektedir. Öte yandan, aydınlatmanın %53.02 gibi yüksek bir oranda "Diğer" (kentsel fonksiyon alanları dışında kalan orman, tarım, boş arazi ve kırsal bölgeler) sınıfında yer alması, kırsal ve yarı-kentsel alanlardaki dağınık yol ve köy aydınlatmalarının ezici bir çoğunlukla bu teknolojiye dayandığını doğrulamaktadır. Beyaz Işık teknolojisinin arazi kullanım kompozisyonu, Trabzon'daki kentsel modernizasyonun ve teknolojik dönüşümün en somut kanıtıdır. Beyaz LED piksellerinin %40.83'ü doğrudan konut alanlarında, %7.94'ü ise sanayi alanlarında yer almaktadır. Kırmızı ışık spektral sınıfına ait piksellerin %83.45 gibi çok büyük bir kısmının "Diğer" kategorisinde yer alması son derece önemli bir fiziksel bulgudur. Bu durum, kentsel fonksiyonel sınırların dışında kalan ve yerleşimin çok seyrek olduğu dik vadi yamaçlarında, tarım arazilerinde ve yüksek rakımlı yayla geçişlerinde tespit edilen zayıf aydınlatmaların, spektral olarak kırmızı-kızılötesi geçiş bölgesine kaydığını (eskimiş sodyum lambalar veya düşük renk sıcaklığına sahip solar aydınlatmalar) göstermektedir. Konut alanlarının kırmızı ışık içindeki payının sadece %5.18 düzeyinde kalması, bu ışık türünün planlı kentsel konut alanlarında tercih edilmediğini, daha çok kırsal aydınlatma karakteristiğini temsil ettiğini göstermektedir.

Sanayi sınıfının beyaz ışık içindeki payı (%7.94), sodyum (%1.96) ve kırmızı ışık (%0.30) sınıflarına kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum, Trabzon'daki organize sanayi bölgelerinin, liman sahalarının ve büyük depolama alanlarının güvenlik, yüksek görünürlük ve operasyonel enerji tasarrufu gereksinimleri nedeniyle çok büyük oranda modern

beyaz LED teknolojisine geçtiğini kanıtlamaktadır. Konut alanlarındaki yüksek beyaz ışık oranı (%40.83), Yomra ve Ortahisar gibi ilçelerdeki yeni çok katlı konut projeleri, siteler ve belediyeler tarafından modernize edilen kentsel peyzaj aydınlatmalarının beyaz LED tabanlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca beyaz ışık sınıfının "Diğer" kategorisindeki payının (%32.92) tüm ışıklar içindeki en düşük seviyede olması, beyaz ışık teknolojisinin henüz kırsal bölgeye nüfuz etmediğini ve katı kentsel bir olgu olduğunu doğrulamaktadır. Her ne kadar ticari alanlar (AVM'ler, iş merkezleri vb.) kentsel alanda coğrafi olarak küçük bir poligon alanına sahip olsa da bu sınıftaki beyaz ışık oranı (%1.05), sodyum oranının (%0.53) iki katıdır. Bu bulgu, ticari işletmelerin ve modern perakende odaklarının, müşteri çekmek ve modern bir kentsel estetik yaratmak amacıyla beyaz aydınlatma teknolojilerini geleneksel sarı aydınlatmaya tercih ettiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. OSM veri tabanından türetilen Trabzon arazi kullanım katmanları. (a) Ulaşım ağı (otoyol ve birincil yollar), (b) Ticari alan poligonları ve perakende noktaları, (c) Sanayi bölgeleri, (d) Konut yerleşim alanları.

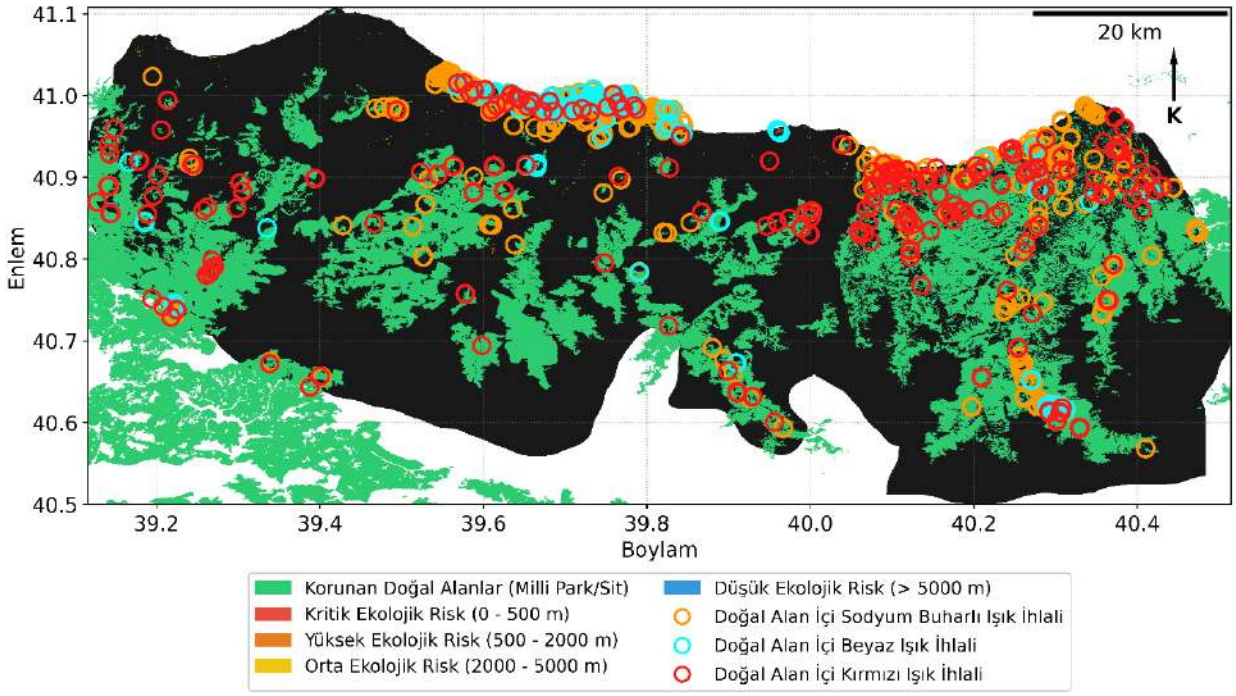
Tablo 3. Trabzon ili gece ışığı teknolojilerinin fonksiyonel arazi kullanım sınıflarına göre yüzdesel istatistikleri

Işık Kaynağı	Yollar (%)	Ticari (%)	Sanayi (%)	Konut (%)	Diğer (%)
Sodyum Buharlı	22.17	0.53	1.96	22.32	53.02
Beyaz Işık	17.26	1.05	7.94	40.83	32.92
Kırmızı Işık	11.06	0.00	0.30	5.18	83.45

3.5. Gece Işıkları Spektral Karakteristiğine Dayalı Ekolojik Işık Kirliliği Analizi

Yapay gece ışıklarının ekosistem üzerindeki en tahrip edici etkisi, mavi dalga boyu emisyonu yüksek olan soğuk beyaz LED aydınlatmalardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, Trabzon genelinde tespit edilen 6.206 beyaz LED pikselinin, tescilli doğal koruma alanlarına (Milli Parklar, Tabiat Parkları ve Doğal Sit Alanları) olan mesafeleri Öklid Mesafe Dönüşümü yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen mekânsal risk haritası Şekil 6'da, risk sınıflarına ait sayısal dağılım istatistikleri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Şekil 6'daki ekolojik risk haritası coğrafi olarak incelendiğinde, Trabzon'da aydınlatma modernizasyonu yapılırken ekolojik hassasiyetlerin ne derece göz ardı edildiği nicel olarak ortaya çıkmıştır. Trabzon genelindeki toplam 6.206 beyaz LED pikselinin %71.67'si (4.448 piksel) "Kritik Risk" (0-500 m) sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu sıra dışı yüksek oran, sahil şeridindeki dar kentsel koridor ile güneydeki hassas orman sınırlarının topoğrafik olarak birbirine çok yakın olmasının bir sonucudur. Ayrıca, yapılan çakıştırma analizi sonucunda, korunan doğal alan sınırlarının doğrudan içerisine sızarak yapay ışık ihlali oluşturan toplam 2.734 aktif ışık noktası tespit edilmiştir. Şekil 6 üzerinde lamba türlerine göre renk kodlu halkalarla işaretlenen bu ihlaller incelendiğinde; ihlallerin büyük kısmının sodyum buharlı (turuncu halkalar) ve kırmızı spektrumlu (kırmızı halkalar) geleneksel sistemlerden kaynaklandığı, ancak konut yakınlarındaki kentsel saçılmaya bağlı olarak beyaz LED (mavi halkalar) ihlallerinin de doğal alan sınırları içerisine nüfuz etmeye başladığı gözlemlenmiştir. Karadeniz göç rotası üzerindeki kuş geçiş yolları düşünüldüğünde, koruma alanlarındaki bu doğrudan yapay ışık sızıntıları ve yakın çevredeki yoğun beyaz LED kullanımı, yaban hayatı üzerinde ciddi birer ışığa yönelim (fototaksis) tehdidi oluşturmaktadır. Bu bulgular, koruma alanları çevresindeki kentsel tampon bölgelerde mavi spektrumu filtrelenmiş sıcak renkli aydınlatmaların tercih edilmesinin ekolojik sürdürülebilirlik açısından zorunlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Trabzon ilinde tespit edilen yapay ışık kaynaklarının tescilli korunan doğal alan sınırları ile çakıştırılması sonucu üretilen Ekolojik Işık Kirliliği Tehdit ve Doğal Alan İhlal Haritası. (Haritada yeşil poligonlar doğal alan sınırlarını; kırmızı, turuncu, sarı ve mavi pikseller beyaz ışık risk mesafelerini; yeşil alanlar içindeki renk kodlu çemberler ise doğrudan sınır ihlali gerçekleştiren aktif lamba kaynaklarını göstermektedir.)

Tablo 4. Trabzon ilindeki beyaz ışık kaynaklarının korunan doğal alanlara yakınlığına göre ekolojik risk dağılım istatistikleri

Ekolojik Risk Düzeyi	Mesafe Sınırı (m)	Beyaz Işık Piksel Sayısı	Yüzdesel Dağılım (%)	Potansiyel Ekolojik Etki
Kritik Risk	0-500	4448	71.67	Doğal habitata doğrudan ışık taşması, göçmen kuşlarda yön kaybı
Yüksek Risk	500-2000	1182	19.05	Koridor etkisi kırılması, geçiş bölgeleri aydınlanması ve üreme bozuklukları
Orta Risk	2000-5000	575	9.27	Gökyüzü parlaması etkisi, böcek popülasyonlarında azalma
Düşük Risk	>5000	1	0.02	Minimal veya dolaylı ekolojik etki

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yeni nesil uzaktan algılama platformlarından biri olan SDGSAT-1 uydusunun Glimmer görüntüleyicisinden elde edilen yüksek çözünürlüklü çok bantlı gece ışığı verileri, Trabzon ili ölçeğinde kentsel morfoloji, sokak aydınlatma tipleri ve ekolojik ışık kirliliği hassasiyeti boyutlarında ilk kez analiz edilmiştir. Araştırma boyunca elde edilen temel bulgular ve bu bulgular ışığında geliştirilen öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- SDGSAT-1 Glimmer verileri ile geleneksel VIIRS NTL verileri arasında, özellikle kentsel alanlarda istatistiksel olarak son derece anlamlı doğrusal ilişkiler ($r \approx 0.71-0.72$) tespit edilmiştir.
- Veri setinin kentsel ve kırsal olarak alt bölümlere ayrılması, aydınlatma teknolojilerindeki mekânsal uyuşmazlıkları nicel olarak doğrulamıştır. VIIRS DNB bandının mavi dalga boyuna karşı olan duyarsızlığı, Trabzon kent merkezindeki (beyaz LED kaynaklı) yapay ışık artışını yakalayamamış ve kentsel mavi bant korelasyonunu ($r=0.591$) sınırlandırmıştır. Kırsal alanda ise mavi bant ilişkisinin neredeyse sıfıra inmesi ($r=0.116$), iç kesimlerde sodyum buharlı aydınlatmanın mutlak baskınlığını matematiksel olarak kanıtlamıştır.
- OSM vektör katmanlarıyla yapılan çakıştırma analizi, Trabzon'daki aydınlatma modernizasyonunun fonksiyonel alanlar bazında nasıl şekillendiğini göstermiştir. Enerji verimli beyaz LED aydınlatmaların büyük oranda Konut (%40.83) ve Sanayi (%7.94) alanlarında yoğunlaştığı; sodyum buharlı aydınlatmanın ise ulaşım ağları (%22.17) ve kentsel fonksiyon sınırları dışında kalan kırsal yollarda (%53.02) korunduğu

saptanmıştır. Özellikle sanayi bölgelerindeki yüksek beyaz LED oranı, güvenlik ve operasyonel verimlilik odaklı kurumsal dönüşümü yansıtmaktadır.

- Trabzon'un dar kıyı koridoru ve engebeli morfolojisi, kentsel yapay ışıklar ile hassas orman sınırlarını coğrafi olarak birbirine çok yaklaştırmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Trabzon genelindeki Beyaz LED piksellerinin %71.67'si (4.448 piksel) tescilli koruma alanlarına olan 0-500 m "Kritik Risk" kuşağında yer almaktadır. Ayrıca, doğrudan milli park ve doğal sit sınırları içerisine sızarak yapay ışık ihlali oluşturan 2.734 doğrudan piksel/nokta kaynağı coğrafi olarak tespit edilmiş ve lamba türlerine göre haritalandırılmıştır.
- Sürmene Çamburnu Tabiat Parkı ve Maçka-Sümela (Altındere Vadisi) geçiş yolları gibi ekolojik olarak kritik ve birinci derece hassas bölgelerin 500 metrelik tampon sınırları içerisinde, yüksek mavi ışık yayan soğuk beyaz LED kullanımı sınırlandırılmalı; bunun yerine mavi spektrumu filtrelenmiş sıcak renkli koruyucu aydınlatma sistemlerine geçilmelidir.
- Yerel yönetimler (Trabzon Büyükşehir Belediyesi ve ilçe belediyeleri) tarafından yürütülen enerji tasarruflu aydınlatma dönüşüm projelerinde, SDGSAT-1 Glimmer gibi çok spektral gece ışığı verilerinden elde edilen lamba sınıflandırma ve LED/HPS oranı haritaları birer karar destek altlığı olarak kullanılmalıdır.
- Doğal Koruma ve Milli Parklar Bölge Müdürlüğü gibi ilgili kamu kurumları, tescilli koruma alanlarındaki insan kaynaklı yasadışı ışık sızıntılarını ve ekolojik ihlalleri, yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verileriyle periyodik ve otomatik olarak denetlemelidir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından "3501 - Kariyer Geliştirme Programı " kapsamında desteklenmektedir (Proje No: 124F297).

YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

Bu çalışmada; Python kodlarının geliştirilmesi ve hata ayıklama süreçlerinde, makalenin dil kalitesi ve okunabilirliğinin artırılması amacıyla Gemini yapay zekâ modelinden yararlanmıştır. Yazarlar, ilgili içeriği gerektiği şekilde gözden geçirmiş olup, yayınlanan makalenin bilimsel içeriğine dair tüm sorumluluğu üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Portnov, B., Rybnikova, N., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, *2*, e1600377-e1600377. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377

Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C. D., Keith, D. M., & Haim, A. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, *92*(10), 2714-2722. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029

Geofabrik GmbH. (2025). *OpenStreetMap Turkey Free Vector Layers (Shapefile Format)*. Geofabrik GmbH. http://download.geofabrik.de/europe/turkey.html

Jia, M., Zeng, H., Chen, Z., Wang, Z., Ren, C., Mao, D., Zhao, C., Zhang, R., & Wang, Y. (2024). Nighttime light in China's coastal zone: The type classification approach using SDGSAT-1 Glimmer Imager. *Remote Sensing of Environment*, *305*, 114104. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114104

Liu, J., Zhu, Y., Zhao, X., Sun, W., & Yang, F. (2026). Area-Consistent Aggregation of SDGSAT-1 Nighttime Light Data: A Radiant Flux Framework for Cross-City Population Estimation. *Sensors*, *26*(17), 5664. https://doi.org/10.3390/s26175664

Liu, S., Wang, C., Chen, Z., Li, W., Zhang, L., Wu, B., Huang, Y., Li, Y., Ni, J., Wu, J., & Yu, B. (2024). Efficacy of the SDGSAT-1 glimmer imagery in measuring sustainable development goal indicators 7.1.1, 11.5.2, and target 7.3. *Remote Sensing of Environment*, *305*, 114079. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114079

Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *2*(4), 191-198. https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002%5B0191:ELP%5D2.0.CO;2

Mander, S., Alam, F., Lovreglio, R., & Ooi, M. (2023). How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*, *92*, 104465. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104465

Overview—SDGSAT-1 OPEN SCIENCE PROGRAM. (t.y.). Geliş tarihi 10 Haziran 2026, gönderen https://www.sdgsat.ac.cn/satellite/intro

MARMARİS ORMAN YANGINLARININ HOTSPOT ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRMESİ (2000–2024)

Gülten KARA[1], Tuğçe KALFA[1]

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, gispir@ktu.edu.tr
[2]Yüksek Lisans Öğrencisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, 442115@ogr.ktu.edu.tr

ÖZET

Orman yangınları, Akdeniz Havzası'nda iklim değişikliği, artan sıcaklıklar ve kuraklık koşullarının etkisiyle giderek büyüyen çevresel risklerden biri haline gelmiştir. Türkiye'nin önemli turizm ve orman ekosistemlerinden biri olan Marmaris, son yıllarda yaşanan büyük ölçekli yangınlar nedeniyle yüksek riskli bölgeler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, Marmaris ilçesinde 2000 –2024 yılları arasında meydana gelen yangın aktivitelerinin zamansal ve konumsal dağılımı, NASA FIRMS tarafından sağlanan MODIS aktif yangın verileri kullanılarak incelenmiştir. Veri setleri Python tabanlı bir süreçle birleştirilmiş, %70'in altındaki güvenilirlik değerine sahip kayıtlar ve çalışma alanı dışındaki veriler elenmiştir. Konumsal yoğunlukların belirlenmesinde Kernel Density Estimation (KDE) yöntemi uygulanmış ve sonuçlar Folium tabanlı bir WebCBS ortamında görselleştirilmiştir. Analizler, yangın aktivitelerinin genel olarak artış eğiliminde olduğunu ve en yüksek yoğunluğun 2021 yılında gerçekleştiğini göstermiştir. Aylık dağılımlar, yangınların özellikle temmuz ve ağustos aylarında yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Fire Radiative Power (FRP) analizine göre kayıtların yaklaşık %80'inin 20 MW'ın üzerinde olması, bölgedeki yangınların büyük bölümünün yüksek şiddette gerçekleştiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, Marmaris'te yangın riskinin konumsal olarak belirli bölgelerde yoğunlaştığını ve uzaktan algılama destekli WebCBS uygulamalarının yangın yönetimi, erken uyarı ve karar destek sistemlerinde etkin olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Marmaris orman yangınları, MODIS, NASA FIRMS, Hot spot analizi, WebCBS, Uzaktan algılama.

ABSTRACT

EVALUATION OF MARMARIS FOREST FIRES USING HOTSPOT ANALYSIS (2000–2024)

Forest fires have become an increasing environmental threat in the Mediterranean Basin due to climate change, rising temperatures, and prolonged drought conditions. Marmaris, one of Türkiye's most important tourism destinations and forested regions, is considered a high-risk area because of the large-scale wildfires experienced in recent years. This study investigates the spatial and temporal distribution of wildfire activity in Marmaris between 2000 and 2024 using MODIS active fire data provided by NASA's Fire Information for Resource Management System (FIRMS). The datasets were integrated through a Python-based processing workflow, and records with confidence levels below 70% as well as observations outside the study area were excluded. Kernel Density Estimation (KDE) was applied to identify wildfire hotspots, and the results were visualized within a Folium-based WebGIS environment. The analysis revealed a generally increasing trend in wildfire activity during the 25-year period, with the highest fire density recorded in 2021. Monthly distributions showed that wildfire occurrences were concentrated mainly in July and August. Fire Radiative Power (FRP) analysis indicated that approximately 80% of all detected fires exceeded 20 MW, suggesting that most wildfire events were of moderate to high intensity. The findings demonstrate that wildfire risk is spatially concentrated in specific parts of Marmaris and highlight the potential of integrating remote sensing data and WebGIS technologies for wildfire monitoring, risk assessment, early warning, and decision-support applications. The study provides valuable insights for developing more effective wildfire management strategies in Mediterranean forest ecosystems.

Keywords: Marmaris forest fires, MODIS, NASA FIRMS, Hotspot analysis, WebGIS, Remote sensing

1. GİRİŞ

Orman yangınları, doğal ekosistemler üzerinde ciddi tahribat oluşturan, ekonomik ve sosyal kayıplara neden olan önemli çevresel afetlerden biridir. Son yıllarda küresel iklim değişikliğinin etkisiyle sıcaklıkların artması, yağış rejimlerinin değişmesi ve kuraklık sürelerinin uzaması, dünya genelinde yangınların sıklığını ve şiddetini artırmıştır. Özellikle Akdeniz Havzası, sıcak ve kurak yaz koşulları nedeniyle orman yangınlarına karşı en hassas bölgeler arasında yer almakta ve iklim değişikliğinin etkilerinin en yoğun hissedildiği alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, orman ekosistemlerinin korunması ve yangın risklerinin etkin bir şekilde yönetilmesi gerekliliğini daha da önemli hale getirmektedir. Türkiye, Akdeniz iklim kuşağında yer alması nedeniyle orman yangınlarının sıklıkla görüldüğü ülkeler arasında bulunmaktadır. Özellikle Ege ve Akdeniz kıyılarında yaz aylarında etkili olan yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve kuvvetli rüzgâr koşulları yangınların oluşumunu ve hızlı yayılımını kolaylaştırmaktadır. Muğla ili ve Marmaris ilçesi, sahip olduğu geniş kızılçam ormanları, karmaşık topografik yapısı ve yoğun turizm faaliyetleri nedeniyle yangın açısından yüksek risk taşıyan bölgeler arasında yer almaktadır. Son yıllarda meydana gelen büyük ölçekli yangınlar, özellikle 2021 yılında yaşanan ve binlerce hektarlık

alanın zarar görmesine neden olan Marmaris yangını, bölgedeki yangın riskinin boyutunu açıkça ortaya koymuştur. Bu nedenle yangınların zamansal ve konumsal özelliklerinin belirlenmesi, riskli alanların tespit edilmesi ve etkili yangın yönetim stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Orman yangınlarının izlenmesi ve analiz edilmesinde uzaktan algılama teknolojileri önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel gözlem yöntemleri geniş alanların sürekli olarak izlenmesinde yetersiz kalırken, uydu sistemleri sayesinde yangınların konumu, zamanı ve şiddeti hakkında hızlı ve güvenilir bilgiler elde edilebilmektedir. Bu kapsamda NASA tarafından geliştirilen Fire Information for Resource Management System (FIRMS), MODIS ve VIIRS sensörlerinden elde edilen aktif yangın verilerini araştırmacılara sunarak yangınların izlenmesi ve değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. MODIS aktif yangın verileri, uzun dönemli kayıtları ve küresel kapsama alanı sayesinde yangın eğilimlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türkiye'de orman yangınlarının zamansal ve konumsal özelliklerinin belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Uzaktan algılama ve CBS tabanlı araştırmalar, yangınların özellikle Ege ve Akdeniz kıyı kuşağında yoğunlaştığını ve belirgin konumsal kümelenmeler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Akyürek, 2023; Demirel & Türk, 2023). Ayrıca yangınların oluşumu ve yayılımının yalnızca konumsal özelliklerden değil, atmosferik koşullar ve iklimsel süreçlerden de önemli ölçüde etkilendiği belirtilmektedir (Arslan vd., 2024). Muğla bölgesinde yürütülen çalışmalar, sıcaklık artışları ve değişen iklim koşullarının yangın faaliyetlerini artırdığını göstermekte olup, bölgenin gelecekte de yüksek yangın riski altında kalacağını ortaya koymaktadır (Çelik & Bilik, 2026; Varol & Ertuğrul, 2015) . Yangınların izlenmesinde kullanılan uydu tabanlı aktif yangın ürünleri, geniş alanların uzun dönemli olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Coskuner (2022), Türkiye'de MODIS ve VIIRS aktif yangın ürünlerinin performansını inceleyerek bu verilerin, yangınların konumsal ve zamansal eğilimlerinin belirlenmesinde etkin biçimde kullanılabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Çamalan & Çamalan (2023) ile Tuygun vd. (2023), büyük ölçekli yangınların izlenmesinde aktif yangın verilerinin ve yangın radyatif gücü parametrelerinin önemini vurgulamıştır. Fire Radiative Power (FRP), yangının açığa çıkardığı enerjiyi nicel olarak ifade eden ve yangın şiddetinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Marmaris ve çevresine odaklanan araştırmaların önemli bir bölümü, yanmış alanların belirlenmesi ve yangın sonrası etkilerin değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Siyavuş (2023), Marmaris'teki yangınların etkilerini uydu görüntüleri kullanarak incelemiş, Yücer (2023) ise 2022 Marmaris yangınında Sentinel-2 ve Landsat-9 verilerini kullanarak yanmış alanları belirlemiştir. Benzer şekilde Demir & Dursun (2023), Muğla ili genelinde Sentinel-2 görüntüleri üzerinden yanmış alan tespiti gerçekleştirmiştir. Son yıllarda ise yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar öne çıkmaya başlamış, yangın duyarlılık modellemeleri ve otomatik yanmış alan tespitine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Alpak vd., 2026; Gündüz, 2026; Novo vd., 2024). Bununla birlikte mevcut literatür incelendiğinde, Marmaris ilçesinde uzun dönemli aktif yangın kayıtlarını kullanarak yangınların zamansal değişimini, konumsal yoğunluk örüntülerini ve şiddet özelliklerini birlikte değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle NASA FIRMS tarafından sağlanan MODIS aktif yangın verilerinin uzun yılları kapsayan analizlerde kullanıldığı, Kernel Density Estimation (KDE) yöntemiyle Hot spot bölgelerinin belirlendiği ve sonuçların WebCBS ortamında etkileşimli olarak sunulduğu çalışmalar oldukça az sayıdadır.

Bu çalışma, NASA FIRMS platformundan elde edilen MODIS aktif yangın verilerini kullanarak Marmaris ilçesinde 2000-2024 yılları arasında meydana gelen yangın aktivitelerinin zamansal ve konumsal dağılımını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda aktif yangın verileri ön işleme süreçlerinden geçirilmiş, güvenilirlik filtreleri uygulanmış, KDE yöntemi ile Hot spot bölgeleri belirlenmiş ve FRP değerleri kullanılarak yangın şiddetleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar WebCBS ortamında sunularak Marmaris'teki yangın riskinin konumsal örüntülerinin ortaya konulması ve yangın yönetimi, erken uyarı sistemleri ile karar destek süreçlerine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

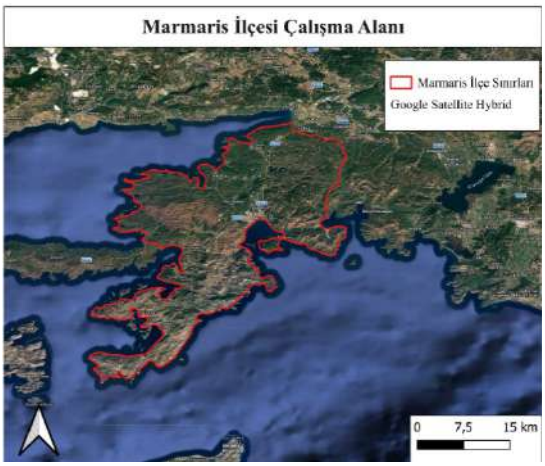
2. VERİ VE YÖNTEM

Çalışmanın temel veri kaynağını NASA tarafından geliştirilen FIRMS platformundan elde edilen MODIS aktif yangın verileri oluşturmaktadır. Veriler 2000–2024 dönemini kapsamakta olup her yangın kaydı için konum, tarih, saat, güvenilirlik değeri ve FRP bilgilerini içermektedir. Veri işleme sürecinde yıllık CSV dosyaları Python programlama dili kullanılarak tek bir veri tabanında birleştirilmiştir. Analizlerin doğruluğunu artırmak amacıyla güvenilirlik değeri %70'in altında olan kayıtlar çıkarılmıştır. Daha sonra Marmaris çalışma alanına ait coğrafi sınırlar esas alınarak konumsal filtreleme uygulanmış ve çalışma alanı dışında kalan kayıtlar elenmiştir. Eksik veya hatalı tarih bilgilerinin temizlenmesiyle analiz için uygun bir veri seti oluşturulmuştur. Yangın yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla KDE yöntemi kullanılmıştır. KDE yöntemi, noktasal yangın verilerinin konumsal dağılımını sürekli yüzeyler halinde göstererek Hot spot alanlarının belirlenmesini sağlamaktadır. Elde edilen yoğunluk haritaları Folium ve Leaflet altyapısı kullanılarak WebCBS ortamına aktarılmıştır. Ayrıca yangınların enerji düzeylerini değerlendirmek amacıyla FRP değerleri analiz edilmiş ve düşük, orta ve yüksek şiddet sınıfları oluşturulmuştur.

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Muğla ilinin güneybatısında yer alan Marmaris ilçesi seçilmiştir. Marmaris, Ege ve Akdeniz bölgelerinin geçiş kuşağında yer almakta olup 907,9 km² yüzölçümüne sahiptir. İlçe, Akdeniz ikliminin etkisi altında bulunmakta ve yaz aylarında yüksek sıcaklık ile düşük nem koşullarına bağlı olarak orman yangınları açısından yüksek risk taşımaktadır. Çalışma alanının coğrafi konumu Şekil 1'de gösterilmektedir.

Marmaris ilçesi, Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Sıcak Yazlı Akdeniz İklimi özellikleri göstermektedir. Bölgede yaz ayları sıcak ve kurak, kış ayları ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (MGM) Muğla istasyonu 2001–2025 ölçüm periyodu verilerine göre, bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı 18,6 °C, yıllık toplam yağış miktarı ise 866,4 mm olarak kaydedilmiştir. Yağışların büyük bölümü sonbahar ve kış aylarında (özellikle Kasım-Aralık) gerçekleşirken, temmuz ve ağustos aylarında ortalama yağış miktarı 4 mm'nin altına düşerek belirgin bir kurak sezon yaşanmaktadır. Bu durum, özellikle yaz aylarında bitki örtüsünün nem içeriğinin azalmasına neden olmakta ve yangın çıkış ve yayılım riskini doğrudan artırmaktadır.



Şekil 1. Çalışma Alanı

Çalışma alanının topografik yapısı, Copernicus Global DEM (30m) verileri kullanılarak QGIS ortamında "Zonal Statistics" aracı ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, Marmaris ilçe sınırları içerisindeki yükseklik değerleri deniz seviyesinden -4,42 m (kıyı şeridi/alçak kesimler) ile 997,85 m (iç kesimlerdeki tepeler) arasında değişmekte olup, ortalama yükselti 228,17 m olarak hesaplanmıştır. Kıyı kesimlerinden iç kesimlere doğru hızla yükselen engebeli arazi yapısı, yerel mikroklima koşullarını etkilemekte ve rüzgâr kanalları oluşturarak yangınların yayılım karakteristiklerini doğrudan belirlemektedir. Topografik ve iklimsel özelliklere ilişkin özet bilgiler Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Marmaris İlçesinin Temel Fiziki ve Topografik Özellikleri

Parametre	**Değer**
Toplam Alan	907,9 km²
Minimum Yükseklik	-4,42 m
Maksimum Yükseklik	997,85 m
Ortalama Yükseklik	228,17 m
İklim Tipi	Sıcak Yazlı Akdeniz İklimi (Csa)
Ortalama Yıllık Sıcaklık	18,6°C
Ortalama Yıllık Yağış	866,4 mm
Baskın Arazi Örtüsü	Orman (%73,6)

Marmaris'in arazi örtüsü özellikleri ESA WorldCover 2021 verileri kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre çalışma alanının baskın arazi örtüsü sınıfını orman alanları oluşturmaktadır. Arazi kullanım ve arazi örtüsü dağılımına ilişkin sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Marmaris İlçesi Arazi Örtüsü Dağılımı

Arazi Sınıfı	**Kod**	**Alan (km²)**	**Oran (%)**
Ağaç Örtüsü (Orman)	10	668,1	73,6
Çalılık	20	140,1	15,4
Otlak	30	54,5	6,0
Tarım Alanları	40	5,2	0,6
Yerleşim Alanları	50	11,3	1,2
Su Kütleleri	80	24,8	2,7
Diğer (Çıplak Alan, Sulak Alan vb.)	-	3,9	0,5
Toplam		907,9	100,0

Çizelge 2 incelendiğinde, çalışma alanının %73,6'sının orman örtüsü ile kaplı olduğu görülmektedir. Çalılık alanlar %15,4, otlaklar %6,0 oranında yer kaplarken tarım ve yerleşim alanlarının oranı daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Geniş ormanlık alanların varlığı, kurak yaz koşulları ve yoğun turizm faaliyetleri birlikte değerlendirildiğinde Marmaris'in Türkiye'de orman yangınlarına karşı en hassas bölgelerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle ilçe, uzun dönemli yangın aktivitelerinin konumsal ve zamansal örüntülerinin incelenmesi açısından uygun bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

2.2 Veri Setleri

Çalışmada orman yangınlarının zamansal ve konumsal analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla farklı kaynaklardan elde edilen coğrafi veri setleri kullanılmıştır. Temel veri kaynağını NASA tarafından geliştirilen FIRMS platformundan elde edilen MODIS Collection 6.1 aktif yangın verileri oluşturmaktadır. MODIS sensörleri Terra ve Aqua uyduları üzerinde yer almakta olup, küresel ölçekte günlük aktif yangın tespitleri sağlamaktadır. Çalışmada 2000-2024 yılları arasını kapsayan aktif yangın kayıtları kullanılmıştır. MODIS aktif yangın verileri; yangın noktalarının coğrafi konumu, algılama tarihi ve saati, güvenilirlik değeri (Confidence), parlaklık sıcaklığı (Brightness) ve FRP gibi öznitelikleri içermektedir. Bu bilgiler yangınların zamansal eğilimlerinin, konumsal dağılımlarının ve şiddet seviyelerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma alanının belirlenmesi amacıyla Marmaris ilçesine ait idari sınır verileri kullanılmıştır. Ayrıca çalışma alanının fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesinde ESA WorldCover 2021 arazi örtüsü verileri ile Copernicus Global DEM sayısal yükseklik modeli verilerinden yararlanılmıştır. Kullanılan veri setlerine ilişkin temel bilgiler Çizelge 3'te sunulmaktadır.

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan veri setleri

Veri Seti	**Kaynak**	**Çözünürlük**	**Kullanım Amacı**
MODIS Collection 6.1 Active Fire	NASA FIRMS	1 km	Aktif yangın analizi
Marmaris İlçe Sınırı	UCBS / Açık Veri	Vektör	Çalışma alanının belirlenmesi
ESA WorldCover 2021	ESA	10 m	Arazi örtüsü analizi
Copernicus Global DEM	Copernicus	30 m	Topografik analiz

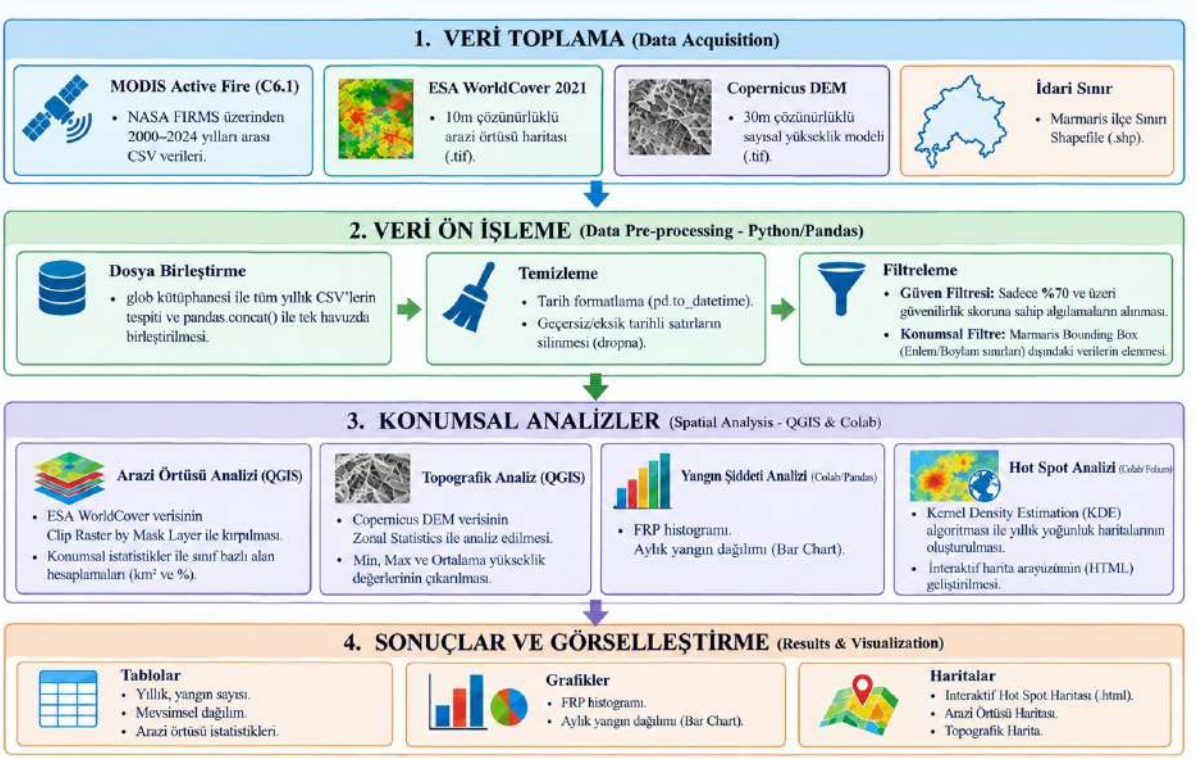
MODIS aktif yangın veri setinde yer alan temel öznitelikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. MODIS aktif yangın verilerinin temel öznitelikleri

Öznitelik	**Açıklama**
Latitude	Yangın noktasının enlem bilgisi
Longitude	Yangın noktasının boylam bilgisi
Acquisition Date	Algılama tarihi
Acquisition Time	Algılama saati
Confidence	Tespit güvenilirliği (%)
Brightness	Parlaklık sıcaklığı (K)
Satellite	Terra veya Aqua uydu bilgisi
FRP	Yangın Radyatif Gücü (MW)

2.3 Veri Ön İşlem Süreci

NASA FIRMS platformundan elde edilen MODIS Collection 6.1 aktif yangın verileri, analizlere başlamadan önce çeşitli ön işleme adımlarından geçirilmiştir. Öncelikle 2000-2024 yıllarını kapsayan yıllık aktif yangın kayıtları Python programlama dili kullanılarak tek bir veri tabanında birleştirilmiştir. Böylece çalışma dönemine ait tüm yangın gözlemleri bütünleşik bir veri seti hâline getirilmiştir. Veri kalitesinin artırılması amacıyla FIRMS veri setinde yer alan güvenilirlik değerleri incelenmiş ve %70'in altında güvenilirliğe sahip kayıtlar analiz dışında bırakılmıştır. Bu işlem, yanlış pozitif yangın tespitlerinin azaltılması ve elde edilen sonuçların doğruluğunun artırılması amacıyla uygulanmıştır. Marmaris ilçesi idari sınır CBS ortamında kullanılarak konumsal filtreleme gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı dışında kalan aktif yangın kayıtları veri setinden çıkarılmış ve Marmaris ilçe sınırları içerisindeki yangın noktaları analizlere dâhil edilmiştir. Ardından veri setinde yer alan eksik tarih bilgileri, hatalı koordinatlar ve yinelenen kayıtlar kontrol edilmiş, gerekli düzeltmeler yapılarak analiz için uygun bir veri tabanı oluşturulmuştur. Ön işleme aşamalarının tamamlanmasının ardından veri seti zamansal analizler, FRP değerlendirmeleri ve KDE analizleri için hazır hâle getirilmiştir. Çalışmada izlenen genel metodolojik süreç Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışmanın veri ön işleme ve analiz iş akışı

2.4 Hot Spot Analizi

Orman yangınlarının konumsal dağılım örüntülerinin belirlenmesi amacıyla KDE yöntemi kullanılmıştır. KDE, noktasal olayların belirli bir alandaki yoğunluk dağılımını sürekli bir yüzey şeklinde modelleyen parametrik olmayan bir konumsal analiz yöntemidir. Bu yöntem sayesinde aktif yangın noktalarının kümelendiği alanlar belirlenebilmekte ve yüksek risk taşıyan bölgeler görsel olarak ortaya konulabilmektedir. Özellikle çok sayıda noktasal olayın bulunduğu veri setlerinde KDE yöntemi, konumsal yoğunluk merkezlerinin ve Hot spot bölgelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Marmaris ilçe sınırları içerisinde 2000-2024 yılları arasında tespit edilen aktif yangın noktalarına KDE yöntemi uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen yoğunluk yüzeyi, yangın olaylarının konumsal olarak yoğunlaştığı bölgeleri ortaya koymak amacıyla Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek ve Çok Yüksek olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Üretilen yoğunluk haritaları sayesinde yangınların rastgele bir dağılım göstermediği, belirli alanlarda kümelenme eğilimi oluşturduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen Hot spot haritaları, çalışma alanındaki risk odaklarının belirlenmesi ve yangın yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli konumsal bilgiler sağlamaktadır. Kernel yoğunluk tahmini aşağıdaki eşitlik kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

Burada f(x) tahmin edilen yoğunluğu, n gözlem sayısını, h bant genişliğini, K çekirdek fonksiyonunu ve x_i her bir gözlem noktasını ifade etmektedir. Bant genişliği parametresi, yoğunluk yüzeyinin pürüzsüzlük derecesini belirleyen temel değişkenlerden biridir.

Yangınların yalnızca konumsal dağılımlarının değil, aynı zamanda şiddet özelliklerinin de değerlendirilmesi amacıyla FRP parametresinden yararlanılmıştır. FRP, aktif yangın pikseli tarafından yayılan radyatif enerjinin megawatt (MW) cinsinden ölçüsünü ifade etmekte olup yangının enerji düzeyi ve şiddeti hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu parametre, yangının büyüklüğünün ve potansiyel etkisinin nicel olarak değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan önemli bir göstergedir. Çalışma kapsamında her bir aktif yangın kaydına ait FRP değerleri analiz edilerek minimum, maksimum ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Ayrıca yangınlar şiddet düzeylerine göre düşük (<50 MW), orta (50-100 MW) ve yüksek (>100 MW) olmak üzere üç sınıfta değerlendirilmiştir. Bu sınıflandırma sayesinde Marmaris'te meydana gelen yangınların enerji karakteristikleri ortaya konulmuş ve farklı şiddet düzeylerindeki yangınların dağılımları karşılaştırılmıştır. FRP değerlerine ilişkin istatistiksel dağılım ve şiddet sınıfları sonuçlar bölümünde Şekil 4 yardımıyla sunulmuştur. KDE ve FRP analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, çalışma alanında yalnızca yangınların yoğunlaştığı bölgelerin değil, aynı zamanda yüksek enerji düzeyine sahip yangınların konumsal örüntülerinin de ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır. Böylece yangın riskinin hem konumsal hem de şiddet boyutları birlikte değerlendirilerek afet yönetimi, erken uyarı sistemleri ve karar destek süreçleri için daha kapsamlı bir analiz altyapısı oluşturulmuştur.

2.5 WebCBS Uygulaması

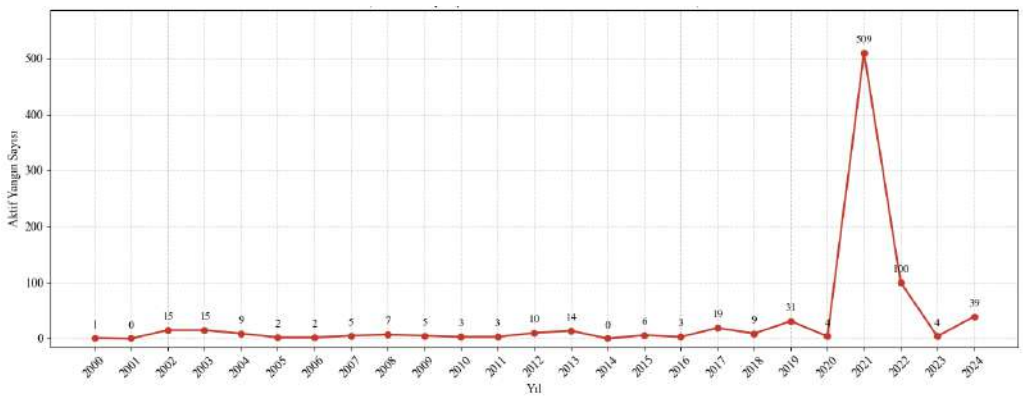
Çalışmada elde edilen konumsal analiz sonuçlarının etkileşimli bir ortamda görüntülenebilmesi ve kullanıcılar tarafından sorgulanabilmesi amacıyla WebCBS tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. WebCBS uygulaması, yangın verilerinin görselleştirilmesini, Hot spot bölgelerinin incelenmesini ve farklı yıllara ait yangın aktivitelerinin karşılaştırılmasını sağlayan bir karar destek aracı olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda Python programlama dili ile üretilen analiz sonuçları, Folium kütüphanesi kullanılarak web ortamına aktarılmıştır. Folium, Leaflet.js altyapısını kullanarak etkileşimli haritaların oluşturulmasına olanak sağlayan açık kaynaklı bir CBS aracıdır. Geliştirilen uygulamada çalışma alanına ait temel harita katmanları üzerine aktif yangın noktaları, KDE sonuçları ve FRP analizlerinden elde edilen bilgiler entegre edilmiştir. Böylece kullanıcıların farklı analiz katmanlarını ayrı ayrı görüntüleyebilmeleri ve karşılaştırabilmeleri sağlanmıştır. Ayrıca harita üzerinde yakınlaştırma, katman seçimi ve bilgi pencereleri gibi etkileşimli özellikler kullanılarak sonuçların daha etkin biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. WebCBS ortamına aktarılan KDE yoğunluk haritaları sayesinde çalışma alanındaki yüksek riskli bölgeler görsel olarak incelenebilmekte, aktif yangın noktalarının konumsal dağılımı detaylı olarak değerlendirilebilmektedir. Bunun yanında FRP değerlerinin harita ortamında sunulması, yalnızca yangınların konumlarının değil aynı zamanda şiddet düzeylerinin de konumsal olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, yangın riskinin konumsal örüntülerinin daha kapsamlı biçimde yorumlanmasını sağlamaktadır. Geliştirilen WebCBS uygulaması, araştırma sonuçlarının statik haritalarla sınırlı kalmadan etkileşimli olarak paylaşılmasına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, yangın yönetimi ve afet planlama süreçlerinde görev alan kurumların yüksek riskli bölgeleri hızlı şekilde belirlemesine katkı sağlayabilecek bir altyapı sunmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların internet tabanlı platformlarda erişilebilir olması, uzaktan algılama ve CBS teknolojilerinin yangın izleme, erken uyarı ve karar destek sistemlerine entegrasyonu açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, NASA FIRMS platformundan elde edilen MODIS aktif yangın verileri kullanılarak Marmaris ilçesinde 2000-2024 yılları arasında meydana gelen yangın aktivitelerine ilişkin analiz sonuçları sunulmakta ve değerlendirmektedir. Veri ön işleme sürecinin ardından oluşturulan veri seti kullanılarak yangınların yıllık ve aylık dağılımları incelenmiş, FRP değerleri yardımıyla yangın şiddetleri analiz edilmiş ve KDE yöntemi ile yangın yoğunluklarının konumsal örüntüleri ortaya konulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçlar WebCBS ortamında görselleştirilerek yangın riskinin konumsal dağılımı değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler, Marmaris'te orman yangınlarının zamansal ve konumsal açıdan belirgin örüntüler sergilediğini göstermektedir. Bulgular, yangın aktivitelerinin yıllar içerisinde değişkenlik göstermekle birlikte son dönemlerde belirgin bir artış eğilimine sahip olduğunu, yangın olaylarının özellikle yaz aylarında yoğunlaştığını ve çalışma alanında belirli bölgelerde kümelendiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında FRP analizleri, yangınların yalnızca sıklık bakımından değil, enerji düzeyi ve potansiyel etkileri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Marmaris'teki yangın dinamiklerinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve yangın yönetimi, erken uyarı sistemleri ile konumsal karar destek süreçlerine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle yangın aktivitelerinin zamansal değişimi değerlendirilmiş, ardından yangın şiddeti ve konumsal yoğunluk örüntülerine ilişkin sonuçlar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.1 Yıllara Göre Yangın Dağılımı

Marmaris ilçesinde 2000-2024 yılları arasında meydana gelen aktif yangınların yıllara göre dağılımları incelenerek yangın aktivitesinin zamansal değişimi değerlendirilmiştir. Çalışma alanında tespit edilen yangın kayıtlarının yıllara göre dağılımı Şekil 3'te sunulmaktadır.



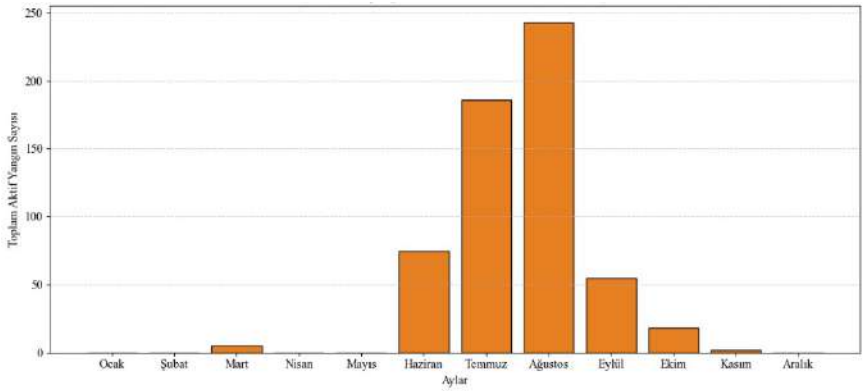
Şekil 3. Marmaris İlçesinde yıllara göre yangın sayıları (2000-2024 yılları)

Şekil 3 incelendiğinde, çalışma döneminde yangın aktivitelerinin yıllar arasında önemli farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Özellikle 2021 yılı, tespit edilen aktif yangın sayısı bakımından analiz döneminin en yüksek değerine ulaşmıştır. Bu durum, 2021 yazında Marmaris ve çevresinde meydana gelen büyük ölçekli orman yangınlarının uydu tabanlı aktif yangın kayıtlarına doğrudan yansıdığını göstermektedir. Aynı yıl boyunca gözlenen yoğun yangın aktivitesi, bölgenin son yıllarda karşı karşıya kaldığı en önemli çevresel afetlerden birini temsil etmektedir. Yıllık değişimler değerlendirildiğinde, 2000-2019 döneminde yangın sayılarının genel olarak düşük seviyelerde seyrettiği, buna karşılık 2020 sonrasında belirgin bir artış eğiliminin ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle 2021 ve 2022 yıllarında gözlenen yüksek değerler, bölgedeki yangın rejiminin son yıllarda önemli ölçüde değiştiğine işaret etmektedir. Bu durum, Muğla bölgesinde artan sıcaklıklar, uzayan kurak dönemler ve azalan nem koşullarının yangın riskini artırdığını ortaya koyan çalışmalarla uyumludur (Çelik & Bilik, 2026; Varol & Ertuğrul, 2015).

Çalışma döneminde bazı yıllarda oldukça düşük yangın aktivitesi gözlenirken, bazı yıllarda ani yükselişlerin meydana gelmesi yangın oluşumunun iklim koşulları, meteorolojik olaylar ve insan faaliyetleri gibi çok sayıda faktörden etkilendiğini göstermektedir. Özellikle 2021 yılında meydana gelen olağanüstü artış, Eker vd. (2024) tarafından Türkiye tarihindeki en sıra dışı yangın olaylarından biri olarak tanımlanan yangınlarla örtüşmektedir. Elde edilen bulgular, Marmaris'te orman yangını riskinin zaman içerisinde arttığını ve özellikle son yıllarda daha yüksek aktivite seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Bu durum, yangın yönetimi ve müdahale planlarının yalnızca geçmiş yangın kayıtlarına değil, değişen iklim koşullarını da dikkate alan uzun dönemli risk değerlendirmelerine dayandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca aktif yangın sayılarındaki artış eğilimi, sonraki bölümlerde değerlendirilen yangın şiddeti ve konumsal yoğunluk analizleri ile ele alındığında bölgedeki yangın riskinin çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

3.2 Aylara Göre Yangın Dağılımı

Marmaris ilçesinde 2000-2024 yılları arasında tespit edilen aktif yangın noktalarının aylara göre dağılımı incelendiğinde, yangın aktivitelerinin belirgin bir mevsimsel karakter gösterdiği görülmektedir (Şekil 4). Yangınların büyük bölümü yaz aylarında meydana gelmiş olup, özellikle temmuz ve ağustos aylarında önemli ölçüde yoğunlaşmıştır. Bu durum, Akdeniz ikliminin etkisi altında bulunan bölgede yaz aylarında sıcaklıkların yükselmesi, yağış miktarının azalması ve bağıl nem değerlerinin düşmesi ile doğrudan ilişkilidir.



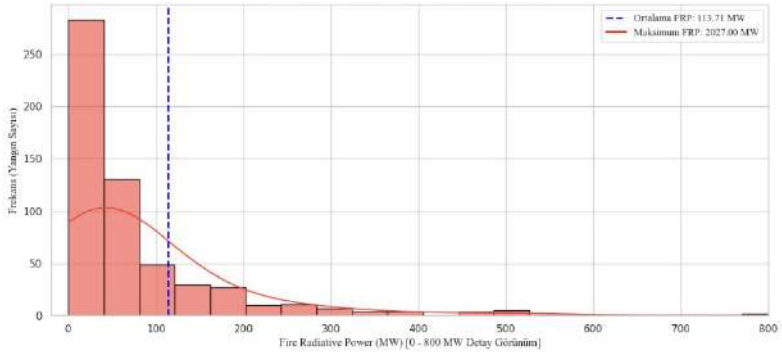
Şekil 4. Marmaris İlçesinde Aylara Göre Aktif Yangın Dağılımı (2000–2024) yılları

Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek yangın aktivitesinin ağustos ayında gerçekleştiği görülmektedir. Ağustos ayını sırasıyla temmuz ve haziran ayları takip etmektedir. Bu dönemde bölgede hâkim olan yüksek sıcaklıklar ve kurak koşullar, bitki örtüsündeki nem miktarının azalmasına neden olmakta ve yanıcı madde özelliklerini artırarak

yangınların oluşma ve yayılma olasılığını yükseltmektedir. Özellikle temmuz ayında gözlenen belirgin yoğunluk, Marmaris'teki yangın riskinin yıl içerisinde en yüksek seviyeye ulaştığı dönemi temsil etmektedir. Yangın aktivitelerinin haziran ayında artmaya başladığı, ağustos ayında zirve yaptığı ve eylül ayından itibaren kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Eylül ayından sonra yangın sayılarında belirgin bir düşüş meydana gelmekte, kış ve ilkbahar aylarında ise oldukça düşük değerler gözlenmektedir. Ocak, şubat ve mart aylarında tespit edilen yangın sayıları son derece sınırlı olup, bu durum yağışlı dönemlerde artan nem koşullarının yangın oluşumunu baskılamasıyla açıklanabilir. Elde edilen bulgular, Marmaris'te yangın sezonunun büyük ölçüde Haziran-Eylül döneminde yoğunlaştığını göstermektedir. Benzer sonuçlar Türkiye genelinde ve Akdeniz iklim kuşağında gerçekleştirilen çalışmalarda da rapor edilmiş olup, yangın faaliyetlerinin yaz aylarında belirgin şekilde arttığı belirtilmektedir (Akyürek, 2023; Demirel & Türk, 2023; Yılmaz vd., 2026). Bu durum, yangınla mücadele kapasitesinin, gözetleme faaliyetlerinin ve erken uyarı sistemlerinin özellikle yaz döneminde güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bölgede turizm faaliyetlerinin en yoğun olduğu dönemin de yaz aylarına denk gelmesi, insan kaynaklı yangın riskinin artmasına neden olmakta ve yangın yönetimine yönelik önlemlerin önemini artırmaktadır.

3.3 FRP Değerlerinin Değerlendirilmesi

Orman yangınlarının yalnızca meydana gelme sıklıklarının değil, aynı zamanda şiddet düzeylerinin de değerlendirilmesi, yangınların potansiyel etkilerinin ortaya konulması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla çalışma kapsamında NASA FIRMS veri setinde yer alan FRP değerleri analiz edilmiştir. FRP, aktif yangın tarafından açığa çıkarılan radyatif enerjiyi MW cinsinden ifade eden ve yangının enerji düzeyi ile yanma şiddetini temsil eden önemli bir parametredir. Çalışma alanındaki yangınlara ait FRP değerlerinin dağılımı Şekil 5'te sunulmaktadır.

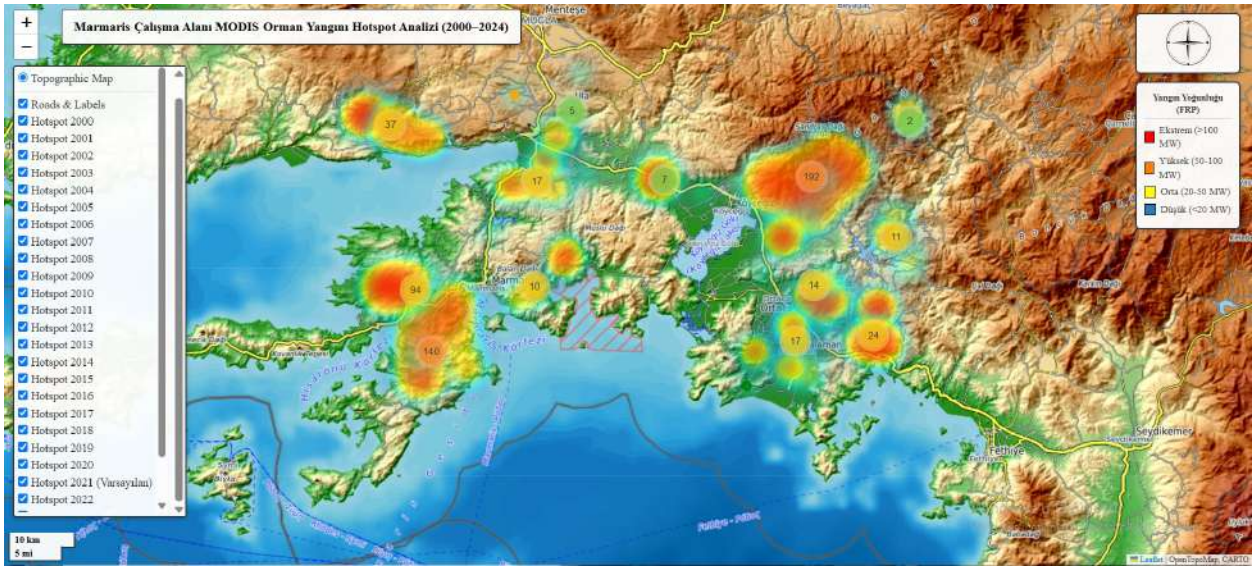


Şekil 5. Marmaris İlçesinde Yangın Radyatif Gücü (FRP) Dağılımı Histogramı

Şekil 5 incelendiğinde, FRP değerlerinin geniş bir aralıkta dağıldığı ve sağa çarpık bir dağılım karakteri gösterdiği görülmektedir. Bu durum, çalışma alanında çok sayıda düşük ve orta şiddetli yangının yanında daha az sayıda ancak oldukça yüksek enerjiye sahip yangınların da meydana geldiğini göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre Marmaris'te tespit edilen yangınların ortalama FRP değeri 113,71 MW olarak hesaplanmış, maksimum FRP değeri ise 2027,00 MW olarak belirlenmiştir. Bu yüksek değerler, çalışma alanında zaman zaman geniş alanlara yayılabilen ve kontrol altına alınması güç büyük ölçekli yangınların meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Yangınlar şiddet düzeylerine göre değerlendirildiğinde, kayıtların %37,1'inin düşük şiddetli (<20 MW), %37,9'unun orta şiddetli (20-50 MW) ve %25,0'ının yüksek şiddetli (>50 MW) yangınlardan oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle yüksek ve aşırı yüksek şiddetli yangınların toplam kayıtların yaklaşık dörtte birini oluşturması dikkat çekici bir bulgudur. Bu sonuç, Marmaris'teki yangınların yalnızca sayı bakımından değil, enerji düzeyi bakımından da önemli bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir. FRP dağılımında gözlenen yüksek değerler, bölgenin sahip olduğu yoğun orman örtüsü, kurak yaz koşulları ve topografik özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Çalışma alanının yaklaşık %73,6'sının ormanlarla kaplı olması, yangınların yüksek miktarda yanıcı madde ile beslenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca yaz aylarında görülen düşük nem ve yüksek sıcaklık koşulları, yangınların daha yüksek enerji açığa çıkararak yayılmasına neden olmaktadır. Elde edilen bulgular, FRP parametresinin yangın risk değerlendirmelerinde önemli bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır. Çamalan & Çamalan (2023), FRP değerlerinin yangının termal gücünü ve enerji çıkışını temsil ettiğini belirtirken, Tuygun vd. (2023) yüksek şiddetli yangınların atmosferik etkilerinin daha belirgin olduğunu vurgulamaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar da Marmaris'teki yangın riskinin değerlendirilmesinde yangın sayılarının tek başına yeterli olmadığını, şiddet göstergelerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak FRP analizleri, Marmaris'te meydana gelen yangınların önemli bir bölümünün orta ve yüksek şiddet sınıfında yer aldığını ve bazı ekstrem olayların çok yüksek enerji düzeylerine ulaştığını ortaya koymuştur. Bu durum, yangın yönetimi ve müdahale planlamalarında yalnızca yangın yoğunluklarının değil, yangın şiddetinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle yüksek FRP değerlerinin gözlendiği bölgeler, yangınla mücadele kaynaklarının öncelikli olarak yönlendirilmesi gereken kritik alanlar olarak değerlendirilebilir.

3.4 Hot Spot Analizi Sonuçları

KDE yöntemi kullanılarak oluşturulan yoğunluk haritaları, Marmaris ilçesindeki aktif yangın noktalarının konumsal dağılımının homojen olmadığını ve belirli alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, yangın olaylarının çalışma alanı içerisinde rastgele dağılmadığını, aksine belirgin konumsal kümelenmeler oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Aktif yangın noktalarına ait yıllık yoğunluk dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Marmaris ilçesi ve çevresinde Aktif Yangın Noktaları Yıllık Kernel Yoğunluk (Hot Spot) Haritası

Şekil 6 incelendiğinde, en yüksek yoğunluk değerlerinin ilçe merkezinin kuzey ve doğu kesimlerindeki geniş ormanlık alanlarda toplandığı görülmektedir. Bu alanlar yüksek orman örtüsü oranı, eğimli arazi yapısı ve yaz dönemlerinde ortaya çıkan kurak koşullar nedeniyle yangın oluşumu ve yayılımı açısından hassas bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kızılçam ormanlarının yoğun olarak bulunduğu kesimlerde yangın noktalarının kümelenmesi, bölgedeki yanıcı madde miktarının yangın davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yoğunluk haritasında dikkat çeken bir diğer unsur, bazı Hot spot bölgelerinin yerleşim alanları ile ormanlık alanların kesiştiği orman-kent arayüzlerinde (Wildland-Urban Interface, WUI) ortaya çıkmasıdır. Bu durum, doğal faktörlerin yanında insan faaliyetlerinin de yangın oluşumu üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Özellikle yaz aylarında artan nüfus hareketliliği, rekreasyon faaliyetleri ve turizm baskısı, yangın çıkış riskini artıran unsurlar arasında değerlendirilmektedir. Ayrıca ulaşım koridorlarına yakın alanlarda gözlenen orta ve yüksek yoğunluk değerleri, insan kaynaklı etkilerin konumsal dağılım üzerindeki rolünü desteklemektedir. Elde edilen bulgular, Muğla ve Türkiye genelinde gerçekleştirilen konumsal yangın analizleriyle de uyumludur. Gayır & Arslan (2018) ile Gayır (2019), Muğla bölgesindeki yangınların istatistiksel olarak anlamlı kümelenmeler oluşturduğunu ortaya koyarken, Akyürek (2023) ve Demirel & Türk (2023) Ege ve Akdeniz kıyı kuşağının Türkiye'de yangın aktivitesinin en yoğun olduğu bölgeler arasında yer aldığını belirtmiştir. Çalışma sonuçları, Marmaris'in bu yüksek risk kuşağı içerisinde yer aldığını ve yangınların belirli konumsal odak noktalarında yoğunlaştığını doğrulamaktadır. Kernel yoğunluk analizleri, yangınların yalnızca geçmişte meydana geldiği alanları göstermekle kalmayıp gelecekteki yangın risklerinin değerlendirilmesi açısından da önemli bilgiler sunmaktadır. Belirlenen Hot spot bölgelerinin düzenli olarak izlenmesi, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, yangın gözetleme faaliyetlerinin planlanması ve müdahale kaynaklarının öncelikli alanlara yönlendirilmesi açısından önemli bir karar destek aracı niteliğindedir. Bu nedenle KDE tabanlı yoğunluk haritaları, Marmaris'te yangın risk yönetimi ve sürdürülebilir orman yönetimi çalışmalarına katkı sağlayabilecek önemli konumsal bilgiler sunmaktadır.

3.5 Bulguların Genel Değerlendirmesi

Bu çalışmada elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, Marmaris ilçesinde orman yangınlarının zamansal ve konumsal açıdan belirgin örüntüler sergilediği görülmektedir. Yıllık dağılım analizleri, özellikle son yıllarda yangın aktivitesinde artış eğilimi bulunduğunu ve 2021 yılının çalışma dönemindeki en yoğun yangın yılı olduğunu ortaya koymuştur. Aylık dağılımlar ise yangınların büyük ölçüde ağustos ve temmuz aylarında yoğunlaştığını göstermiştir. Bu durum, Akdeniz ikliminin karakteristik özellikleri olan yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve uzun süreli kuraklık koşullarının yangın oluşumu üzerindeki etkisini doğrulamaktadır. Yangın şiddetine ilişkin FRP analizleri, çalışma alanında meydana gelen yangınların önemli bir bölümünün orta ve yüksek şiddet sınıfında yer aldığını ortaya koymuştur. Özellikle yüksek FRP değerlerine sahip yangınların varlığı, Marmaris'te yalnızca yangın sayılarının değil, yangınların enerji düzeylerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu sonuç, bölgede meydana gelen bazı yangınların kısa sürede geniş alanlara yayılabilecek ve kontrol altına alınması güç olaylara dönüşebildiğini göstermesi

bakımından önemlidir. KDE sonuçları ise yangın olaylarının çalışma alanında rastgele dağılmadığını, belirli bölgelerde yoğunlaşarak konumsal kümelenmeler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle orman örtüsünün yoğun olduğu iç kesimlerde ve bazı ulaşım koridorları çevresinde belirlenen Hot spot alanları, doğal çevre koşulları ile insan faaliyetlerinin yangın dinamikleri üzerindeki ortak etkisini göstermektedir. Çalışma alanının yaklaşık %73,6'sının ormanlarla kaplı olması ve yaz döneminde yoğun nüfus hareketliliğinin yaşanması, bu konumsal örüntülerin oluşmasında etkili faktörler olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde Muğla ve Akdeniz bölgesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalarla genel olarak uyumludur. Ancak bu çalışma, Marmaris ilçesinde 2000-2024 yıllarını kapsayan uzun dönemli aktif yangın kayıtlarını kullanması, yangınların zamansal değişimini Hot spot analizi ve FRP değerlendirmeleri ile ele alması ve sonuçları WebCBS ortamında sunması bakımından mevcut çalışmalardan farklılaşmaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca geçmiş yangın olaylarının değerlendirilmesine değil, aynı zamanda gelecekteki yangın risklerinin yönetilmesine yönelik konumsal karar destek süreçlerine de katkı sağlamaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Marmaris'teki yangın riskinin zaman içerisinde arttığı, yangınların belirli mevsimlerde yoğunlaştığı ve belirli konumsal odaklarda kümelendiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle yangın yönetimi stratejilerinin yüksek yoğunluklu Hot spot bölgelerine odaklanması, erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi ve yangınla mücadele kaynaklarının risk düzeyi yüksek alanlara öncelik verecek şekilde planlanması gerekmektedir. Ayrıca uzaktan algılama verileri ile CBS tabanlı analizlerin birlikte kullanılması, yangın riskinin izlenmesi ve sürdürülebilir afet yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Marmaris ilçesinde 2000-2024 yılları arasında meydana gelen orman yangınları, NASA FIRMS platformundan elde edilen MODIS aktif yangın verileri kullanılarak zamansal ve konumsal açıdan analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında güvenilirlik filtresinden geçirilen aktif yangın kayıtları kullanılarak yıllık ve aylık değişimler incelenmiş, FRP değerleri yardımıyla yangın şiddetleri değerlendirilmiş ve KDE yöntemi ile yangın yoğunluklarının konumsal örüntüleri ortaya konulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçlar WebCBS ortamında görselleştirilerek yangın riskinin konumsal dağılımı değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, Marmaris'te orman yangınlarının son yirmi beş yıllık süreçte genel olarak artış eğiliminde olduğunu göstermiştir. Özellikle 2021 yılı, aktif yangın sayısı bakımından çalışma döneminin en yoğun yılı olarak belirlenmiştir. Bu durum, aynı yıl bölgede meydana gelen büyük ölçekli orman yangınlarının aktif yangın kayıtlarına açık biçimde yansıdığını ortaya koymaktadır. Aylık dağılımlar incelendiğinde ise yangınların büyük ölçüde Haziran-Eylül döneminde meydana geldiği ve en yüksek aktivitenin ağustos ayında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Marmaris'teki yangın rejiminin Akdeniz ikliminin karakteristik sıcak ve kurak yaz koşullarından güçlü biçimde etkilendiğini göstermektedir. FRP analizleri, çalışma alanındaki yangınların önemli bir bölümünün orta ve yüksek şiddet sınıfında yer aldığını ortaya koymuştur. Özellikle yüksek FRP değerlerine sahip yangınların varlığı, Marmaris'te meydana gelen yangınların yalnızca sıklıklarıyla değil, oluşturdukları enerji ve potansiyel tahribat düzeyleriyle de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum, bölgedeki yangınların kontrol altına alınmasının güçleşebileceğini ve yangınla mücadele planlamalarında şiddet boyutunun dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. KDE sonuçları, yangın olaylarının çalışma alanında rastgele dağılmadığını ve belirli bölgelerde yoğunlaştığını göstermiştir. Hot spot alanlarının ağırlıklı olarak yoğun orman örtüsüne sahip kesimlerde, bazı durumlarda ise ulaşım koridorları ve insan faaliyetlerinin etkili olduğu bölgelerde toplandığı belirlenmiştir. Bu sonuç, doğal çevre koşullarının yanı sıra antropojenik etkilerin de yangın oluşumu üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Çalışmanın literatüre temel katkısı, Marmaris ilçesinde uzun dönemli aktif yangın verilerini kullanarak yangınların zamansal değişimini, konumsal yoğunluk örüntülerini ve şiddet özelliklerini birlikte değerlendirmesidir. Ayrıca sonuçların WebCBS ortamında sunulması, yangın verilerinin yalnızca akademik bir analiz ürünü olmaktan çıkarılarak karar destek süreçlerinde kullanılabilecek dinamik bir bilgi kaynağına dönüştürülmesini sağlamıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, yangın yoğunluğunun yüksek olduğu Hot spot bölgelerinde erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi, gözetleme ve izleme ağlarının geliştirilmesi ve yangınla mücadele kaynaklarının risk odaklı olarak planlanması önerilmektedir. Özellikle yangın aktivitesinin yoğunlaştığı Haziran-Eylül döneminde önleyici tedbirlerin artırılması ve orman-kent arayüzü bölgelerinde farkındalık çalışmalarına öncelik verilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca yüksek FRP değerlerine sahip yangınların yoğunlaştığı alanların öncelikli müdahale bölgeleri olarak değerlendirilmesi, yangın yönetiminde kaynakların daha etkin kullanılmasına katkı sağlayabilir. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda, MODIS aktif yangın verilerinin Sentinel-2 ve Landsat gibi daha yüksek konumsal çözünürlüğe sahip uydu verileriyle bütünleştirilmesi önerilmektedir. Bunun yanında sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yağış gibi meteorolojik değişkenlerin analizlere dahil edilmesi, yangın oluşum mekanizmalarının daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli yangın duyarlılık modelleri ile dinamik risk haritalarının geliştirilmesi ise Marmaris ve benzer Akdeniz ekosistemlerinde daha etkin yangın yönetim stratejilerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Akyürek, Ö. (2023). Türkiye'deki 2000–2021 yılları arasındaki bitki örtüsü yangınlarının mekânsal analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, *4*(1), 33-46.

Alpak, I., Kurtuluş, B., & Yamaç, S. S. (2026). Interpretable Machine Learning-Based Wildfire Susceptibility Mapping in a Mediterranean Landscape: The Muğla Case. *Environmental and Earth Sciences Proceedings*, *46*(1), 1.

Arslan, H., Baltaci, H., Demir, G., & Ozcan, H. K. (2024). Spatiotemporal changes and background atmospheric factors associated with forest fires in Turkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(10), 891.

Coskuner, K. A. (2022). Assessing the performance of MODIS and VIIRS active fire products in the monitoring of wildfires: A case study in Turkey. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, *15*(2), 85.

Çamalan, G., & Çamalan, İ. (2023). Türkiye'de büyük orman yangınları ve uydu-model verileri kullanımı. *V. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu (Uzalmet)*, 14-17.

Çelik, M. A., & Bilik, A. (2026). Thermal evolution (1850–2100) of a Mediterranean coastal tourism hotspot: insights from Muğla region, Türkiye. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 1-13.

Demir, S., & Dursun, İ. (2023). Determining burned areas using different threshold values of NDVI with Sentinel-2 satellite images on gee platform: A case study of Muğla Province. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, *7*(2), 117-130.

Demirel, Y., & Türk, T. (2023). Türkiye'de 2015 ile 2022 yılları arasında meydana gelen orman yangınlarının coğrafi bilgi sistemleri ile zamansal ve mekânsal analizi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, *10*(2), 136-150.

Eker, R., Çınar, T., Baysal, İ., & Aydın, A. (2024). Remote sensing and GIS-based inventory and analysis of the unprecedented 2021 forest fires in Türkiye's history. *Natural Hazards*, *120*(12), 10687-10707.

Gayır, B. (2019). *Muğla Yöresinde Meydana Gelen Orman Yangınlarının Konumsal İstatistik Analizi ve Risk Haritalarının Oluşturulması* [Thesis]. Kocaeli Üniversitesi.

Gayır, B., & Arslan, O. (2018). Orman yangınlarının CBS tabanlı konumsal istatistik analizi: 2011-2015 yılları arasında Muğla orman bölge sınırları içerisinde çıkan yangınlar. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, *4*(1), 46-62.

Gündüz, H. İ. (2026). Automated burned area detection using machine learning with hybrid training data generation and explainable AI: a comparative analysis of PBIA and OBIA approaches. *Natural Hazards*, *122*(7), 283.

Novo, A., Dutal, H., & Eskandari, S. (2024). Fire susceptibility modeling and mapping in Mediterranean forests of Turkey: a comprehensive study based on fuel, climatic, topographic, and anthropogenic factors. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *9*(2), 655-679.

Siyavuş, A. E. (2023). Detection of Wildfires with Satellite Images and Evaluation of Their Effects: The Example of Marmaris. *EKEV Akademi Dergisi*, (Özel Sayı), 62-76.

Tuygun, G. T., İşsever, G., & Elbir, T. (2023). Türkiye'de 2021 yılında yaşanan büyük orman yangınlarında yanan orman alanlarının ve yangın kaynaklı atmosferik aerosollerin uydular ile izlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, *25*(74), 351-369.

Varol, T., & Ertuğrul, M. (2015). The Impact of the Changing Climate on Fire Activity in Muğla Region. *Polish Journal of Environmental Studies*, *24*(3), 1363.

Yılmaz, F. K., Bozyurt, O., Erkmen, Y. E., & Avcı, İ. (2026). A Geographical Analysis of Forest Fires Occurring in The Mediterranean Ecosystem of Turkey in July 2021. *Dünya Coğrafyası ve Kalkınma Perspektifi Dergisi*, (9), 1-12.

Yücer, E. (2023). SENTINEL-2 MSI VE LANDSAT-9 OLI Uydu Görüntüleriyle Yanmiş Alanlarin Tespiti: 2022 Muğla/Marmaris Orman Yangını. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *26*(4), 866-880.

SENTİNEL-2 GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK PLANETSCOPE GÖRÜNTÜLERİNİN YAPAY ZEKÂ TABANLI SPEKTRAL ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Osman Yavuz ALTUNTAŞ[1], İsmail ÇÖLKESEN[2],

[1]Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, oyavuzaltuntas@gtu.edu.tr
[2]Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, icolkesen@gtu.edu.tr

ÖZET

Yüksek mekânsal çözünürlüklü uzaktan algılama görüntülerinin kullanımı, çevresel süreçlerin ve antropojenik faaliyetlerin izlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Sentinel-2 (S2) ve PlanetScope (PS) uydu görüntüleri kullanılarak yapay zekâ tabanlı süper çözünürlük (SR) ve mekânsal ölçek küçültme (DS) performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Veri setine spektral tutarlılığı incelemek amacıyla NDVI, MSAVI, NDBIrg, NDWI ve CI indeksleri dâhil edilmiştir. Yöntem kapsamında piksel tabanlı Rastgele Orman (RO) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) ile kenar etkilerini önlemek adına 8 piksel bindirmeli (512×512 yama boyutu) Evrişimsel Sinir Ağı tabanlı SRCNN modeli uygulanmıştır. Spektral tutarlılık analizinde S2–PS görüntü çiftlerinin ortak bantlarında (Mavi, Yeşil, Kırmızı, Yakın kızılötesi) R^2 değerleri 0.966–0.987, RMSE değerleri 0.011–0.033 arasında değişmiş; en yüksek tutarlılık Kırmızı (R^2= 0.987), en düşük tutarlılık ise Yakın kızılötesi (R^2= 0.966) bandında elde edilmiştir. Spektral indekslerde en yüksek R^2 NDVI'da, en düşük RMSE ise NDBIrg'de (0.033) görülmüştür. Görünür ve Yakın kızılötesi bantlarının kestiriminde ÇKA modeli genel metrik ortalamalarında (0.9668 SSIM, 38.207 dB PSNR) sayısal olarak öne çıkarken, nitel değerlendirmelerde SRCNN arazi dokularını ve kenar detaylarını korumada en yüksek görsel kaliteyi üretmiştir. Ayrıca S2'ye özgü SWIR1 ve SWIR2 bantlarının PS çözünürlüğünde sentetik üretiminde SRCNN sırasıyla R^2= 0.7237 ve R^2= 0.7056 değerleriyle piksel tabanlı modellere açık ara üstünlük sağlamıştır. Sonuçlar, S2 ve PS verilerinin spektral ve mekânsal entegrasyon potansiyelini doğrulamaktadır. Gelecekte üretken çekişmeli ağ (GAN), difüzyon ve transformatör tabanlı mimarilerin bu sürece önemli katkılar sunabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Görüntü füzyonu, Spektral tutarlılık, Uzaktan algılama, Yapay zekâ.

ABSTRACT

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED SPECTRAL ENRICHMENT OF PLANETSCOPE IMAGERY USING SENTINEL-2 IMAGERY

High-spatial-resolution remote sensing imagery is vital for effectively monitoring environmental processes and anthropogenic activities. This study comparatively evaluates artificial intelligence (AI)-based approaches for super-resolution (SR) and spatial downscaling (DS) using Sentinel-2 (S2) and PlanetScope (PS) satellite imagery. Spectral indices (NDVI, MSAVI, NDBIrg, NDWI, and CI) were incorporated into the dataset to evaluate spectral consistency across paired S2–PS images. The experimental framework employed pixel-based Random Forest (RF) and Multi-Layer Perceptron (MLP), alongside a patch-based Super-Resolution Convolutional Neural Network (SRCNN) configured with 512×512 patch sizes and an 8-pixel overlap to mitigate boundary artifacts. Initial consistency analysis across common spectral bands (RGB+NIR) yielded R^2 values of 0.966–0.987 and RMSE values of 0.011–0.033, with the Red band exhibiting the highest agreement (R^2 = 0.987) and NIR the lowest (R^2 = 0.966). Among the derived indices, NDVI achieved the highest R^2, while NDBIrg produced the lowest RMSE (0.033). Regarding VNIR band reconstruction, MLP attained the highest overall average quantitative metrics (0.9668 SSIM, 38.207 dB PSNR). However, qualitative evaluations demonstrated that SRCNN preserved complex spatial textures and edge details superiorly. Furthermore, in the synthetic estimation of S2-exclusive SWIR1 and SWIR2 bands at PS resolution, SRCNN significantly outperformed pixel-based models, achieving R^2 values of 0.7237 and 0.7056, respectively. Overall, these findings confirm the feasibility of fusing the spectral richness of S2 with the spatial resolution of PS. Future research incorporating generative adversarial networks (GANs), diffusion models, and transformer-based architectures holds strong potential to further advance satellite image fusion

Keywords: Artificial intelligence, Image fusion, Remote sensing, Spectral consistency.

1. GİRİŞ

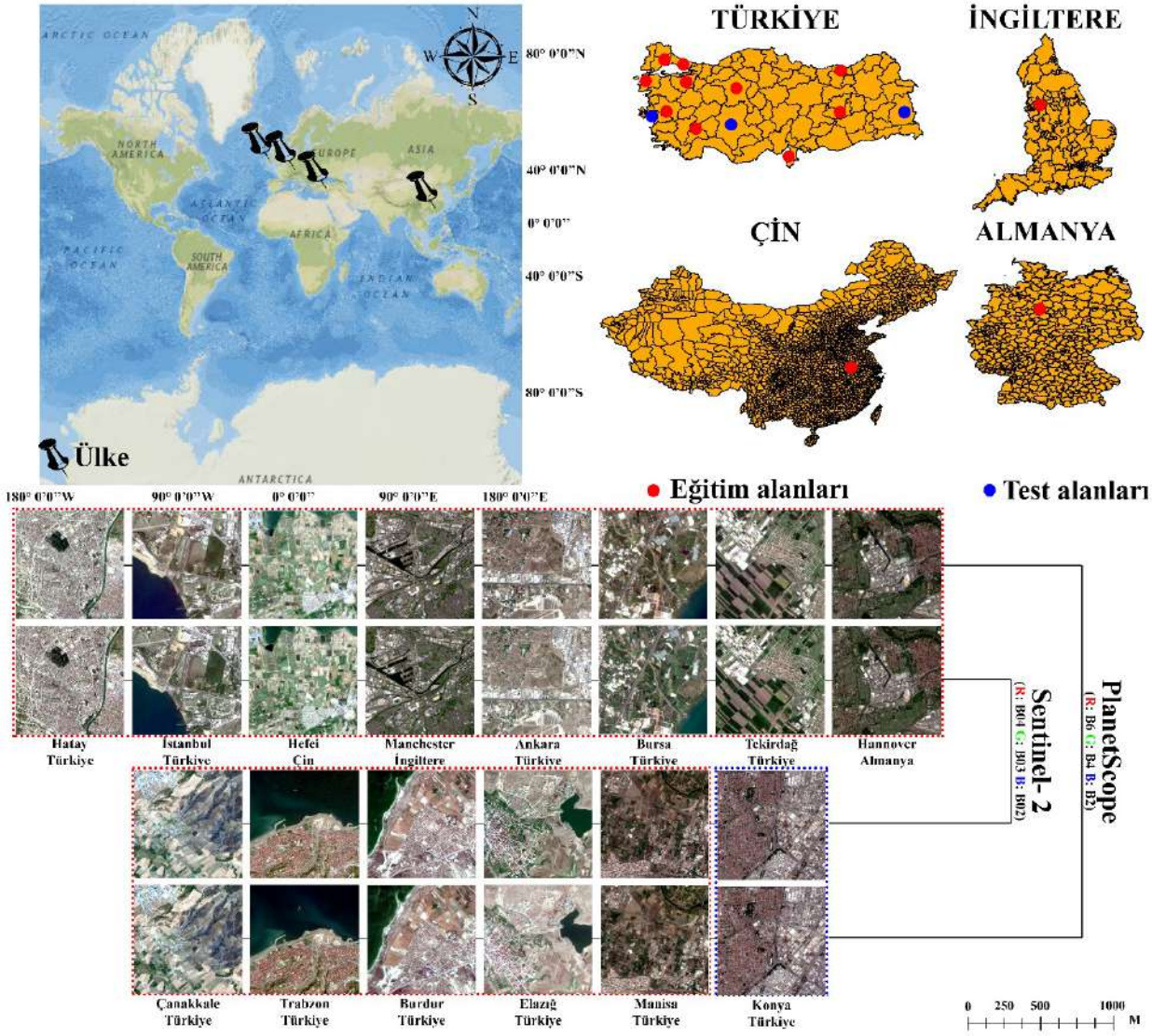
Dünya genelinde hızla artan nüfusla birlikte artan temel ihtiyaçların giderilmesine yönelik kentleşmedeki artışlar, sanayi ve altyapı faaliyetleri, tarımsal alanların genişlemesi gibi eylemler arazi örtüsünde değişikliğe neden olmaktadır. Beşerî faktörlerin yanı sıra antropojenik etkenlerin dolaylı yoldan etki ettiği iklim değişikliğine bağlı olumsuz koşullar, heyelan, deprem, taşkın, yangın gibi doğal afetlerin meydana gelmesi de arazi örtüsünde köklü değişikliklere yol açabilmektedir. Bu noktada, birçok farklı ekosisteme ev sahipliği yapan ve canlılığın devamı için büyük öneme sahip arazi örtüsündeki değişimlerin tespiti ve izlenmesi olumsuz koşulların önüne geçilmesine yönelik önlemlerin alınmasına büyük katkı sağlamaktadır. Saha çalışmaları gibi geleneksel yöntemlere dayalı gerçekleştirilen çalışmalar, düşük kapsama alanı göz önünde bulundurulduğunda ise yüksek maliyete, yoğun iş gücüne ve zamansal kayba neden olmaktadır (Schnebele vd., 2015). Öte yandan, ekosistem ile çevresel etkenler arasındaki ilişki doğrusal bir yapıda bulunmadığından kısa dönemleri kapsayan gözlemler ile uzun vadeli çalışmaların sonuçları çelişmektedir (Lindenmayer vd., 2012). Dolayısıyla geniş kapsama alanına sahip uzaktan algılama teknolojilerinin kullanımı büyük öneme sahip arazi örtüsündeki değişimlerin tespitinde yer gözlemine dayalı uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Her geçen gün gelişen teknolojiyle birlikte artan sensör teknolojisi dünya gözlemine dayalı uygulamalar için büyük avantaj sağlamaktadır. Özellikle gelişmiş sensör teknolojisinin beraberinde getirdiği yüksek mekânsal, zamansal ve spektral çözünürlüğe sahip uydu görüntülerinin varlığı bu uygulamaların sürekli olarak gelişmesine ve bu konuda yeni çalışmalar yapılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak hali hazırda var olan ücretsiz ve açık kaynak erişime sahip orta seviye mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel-2 (S2) ve Landsat 8/9 (L8/ 9) gibi uydu görüntüleri özellikle karmaşık dokuya sahip arazi örtüsünün tespitinde yetersiz kalabilmektedir. Yer gözlemine dayalı gerçekleştirilen uygulamalara yönelik literatür göz önünde bulundurulduğunda, görüntü füzyonu uygulamalarının birçok farklı analize katkı sağladığı görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda; aktif ve pasif uzaktan algılama sistemlerinin füzyonuna, geleneksel enterpolasyon ve istatistiksel tabanlı yaklaşımların yanı sıra derin öğrenme tabanlı mekânsal füzyona, korelasyon ve yardımcı veri setlerine duyarlı spektral füzyona dayalı çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir (Houborg ve McCabe, 2018; Gašparović ve Jogun, 2018; Shao ve Cai, 2018; Adriano vd., 2019; Acito vd., 2021). İlk olarak süper çözünürlük (SR) yaklaşımı, genellikle düşük çözünürlüklü görüntüden daha ayrıntılı ve daha net yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturma sürecini ifade etmektedir (Tuna vd., 2018). Buna karşın aşağı ölçekleme (DS) yaklaşımları ise genellikle, farklı mekansal çözünürlüklere sahip çeşitli sensörlerden elde edilen verilerin birleştirilmesini içermektedir. Kaba ve ince ölçekler arasındaki mekansal optimizasyon, enterpolasyon veya regresyon ilişkilerini kullanarak, girdi görüntülerinden daha ince bir uzamsal çözünürlükte değerlerin tahmin edilmesi süreci olarak tanımlanmaktadır (Atkinson, 2013). Her iki yaklaşım da düşük ve yüksek çözünürlüklü görüntülerin tamamlayıcı özelliklerinin bütünleştirilmesi yoluyla, düşük çözünürlüklü görüntülerdeki spektral bilgilerin yüksek çözünürlüklü görüntülerin ayrıntılı mekânsal bilgileriyle birleştirilerek daha yüksek mekânsal bilgi içeren çıktı görüntülerinin elde edilmesini amaçlayan füzyon süreçlerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, S2 ve PS görüntülerinin tamamlayıcı mekânsal, spektral ve zamansal özelliklerinden yararlanarak, yapay zekâ tabanlı yöntemler aracılığıyla PS'nin 3m mekânsal çözünürlüğünde S2 benzeri (zenginleştirilmiş S2) görüntüler üretmektir. Böylece, yapay zekâ modellerinin eğitiminin ardından yalnızca PS görüntüleri kullanılarak, eş zamanlı S2 görüntüsüne ihtiyaç duyulmaksızın 3m mekânsal çözünürlüğe sahip zenginleştirilmiş S2 görüntülerinin üretilebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle aynı tarihli ve eşlenik S2 ile PS görüntü çiftleri oluşturulmuş, ardından her iki sensörde ortak olarak bulunan spektral bantlar ile spektral indekslerin spektral tutarlılığı R^2 ve RMSE performans metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Ortak bantlarda elde edilen yüksek spektral uyum doğrultusunda SR yaklaşımı için S2 görüntülerinin spektral bant veya spektral indeksler girdi ve PS görüntülerine ait ortak spektral bant değerleri etiket olarak belirlenmiştir. Buna karşın DS uygulamalarında ise, PS görüntülerine ait spektral bantlar veya spektral indeksler giriş değişkenleri, S2 görüntülerine ait spektral bantlar hedef değişkenler olarak tanımlanmıştır. Ardından, her bir S2 veya PS görüntüsü için piksel tabanlı Rastgele Orman (RO) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) modelleri ile patch tabanlı Süper Çözünürlüklü Evrişimsel Sinir Ağı (SRCNN) mimarisi uygulanmıştır. Geliştirilen modeller kullanılarak, hem S2 ve PS sensörlerinde ortak olarak bulunan görünür (KYM) ve yakın kızılötesi (YKÖ) bantlar (SR) hem de yalnızca S2 sensöründe bulunan kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantları (DS), PS' nin 3m mekânsal çözünürlüğe sahip olarak üretilmiştir. Geliştirilen modellerin tahmin performansları R^2 ve RMSE metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, zenginleştirilmiş S2 görüntülerinde üretilen ortak bantlar ile yüksek mekânsal çözünürlüklü referans PS bantları arasındaki radyometrik ve yapısal benzerlik PSNR ve SSIM metrikleri kullanılarak incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİ SETİ

2.1 Çalışma alanı

Çalışma kapsamında, farklı arazi kullanımı/arazi örtüsü sınıflarının temsil edilmesi amacıyla Dünya ve Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde bulunan Burdur, İstanbul, Manisa, Bursa, Çanakkale, Tekirdağ, Ankara, Hatay, Elazığ, Trabzon, Hefei (Çin), Manchester (İngiltere) ve Hannover (Almanya) illerindeki alanlar eğitim ve doğrulama, Konya ilindeki alan ise bağımsız test veri setinin oluşturulmasında kullanılmıştır (Şekil 1). Eğitim ve doğrulama alanları; su, yerleşim, bitki örtüsü, çorak arazi, farklı çatı tipleri ve yanmış alanlar gibi çeşitli arazi örtüsü sınıflarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Bu kapsamda Burdur ve Bursa alanları, sırasıyla Burdur ve İznik göllerini içermeleri nedeniyle su sınıfının; İstanbul, Manisa ve Ankara alanları yerleşim ve karma arazi örtüsünün; Tekirdağ beyaz çatı sınıfının, Çanakkale yanmış alanların; Hatay, Elazığ, Trabzon, Hefei, Manchester ve Hannover ise farklı bölgesel arazi örtüsü ve su özelliklerinin temsil edilmesinde kullanılmıştır. Model performansının farklı coğrafi ve arazi örtüsü koşullarındaki genellenebilirliğini değerlendirmek amacıyla Konya ilindeki bölge bağımsız test alanı olarak belirlenmiştir. Konya alanı temel arazi örtüsü sınıflarının büyük bölümünü içermektedir. Böylece eğitimde kullanılmayan farklı coğrafi koşula sahip bir alan üzerinden modellerin performansları objektif olarak analiz edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanları.

2.2 Veri seti

S2, Avrupa Uzay Ajansı'nın Copernicus Programı kapsamında geliştirilen, kara yüzeylerinin izlenmesi ve çevresel değişimlerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan orta çözünürlüklü bir multispektral uydu misyonudur. S2A, S2B ve S2C uydularından oluşan misyon, görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerini kapsayan 13 spektral bantta, 10, 20 ve 60 m mekânsal çözünürlüklerde veri sağlamaktadır (Drusch vd., 2012; ESA, 2015; Gascon vd., 2017). PS ise Planet Labs. tarafından işletilen ve yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte görüntüleme sağlayan multispektral bir uydu takımyıldızıdır. Özellikle SuperDove uyduları, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerini kapsayan 8 spektral bantta ve yaklaşık 3 m mekânsal çözünürlükte görüntü üretmekte ve yüksek tekrarlı görüntüleme olanağı sunmaktadır (Houborg ve McCabe, 2018; Planet Labs, 2020). Öte yandan, bu iki sensor tarafından elde edilen altı spektral bandın benzer merkezi dalga boyuna sahip olduğu bilinmektedir (Chasles vd., 2025). Bununla birlikte, S2 Coastal Blue bandının 60m mekânsal çözünürlüğe sahip olması ve karasal uygulama kapsamı açısından değerlendirmeye alınmaması nedeniyle, analizlerde ortak bant seti olarak dikkate alınmamıştır. Her iki sensor tarafından aynı ya da benzer merkezi dalga boyuna sahip olan ortak spektral bantlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. S2- PS görüntü çifti için ortak olan bantların numarası, ismi ve merkezi dalgaboyu.

S2			PS		
Bant numarası	**Bant ismi**	**Merkezi dalgaboyu (nm)**	**Bant numarası**	**Bant ismi**	**Merkezi dalgaboyu (nm)**
B02	M	490	B2	M	490
B03	Y	560	B4	Y	565
B04	K	665	B6	K	665
B05	KK	705	B7	KK	705
B8A	YKÖ	865	B8	YKÖ	865

Ana veri seti olarak kullanılan ortak spektral bantların haricinde bu bantlardan türetilen NDVI, MSAVI, $NDBI_{rg}$, NDWI ve CI indeksleri yardımcı veri seti olarak değerlendirmeye alınmıştır. Bu indeksler sırasıyla bitki örtüsü, toprak etkisi, yapılaşmış alanlar, su yüzeyleri ve yüzey renk özelliklerinin karakterizasyonuna katkı sağlamaktadır. İndeksler, S2 ve PS görüntülerinde karşılık gelen ortak bantlar kullanılarak hesaplanmış ve temel spektral bantları tamamlayıcı değişkenler olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan spektral indekslerin matematiksel formülleri ve hesaplamada kullanılan bantlar ile kaynaklarına Çizelge 2'de yer verilmiştir. Öte yandan, süper çözünürlük işleminin mekansal çözünürlük açısından tek anlamlılığını sağlamak amacıyla KK bandı sürece dâhil edilmemiş; Sentinel-2 sensöründe ise B8A bandı yerine B08 spektral bandı YKÖ olarak kullanılmıştır (Major et al., 2025). Ayrıca, ortak bantlardan türetilen spektral indekslerin iki veri seti arasındaki spektral tutarlılığın değerlendirilmesinde kullanılabileceği ve düşük RMSE değerlerinin yüksek tutarlılığa işaret ettiği bildirilmiştir (Baldin ve Casella., 2024).

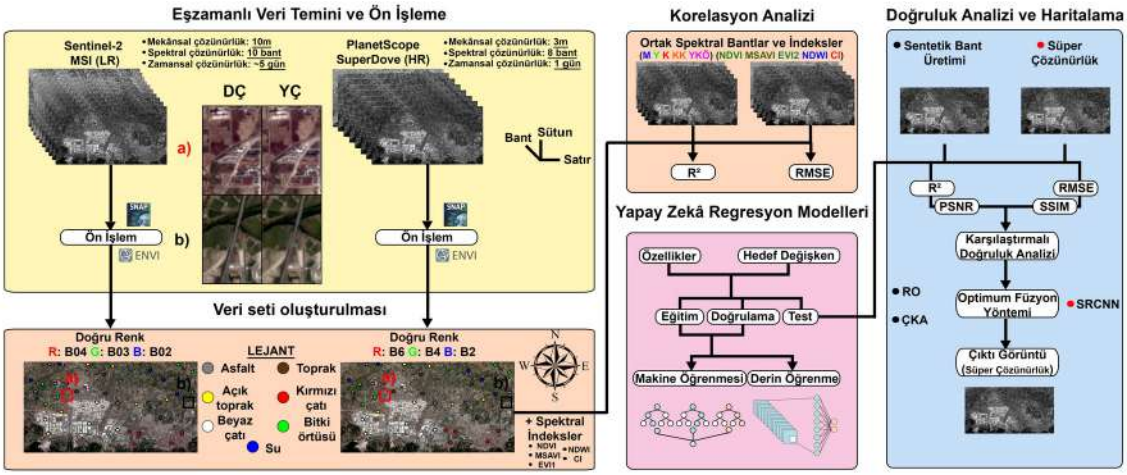
Çizelge 2. Yardımcı veri seti olarak kullanılan spektral indekslere ilişkin formül ve kaynaklar.

Indeks	**Eşitlik**	**Kaynak**
NDVI	$\frac{YKÖ - K}{YKÖ + K}$	Tucker, 1979
MSAVI	$\frac{2\,YKÖ + 1 - \sqrt{(2\,YKÖ + 1)^2 - 8(YKÖ - K)}}{2}$	Qi vd., 1994
$NDBI_{rg}$	$\frac{K - Y}{K + Y}$	Bai vd., 2020
NDWI	$\frac{Y - YKÖ}{Y + YKÖ}$	McFeeters, 1996
CI	$\frac{K - M}{K}$	Escadafal, 1993

3. METODOLOJİ

Çalışmada, S2 uydu görüntülerinin uzamsal ve spektral çözünürlüğünü artırmada regresyon tabanlı makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerinin potansiyel kullanımı değerlendirilmiştir. Bunu başarmak için altı ana adım izlenmiştir: (1) S2 ve PS uydu görüntü çiftlerinin ön işlenmesi ve filtrelenmesi, (2) veri setinin oluşturulması, (3) görüntülerdeki spektral bant ve indeks değerlerinin tutarlılığının R^2 ve RMSE metrikleri kullanılarak, (4) regresyon tabanlı öğrenme

modellerinin geliştirilmesi, (5) süper çözünürlük sonuçlarının PSNR ve SSIM metriklerine göre analizi, (6) sentetik bant oluşturma performansının R^2 ve RMSE metriklerine dayalı olarak model bazlı doğruluk değerlendirmesi (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan iş akışı.

3.1. Yapay zekâ regresyon modelleri

RO, çok sayıda karar ağacının birlikte kullanıldığı topluluk öğrenmesi tabanlı bir yöntemdir. Model, rastgele oluşturulan alt veri setleri ve değişkenler üzerinden birden fazla karar ağacı oluşturarak tahmin sonuçlarını birleştirir ve nihai tahmini elde eder. Özellikle regresyon problemlerindeki başarısı nedeniyle uzaktan algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Breiman, 2001; Hutengs ve Vohland, 2016; Wang vd., 2016; Georganos vd., 2021). ÇKA, giriş, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşan ileri beslemeli bir yapay sinir ağıdır. Doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenebilmesi, MLP'nin regresyon ve tahmin problemlerinde etkin biçimde kullanılmasını sağlamaktadır (Foody, 2004; Hakim vd., 2020; Tripathi vd., 2022; Valle vd., 2024; van der Wal vd., 2025). SRCNN ise süper çözünürlük problemlerine yönelik geliştirilen ESA tabanlı bir derin öğrenme modelidir. Model; özellik çıkarma, doğrusal olmayan haritalama ve görüntü yeniden yapılandırma olmak üzere üç temel katmandan oluşmakta ve düşük çözünürlüklü girdilerden yüksek çözünürlüklü görüntü özelliklerini öğrenmektedir (Dong vd., 2015). Basit mimarisi sayesinde hızlı ve etkili sonuçlar sunmasına karşın, karmaşık dokuların ve farklı veri türlerinin modellenmesinde sınırlılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle SRCNN, çalışmada geleneksel makine öğrenmesi modellerine alternatif bir derin öğrenme yaklaşımı olarak değerlendirilebilecektir.

Çalışmanın temel amacı doğrultusunda, regresyon problemlerinin çözümünde makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yapay zekâ modellerinden yararlanılacaktır. Bu kapsamda, daha az veri ile hızlı ve yüksek performans sunabilen topluluk öğrenmesi tabanlı RO ve yapay sinir ağı tabanlı ÇKA modelleri ile uzaktan algılanmış görüntülerde özelliklerin otomatik olarak öğrenilmesini sağlayan Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) tabanlı SRCNN modeli kullanılmıştır. SRCNN modelinin eğitiminde kayıp (loss) fonksiyonu olarak MSE tercih edilmiş, ağırlık güncellemeleri ise Adam optimizasyon algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca model uygulamasında 100 epok ile mekânsal bağlamı etkili biçimde yakalamak adına 512×512 piksel boyutunda yamalar (patch) kullanılmış; yama birleştirme aşamalarında oluşabilecek kenar etkisinien aza indirmek amacıyla 8 piksellik bindirme uygulanmıştır. Böylece, farklı yapısal özelliklere sahip makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Öte yandan, derin öğrenme modellerinden SRCNN mimarisinin oluşturulması ve eğitilmesinde TensorFlow derin öğrenme çatısı kullanılmıştır. SRCNN ve diğer makine öğrenmesi modellerinin uygulanması, NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU, 12. Nesil Intel® Core™ i7-12700H işlemci ve 16 GB RAM kapasitesine sahip bir dizüstü bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.2 Doğruluk analizi

Gerçek değerler ile tahminler arasındaki farkların karesinin karekökü alınarak RMSE ve modelin açıklama gücünü gerçek değerler ile tahminler arasındaki farkların karesinin gerçek değerler ile ortalama değer arasındaki farkların karesine oranının 1'den farkı ile ölçen R^2 metrikleri hesaplanacaktır. R^2 metriği bağımlı değişkendeki varyansın bağımsız değişkenler tarafından açıklanabilen oranını belirlemektedir (Chai ve Draxler, 2014; Hodson, 2022). Buna karşın, PSNR görüntü kalitesini nicel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılan klasik bir hata tabanlı ölçüt olup,

temel olarak Karesel Ortalama Hata (MSE) metriğine dayanmaktadır. Hesaplanan PSNR değerleri, görüntünün radyometrik çözünürlüğüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca PSNR değerleri arttıkça MSE değerleri azalmakta ve dolayısıyla görüntü kalitesi artmaktadır (Hore ve Ziou, 2010). Öte yandan, SSIM indeksine ilişkin değerler genellikle 0 ile 1 arasında değişmektedir. Orijinal görüntülerle en yüksek uyum indeks 1'e yakın değerler aldığında gözlenmektedir. Uzaktan algılanmış görüntülerin füzyonunun sonucu olarak üretilen görüntülerin mekânsal ve spektral tutarlılığını ölçmek için PSNR ve SSIM metriği de literatürde sık kullanılmaktadır (Wang vd., 2023; Wang vd., 2024; Arulananth vd., 2025; He vd., 2025; Zhao vd., 2025). Çalışma kapsamında makine ve derin öğrenme mimarileri kullanılarak görüntü füzyonu işlemi ve üretilen sentetik SWIR bantlarının mekânsal ve spektral doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla uzaktan algılanmış veriler kullanılarak gerçekleştirilen regresyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan R^2 ve RMSE gibi standart metriklerin haricinde PSNR ve SSIM metrikleri de kullanılacaktır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Kullanılacak doğruluk analizi metriklerine ilişkin eşitlikler.

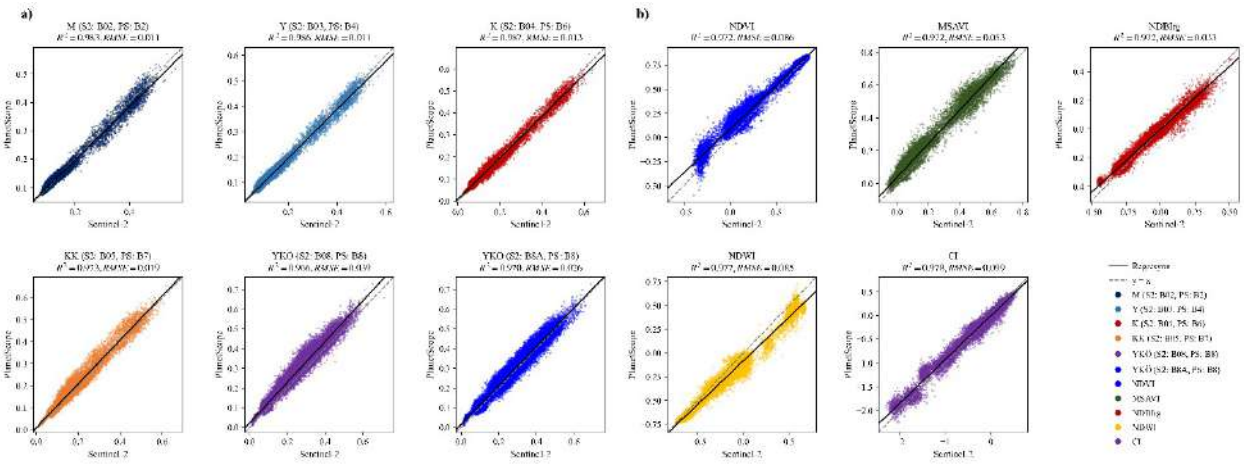
Metrik	Formül
R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (I_{YÇ}(i) - I_{SÇ}(i))^2}{\sum_{i=1}^{N} (I_{YÇ}(i) - \mu_{I_{YÇ}})^2}$
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (I_{YÇ}(i) - I_{SÇ}(i))^2}$
PSNR	$20\log_{10}\left(\frac{MAX_i}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (I_{YÇ}(i) - I_{SÇ}(i))^2}}\right)$
SSIM	$\frac{(2\mu_{YÇ}\mu_{SÇ} + C_1)(2\sigma_{I_{YÇ}I_{SÇ}} + C_2)}{(\mu_{I_{YÇ}}{}^2 + \mu_{I_{SÇ}}{}^2 + C_1)(\sigma_{I_{YÇ}}{}^2 + \sigma_{I_{SÇ}}{}^2 + C_2)}$

Burada, Tahmin sayısı: N; Gerçek görüntü: $I_{YÇ}$; Tahmin görüntüsü: $I_{SÇ}$; Gerçek görüntü ortalama değeri: $\mu_{IYÇ}$; Gerçek görüntü varyans değeri: $\sigma_{IYÇ}$; Tahmin görüntü varyans değeri: $\sigma_{ISÇ}$; Gerçek ve tahmin görüntüler arasındaki kovaryans değeri: $\sigma_{IYÇISÇ}$; En yüksek gerçek ve tahmin görüntü piksel değeri: MAX_I ve Stabilizasyon katsayıları: C_1 ve C_2 ile temsil etmektedir.

4. UYGULAMA

4.1 S2- PS çiftinin spektral uyumunun analiz edilmesi

Modellerin eğitimi için hazırlanan 14 çift veri üzerinden asfalt, toprak, açık toprak, kırmızı çatı, beyaz çatı, bitki örtüsü, su ve yanmış alan olmak üzere 8 temel arazi sınıfından dengeli bir dağılımla toplam 22.923 örnek piksel toplanmıştır. Elde edilen örnek piksel değerleri kullanılarak gerçekleştirilen spektral tutarlılık analizinde, S2 ve PS görüntü çiftleri arasında yüksek düzeyde bir radyometrik uyum gözlemlenmiştir. Tüm bantlar genelinde R^2 değerleri 0.966 ile 0.987, RMSE değerleri ise 0.011 ile 0.039 arasında değişim göstermiştir. En yüksek tutarlılık K bandında (R^2 = 0.987, RMSE = 0.013) elde edilirken, en düşük tutarlılık ise YKÖ bandında (R^2 = 0.966, RMSE = 0.039) kaydedilmiştir. Benzer şekilde; M, Y, K ve YKÖ spektral bantları kullanılarak hesaplanan ve yardımcı veri seti olarak değerlendirilen spektral indekslerin (NDVI, MSAVI, NDBIrg, NDWI ve CI) tutarlılık analizinde R^2 değerleri 0.972 ile 0.978, RMSE değerleri ise 0.033 ile 0.099 aralığında gerçekleşmiştir. İndeksler arasında R^2 ölçütüne göre en yüksek tutarlılık NDVI, en düşük tutarlılık ise CI indeksinde elde edilmiştir. RMSE metriği açısından ise NDBIrg indeksi en düşük hata oranıyla en yüksek tutarlılığı sergilerken, CI indeksi en yüksek hata değerini üretmiştir (Şekil 3a ve Şekil 3b).

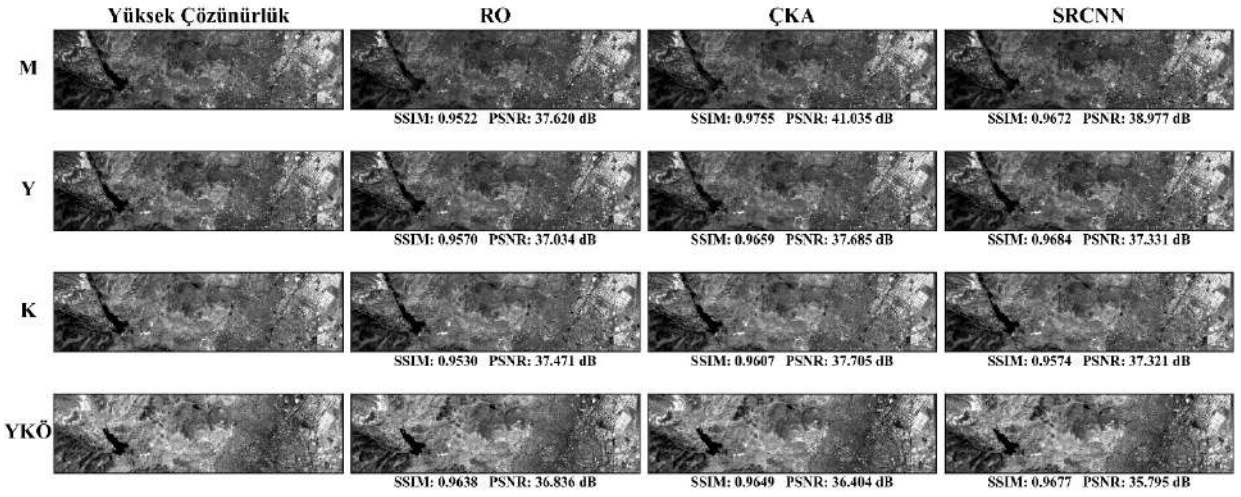


Şekil 3. S2- PS görüntü çifti a) spektral bantlar b) spektral indeksler için tutarlılık grafikleri.

Bu aşamada elde edilen bulgular; PS görüntülerinin yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüğü sayesinde S2 görüntülerindeki mekânsal ayrıntıların artırılabileceğini, buna karşılık S2 görüntülerinin üstün spektral bilgisinin de PS çözünürlüğüne aktarılabileceğini doğrulamıştır.

4.2 SR için doğruluk değerlendirmesi

SR yaklaşımıyla düşük çözünürlüklü S2 görüntülerinden yüksek çözünürlüklü PS görüntülerinin M, Y, K ve YKÖ bantlarının kestirimi amacıyla RO, ÇKA ve SRCNN modelleri karşılaştırılmıştır. Modellerin bant bazlı kestirim performanslarına ait SSIM ve PSNR metrikleri Şekil 4'te sunulmuştur. M, Y, K ve YKÖ bantlarında en yüksek SSIM değerleri sırasıyla ÇKA (0.9755), SRCNN (0.9684), ÇKA (0.9607) ve SRCNN (0.9677) modelleri ile elde edilirken; en yüksek PSNR değerleri sırasıyla ÇKA (41.035 dB), ÇKA (37.685 dB), ÇKA (37.705 dB) ve RO (36.836 dB) algoritmaları tarafından sergilenmiştir. Dört bandın ortalaması dikkate alındığında, ÇKA modeli ortalama 0.9668 SSIM ve 38.207 dB PSNR değerlerine ulaşarak genel metrik başarısında öne çıkmış; diğer iki modelin ortalamasına kıyasla SSIM'de 0.006, PSNR'de ise 0.91 dB'lik bir üstünlük sağlamıştır. Buna karşın, görsel ve nitel incelemelerde SRCNN modelinin, test veri seti için özellikle karmaşık arazi dokularında ve kenar detaylarında referans yüksek çözünürlüklü görüntüye en yakın görsel kaliteyi ürettiği tespit edilmiştir.

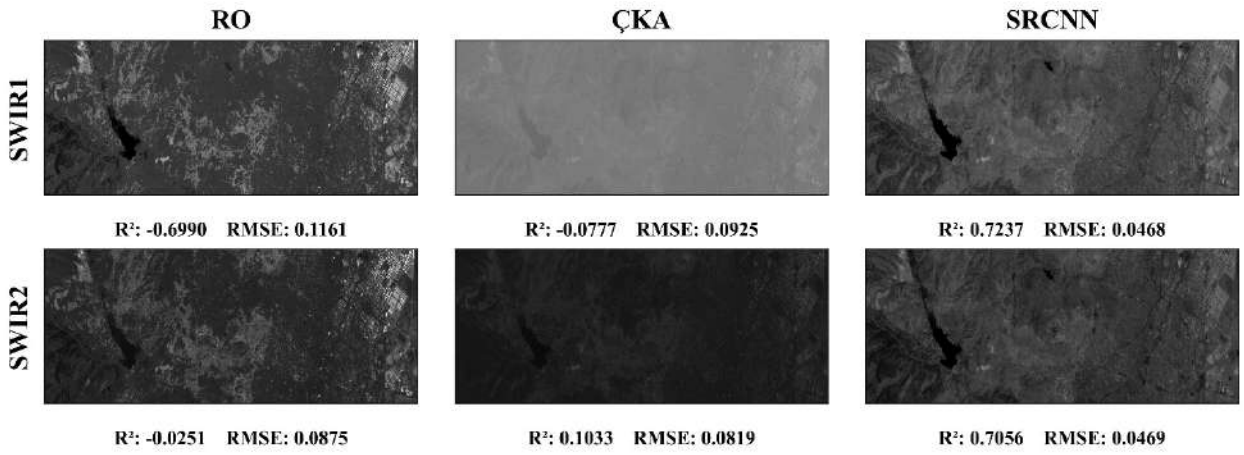


Şekil 4. SR için bant bazlı tahmin edilen görüntüler ve performans metrikleri.

4.3 Sentetik bant üretimi (DS) için doğruluk değerlendirmesi

DS uygulamalarında ise S2 görüntülerinde mevcut olan fakat PS sensör yapısında yer almayan SWIR bantlarının kestirimi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, orijinal olarak 20 m mekânsal çözünürlüğe sahip SWIR1 ve SWIR2 bantları 3m çözünürlükte kestirilmiş ve doğrulama amacıyla tekrar 20 m çözünürlüğe yeniden örneklenmiştir (küçültülmüştür). Kestirilen bantlar ile referans gerçek veriler arasındaki R^2 ve RMSE değerleri Şekil 5'te

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bant bazlı değerlendirmelerde; SWIR1 bandında SRCNN modeli R^2 = 0.7237 ve RMSE = 0.0468 değerlerine ulaşırken, SWIR2 bandında da benzer şekilde R^2 = 0.7056 ve RMSE = 0.0469 ile açık ara en yüksek performansı sergilemiştir. Diğer taraftan, RO (R^2_{SWIR1} = -0.6990, R^2_{SWIR2} = -0.0251) ve ÇKA (R^2_{SWIR1} = -0.0777, R^2_{SWIR2} = 0.1033) modelleri kabul edilebilir bir korelasyon sağlayamamıştır.



Şekil 5. DS için bant bazlı tahmin edilen görüntüler ve performans metrikleri.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, 14 adet S2 ve PS uydu görüntü çifti üzerinden 8 farklı arazi sınıfını temsil eden 22.923 piksel ile spektral uyum analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından yüksek çözünürlüklü bant kestirimi (SR) ve PS sensöründe bulunmayan 20m mekânsal çözünürlüklü SWIR bantlarının 3m çözünürlükte sentezlenmezi (DS) amacıyla RO, ÇKA ve SRCNN modelleri karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Spektral tutarlılık analizinde S2 ve PS bantları (R^2 = 0.966-0.987) ile spektral indeksler (R^2 = 0.972- 0.978) arasında yüksek uyum saptanmıştır. SR uygulamasında ÇKA modeli ortalama SSIM (0.9668) ve PSNR (38.207 dB) mektrikleriyle en yüksek değerleri sunarken, SRCNN özellikle karmaşık arazi dokularında ve kenar detaylarında referans görüntüye en yakın görsel kaliteyi üretmiştir. DS uygulamasında ise SWIR bantlarının kestiriminde SRCNN modeli diğer iki makine öğrenmesi algoritmasına kıyasla açık ara en yüksek performansı (R^2> 0.70 ve RMSE≈ 0.047) sergilemiştir. Bununla birlikte, model eğitimine spektral indekslerin yardımcı veri seti olarak eklenmesinin tahmin doğruluğuna belirgin bir katkı sağlamaması çalışmanın temel limitasyonu olup, bu çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) veya bilgi tekrarı kısıtını aşmak adına Temel Bileşenler Analizi (PCA) ile boyut indirgeme alternatif bir çözüm olarak öngörülmektedir. Gelecekte model başarımını artırmak amacıyla Üretici Çekişmeli Ağlar (GAN), Transformer ve Difüzyon tabanlı derin mimarilerin denenmesi; ayrıca SR ve DS yaklaşımları kullanılarak sentezlenen spektral bantların arazi kullanımı/arazi örtüsü tematik haritalarının sınıflandırma doğruluğuna katkısının nicel olarak analiz edilmesi planlanmaktadır

KAYNAKLAR

Acito, N., Diani, M., ve Corsini, G., 2021. PRISMA spatial resolution enhancement by fusion with sentinel-2 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 62-79.

Adriano, B., Xia, J., Baier, G., Yokoya, N., ve Koshimura, S., 2019. Multi-source data fusion based on ensemble learning for rapid building damage mapping during the 2018 sulawesi earthquake and tsunami in Palu, Indonesia. *Remote Sensing*, 11(7), 886.

Arulananth, T. S., Mahalakshmi, M., Karovic, V., Babu, J. C., Kumar, N. S., ve Kumar, A. H. 2025. Enhancing remote sensing image fusion with deep learning attention fusion residual approach. Discover Applied Sciences, 7(5), 394.

Atkinson, P. M., 2013. Downscaling in remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22, 106-114.

Bai, Y., He, G., Wang, G., ve Yang, G., 2020. WE-NDBI-A new index for mapping urban built-up areas from GF-1 WFV images. *Remote Sensing Letters*, 11(5), 407-415.

Baldin, C. M., ve Casella, V. M., 2024. Vegetative Index Intercalibration Between PlanetScope and Sentinel-2 Through a SkySat Classification in the Context of "Riserva San Massimo" Rice Farm in Northern Italy. *Remote Sensing*, 16(21), 3921.

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.

Chai, T., ve Draxler, R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250.

Chasles, R. G., Maciel, D. A., Barbosa, C. C., Novo, E. M., Martins, V. S., Paulino, R., Wanderley, R., Júnior, R. F., Lima, T. M., Bacellar, P., dos Santos, J. C. P., Silva, A. C. C., Tavares, M., Motta-Marques, D., Noernberg, M. A., Zem, R. C., Ciotti, A. M., Kabir, S., Begliomini, F. N., ve Ashapure, A., 2025. Accuracy assessment of PlanetScope SuperDove products for aquatic reflectance retrieval over Brazilian inland and coastal waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 227, 678-690.

Dong, C., Loy, C. C., He, K., ve Tang, X., 2015. Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 38(2), 295-307.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., ve Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.

Escadafal, R., 1993. Remote sensing of soil color: principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, 7(3-4), 261-279.

European Space Agency (ESA). 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency, 64 sayfa.

Foody, G. M., 2004. Supervised image classification by MLP and RBF neural networks with and without an exhaustively defined set of classes. *International Journal of Remote Sensing*, 25(15), 3091-3104.

Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., De Bonis, R., Isola, C., Martimort, P., ve Fernandez, V., 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, 9(6), 584.

Gašparović, M., ve Jogun, T., 2018. The effect of fusing Sentinel-2 bands on land-cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 39(3), 822-841.

Georganos, S., Grippa, T., Niang Gadiaga, A., Linard, C., Lennert, M., Vanhuysse, S., Mboga, N., Wolff, E., ve Kalogirou, S., 2021. Geographical random forests: a spatial extension of the random forest algorithm to address spatial heterogeneity in remote sensing and population modelling. *Geocarto International*, 36(2), 121-136.

Hakim, W. L., Achmad, A. R., ve Lee, C. W., 2020. Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3627.

He, Y., Li, H., Zhang, M., Liu, S., Zhu, C., Xin, B., Wang, J., ve Wu, Q., 2025. Hyperspectral and multispectral remote sensing image fusion based on a retractable spatial–spectral transformer network. *Remote Sensing*, 17(12), 1973.

Hodson, T. O., 2022. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, 1-10.

Hore, A., ve Ziou, D., 2010. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. *IEEE 20th international conference on pattern recognition* , İstanbul, Türkiye, 1, syf: 2366-2369.

Houborg, R., ve McCabe, M. F., 2018. A cubesat enabled spatio-temporal enhancement method (cestem) utilizing planet, landsat and modis data. *Remote Sensing of Environment*, 209, 211-226.

Hutengs, C., ve Vohland, M., 2016**.** Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sensing of Environment*, 178, 127-141.

Lindenmayer, D. B., Likens, G. E., Andersen, A., Bowman, D., Bull, C. M., Burns, E., Dickman, C. R., Hoffmann, A. A., Keith, D. A., Liddell, M. J., Lowe, A. J., Metcalfe, D. J., Phinn, S. R., Russell-Smith, J., Thurgate, N., ve Wardle, G. M., 2012. Value of long-term ecological studies. Austral Ecology, 37(7), 745-757.

Major, D., Horváth, Z., Kröber, F., Augustin, H., Sudmanns, M., Ševčík, P., Baraldi, A., Berg, A., Cornel, D., ve Tiede, D. 2025. A holistic approach for multi-spectral Sentinel-2 super-resolution and spectral evaluation. *International Journal of Remote Sensing*, 46(20), 7437-7464.

McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.

Planet Labs., 2020. *Planet Imagery Product Specifications*. Planet Labs PBC, San Francisco, CA, USA. 97 sayfa.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., ve Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.

Schnebele, E., Tanyu, B. F., Cervone, G., ve Waters, N. J. E. T. R. R., 2015. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. *European Transport Research Review*, 7(2), 7.

Shao, Z., ve Cai, J., 2018. Remote sensing image fusion with deep convolutional neural network. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,* 11(5), 1656-1669.

Tripathi, A., Tiwari, R. K., ve Tiwari, S. P., 2022. A deep learning multi-layer perceptron and remote sensing approach for soil health based crop yield estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 102959.

Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Tuna, C., Unal, G., ve Sertel, E., 2018. Single-frame super resolution of remote-sensing images by convolutional neural networks. *International journal of remote sensing*, 39(8), 2463-2479.

Valle, M. E., Vital, W. L., ve Vieira, G., 2024. Universal approximation theorem for vector-and hypercomplex-valued neural networks. *Neural Networks*, 180, 106632.

van der Wal, P. R., Strisciuglio, N., Azzopardi, G., ve Mocanu, D. C., 2025. Multilayer perceptron ensembles in a truly sparse training context. *Neural Computing and Applications*, 37(20), 15419-15438.

Wang, L. A., Zhou, X., Zhu, X., Dong, Z., ve Guo, W., 2016. Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. The Crop Journal, 4(3), 212-219.

Wang, W., Jia, F., Yang, Y., Mu, K., ve Liu, H., 2024. MDSCNN: Remote sensing image spatial–spectral fusion method via multi-scale dual-stream convolutional neural network. *Remote Sensing*, 16(19), 3583.

Wang, Z., Fang, S., ve Zhang, J., 2023. Spatiotemporal fusion model of remote sensing images combining single-band and multi-band prediction. *Remote Sensing*, 15(20), 4936.

Zhao, Y., Su, J., Li, W., Yu, Z., ve Dai, X., 2025. A lightweight remote sensing image fusion method for vehicle perception. ICT Express.

MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KENTSEL TAŞKIN RİSKİNİN ÇOK BOYUTLU DEĞERLENDİRİLMESİ: BÜYÜKÇEMECE ÖRNEĞİ, İSTANBUL

Gülşah KILIÇ[1], Filiz BEKTAŞ BALÇIK[2],

[1] İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Coğrafi Bilgi Teknolojileri Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, kilicg18@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, bektasfi@itu.edu.tr

ÖZET

Taşkın bir akarsu ya da kıyı sisteminin taşıma kapasitesini aşarak kara yüzeyini geçici olarak su altında bırakması durumu olarak tanımlanmaktadır (World Meteorological Organization [WMO] ve United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2012). Kentler, hızlı nüfus artışı, plansız ve yoğun yapılaşma, arazi kullanımındaki dönüşümler, geçirimsiz yüzeylerin artması ve iklim değişikliğine bağlı olarak daha sık ve şiddetli yaşanan aşırı yağış olayları nedeniyle taşkın riskine karşı kırılgan hale gelmektedir. Özellikle kentsel alanlarda taşkın riski yalnızca fiziksel tehlike koşullarıyla açıklanamayacak kadar çok boyutlu ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Taşkının meydana gelme olasılığını belirleyen topoğrafik, hidrolojik ve çevresel faktörlerin yanı sıra, taşkından etkilenebilecek nüfus grupları, yapılaşmış çevre, ulaşım sistemleri, sosyal ve ekonomik kırılganlık düzeyleri de taşkın riskinin mekansal dağılımında önemli rol oynamaktadır (Kılıç ve Bektaş Balçık., 2026). Bu nedenle taşkın riskinin yalnızca tehlike odaklı değil, tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenlerini birlikte değerlendiren bütünleşik bir çerçeve ile ele alınması gerekmektedir. Taşkın riskinin belirlenmesi için literatürde çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Kılıç ve Bektaş Balçık., 2025). Yaygın olarak kullanılan Makine öğrenmesi (ML) algoritmalarından Rastgele Orman (RF), geçmiş taşkın verileriyle eğitilen ve çok sayıda karar ağacından oluşan bir modeldir. Bu yöntem ile taşkına neden olan kriterler dikkate alınarak taşkın riski olasılığı modellenmektedir. RF modelinin farklı taşkın senaryoları üzerinden tahminler üretebilmesi, yüksek riskli alanların tespitinde doğruluk ve güvenilirliği artırmaktadır (Rafiei-Sardooi ve diğ., 2021; Ganjirad ve Delavar, 2023; Koyuncu ve Ekmekcioğlu, 2024). Bu çalışmada, kentsel taşkın riskini fiziksel tehlike, sosyal kırılganlık ve maruziyet göstergelerini birlikte kullanarak değerlendiren Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı ve makine öğrenmesi destekli bir mekansal analiz çerçevesi geliştirilmiştir. Taşkın riskini yalnızca taşkının oluşabileceği fiziksel koşullar üzerinden değil, aynı zamanda taşkından etkilenebilecek nüfus, yapılaşmış çevre, altyapı unsurları, erişilebilirlik koşulları ve sosyo-ekonomik kırılganlık göstergeleriyle birlikte ele almaktadır. Bu kapsamda Rastgele Orman (RF) modeli kullanılarak taşkın riski tahmin edilmiş, model sonuçları performans, yorumlanabilirlik ve mekansal dağılım bakımından incelenmiştir.

Çalışma bölgesi olarak İstanbul'un batısında, Marmara Denizi kıyısında yer alan Büyükçekmece ilçesi seçilmiştir. Çalışmada taşkın riskinin temel bileşenleri doğrultusunda 24 farklı parametre kullanılmıştır. Tehlike bileşeni kapsamında eğim, bakı, yükseklik, akarsuya uzaklık, jeolojik yapı, yağış ve toprak türü değerlendirilmiştir. Maruziyet bileşeni kapsamında nüfus yoğunluğu, arazi kullanımı ve ulaşım yoğunluğu kullanılmıştır. Kırılganlık bileşeni kapsamında ise 15 yaş altı nüfus, 65 yaş üstü nüfus, kadın nüfus oranı, ortalama gelir, ortalama konut değeri, hanehalkı büyüklüğü, eğitim düzeyi, toplam araç sayısı ve temel hizmetlere erişim göstergeleri ele alınmıştır. Farklı veri kaynaklarından elde edilen bu katmanlar ortak koordinat sistemine dönüştürülmüş, 30 m mekansal çözünürlüğe getirilmiş ve model girdisi olarak kullanılmak üzere normalize edilmiştir.

Modelleme sürecinde öncelikle geçmiş taşkın kayıtları ve taşkın risk alanları kullanılarak ikili sınıflandırmaya dayalı bir taşkın envanteri oluşturulmuştur. Bu kapsamda taşkın var ve taşkın yok sınıflarını temsil eden toplam 4.066 noktalı dengeli bir veri seti hazırlanmıştır. RF modeli için bu noktalardan 24 raster katmandaki değerler örneklenerek özellik matrisi oluşturulmuş ve veri seti eğitim ve test kümelerine ayrılmıştır. Model hiperparametreleri RandomizedSearchCV yöntemiyle optimize edilmiştir. Rastgele orman modelinin tahmin başarısı Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve (ROC-AUC) metriği ile değerlendirilmiştir. Ayrıca model kararlarında etkili olan değişkenleri açıklamak amacıyla SHapley Additive exPlanations (SHAP) yöntemi uygulanmıştır.

Sonuçlar, RF modelinin taşkın olan ve olmayan alanları ayırt etmede oldukça yüksek bir performans sergilediğini göstermektedir. RF modelinde bağımsız test veri seti üzerinde AUC değeri 0.9914, genel doğruluk değeri yaklaşık % 97 ve taşkın sınıfı için duyarlılık değeri 0.98 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, RF modelinin Büyükçekmece ilçesinde taşkın riski haritalarının üretilmesi için güçlü ve etkili bir sınıflandırma aracı sunduğunu göstermektedir.

SHAP analizi sonuçlarına göre, RF modelinde düşük eğitim oranı, gelir düzeyi, ortalama konut değeri, yaş grupları ve hanehalkı yapısı gibi sosyal kırılganlık göstergeleri daha belirgin hale gelmiştir. Bu sonuç, RF modelinin sosyal kırılganlık örüntülerini güçlü temsil ettiğini göstermektedir. Mekansal analiz sonuçları, Büyükçekmece ilçesinde taşkın riskinin homojen dağılmadığını, özellikle dere koridorları, Büyükçekmece Gölü çevresi, kıyı kesimleri ve düşük kotlu yerleşim alanlarında yoğunlaştığını göstermiştir. İlçe alanının yaklaşık yüzde 13,3'ünün yüksek veya çok yüksek taşkın riski altında olduğu belirlenmiştir. Mimar Sinan Merkez, Hürriyet, Mimaroba, Kamiloba, Dizdariye, Ekinoba, Ulus ve Türkoba mahalleleri model çıktısında öne çıkan risk alanları arasında yer almıştır. Dizdariye ve Ulus gibi mahallelerde RF baskınlığı sosyal kırılganlık göstergelerinin önemine işaret etmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, Büyükçekmece ilçesinde kentsel taşkın riskinin fiziksel tehlike, sosyal kırılganlık ve maruziyet bileşenleriyle birlikte ele alındığında daha kapsamlı ve planlama açısından daha anlamlı biçimde değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma, geleneksel uzman ağırlıklı yaklaşımlardan farklı olarak, risk bileşenlerini aynı mekansal veri yapısında bütünleştirerek RF modeliyle veriden öğrenen bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. RF modeli yüksek doğruluk ve yorumlanabilirlik kapasitesiyle uzun vadeli arazi kullanım planlaması, kentsel dönüşüm önceliklendirmesi ve afet risk azaltma stratejileri için güçlü bir karar destek aracı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Taşkın, Rastgele orman modeli, SHAP, Büyükçekmece

ABSTRACT

A MULTIDIMENSIONAL ASSESSMENT OF URBAN FLOOD RISK USING MACHINE LEARNING METHOD: BÜYÜKÇKMECE CASE STUDY, İSTANBUL

Gülşah KILIÇ[1], Filiz BEKTAŞ BALÇIK[2],

[1] İstanbul Technical University, Informatics Institute, 34469, Maslak, İstanbul, kilicg18@itu.edu.tr
[2]Prof. Dr., İstanbul Technical University, Department of Geomatics, 34469, Maslak, İstanbul, bektasfi@itu.edu.tr

"Flood is defined as the situation in which a river or coastal system exceeds its carrying capacity and temporarily inundates the land surface (World Meteorological Organization [WMO] and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2012)". Cities have become vulnerable to flood risk due to rapid population growth, unplanned and dense urbanization, land use transformations, the increase in impervious surfaces, and more frequent and intense extreme rainfall events associated with climate change. In particular, flood risk in urban areas has a multidimensional and complex structure that cannot be explained solely by physical hazard conditions. In addition to topographic, hydrological, and environmental factors that determine the probability of flood occurrence, population groups that may be affected, the built environment, transportation systems, and levels of social and economic vulnerability also play an important role in the spatial distribution of flood risk (Kılıç and Bektaş Balçık, 2026). Therefore, flood risk needs to be addressed not only with a hazard-oriented approach but within an integrated framework that jointly considers hazard, exposure, and vulnerability components. Numerous methods have been developed in the literature to determine flood risk (Kılıç and Bektaş Balçık, 2025). Among the widely used machine learning (ML) algorithms, Random Forest (RF) is a model trained with historical flood data and composed of multiple decision trees. With this method, flood probability is modeled by taking into account the criteria that cause flooding. The ability of the RF model to generate predictions under different flood scenarios increases accuracy and reliability in identifying high-risk areas (Rafiei-Sardooi et al., 2021; Ganjirad and Delavar, 2023; Koyuncu and Ekmekcioğlu, 2024). In this study, a Geographic Information Systems (GIS) based and machine learning-supported spatial analysis framework was developed to assess urban flood risk using physical hazard, social vulnerability, and exposure indicators in unison. The framework considers flood risk not only through the physical conditions where flooding may occur, but also together with the population, urbanized environment, infrastructure elements, accessibility conditions, and socioeconomic vulnerability indicators that may be affected by flooding. In this context, flood risk was estimated using a Random Forest (RF) model, and the model results were examined in terms of performance, interpretability, and spatial distribution.

The study area was selected as Büyükçekmece district, located on the Marmara Sea coast in the west of Istanbul. In the study, 24 different parameters were used based on the basic components of flood risk. As the hazard components the slope, the aspect, the elevation, the distance to stream, the geological structure, the precipitation, and the soil type were evaluated. Exposure components included population density, land use, and transportation density meanwhile the vulnerability components included population under 15, population over 65, female population ratio, average income, average housing value, household size, education level, total number of vehicles, and access to basic services. These layers obtained from different data sources were transformed to a common coordinate system, subsetted according to the study area, resampled to a spatial resolution of 30 m, and normalized to be used as model input.

In the modeling process, a flood inventory based on binary classification was first created using past flood records and flood risk areas. In this context, a balanced dataset of 4,066 points representing flood present and flood absent classes was prepared. For the RF model, a feature matrix was created by sampling the values in 24 raster layers from these points, and the dataset was divided into training and test sets. Model hyperparameters were optimized using the RandomizedSearchCV method. The prediction success of the random forest model was evaluated with the Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve (ROC-AUC) metric. In addition, the SHapley Additive exPlanations (SHAP) method was applied to explain the variables affecting model decisions.

The findings show that the RF model exhibits a very precise performance in distinguishing between flood-prone and non-flood-prone areas. In the RF model, the AUC value on the test dataset was calculated as 0.9914, the overall accuracy value as approximately 97 %, and the sensitivity value for the flood class as 0.98. These results show that the RF model offers a powerful and effective classification tool for flood risk mapping in Büyükçekmece district.

According to the SHAP analysis results, social vulnerability indicators such as low education rate, income level, average housing value, age groups, and household structure have become more prominent in the RF model. This finding shows that the RF model strongly represents social vulnerability patterns. Spatial analysis results showed that flood risk in Büyükçekmece district is not homogeneously distributed, but is concentrated especially in stream corridors, around Büyükçekmece Lake, coastal areas, and low-lying settlement areas. It was determined that approximately 13.3% of the district area is under high or very high flood risk.

Mimar Sinan Merkez, Hürriyet, Mimaroba, Kamiloba, Dizdariye, Ekinoba, Ulus, and Türkoba neighborhoods were among the risk areas that stood out in the model output. The dominance of RF in neighborhoods such as Dizdariye and Ulus points to the importance of social vulnerability indicators.

In conclusion, this study reveals that urban flood risk in Büyükçekmece district can be assessed more comprehensively and meaningfully in terms of planning when considered together with its components of physical hazard, social vulnerability, and exposure. Unlike traditional expert-based approaches, the study offers a data-learning assessment framework using the RF model by integrating risk components in the same spatial data structure. With its high accuracy and interpretability, the RF model provides a powerful decision support tool for long-term land use planning, urban transformation prioritization, and disaster risk reduction strategies.

Keywords: Flood, Random forest model, SHAP, Büyükçekmece

KAYNAKÇA

World Meteorological Organization ve United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2012). International Glossary of Hydrology. https://library.wmo.int/records/item/35589-international-glossary-of-hydrology?offset=1 adresinden erişildi.

Kılıç, G. (2026). Makine Öğrenmesi Ve Derin Öğrenme Yöntemleriyle Kentsel Taşkın Riskinin Çok Boyutlu Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü.

Kılıç, G. ve Bektaş Balçık, F. (2025). Flood-Risk Map for Büyükçekmece District Based on Socioeconomic Factors. Environmental and Earth Sciences Proceedings içinde (C. 32, s. 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/eesp2025032011

Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Choubin, B., Mosavi, A. H. ve Clague, J. J. (2021). Evaluating urban flood risk using hybrid method of TOPSIS and machine learning. International Journal of Disaster Risk Reduction, 66, 102614. doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102614

Ganjirad, M. ve Delavar, M. R. (2023). Flood Risk Mappıng Using Random Forest And Support Vector Machine. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-4-W1-2022, 201-208. ISPRS WG IV/3
ISPRS GeoSpatial Conference 2022, Joint 6th Sensors and Models in Photogrammetry and Remote Sensing (SMPR) and 4th Geospatial Information Research (GIResearch) Conferences - 19–22 February 2023, Tehran, Iran (virtual), sunulmuş bildiri. doi:10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-201-2023

Koyuncu, Z. ve Ekmekcioğlu, Ö. (2024). İstanbul İçin CBS Tabanlı Makine Öğrenmesi İle Sel Duyarlılık Haritasının Oluşturulması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10(1), 1-15. doi:10.21324/dacd.1254778

KÜRESEL TOPRAK ÜSTÜ BİYOKÜTLE VERİ SETİ KULLANILARAK MANAVGAT ORMAN YANGINI SONRASI KARBON VE TOPRAK ÜSTÜ BİYOKÜTLE DİNAMİKLERİNİN ZAMANSAL ANALİZİ

Fidan Şevval Bulut[1], Cumhur Eren Bilal[2], Beyza Türkel[3], Ayhan Ateşoğlu[4]

[1]Arş. Gör., Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, fbulut@bartin.edu.tr
[2]Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, cumhurreren0@gmail.com
[3]Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, beyzaa.turkell@gmail.com
[4]Prof. Dr., Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, aatesoglu@bartin.edu.tr

ÖZET

2021 Manavgat orman yangını sonrasında toprak üstü biyokütle ve karbon stoklarında meydana gelen değişimlerin zamansal ve mekânsal olarak izlenmesi, yangının ekosistem üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, 2021 Manavgat orman yangını öncesi ve sonrası dönemde toprak üstü biyokütlenin (AGB) değişiminin belirlenmesi ve bu değişimin yangın şiddetine göre değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Analizlerde, 2017–2025 dönemini kapsayan 100 m mekânsal çözünürlüklü CTrees yıllık AGB verileri ile Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR verisi kullanılmıştır. 2020 yılı yangın öncesi referans yıl, 2022 yılı ise ilk tam yangın sonrası yıllık gözlem olarak değerlendirilmiştir. Toplam toprak üstü biyokütle karbon stoku, AGB değerlerine 0.47 karbon fraksiyonu uygulanarak hesaplanmıştır. Çalışma alanında ortalama AGB 2020 yılında 52.00 Mg ha^{-1} iken 2022 yılında 34.37 Mg ha^{-1}'e düşmüş ve %33,91 azalmıştır. AGB 2024 yılında 29.37 Mg ha^{-1} ile incelenen dönemin en düşük seviyesine ulaşmış; 2025 yılında ise 29.75 Mg ha^{-1}'e yükselerek bir önceki yıla göre %1.28 pozitif değişim göstermiştir. Toplam karbon stoku 2020'de yaklaşık 1.339 milyon ton C'den 2022'de 0.885 milyon ton C'ye gerilemiştir. Yangın şiddeti sınıflarına göre 2020–2022 dönemindeki AGB azalması düşük şiddette %30,78, orta-düşükte %33,62, orta-yüksekte %37,99 ve yüksek şiddette %45,46 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, AGB azalmasının incelenen yangın şiddeti sınıfları boyunca arttığını ve 2025 yılında gözlenen sınırlı pozitif değişime rağmen biyokütlenin yangın öncesi düzeylerin belirgin biçimde altında kaldığını göstermektedir. CTrees yıllık AGB ürünleri ile Sentinel-2 tabanlı dNBR verilerinin birlikte kullanımı, büyük orman yangınları sonrasında biyokütle ve karbon stoklarındaki değişimlerin izlenmesi için uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: dNBR, karbon stoku, Manavgat orman yangını, toprak üstü biyokütle, yangın şiddeti

ABSTRACT

TEMPORAL ANALYSIS OF POST-FIRE CARBON AND ABOVEGROUND BIOMASS DYNAMICS FOLLOWING THE MANAVGAT FOREST FIRE USING A GLOBAL ABOVE GROUND BIOMASS DATASET

Quantifying post-fire changes in above-ground biomass and associated carbon stocks is essential for assessing the ecological consequences of large wildfires. This study examined the temporal dynamics of above-ground biomass (AGB) following the 2021 Manavgat forest fire and evaluated whether biomass losses differed across fire-severity classes. Annual CTrees AGB data at 100 m spatial resolution for 2017–2025 were combined with fire-severity information derived from Sentinel-2-based differenced Normalized Burn Ratio (dNBR). The year 2020 was used as the pre-fire reference, whereas 2022 represented the first complete post-fire annual observation. Above-ground biomass carbon stocks were estimated using a carbon fraction of 0.47. Mean AGB declined from 52.00 Mg ha^{-1} in 2020 to 34.37 Mg ha^{-1} in 2022, corresponding to a 33.91% reduction. AGB continued to decline thereafter, reaching the lowest value of the study period in 2024 (29.37 Mg ha^{-1}), before increasing slightly to 29.75 Mg ha^{-1} in 2025, representing a 1.28% year-to-year increase. Total above-ground biomass carbon stock decreased from approximately 1.339 million tonnes C in 2020 to 0.885 million tonnes C in 2022. Biomass loss between 2020 and 2022 increased consistently across the examined fire-severity classes, from 30.78% in low-severity areas to 45.46% in high-severity areas. Despite the positive change observed in 2025, biomass remained substantially below pre-fire levels. These findings demonstrate the value of integrating annual CTrees AGB products with Sentinel-2-derived dNBR for monitoring post-fire biomass and carbon-stock dynamics and for assessing differences associated with fire severity.

Keywords: above-ground biomass, carbon stock, dNBR, fire severity, Manavgat wildfire

1. GİRİŞ

Akdeniz Havzası, sıcak ve kurak yaz koşulları nedeniyle yangınların sık görüldüğü bölgelerden biridir. Ancak bölgedeki yangın rejimini yalnızca iklim koşullarıyla açıklamak mümkün değildir; yanıcı madde çeşidi, arazi kullanımı, yangın nedenleri ve yangın yönetimi üzerinde etkilidir. Buna karşın, yüksek sıcaklık ile kuraklığın aynı dönemde güçlenmesi, özellikle büyük yangınların gelişebileceği daha elverişli yangın havası koşulları yaratmaktadır (Ruffault vd., 2020) . Güney Avrupa için yapılan çalışmalar da iklim ısınmasıyla birlikte yangın tehlikesinin ve yangın

sezonu süresinin artması gözlenmekle birlikte, yanan alan miktarına ilişkin projeksiyonlar, insan etkileri ve yangın dinamikleri nedeniyle daha belirsizdir (Dupuy vd., 2020) . Benzer şekilde Turco vd. (2018) , Akdeniz bölgesi kapsamında küresel ısınmanın 2 °C altında sınırlanması durumunda büyük yangınların oluşmasını da belirli ölçekte azaltacağını gösteren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Dolayısı ile günümüzde büyük orman yangınlarının çıkışını sadece iklim değişikliğine yormaktan ziyade yanıcı madde miktarı, planlama ve yangın nedenlerinin de öneminin büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bu koşulların ekosistem açısından önemi, yangın etkilerinin yalnızca yanan alanın büyüklüğüyle sınırlı kalmamasından kaynaklanmaktadır. Yangınlar orman yapısını değiştirirken, canlı bitki örtüsünde depolanan toprak üstü biyokütlenin ve buna bağlı karbon stoklarının azalmasına da neden olabilmektedir. Akdeniz ekosistemlerinde yapılan çalışmalar, yangınların odunsu biyokütle ve karbon stokları üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiğini göstermektedir (Molina vd., 2019; Silvestro vd., 2021) . Ayrıca bu etkinin her yangında aynı olmadığı; biyokütle kaybının yangının özelliklerine ve özellikle yangın şiddetine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiği bildirilmiştir (Guerra-Hernández vd., 2024; Molina vd., 2019) . Bu nedenle toprak üstü biyokütledeki değişimin izlenmesi, yangınların orman karbon stokları üzerindeki etkisini değerlendirmenin yanı sıra yangın sonrası dönemde vejetasyonun nasıl bir değişim gösterdiğinin anlaşılması açısından da önem taşımaktadır. Nitekim zamansal toprak üstü biyokütlenin (Above-Ground Biomass, AGB) verilerinin, bozulma sonrası biyokütle eğilimlerinin ve toparlanma süreçlerinin izlenmesinde önemli bilgi sağladığı vurgulanmaktadır (Zhang vd., 2025) .

Toprak üstü biyokütledeki bu tür değişimlerin geniş alanlarda ve birbirini izleyen yıllar boyunca değerlendirilmesi, mekânsal olarak süreklilik gösteren gözlemlere ihtiyaç duymaktadır. Uydu, hava kaynaklı LiDAR ve arazi ölçümlerinin birlikte hibrit kullanılması, biyokütle stoklarının mekânsal olarak izlenmesine olanak vermektedir. Nitekim Xu vd. (2021) , arazi, hava ve uydu gözlemlerini bir araya getirerek 2000–2019 dönemindeki canlı odunsu biyokütle karbon stoku değişimlerini küresel ölçekte haritalamış ve biyokütle değişiminin zamansal olarak ele alınmasının karbon dinamiklerinin değerlendirilmesindeki önemini göstermiştir. Son yıllarda geliştirilen yıllık AGB ürünleri ise bu yaklaşımın daha yüksek mekânsal ve zamansal ayrıntıda uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Bu ürünlerden biri olan CTrees küresel AGB veri seti, 2000–2025 dönemini yıllık olarak ve 100 m mekânsal çözünürlükte kapsamaktadır. Ürün; optik ve radar uydu gözlemleri ile hava kaynaklı LiDAR, orman envanteri ve farklı vejetasyon yapısı bilgilerini bir araya getirerek yıllar arasındaki biyokütle değişimlerinin izlenmesini amaçlamaktadır (CTrees, 2025; Yang vd., 2026) .

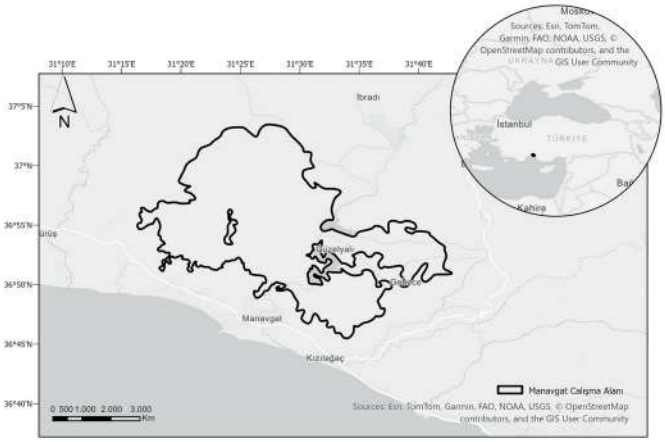
Yıllık AGB zaman serileri yangın sonrasında biyokütlenin nasıl değiştiğini izlemeye olanak verirken, bu değişimin yangın alanı içerisindeki mekânsal farklılıklarının değerlendirilmesinde yangın şiddeti de önemli bir değişken olarak ele alınabilir (Guerra-Hernández vd., 2024) . Yangın şiddeti, yangının ekosistem üzerinde oluşturduğu değişimin büyüklüğünü ifade etmekte ve uzaktan algılama verileri bu değişimin geniş alanlarda haritalanmasına imkân sağlamaktadır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan Normalized Burn Ratio (NBR), yangın öncesi ve sonrası görüntüler arasında fark alınarak dNBR biçiminde değerlendirilebilmekte ve yangının neden olduğu spektral değişimin mekânsal olarak ortaya konulmasında kullanılmaktadır (Key ve Benson, 2006) . dNBR değerlerinin arazi gözlemleriyle ilişkisi farklı yangın alanlarında da sınanmış ve bu indeksin yangın sonrası şiddet değerlendirmelerinde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir (Robichaud vd., 2007) . Yangın şiddetindeki farklılıkların biyokütle ve orman yapısı üzerindeki etkileri de aynı değildir. Örneğin Guerra-Hernández vd. (2024) , İspanya ve Portekiz'deki yangınlarda biyokütle stokları ve orman yapısı üzerindeki etkinin artan yangın şiddetiyle birlikte belirginleştiğini göstermiştir. Türkiye'de *Pinus brutia* ormanlarında yürütülen uzun süreli arazi gözlemleri de yangın şiddetinin, yangın öncesi meşcere özellikleri ve topoğrafya ile yangın sonrası vejetasyonun gelişiminde etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Kavgaci vd., 2016) . Bu nedenle yangın şiddeti bilgisinin yıllık AGB değişimleriyle birlikte ele alınması, yangın alanı içerisindeki biyokütle değişiminin mekânsal olarak daha ayrıntılı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

2021 yılında Antalya'nın Manavgat ilçesinde meydana gelen büyük orman yangını geniş bir alanı etkilemiş ve alan içerisinde farklı yangın şiddeti düzeyleri gözlenmiştir. Yangının mekânsal yayılımı ve yanma şiddeti daha önce Sentinel-2 ve diğer uzaktan algılama verileri kullanılarak farklı çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir (Altay ve Türker, 2026; Kavzoğlu vd., 2021) . Bununla birlikte, yangın sonrası biyokütle değişiminin yalnızca yangın öncesi ve sonrası iki tarih üzerinden değil, yıllık bir AGB zaman serisi içerisinde izlenmesi, yangın sonrasındaki değişimin zaman içinde nasıl geliştiğinin daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, 2021 Manavgat orman yangını sonrasında toprak üstü biyokütle ve buna bağlı karbon stokundaki zamansal değişimin 2017–2025 dönemi için belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda yıllık AGB değişimleri incelenmiş, 2020 yılı yangın öncesi referans dönem olarak ele alınmış ve Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR yangın şiddeti sınıfları kullanılarak AGB değişimlerinin farklı şiddet düzeylerinde nasıl farklılaştığı değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Türkiye'nin güneyinde, Antalya ili Manavgat ilçesi sınırları içerisinde yer alan ve 2021 yılında meydana gelen büyük ölçekli orman yangınından etkilenen alanı kapsamaktadır (Şekil 1). Manavgat ve çevresi Akdeniz ikliminin etkisi altında olup, yaz aylarında yüksek sıcaklıkların ve kurak koşulların hâkim olduğu bir bölgedir. Antalya ili için uzun dönemli meteorolojik gözlemlerde yıllık ortalama sıcaklık 18,8 °C, ortalama maksimum sıcaklık 24,2 °C ve ortalama minimum sıcaklık 13,8 °C olarak bildirilmektedir (Bulut, 2024). Çalışma alanındaki orman vejetasyonu ağırlıklı olarak kızılçam (*Pinus brutia*), karaçam (*Pinus nigra*) ve yer yer ardıç (*Juniperus* spp.) türlerinden oluşmakta; daha sınırlı alanlarda meşe, kayın ve gürgen türleri de bulunmaktadır (Bulut, 2024). Manavgat orman yangını 28 Temmuz 2021 tarihinde başlamış ve 6 Ağustos 2021 tarihinde sona ermiştir (EFFIS, 2021).Yangın, orman alanlarının yanı sıra bölgedeki bazı tarım alanlarını da etkilemiştir. Bu çalışmada analiz alanının sınırlandırılmasında, Avrupa Orman Yangını Bilgi Sistemi (European Forest Fire Information System, EFFIS) tarafından sağlanan yanmış alan verisi kullanılmıştır. EFFIS, Copernicus Acil Durum Yönetim Servisi kapsamında yangın tehlikesi ve yanmış alanlara ilişkin mekânsal bilgiler sağlayan bir sistemdir (San-Miguel-Ayanz vd., 2012) . EFFIS yanmış alan verileri vektör formatında sunulmakta olup, bu çalışmada 2021 Manavgat yangınına ait yangın poligonu temel çalışma sınırı olarak kullanılmıştır (EFFIS, 2021) . CTrees AGB verisinin bu yangın poligonu ile kesişen geçerli raster hücreleri dikkate alındığında biyokütle analizine dahil edilen alan yaklaşık 54,802.55 ha olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma Alanı.

2.2. Kullanılan Veriler

Çalışmada kullanılan temel veri setleri ve bu verilere ilişkin başlıca özellikler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Çalışmanın temel verisini CTrees tarafından geliştirilen Küresel Toprak Üstü Biyokütle (Global Above-Ground Biomass, AGB) ürünü oluşturmaktadır. CTrees AGB ürünü, canlı odunsu vejetasyonun birim alan başına toprak üstü biyokütle miktarını (Mg ha^{-1}) küresel ölçekte yıllık olarak sunmakta olup, standart ürün 100 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir. Veri seti 2000–2025 dönemini kapsamaktadır. Ham AGB değerleri 16-bit tamsayı formatında depolanmakta ve gerçek AGB değerlerinin elde edilmesi için ham değerler 10'a bölünmektedir (CTrees, 2025). CTrees AGB ürünüyle birlikte, piksel düzeyindeki AGB tahminlerine ilişkin belirsizlik bilgisi artık standart hatası (Residual Standard Error, RSE) katmanı olarak sağlanmaktadır (CTrees, 2025). RSE katmanı AGB ürünüyle aynı mekânsal ve zamansal kapsamda sunulmakta ve Mg ha^{-1} biriminde ifade edilmektedir. Bu çalışmada 2021 Manavgat yangını öncesi ve sonrası değişimlerin değerlendirilmesi amacıyla 2017–2025 dönemine ait yıllık AGB verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan CTrees AGB verilerine Earthmover Arraylake platformu üzerinden programatik olarak erişilmiştir (earthmover, 2026) . CTrees AGB ürününün oluşturulmasında optik, radar ve lidar tabanlı çok kaynaklı uzaktan algılama verileri ile arazi ve orman envanteri temelli referans veriler birlikte kullanılmaktadır. Model girdileri arasında Landsat ve Harmonized Landsat–Sentinel-2 (HLS) yüzey yansıtım verileri, ALOS PALSAR L-band radar ölçümleri, GEDI ve ICESat-2 tabanlı vejetasyon yapı ve yükseklik bilgileri ile Copernicus DEM gibi yardımcı veriler yer almaktadır. Güncel ürün geliştirme yaklaşımında 2020 yılı temel AGB haritası olarak ele alınmakta ve yıllık uzaktan algılama verileri kullanılarak 2000–2025 dönemine ait AGB zaman serisi oluşturulmaktadır. Ürün, ormansızlaşma, yangın, degradasyon ve yeniden büyüme gibi vejetasyon değişimlerinin yıllık AGB serisine yansıtılmasını amaçlayan zamansal modelleme ve harmonizasyon süreçlerini içermektedir (CTrees, 2025). Güncel CTrees yöntem çalışmasında da ürünün 100 m çözünürlükte, 2000–2025 dönemini kapsayan yıllık küresel AGB izleme ürünü olarak geliştirildiği

belirtilmektedir (Yang vd., 2026). CTrees veri seti ayrıca her yıl için piksel düzeyinde AGB belirsizlik katmanı sağlamaktadır. Bu değişken ürün metadatasında artıkların standart hatası (Residual Standard Error, RSE) olarak tanımlanmakta ve AGB ile aynı şekilde Mg ha^{-1} biriminde sunulmaktadır. Ham belirsizlik değerlerine de 0.1 ölçek faktörü uygulanmıştır (CTrees, 2025). Çalışmada bu katman, CTrees tarafından piksel düzeyinde sağlanan AGB tahmin belirsizliğinin yıllar içerisindeki değişimini değerlendirmek amacıyla kullanılmış; her yıl için RSE değerleri piksel alanları dikkate alınarak alan-ağırlıklı olarak özetlenmiştir.

Yangın şiddetinin belirlenmesinde Sentinel-2 uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Yangın öncesi ve yangın sonrası görüntüler kullanılarak B8A ve B12 bantlarından Normalize Edilmiş Yanma Şiddeti (Normalized Burn Ratio, NBR) hesaplanmış, yangın öncesi ve sonrası NBR değerleri arasındaki fark alınarak Fark Normalize Edilmiş Yanma Şiddeti (Differenced Normalized Burn Ratio, dNBR) elde edilmiştir. NBR ve dNBR indeksleri, yangın öncesi ve sonrası spektral değişimin ve yangın şiddetinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Miller ve Thode, 2007).dNBR verisinden türetilen yangın şiddeti sınıfları ise yangının oluşturduğu mekânsal farklılıkların sınıflandırılması ve karşılaştırılmasında kullanılabilmektedir (Eidenshink vd., 2007) .

Çalışma alanının mekânsal olarak sınırlandırılmasında EFFIS tarafından sağlanan 2021 Manavgat yangınına ait yanmış alan verisi kullanılmıştır. EFFIS, Avrupa Birliği ve komşu ülkelerde orman yangınlarının izlenmesi ve değerlendirilmesini desteklemek amacıyla geliştirilmiş olup, Copernicus Acil Durum Yönetim Servisi bünyesinde faaliyet göstermektedir. Sistem, uydu tabanlı yangın gözlemleri ile çeşitli yardımcı veri kaynaklarını bir araya getirerek güncel ve geçmiş yangınlara ilişkin mekânsal bilgiler sağlamaktadır (EFFIS, 2021; San-Miguel-Ayanz vd., 2012) . EFFIS tarafından sunulan yanmış alan verileri vektör formatında kullanılabilmekte olup, bu çalışmada 2021 Manavgat yangınına ait yangın poligonu CTrees AGB verilerinin çalışma alanına sınırlandırılmasında temel mekânsal veri olarak kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan temel veri setleri.

Veri seti	Veri türü	Mekânsal çözünürlük	Zamansal kapsam	Çalışmadaki kullanım amacı
CTrees Küresel AGB	Raster	100 m	2000–2025 (Bu çalışmada kullanılan 2017–2025)	Toprak üstü biyokütlenin yıllık değişiminin belirlenmesi ve toprak üstü biyokütle karbon stoku hesabına temel oluşturması
Sentinel-2	Raster	20 m (B8A ve B12)	- 20.07.2021 (Yangın Öncesi) - 09.08.2021 (Yangın Sonrası)	NBR ve dNBR türetilmesi
dNBR tabanlı yangın şiddeti	Raster	20 m	2021	Yangın şiddetinin düşük, orta-düşük, orta-yüksek ve yüksek sınıflarda değerlendirilmesi
EFFIS Yanmış alan	Vektör	-	2021	Manavgat yangın alanının mekânsal sınırının belirlenmesi ve CTrees AGB verilerinin çalışma alanına sınırlandırılması

2.3. Toprak Üstü Biyokütle ve Karbon Stok Analizi

CTrees AGB verileri, 2021 Manavgat yangınına ait EFFIS yangın poligonu kullanılarak çalışma alanı ile sınırlandırılmıştır. Veri setinde tamsayı formatında depolanan ham AGB değerleri, ürün için tanımlanan ölçek faktörü dikkate alınarak 10'a bölünmüş ve Mg ha^{-1} birimine dönüştürülmüştür (CTrees, 2025) . Analizler, yangın öncesi ve sonrası değişimlerin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla 2017–2025 dönemine ait yıllık AGB verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

CTrees verisinin coğrafi koordinat sisteminde (EPSG:4326) bulunması nedeniyle, boylam-enlem ızgarasında raster hücrelerinin yüzey alanlarının enleme bağlı olarak değiştiği dikkate alınmıştır (Kelly ve Šavrič, 2021) .Bu nedenle hücre alanları sabit kabul edilmemiş; her bir hücrenin yüzey alanı WGS84 elipsoidi dikkate alınarak hesaplanmış ve hektar birimine dönüştürülmüştür. Çalışma alanındaki hücrelerin ortalama alanı yaklaşık 0.781 ha olarak belirlenmiştir. EFFIS yangın poligonu içerisinde geçerli CTrees hücrelerinin toplam alanı ise 54802.55 ha olup, bu değer çalışmada AGB analiz alanını temsil etmektedir.

Her yıl için ortalama toprak üstü biyokütle, raster hücrelerinin alanlarındaki farklılıklar dikkate alınarak alan-ağırlıklı ortalama şeklinde hesaplanmıştır. Yıllık toplam toprak üstü biyokütle miktarı ise her bir hücrenin AGB değerinin ilgili hücre alanı ile çarpılması ve çalışma alanındaki tüm geçerli hücreler için toplanmasıyla elde edilmiştir. Toprak üstü biyokütlede depolanan karbon miktarının belirlenmesinde kuru biyokütlenin karbon fraksiyonu 0.47 olarak kabul edilmiş ve yıllık toplam toprak üstü biyokütle değerleri bu katsayı ile çarpılarak toprak üstü biyokütle karbon stoku hesaplanmıştır (IPCC, 2006). Yıllık AGB ve toprak üstü biyokütle karbon stokları 2017–2025 dönemi için değerlendirilmiş; yangın etkisinin karşılaştırılmasında 2020 yılı yangın öncesi referans yıl, 2021 yılı yangın yılı ve 2022 yılı ilk tam yangın sonrası yıllık gözlem olarak ele alınmıştır. Yıllar arasındaki değişimler mutlak ve yüzde değişim değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca CTrees tarafından piksel düzeyinde sağlanan RSE katmanı kullanılarak AGB tahminlerine ilişkin ürün belirsizliği değerlendirilmiştir. RSE katmanının ham değerleri ilgili ölçek faktörü dikkate alınarak 10'a bölünmüş ve Mg ha^{-1} birimine dönüştürülmüştür. RSE verileri EFFIS yangın poligonu ile sınırlandırılmış ve 2017–2025 döneminde her yıl için geçerli piksel değerleri, piksel alanları dikkate alınarak alan-ağırlıklı olarak ortalanmıştır. Elde edilen değerler çalışma alanı ortalama AGB tahmininin güven aralığı olarak değil, CTrees tarafından piksel düzeyinde sağlanan belirsizlik bilgisinin yıllık mekânsal özeti olarak değerlendirilmiştir.

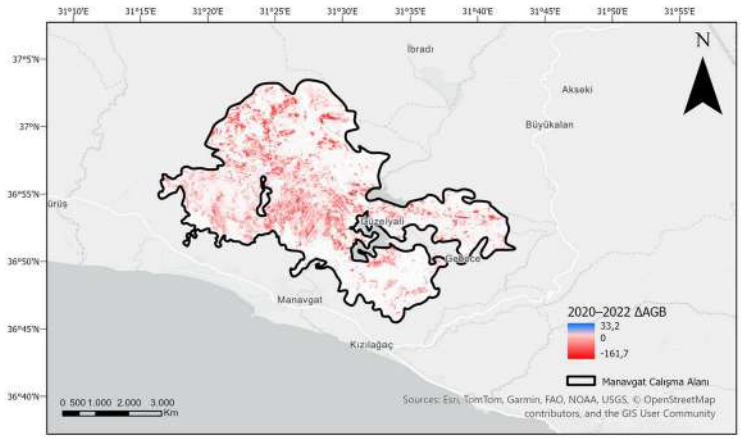
2.4. Yangın Şiddeti Analizi

Yangın şiddetinin belirlenmesinde yangın öncesi 20 Temmuz 2021 ve yangın sonrası 9 Ağustos 2021 tarihli Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Her iki görüntü için B8A ve B12 bantları kullanılarak NBR hesaplanmış, ardından yangın öncesi NBR değerlerinden yangın sonrası NBR değerlerinin çıkarılmasıyla dNBR elde edilmiştir. dNBR, yangın öncesi ve sonrası vejetasyon koşullarındaki spektral değişimin değerlendirilmesine olanak sağlamakta ve artan pozitif değerler daha yüksek yangın şiddetini temsil etmektedir (Robichaud vd., 2007) .Yangın şiddeti sınıflarının belirlenmesinde Key ve Benson (2006) tarafından tanımlanan dNBR sınıflandırması esas alınmıştır. Buna göre dNBR değerleri 0.100–0.269 düşük, 0.270–0.439 orta-düşük, 0.440–0.659 orta-yüksek ve 0.660–1.300 yüksek yangın şiddeti olarak sınıflandırılmıştır (Key ve Benson, 2006) . Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR verisi 20 m, CTrees AGB ürünü ise 100 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir. İki veri seti arasındaki bu mekânsal çözünürlük farkı dikkate alınarak, dNBR'den türetilen yangın şiddeti sınıfları mekânsal sınırlar olarak kullanılmış ve CTrees AGB rasterları her bir şiddet sınıfına göre ayrı ayrı sınırlandırılmıştır. Böylece CTrees AGB değerleri kendi 100 m mekânsal çözünürlüğü korunarak, ilgili yangın şiddeti sınıfları içerisinde değerlendirilmiştir. Her bir yangın şiddeti sınıfı için 2017–2025 dönemine ait yıllık ortalama toprak üstü biyokütle değerleri hesaplanmıştır. Yangının şiddete bağlı etkisinin değerlendirilmesinde 2020 yılı yangın öncesi referans, 2022 yılı ise ilk tam yangın sonrası yıllık gözlem olarak kullanılmış; sınıflar arasındaki AGB değişimleri mutlak ve yüzde değişim değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Toprak Üstü Biyokütle ve Karbon Stoklarının Zamansal Değişimi

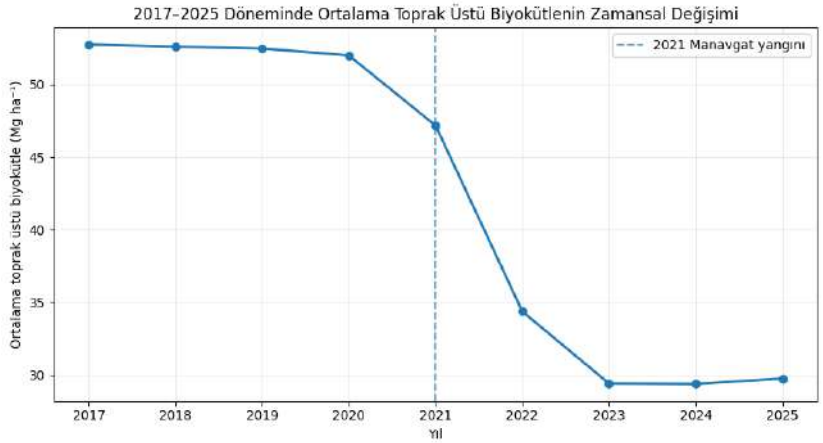
2017–2025 döneminde Manavgat yangın alanındaki ortalama toprak üstü biyokütle değerleri belirgin bir zamansal değişim göstermiştir. Yangın öncesi 2017–2020 döneminde ortalama AGB değerleri 52.77–52.00 Mg ha^{-1} aralığında değişmiş ve görece kararlı bir seyir izlemiştir. Yangın öncesi referans yıl olarak kabul edilen 2020 yılında ortalama AGB 52.00 Mg ha^{-1} iken, yangın yılı olan 2021'de 47.17 Mg ha^{-1}'e ve ilk tam yangın sonrası yıllık gözlem olan 2022'de 34.37 Mg ha^{-1}'e gerilemiştir. Buna göre 2020–2022 döneminde ortalama AGB'de 17.64 Mg ha^{-1}, diğer bir ifadeyle yaklaşık %33,91 azalma meydana gelmiştir. Bu değişimin çalışma alanındaki mekânsal dağılımı Şekil 2'de gösterilmektedir. 2017–2025 dönemine ait yıllık ortalama toprak üstü biyokütle ve toplam karbon stoku değerleri Çizelge 2'de, ortalama AGB'nin zamansal değişimi ise Şekil 3'te gösterilmiştir. Yangın sonrası azalma 2022 sonrasında da devam etmiş; ortalama AGB 2023 yılında 29.40 Mg ha^{-1}'e, 2024 yılında ise 29.37 Mg ha^{-1} ile incelenen dönemin en düşük seviyesine gerilemiştir. Böylece 2020 yılına kıyasla 2024 yılında ortalama AGB'de yaklaşık %43,52 azalma belirlenmiştir. Bununla birlikte 2025 yılında ortalama AGB'nin 29.75 Mg ha^{-1}'e yükseldiği ve 2024–2025 arasında 0.38 Mg ha^{-1} (%1.28) oranında pozitif değişim meydana geldiği görülmüştür. Bu artış, yangın öncesi biyokütle düzeylerine geri dönüşü göstermemekle birlikte, incelenen zaman serisinde minimum değerin ardından gözlenen ilk pozitif değişimi temsil etmektedir.



Şekil 2. 2020–2022 döneminde Manavgat yangın alanında toprak üstü biyokütle değişiminin (ΔAGB) mekânsal dağılımı. Negatif değerler AGB azalışını, pozitif değerler ise AGB artışını göstermektedir.

Çizelge 2. 2017–2025 döneminde toprak üstü biyokütle ve karbon stoku değişimi.

Yıl	Ortalama AGB (Mg ha^{-1})	Toplam AGB (ton)	Toprak üstü biyokütle karbon stoku (ton C)
2017	52.766	2,891,723	1,359,110
2018	52.619	2,883,662	1,355,321
2019	52.486	2,876,371	1,351,894
2020	52.004	2,849,973	1,339,487
2021	47.172	2,585,164	1,215,027
2022	34.367	1,883,403	885,199
2023	29.403	1,611,346	757,333
2024	29.370	1,609,539	756,483
2025	29.747	1,630,192	766,190



Şekil 3. 2017–2025 döneminde Manavgat yangın alanındaki ortalama toprak üstü biyokütlenin (AGB) zamansal değişimi.

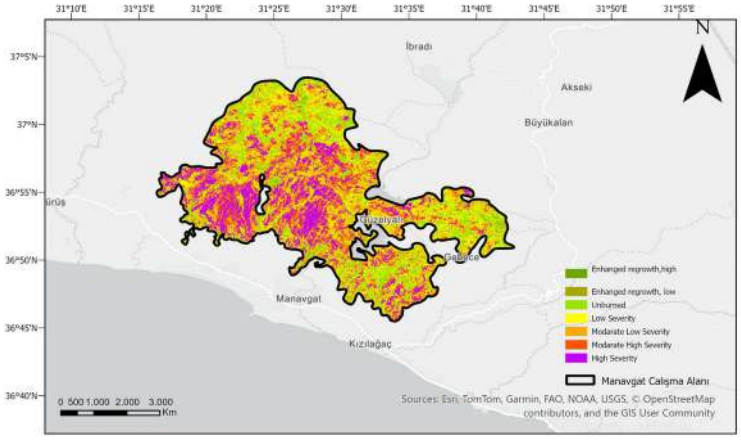
Çizelge 2'de görüldüğü üzere toplam toprak üstü biyokütle karbon stoku 2020 yılında yaklaşık 1.339 milyon ton C iken, 2022 yılında 0.885 milyon ton C'ye gerilemiş ve bu dönemde yaklaşık 0.454 milyon ton C azalma meydana gelmiştir. Karbon stoku 2024 yılında yaklaşık 0.756 milyon ton C ile incelenen dönemin en düşük seviyesine ulaşmış; 2025 yılında ise yaklaşık 0.766 milyon ton C'ye yükselmiştir. Böylece 2020–2024 döneminde toprak üstü biyokütle karbon stokundaki toplam azalma yaklaşık 0.583 milyon ton C, 2024–2025 dönemindeki artış ise yaklaşık 0.010 milyon ton C olarak belirlenmiştir. CTrees tarafından piksel düzeyinde sağlanan AGB tahmin belirsizliği de çalışma alanında alan-ağırlıklı olarak değerlendirilmiştir. Ortalama piksel RSE değeri 2017 yılında 27.24 Mg ha^{-1} iken, 2020 yılında 26.97 Mg ha^{-1}, 2022 yılında 22.27 Mg ha^{-1} ve 2023 yılında 20.68 Mg ha^{-1} olarak hesaplanmıştır. 2024 ve 2025 yıllarında ise değerler sırasıyla 20.69 ve 20.82 Mg ha^{-1} düzeyinde kalmıştır. Bu değerler ortalama AGB tahmininin hata payı veya güven aralığı olarak değil, CTrees ürününde piksel düzeyinde sağlanan belirsizlik bilgisinin çalışma alanındaki zamansal özeti olarak değerlendirilmiştir.

Manavgat yangın alanında 2020–2022 döneminde belirlenen %33,91'lik ortalama AGB azalması, Akdeniz ekosistemlerinde büyük yangınların toprak üstü biyokütle stokları üzerinde önemli kayıplara yol açabildiğini gösteren önceki çalışmalarla genel olarak uyumludur. Guerra-Hernández vd. (2024) , İspanya ve Portekiz'de 2020–2021 döneminde meydana gelen yangınları GEDI verileriyle değerlendirmiş ve incelenen yangınların çoğunda yangın öncesi ve sonrası AGB yoğunluğunda %3.21–%18,73 arasında azalma bildirmiştir. Bununla birlikte, çalışmalar arasındaki farklılıkların kullanılan veri kaynakları, yangın alanlarının yapısı, yangın şiddeti dağılımı ve yangın öncesi/sonrası değerlendirme dönemlerinden kaynaklanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Akdeniz ekosistemlerinde biyokütle tüketimini değerlendiren Molina vd. (2019) ise iki farklı yangında biyokütle tüketiminin %16,59 ile %98,75 arasında değişebildiğini göstermiştir. Bu geniş aralık, yangınların biyokütle üzerindeki etkisinin yangının ve alanın özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini ortaya koymaktadır.

Manavgat'ta AGB'nin 2022 sonrasında da azalmaya devam ederek 2024 yılında incelenen dönemin en düşük değerine ulaşması ve 2025 yılında yalnızca %1.28'lik pozitif değişim göstermesi, yangın öncesi biyokütle düzeylerine kısa sürede geri dönülmediğini göstermektedir. Akdeniz kuşağı ibreli ormanlarında uzun dönemli toparlanmayı inceleyen Viana-Soto vd. (2022) , yangından 26 yıl sonra dahi yanmış alanların yarısından azının yangın öncesi orman yapısına tamamen döndüğünü ve ortalama vejetasyon yüksekliğinin yangın öncesi düzeylere ulaşmadığını bildirmiştir. Bu nedenle Manavgat'ta 2024–2025 döneminde gözlenen pozitif AGB değişimi, tam bir ekosistem veya biyokütle toparlanması yerine kısa dönemli pozitif bir değişim olarak değerlendirilmelidir.

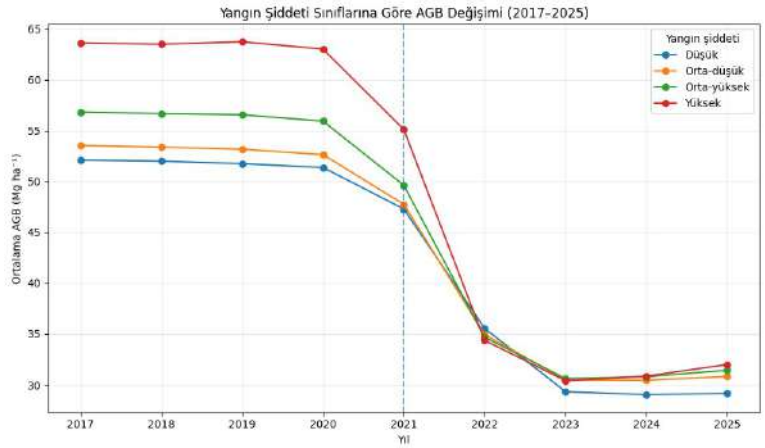
3.2. Yangın Şiddetine Göre Toprak Üstü Biyokütle Değişimi

Key ve Benson (2006) dNBR sınıflandırmasına göre AGB analizlerine yalnızca düşük, orta-düşük, orta-yüksek ve yüksek yangın şiddeti sınıfları dahil edilmiştir. Yeniden büyüme sınıfları ile yanmamış sınıf analiz dışında tutulmuş; ancak dNBR sınıflarının çalışma alanındaki bütüncül mekânsal dağılımını göstermek amacıyla Şekil 4'te görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Manavgat yangın alanında dNBR tabanlı sınıfların mekânsal dağılımı. AGB analizlerine yalnızca düşük, orta-düşük, orta-yüksek ve yüksek yangın şiddeti sınıfları dahil edilmiştir.

Yangın şiddeti sınıflarına göre yıllık ortalama AGB değerleri incelendiğinde, yangın öncesi dönemde sınıflar arasında belirgin başlangıç farklılıkları bulunduğu görülmüştür (Şekil 5). Yangın öncesi referans yıl olan 2020'de ortalama AGB; düşük şiddet sınıfında 51.38 Mg ha^{-1}, orta-düşük sınıfta 52.64 Mg ha^{-1}, orta-yüksek sınıfta 55.94 Mg ha^{-1} ve yüksek şiddet sınıfında 63.02 Mg ha^{-1} olarak belirlenmiştir. Yangın sonrası ilk yıllık gözlem olan 2022'de ise bu değerler sırasıyla 35.56, 34.95, 34.68 ve 34.38 Mg ha^{-1} düzeyine gerilemiştir.



Şekil 5. 2017–2025 döneminde yangın şiddeti sınıflarına göre ortalama toprak üstü biyokütlenin (AGB) zamansal değişimi.

2020–2022 dönemindeki AGB kaybının yangın şiddeti arttıkça düzenli biçimde yükseldiği belirlenmiştir. Düşük şiddet sınıfında AGB kaybı 15.81 Mg ha^{-1} (%30,78) iken, bu değer orta-düşük sınıfta 17.70 Mg ha^{-1} (%33,62), orta-yüksek sınıfta 21.25 Mg ha^{-1} (%37,99) ve yüksek şiddet sınıfında 28.65 Mg ha^{-1} (%45,46) olarak hesaplanmıştır. AGB değerlerindeki azalma 2022 sonrasında da devam etmiş ve 2024 yılında tüm şiddet sınıflarında düşük seviyeler gözlenmiştir. 2020–2024 dönemindeki kümülatif azalma düşük, orta-düşük, orta-yüksek ve yüksek şiddet sınıflarında sırasıyla %43,49, %42,14, %44,95 ve %51.06 olarak belirlenmiştir. Bu dönemde en yüksek azalma yüksek şiddet sınıfında görülmüş olmakla birlikte, sınıflar arasında tamamen düzenli bir artış eğilimi bulunmamaktadır. 2024–2025 döneminde tüm yangın şiddeti sınıflarında pozitif AGB değişimi gözlenmiştir. Bir yıllık AGB değişimi düşük şiddet sınıfında 0.12 Mg ha^{-1} (%0.42), orta-düşük sınıfta 0.36 Mg ha^{-1} (%1.17), orta-yüksek sınıfta 0.64 Mg ha^{-1} (%2.08) ve yüksek şiddet sınıfında 1.14 Mg ha^{-1} (%3,70) olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). Böylece 2024–2025 dönemindeki pozitif değişimin büyüklüğünün yangın şiddeti sınıfları boyunca arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, bu değerlendirme yalnızca bir yıllık kısa dönemli değişime dayandığından, söz konusu artışların ekolojik toparlanma hızı olarak yorumlanması uygun değildir. Nitekim yüksek şiddet sınıfında 2025 yılı ortalama AGB değeri (31.99 Mg ha^{-1}), 2020 yılındaki yangın öncesi değerinin hâlâ %49,24 altında kalmıştır. Bu nedenle özellikle yüksek şiddet sınıfında gözlenen daha yüksek pozitif değişim, daha hızlı veya daha başarılı bir toparlanmanın göstergesi olarak değerlendirilmemelidir.

Çizelge 3. Yangın şiddeti sınıflarına göre seçilmiş dönemlerde ortalama AGB değişimi.

Yangın şiddeti	2020→2022 değişim (%)	2020→2024 değişim (%)	2024→2025 değişim (%)
Düşük	−30.78	−43.49	+0.42
Orta-düşük	−33.62	−42.14	+1.17
Orta-yüksek	−37.99	−44.95	+2.08
Yüksek	−45.46	−51.06	+3.70

2020–2022 döneminde AGB kaybının yangın şiddeti sınıfları boyunca düzenli olarak arttığı görülmüştür; kayıp düşük şiddet sınıfında %30,78 iken yüksek şiddet sınıfında %45,46'ya ulaşmıştır. Bu bulgu Guerra-Hernández vd. (2024) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumludur. Söz konusu çalışmada, yangın şiddetinin artmasıyla birlikte biyokütle stokları ve orman yapısına ilişkin GEDI metrikleri üzerindeki etkinin de arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla Manavgat yangınında yüksek şiddet sınıfında gözlenen daha büyük AGB kaybı, Akdeniz ormanlarında şiddetli yangınların vejetasyon yapısı ve biyokütle üzerindeki daha güçlü etkilerini ortaya koyan önceki bulgularla tutarlıdır. Bununla birlikte, yangın sonrası değişimin yalnızca yangın şiddeti tarafından kontrol edildiği düşünülmemelidir. Kavgaci vd. (2016) , Antalya'daki 2008 Serik–Taşağıl yangını sonrasında Pinus *brutia* ormanlarında yürüttükleri beş yıllık çalışmada, yangın sonrası vejetasyon gelişiminin yönü ve hızının yangın şiddetinin yanı sıra yangın öncesi meşcere yaşı, bakı ve türlerin rejenerasyon özelliklerinden de etkilendiğini göstermiştir. Bu nedenle Manavgat'ta şiddet sınıfları arasında gözlenen farklılıklar yorumlanırken, başlangıçtaki meşcere koşullarının ve çevresel özelliklerin de potansiyel etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

2024–2025 döneminde bütün şiddet sınıflarında pozitif AGB değişimi gözlenirken, artışın yüksek şiddet sınıfında %3,70 ile diğer sınıflardan daha büyük olması dikkat çekmektedir. Ancak bu sonuç, yüksek şiddetli alanların daha hızlı veya daha başarılı biçimde toparlandığını tek başına göstermemektedir. Nitekim yüksek şiddet sınıfındaki 2025 AGB değeri, 2020 yangın öncesi düzeyinin hâlâ %49,24 altında kalmıştır. Viana-Soto vd. (2020) , Akdeniz ibreli ormanlarında yangın şiddetinin özellikle kısa dönemli toparlanma hızını etkileyebildiğini ve bazı yüksek şiddetli alanlarda daha yüksek toparlanma oranlarının görülebildiğini bildirmiştir. Bununla birlikte yazarlar, toparlanma dinamiklerinin yangın sonrası iklim koşulları ve diğer alan özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini

göstermektedir. Bu nedenle çalışmamızdaki 2024–2025 artışı, tam bir biyokütle toparlanmasından ziyade erken dönemli pozitif AGB değişimi olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonuçları değerlendirilirken dNBR tabanlı yangın şiddeti verisi ile CTrees AGB ürününün tamamen bağımsız veri kaynakları olmadığı da dikkate alınmalıdır. CTrees AGB ürünü yalnızca Sentinel-2 verisine dayanmamakta; Landsat, Harmonized Landsat–Sentinel-2 (HLS), ALOS PALSAR, GEDI, ICESat-2, hava LiDAR'ı ve orman envanteri gibi çoklu veri kaynaklarını bir araya getirmektedir(CTrees, 2025) . Bununla birlikte HLS kapsamında Sentinel-2 gözlemleri de CTrees modelleme sürecine katkı sağladığından, Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR ile CTrees AGB arasında veri kaynağı açısından kısmi bir örtüşme bulunmaktadır. Bu nedenle burada belirlenen şiddet–AGB deseni, birbirinden tamamen bağımsız iki gözlem sisteminin doğrulaması olarak değil, yangın şiddeti sınıfları ile yıllık AGB değişiminin birlikte değerlendirilmesi olarak yorumlanmalıdır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, 2021 Manavgat orman yangını sonrasında toprak üstü biyokütlenin zamansal ve mekânsal değişimi CTrees yıllık AGB ürünleri kullanılarak 2017–2025 dönemi için değerlendirilmiştir. Yangın öncesi 2017–2020 döneminde ortalama AGB değerleri görece kararlı bir seyir göstermiş, 2020 yılında 52.00 Mg ha^{-1} olan ortalama AGB, ilk tam yangın sonrası yıllık gözlem olan 2022 yılında 34.37 Mg ha^{-1}'e gerilemiştir. Buna göre 2020–2022 döneminde ortalama AGB'de 17.64 Mg ha^{-1}, diğer bir ifadeyle yaklaşık %33,91 azalma meydana gelmiştir. Azalma sonraki yıllarda da devam etmiş ve 2024 yılında ortalama AGB 29.37 Mg ha^{-1} ile incelenen dönemin en düşük seviyesine ulaşmıştır. Bu değer, 2020 yılına göre yaklaşık %43,52'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. 2025 yılında ortalama AGB 29.75 Mg ha^{-1}'e yükselmiş ve 2024–2025 döneminde 0.38 Mg ha^{-1} (%1.28) oranında pozitif değişim belirlenmiştir. Bu artış, incelenen zaman serisinde 2024 yılındaki minimum değerin ardından gözlenen ilk pozitif değişimi temsil etmektedir. Bununla birlikte, yalnızca bir yıllık döneme ait olan bu değişim, yangın sonrası ekolojik toparlanma hızı veya yangın öncesi biyokütle düzeylerine geri dönüş olarak değerlendirilmemiştir.

AGB değerlerinden 0.47 karbon fraksiyonu kullanılarak hesaplanan toplam toprak üstü biyokütle karbon stoku, 2020 yılında yaklaşık 1.339 milyon ton C iken 2022 yılında 0.885 milyon ton C'ye gerilemiş ve bu dönemde yaklaşık 0.454 milyon ton C azalma meydana gelmiştir. Karbon stoku 2024 yılında yaklaşık 0.756 milyon ton C ile incelenen dönemin en düşük seviyesine ulaşmış, 2025 yılında ise yaklaşık 0.766 milyon ton C'ye yükselmiştir. Böylece biyokütlede belirlenen zamansal değişimin karbon stoku karşılığı da nicel olarak ortaya konulmuştur.

Yangın şiddetine göre yapılan değerlendirmede, 2020–2022 dönemindeki AGB kaybının incelenen şiddet sınıfları boyunca arttığı belirlenmiştir. AGB kaybı düşük şiddet sınıfında %30,78 iken, orta-düşük sınıfta %33,62, orta-yüksek sınıfta %37,99 ve yüksek şiddet sınıfında %45,46 olarak hesaplanmıştır. 2020–2024 döneminde ise en yüksek kümülatif azalma %51.06 ile yüksek şiddet sınıfında görülmüş, ancak bu dönem için sınıflar arasında tamamen düzenli bir artış eğilimi gözlenmemiştir. 2024–2025 döneminde tüm yangın şiddeti sınıflarında pozitif AGB değişimi belirlenmiştir. Bir yıllık değişim düşük şiddet sınıfında %0.42, orta-düşük sınıfta %1.17, orta-yüksek sınıfta %2.08 ve yüksek şiddet sınıfında %3,70 olarak hesaplanmış; yüksek şiddet sınıfındaki mutlak AGB artışı 1.14 Mg ha^{-1} olmuştur. Bununla birlikte, bu değerlendirme yalnızca bir yıllık kısa dönemli değişime dayanmaktadır. Ayrıca yüksek şiddet sınıfındaki 2025 ortalama AGB değeri, 2020 yangın öncesi seviyesinin hâlâ %49,24 altında bulunmaktadır. Bu nedenle yüksek şiddet sınıfında gözlenen daha büyük pozitif değişim, daha hızlı veya daha başarılı bir ekolojik toparlanmanın göstergesi olarak yorumlanmamıştır.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, CTrees yıllık AGB ürünleri ile Sentinel-2 tabanlı dNBR yangın şiddeti bilgilerinin birlikte kullanılmasının, büyük orman yangınları sonrasında biyokütledeki zamansal ve mekânsal değişimlerin ve yangın şiddetine bağlı zamansal değişimlerin izlenmesine olanak sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, 2025 yılında gözlenen pozitif değişimin kalıcı bir eğilime dönüşüp dönüşmediğinin belirlenebilmesi için daha uzun süreli yıllık gözlemlere ihtiyaç bulunmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan yıllık toprak üstü biyokütle (AGB) ve belirsizlik (RSE) ürünlerini erişime sunan CTrees ekibine teşekkür ederiz. Çalışma alanının sınırlandırılmasında kullanılan yanmış alan verileri, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC) bünyesindeki European Forest Fire Information System (EFFIS) tarafından sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Altay, M. ve Türker, M., 2026. Assessing Burned Area and Severity in Mediterranean Forests Using Bi-Temporal Sentinel-2 and CORINE Data: The Manavgat 2021 Wildfire Case. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 7(1): 145-165.

Bulut, F.Ş., 2024. Burned Forest Area Mapping From Post-Fire Sentinel-2 Imagery Using Object-Based Machine Learning Classification. *Yüksek lisans tezi*. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 78 sayfa.

CTrees, 2025. *Above-Ground Biomass (AGB) Carbon Data Brief, Version 1.0*. CTrees, Pasadena, California, ABD. 9 sayfa.

Dupuy, J.-L., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J. ve Fernandes, P., 2020. Climate Change Impact on Future Wildfire Danger and Activity in Southern Europe: A Review. *Annals of Forest Science*, 77: 35.

Earthmover, t.y. Global Aboveground Biomass (AGB), 100m. https://app.earthmover.io/marketplace/69e00e1c21faca8bf36879d2 [Erişim tarihi: 18.09.2026].

Eidenshink, J.C., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z.-L., Quayle, B. ve Howard, S.M., 2007. A Project for Monitoring Trends in Burn Severity. *Fire Ecology*, 3(1): 3-21.

European Forest Fire Information System (EFFIS), t.y. Burnt Area Mapped Using Sentinel2/MODIS Images. https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/data.request.form/ [Erişim tarihi: 16.09.2026].

Guerra-Hernández, J., Pereira, J.M.C., Stovall, A. ve Pascual, A., 2024. Impact of Fire Severity on Forest Structure and Biomass Stocks Using NASA GEDI Data. Insights From the 2020 and 2021 Wildfire Season in Spain and Portugal. *Science of Remote Sensing*, 9: 100134.

IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japonya.

Kavgacı, A., Örtel, E., Torres, I. ve Safford, H., 2016. Early Postfire Vegetation Recovery of *Pinus brutia* Forests: Effects of Fire Severity, Prefire Stand Age, and Aspect. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 40(5): 723-736.

Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ., Tonbul, H. ve Öztürk, M.Y., 2021. Uzaktan Algılama Teknolojileri ile Orman Yangınlarının Zamansal Analizi: 2021 Yılı Akdeniz ve Ege Yangınları. Kavzoğlu, T. (Ed.), *Orman Yangınları: Sebepleri, Etkileri, İzlenmesi, Alınması Gereken Önlemler ve Rehabilitasyon Faaliyetleri*, Türkiye Bilimler Akademisi, Ankara. syf: 219-251.

Kelly, K. ve Šavrič, B., 2021. Area and Volume Computation of Longitude-Latitude Grids and Three-Dimensional Meshes. *Transactions in GIS*, 25(1): 6-24.

Key, C.H. ve Benson, N.C., 2006. Landscape Assessment (LA). Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S. ve Gangi, L.J. (Ed.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado. syf: LA-1-LA-55.

Miller, J.D. ve Thode, A.E., 2007. Quantifying Burn Severity in a Heterogeneous Landscape With a Relative Version of the Delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1): 66-80.

Molina, J.R., Herrera, M.A. ve Rodríguez y Silva, F., 2019. Wildfire-Induced Reduction in the Carbon Storage of Mediterranean Ecosystems: An Application to Brush and Forest Fires Impacts Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 76: 88-97.

Robichaud, P.R., Lewis, S.A., Laes, D.Y.M., Hudak, A.T., Kokaly, R.F. ve Zamudio, J.A., 2007. Postfire Soil Burn Severity Mapping With Hyperspectral Image Unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 108(4): 467-480.

Ruffault, J., Curt, T., Moron, V., Trigo, R.M., Mouillot, F., Koutsias, N., Pimont, F., Martin-StPaul, N., Barbero, R., Dupuy, J.-L., Russo, A. ve Belhadj-Khedher, C., 2020. Increased Likelihood of Heat-Induced Large Wildfires in the Mediterranean Basin. *Scientific Reports*, 10: 13790.

San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Liberta, G., Giovando, C., Boca, R., Sedano, F., Kempeneers, P., McInerney, D., Withmore, C., Santos de Oliveira, S., Rodrigues, M., Durrant, T., Corti, P., Oehler, F., Vilar, L. ve Amatulli, G., 2012. Comprehensive Monitoring of Wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). Tiefenbacher, J.P. (Ed.), *Approaches to Managing Disaster: Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts*, InTech, Rijeka, Hırvatistan. syf: 87-105.

Silvestro, R., Saulino, L., Cavallo, C., Allevato, E., Pindozzi, S., Cervelli, E., Conti, P., Mazzoleni, S. ve Saracino, A., 2021. The Footprint of Wildfires on Mediterranean Forest Ecosystem Services in Vesuvius National Park. *Fire*, 4(4): 95.

Turco, M., Rosa-Cánovas, J.J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J.P., Llasat, M.C. ve Provenzale, A., 2018. Exacerbated Fires in Mediterranean Europe Due to Anthropogenic Warming Projected With Non-Stationary Climate-Fire Models. *Nature Communications*, 9: 3821.

Viana-Soto, A., Aguado, I., Salas, J. ve García, M., 2020. Identifying Post-Fire Recovery Trajectories and Driving Factors Using Landsat Time Series in Fire-Prone Mediterranean Pine Forests. *Remote Sensing*, 12(9): 1499.

Viana-Soto, A., García, M., Aguado, I. ve Salas, J., 2022. Assessing Post-Fire Forest Structure Recovery by Combining LiDAR Data and Landsat Time Series in Mediterranean Pine Forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102754.

Xu, L., Saatchi, S.S., Yang, Y., Yu, Y., Pongratz, J., Bloom, A.A., Bowman, K., Worden, J., Liu, J., Yin, Y., Domke, G.M., McRoberts, R.E., Woodall, C., Nabuurs, G.-J., de-Miguel, S., Keller, M., Harris, N., Maxwell, S. ve Schimel, D., 2021. Changes in Global Terrestrial Live Biomass Over the 21st Century. *Science Advances*, 7(27): eabe9829.

Yang, Y., Saatchi, S., Kwon, N., Lin, W.T., Liu, Z., Li, S., DalAgnol, R. ve Sagang, L.B., 2026. From Snapshot Maps to Continuous Monitoring of Global Forest Carbon at 100 m Resolution (2000-2025). EarthArXiv preprint. https://doi.org/10.31223/X5KJ4Q [Erişim tarihi: 18.09.2026].

Zhang, Y., Zou, Y. ve Wang, Y., 2025. Remote Sensing of Forest Above-Ground Biomass Dynamics: A Review. *Forests*, 16(5): 821.

GRACE & GRACE-FO YERALTI SUYU DEPOLAMA ANOMALLERİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÖLÇEK İNDİRGEMESİ

Şeyma AKÇA[1], Dilek Eren AKYÜZ[2], Fusun BALIK ŞANLI[3]

[1]Arş Gör. Dr., Harran Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63000, Osmanbey, Şanlıurfa, seymakca@harran.edu.tr
[2]Doç. Dr., İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34315, Avcılar, İstanbul, dilekeren.akyuz@iuc.edu.tr
[3]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, fbalik@yildiz.edu.tr

ÖZET

Giriş: *Yeraltı suları, yağışların sızarak, yeraltındaki akiferde birikmesiyle meydana gelen tatlı su kaynaklarındandır. Sızma esnasında yeryüzünün çeşitli katmanlarına temas ederek filtrelenen yüzey suları bakteri, organik madde, koku ve tatlardan arınarak iyi kalitede bir yeraltı su kaynağı oluşturur (Bayazıt, 1995). Türkiye'de önümüzdeki yüzyıl içinde su kaynaklarının %25'e kadar azalabileceği öngörülmektedir (Giorgi ve Lionello, 2008). Fırat-Dicle havzasının bir alt havzası olan Harran Ovası'nda gerçekleştirilen tarımsal sulama faaliyetleri, yeraltı suyu rejimi üzerinde çok boyutlu ve giderek sistematik hale gelen baskılar oluşturmuştur. İklim değişikliğiyle birlikte oldukça kurak olan havzanın akifer beslenmesi ve yeraltı suyu depolanmasının hidrolojik süreçler boyunca sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesini etkilemiştir. Bölgesel ölçekte gözlenen yıllık yağış azalışları ile yıl içi kuraklık sıklığı ve süresindeki artış, yeraltı suyunun beslenme yollarını önemli ölçüde azaltmış; böylece sığ akifer sisteminin doğal yenilenme kapasitesini sınırlandırmıştır (Legg, 2021). GAP'ın 141.500 ha sulama alanıyla en büyük tarımsal sulama faaliyetlerinin gerçekleştirildiği Harran Ovası, Atatürk Barajı'ndan açık kanal sistemleriyle sulanmaya başlanmıştır. 30 yılı aşkın süredir tarımsal sulama faaliyetlerinin gerçekleştirildiği ovada, aşırı ve kontrolsüz sulamalar, yetersiz drenaj, tarımsal ilaçlama ve evsel atıkların havza drenaj ağı boyunca uzaklaştırılması birçok çevresel problem beraberinde getirmiştir. Öte yandan, çevre ilçe ve illerden aldığı göçle birlikte I. sınıf tarım arazilerinin imara açılması gıda krizi ve çölleşmeyi tetiklemiştir (Yeşilnacar ve ark., 2007). GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment/ Yerçekimi Geri Kazanımı ve İklim Deneyi), Dünya'nın yerçekimindeki değişimlere bağlı olarak gezegen genelinde su hareketi ve yüzey kütle değişimlerini izleyerek karasal su depolama anomalileri (KSDA) hakkında bilgi sağlayan, yerçekimi alanının aylık olarak yüksek çözünürlüklü küresel modellerindeki değişiklikleri ölçen bir ikiz uydu misyonudur (Tapley ve ark., 2019). Bahsi geçen çevresel problemlerle birlikte sürdürülebilir tarımsal sulama faaliyetleri için yeraltı suyu yönetimi kaçılmazdır. KSDA hakkında bilgi sunan GRACE& GRACE-FO yeryüzünün sahip olduğu toplam su depolama anomalileri izlenebilmektedir. Ancak GRACE&GRACE-FO uydularının düşük konumsal çözünürlüğe sahip olması bölgesel ölçekte hidrolojik uygulamaları kısıtlamaktadır. Bu çalışma da GRACE&GRACE-FO'nun 1°'lik mekansal çözünürlüğü, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar kullanılarak 1 km'ye indirgenmiştir. Karasal su depolama anomalilerinden elde edilen yeraltı suyu depolama anomalileri kuyu gözlemleriyle kıyaslanarak ölçek indirgeme model doğrulukları KGE,NRMSE, R^2 ve NSE metrikleriyle ölçülmüştür.*

Materyal ve Metot: *Bu çalışma, Türkiye'nin Şanlıurfa idari sınırları içerisinde yer alan ve tarımsal sulama faaliyetlerinin gerçekleştirildiği Harran Ovası'nda yeraltı su yönetimi ve sürdürülebilir tarımsal sulama faaliyetlerini iyileştirmek amacıyla GRACE & GRACE-FO uydularının 1°'lik mekânsal çözünürlüğünü, 1 km'ye ölçek indirgemesi için, ovaya ait yağış, toprak, yükseklik, arazi kullanım, drenaj yoğunluğu, eğim, jeoloji, Topografik Nemlilik İndeksi (TNİ) ve Topografik Pürüzlülük İndeksi (TPİ) tematik katmanları kullanılarak bir veri seti koleksiyonu oluşturulmuştur. GRACE'in operasyonel kaynaklı 11 aylık veri boşluğu tekrarlayan sinir ağları yöntemlerinden olan Uzun-Kısa Dönem Bellek (Long-Short Term Memory/LSTM) mimarisi kullanılarak doldurulmuştur (Hochreiter ve Schmidhuber, 1997). Modele ait RMSE değeri 37.56 olarak bulunmuştur. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar olan Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR), Aşamalı Lineer Regresyon (ALR), Gauss Süreç Regresyonu (GSR), Rastgele Orman (RO), Destek Vektör Makinaları (DVM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri kullanılarak ölçek indirgemesi gerçekleştirilmiştir (Alpaydın, 2021). Çıktıda GRACE&GRACE-FO YSDA verisi yüksek çözünürlüklü olacak şekilde üretilmiştir. Bunun için veri setindeki bütün tematik katmanların mekansal çözünürlüğü GRACE'in sahip olduğu orijinal mekansal çözünürlüğe yeniden örneklenmiştir. GRACE'in orijinal çözünürlüğünde eğitilen modellere, 1 km mekansal çözünürlüğüne sahip veriseti koleksiyonu test olarak verilmiştir.*

Bulgular: *Üretilen sonuçlara ait doğruluklar kuyu statik seviyeleriyle karşılaştırılarak KGE, NSE, NRMSE ve R^2 değerlendirme metrikleriyle oluşturulan modeller karşılaştırılmıştır (Keskin ve ark., 2025). Metriklere ait sonuçlar Çoklu Lineer Regresyon, Aşamalı Lineer Regresyon, Gauss Süreç Regresyonu, Rastgele Orman, Destek Vektör Makinaları ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri için sırasıyla;*

- *KGE: 0.87<RO<0.93, 0.80<DVM<0.89, 0.75<ÇLR<0.82, 0.78<ALR<0.85 , 0.73<YSA<0.79, 0.60<GSR<0.65,*
- *NSE: 0.85<RO<0.91, 0.82<DVM<0.87, 0.79<ÇLR<0.81, 0.76<ALR<0.82, 0.74<YSA<0.80, 0.62<GSR<0.67,*
- *NRMSE: 0.6<RO<1.4, 1.0<DVM<2.7, 1.6<ÇLR<2.4, 1.5<ALR<2.7, 1.0<YSA<1.8, 1.2<GSR<2.3,*
- ***R^2:*** *0.85<RO<0.94, 0.84<DVM<0.91, 0.80<ÇLR<0.83, 0.79<ALR<0. 82, 0.76<YSA<0.81, 0.67<GSR<0.78.*

Tüm modeller arasında en iyi sonuç, bütün metriklerde Rastgele Orman yönteminden elde edilmiştir.

Sonuç: *ÇLR, ALR, GSR, RO, DVM ve YSA makine öğrenmesi modelleri kullanılarak 1 km'ye ölçek indirgemesi sonuçları Şekil1.'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; ovanın güneyinde azalan YSDA potansiyeli bütün yöntemlerde belirgin olarak azalmaktadır.*

ÇLR ve ALR yönteminde ovanın kuzeyinde pozitif YSDA üretilmiştir. GSR yönteminde belirgin olarak havza drenaj ağı boyunca YSDA değişimi mevcuttur. DVM'de YSDA potansiyeli genel olarak negatif/azalan bir potansiyel söz konusudur. YSA'da yeraltı su anomalileri günayda azalırken; kuzeyde artan bir potansiyel üretmiştir. RO yönteminde ise özellikle havzanın jeolojik formasyon paterniyle uyumlu olacak şekilde YSDA potansiyleinde azalma mevcuttur ve güneyinde de azalan bir eğilim vardır.

Anahtar Sözcükler: GRACE & GRACE-FO, Ölçek İndirgeme, Makine Öğrenmesi

ABSTRACT

MACHINE LEARNING-BASED DOWNSCALING OF GRACE&GRACE-FO GROUNDWATER STORAGE ANOMALIES

Introduction: *Groundwater is a freshwater resource formed when precipitation infiltrates into the subsurface and accumulates within aquifer systems. During infiltration, surface water is filtered through various layers of the Earth's surface, which removes bacteria, organic matter, odors, and undesirable tastes, thereby contributing to the formation of good-quality groundwater resources (Bayazıt, 1995). A reduction of up to 25% in Türkiye's water resources has been projected over the coming century (Giorgi and Lionello, 2008). In the Harran Plain, a sub-basin of the Euphrates–Tigris Basin, agricultural irrigation activities have exerted multidimensional and increasingly systematic pressures on the groundwater regime. Along with climate change, these pressures have affected the sustainable maintenance of aquifer recharge and groundwater storage throughout hydrological processes in this highly arid region. Observed decreases in annual precipitation at the regional scale, together with increases in the frequency and duration of intra-annual droughts, have substantially reduced groundwater recharge pathways, thereby limiting the natural renewal capacity of the shallow aquifer system (Legg, 2021).*

The Harran Plain, which contains one of the largest agricultural irrigation areas of the Southeastern Anatolia Project (GAP), with an irrigated area of 141,500 ha, has been irrigated through open-channel systems supplied by the Atatürk Dam. More than three decades of agricultural irrigation activities in the plain have resulted in several environmental problems due to excessive and uncontrolled irrigation, inadequate drainage, agricultural pesticide use, and the transport of domestic wastes through the basin drainage network. Furthermore, the conversion of first-class agricultural lands to urban development areas, together with migration from surrounding districts and provinces, has contributed to increasing risks of food insecurity and desertification (Yeşilnacar et al., 2007).

The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) is a twin-satellite mission that monitors changes in the Earth's gravitational field associated with variations in water movement and surface mass, providing information on terrestrial water storage anomalies (TWSA) (Tapley et al., 2019).

In the context of these environmental challenges, effective groundwater management is essential for sustainable agricultural irrigation. GRACE and GRACE-FO provide valuable information on changes in total terrestrial water storage. However, their relatively coarse spatial resolution limits their applicability to regional-scale hydrological studies. Therefore, in this study, the original 1° spatial resolution of GRACE and GRACE-FO observations was downscaled to 1 km using machine learning-based approaches. Groundwater storage anomalies derived from terrestrial water storage anomalies were compared with groundwater well observations, and the performance of the downscaling models was evaluated using the Kling–Gupta Efficiency (KGE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), coefficient of determination (R^2), and Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) metrics.

Materials and Methods: *This study was conducted in the Harran Plain, located within the administrative boundaries of Şanlıurfa, Türkiye, where intensive agricultural irrigation activities are carried out. To improve groundwater management and support sustainable agricultural irrigation, a dataset collection was developed to downscale the 1° spatial resolution of GRACE and GRACE-FO observations to 1 km. The dataset included thematic layers representing precipitation, soil, elevation, land use/land cover, drainage density, slope, geology, Topographic Wetness Index (TWI), and Topographic Ruggedness Index (TRI) for the Harran Plain. The 11-month data gap associated with the GRACE operational period was filled using a Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural network architecture (Hochreiter and Schmidhuber, 1997). The LSTM model yielded an RMSE value of 37.56.*

Downscaling was performed using six machine learning-based approaches: Multiple Linear Regression (MLR), Stepwise Linear Regression (SLR), Gaussian Process Regression (GPR), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Artificial Neural Network (ANN) (Alpaydın, 2021). High-resolution groundwater storage anomaly (GWSA) data were subsequently generated. For this purpose, all thematic layers in the dataset were resampled to the original spatial resolution of the GRACE observations. The models were trained using the predictors resampled to the original GRACE spatial resolution, and the resulting models were then applied to the corresponding predictor dataset at 1 km spatial resolution to generate the downscaled GWSA estimates.

Results: *The accuracy of the generated results was evaluated by comparison with groundwater well static-level observations. The performance of the developed models was assessed using the KGE, NSE, NRMSE, and R^2 metrics (Keskin et al., 2025). The ranges of the evaluation metrics obtained for MLR, SLR, GPR, RF, SVM, and ANN were as follows:*

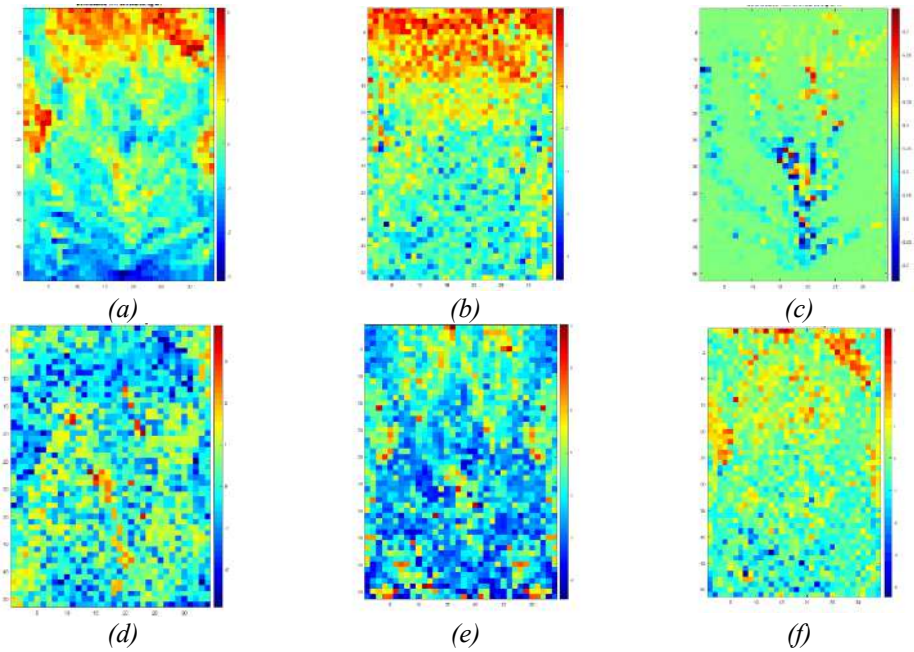
- *KGE: 0.87 < RF < 0.93, 0.80 < SVM < 0.89, 0.75 < MLR < 0.82, 0.78 < SLR < 0.85, 0.73 < ANN < 0.79, and 0.60 < GPR < 0.65.*
- *NSE: 0.85 < RF < 0.91, 0.82 < SVM < 0.87, 0.79 < MLR < 0.81, 0.76 < SLR < 0.82, 0.74 < ANN < 0.80, and 0.62 < GPR < 0.67.*

- *NRMSE: 0.6 < RF < 1.4, 1.0 < SVM < 2.7, 1.6 < MLR < 2.4, 1.5 < SLR < 2.7, 1.0 < ANN < 1.8, and 1.2 < GPR < 2.3.*
- *R^2: 0.85 < RF < 0.94, 0.84 < SVM < 0.91, 0.80 < MLR < 0.83, 0.79 < SLR < 0.82, 0.76 < ANN < 0.81, and 0.67 < GPR < 0.78.*

Among all the models, the Random Forest approach achieved the best overall performance across all evaluation metrics.

Conclusion: *The downscaled GWSA results obtained using the MLR, SLR, GPR, RF, SVM, and ANN machine learning models at a spatial resolution of 1 km are presented in Figure 1. The results indicate a pronounced decrease in GWSA toward the southern part of the plain across all methods. Positive GWSA values were generated in the northern part of the plain by the MLR and SLR approaches. The GPR results showed a pronounced spatial pattern of GWSA variation along the drainage network. The SVM approach generally produced negative or decreasing GWSA values across the plain. In the ANN results, GWSA decreased toward the south, while an increasing pattern was observed in the northern part of the plain. The RF approach produced a decreasing GWSA pattern that was particularly consistent with the spatial distribution of the geological formations, together with a decreasing trend in the southern part of the plain.*

Keywords: GRACE & GRACE-FO, Downscaling, Machine Learning, Deep Learning.



Şekil 1. GRACE-GRACE-FO Yeraltı Suyu Depolama Anomalileri (a) ÇLR, (b) ALR, (c) GSR, (d) RO, (e) DVM, (f) YSA

KAYNAKÇA

Alpaydin, E. 2021. *Machine learning*. MIT press.

Bayazıt, M. 1995. *Hidroloji*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Giorgi F, Lionello P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. Global Planet Change 63(2-3) 90-104. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J., 1997. Long short-term memory. *Neural computation*, *9*(8), 1735-1780.

Keskin, M. Z., Abu Arra, A., Gemici, E., & Şişman, E., 2025. Enhancing ERA5 precipitation with improved predictor selection for regional climate change assessment. *Natural Hazards*, *121*(18), 21771-21810.

Legg, S. 2021. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction*, *49*(4), 44-45.

Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., . . . Chambers, D. P. J. N. c. c. 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. 9(5), 358-369.

ULUSAL UZAKTAN ALGILAMA ARŞİV ALTYAPISI

Yasemin KILIÇ

Şube Müdürü, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, CBS Genel Müdürlüğü, yasemin.kilic@csb.gov.tr

ÖZET

Uzaktan algılama teknolojilerinde son yıllarda yaşanan gelişmeler, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğe sahip uydu görüntülerinin üretimini önemli ölçüde artırmıştır. Kamu kurumları tarafından çevresel izleme, afet yönetimi, mekânsal planlama, tarımsal üretimin takibi ve doğal kaynakların yönetimi gibi birçok alanda yoğun olarak kullanılan bu verilerin sürdürülebilir biçimde yönetilebilmesi için bütünleşik bir arşiv altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak Türkiye'de uzaktan algılama verileri farklı kurumlar tarafından birbirinden bağımsız sistemlerde depolanmakta, mükerrer veri temini yapılmakta ve kurumlar arasında standart bir veri paylaşım mekanizması bulunmamaktadır. Bu durum kamu kaynaklarının etkin kullanımını zorlaştırmakta, afet ve acil durumlarda güncel verilere hızlı erişimi sınırlandırmakta ve ulusal ölçekte veri bütünlüğünün sağlanmasını güçleştirmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye için merkezi bir Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı önerilmektedir. Önerilen sistem; çok kaynaklı uydu, hava aracı, insansız hava aracı (İHA) ve LiDAR verilerinin tek çatı altında depolanmasını, uluslararası metaveri standartları doğrultusunda kataloglanmasını, coğrafi sorgulama altyapısı ile erişilebilir hale getirilmesini ve OGC standartlarına uygun servisler aracılığıyla kamu kurumlarıyla paylaşılmasını hedeflemektedir. Ayrıca sistemde yapay zekâ destekli analiz bileşenlerinin kullanılmasıyla değişim analizi, nesne tespiti, afet hasar analizi, kaçak yapı tespiti ve arazi kullanım izleme gibi işlemlerin otomatik olarak gerçekleştirilebilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada mevcut durum analiz edilerek önerilen mimarinin temel bileşenleri açıklanmış; veri depolama, metaveri yönetimi, coğrafi arama, görüntü ön izleme, servis tabanlı veri paylaşımı ve analitik katmanlar detaylı olarak değerlendirilmiştir. Önerilen altyapının, Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ile bütünleşik çalışarak kamu kurumları arasında veri tekrarını azaltacağı, karar destek süreçlerini hızlandıracağı, afet yönetimi kapasitesini artıracağı ve sürdürülebilir ulusal mekânsal veri yönetimine önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan Algılama, Uydu Görüntüleri, Uzaktan Algılama Arşivi, Coğrafi Bilgi Sistemleri, TUCBS, OGC Standartları, STAC, Yapay Zekâ

ABSTRACT

Recent advances in remote sensing technologies have significantly increased the availability of satellite imagery with high spatial and temporal resolution. These datasets are extensively used by public institutions for environmental monitoring, disaster management, spatial planning, agricultural monitoring, and natural resource management. The growing volume and diversity of remotely sensed data necessitate the establishment of an integrated and sustainable national archive infrastructure. However, in Türkiye, remote sensing datasets are currently stored within fragmented institutional systems, resulting in duplicated data acquisition, limited interoperability, and the absence of a standardized national data-sharing mechanism. This situation reduces operational efficiency, complicates rapid access to up-to-date imagery during emergencies, and hinders the establishment of a unified national geospatial data infrastructure.

This study proposes a National Remote Sensing Archive Infrastructure for Türkiye that integrates satellite imagery, aerial photographs, unmanned aerial vehicle (UAV) data, and LiDAR datasets into a centralized architecture. The proposed system aims to provide standardized metadata management compliant with international standards, spatial search capabilities, web service-based data dissemination using Open Geospatial Consortium (OGC) standards, and interoperability with the Turkish National Geographic Information System (TUCBS). Furthermore, artificial intelligence-based analytical modules are incorporated to enable automated object detection, land-use monitoring, change detection, disaster damage assessment, and unauthorized construction identification.

The study presents the conceptual architecture of the proposed infrastructure and discusses its major components, including data storage, metadata management, spatial query services, image preview mechanisms, service-oriented data dissemination, and artificial intelligence-based analytics. The proposed framework is expected to enhance institutional collaboration, reduce redundant data acquisition, accelerate decision-making processes, strengthen disaster response capabilities, and contribute to the development of a sustainable national geospatial data management ecosystem.

Keywords: Remote Sensing, Satellite Imagery, National Archive Infrastructure, Geographic Information Systems, TUCBS, OGC Standards, STAC, Artificial Intelligence

1. GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojileri, yeryüzüne ilişkin mekânsal bilgilerin geniş alanlarda, yüksek doğrulukta ve düzenli zaman aralıklarıyla elde edilmesini sağlayan en önemli coğrafi bilgi üretim yöntemlerinden biridir. Özellikle son on yılda uydu teknolojilerindeki gelişmeler, sensör çözünürlüklerinin artması, veri elde etme sıklığının yükselmesi ve bulut bilişim altyapılarının yaygınlaşmasıyla birlikte uzaktan algılama verilerinin kullanım alanları önemli ölçüde genişlemiştir. Günümüzde optik, radar (SAR), hiperspektral ve termal sensörlerden elde edilen veriler; çevresel izleme, doğal kaynak yönetimi, afet risk azaltma, şehir planlama, tarım, ormancılık, su kaynakları yönetimi, iklim

değişikliği çalışmaları ve savunma gibi birçok alanda karar destek süreçlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) ve Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından yürütülen Copernicus, Landsat ve EarthData gibi programlar sayesinde petabaytlar seviyesine ulaşan uydu verileri araştırmacılar ve kamu kurumları tarafından erişilebilir hâle gelmiştir. Bununla birlikte yalnızca veriye erişimin sağlanması yeterli olmayıp, bu verilerin sürdürülebilir biçimde depolanması, standartlara uygun şekilde kataloglanması, güvenli biçimde paylaşılması ve uzun dönemli olarak yönetilmesi de kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde ulusal ölçekte uzaktan algılama veri arşivleri oluşturulmakta ve bu arşivler açık standartlara dayalı servisler üzerinden kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır.

Uzaktan algılama verilerinin etkin yönetimi yalnızca teknolojik bir gereklilik değil, aynı zamanda kamu yönetimi açısından stratejik bir zorunluluktur. Aynı görüntünün farklı kurumlar tarafından tekrar tekrar satın alınması veya farklı ortamlarda depolanması, kamu kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olmakta; veri standartlarının farklılaşması ise kurumlar arası birlikte çalışabilirliği önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle afet ve acil durumlarda güncel uydu görüntülerine hızlı erişilememesi, müdahale süreçlerini olumsuz etkileyebilmekte ve karar alma mekanizmalarının etkinliğini azaltabilmektedir.

Türkiye'de uzaktan algılama verilerinden yararlanan kurum sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı, AFAD, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Karayolları Genel Müdürlüğü, belediyeler ve üniversiteler başta olmak üzere birçok kurum farklı amaçlarla uydu görüntülerinden faydalanmaktadır. Ancak bu kullanımın büyük ölçüde kurumsal ihtiyaçlara göre şekillendiği, ortak bir veri yönetim modeli ve ulusal arşiv altyapısının henüz oluşturulmadığı görülmektedir. Sonuç olarak aynı coğrafi alanlara ait görüntüler farklı kurumlar tarafından mükerrer olarak temin edilmekte, veri paylaşımı çoğunlukla manuel yöntemlerle gerçekleştirilmekte ve ulusal ölçekte sürdürülebilir bir uzaktan algılama veri ekosistemi oluşturulamamaktadır.

Yüksek çözünürlüklü ticari uydu görüntülerinin yanı sıra Sentinel ve Landsat gibi açık erişimli uydu programlarının oluşturduğu veri hacmi her geçen yıl katlanarak artmaktadır. Buna insansız hava araçları (İHA), hava fotoğrafları, LiDAR verileri ve yapay zekâ tabanlı analiz çıktıları da eklendiğinde, kurumların depolama kapasitesi, veri erişimi ve veri yönetimi konularında yeni nesil çözümlere ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Büyük hacimli mekânsal verilerin yönetiminde yalnızca depolama kapasitesinin artırılması yeterli olmayıp; verilerin metaveri standartlarına göre kataloglanması, servis tabanlı mimariler üzerinden erişime açılması ve uluslararası birlikte çalışabilirlik standartlarını desteklemesi gerekmektedir.

Bu kapsamda, Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ile uyumlu çalışacak merkezi bir uzaktan algılama arşiv altyapısının oluşturulması, ulusal mekânsal veri yönetiminin güçlendirilmesi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Böyle bir altyapı sayesinde farklı veri sağlayıcılarından elde edilen uydu görüntüleri, hava fotoğrafları, İHA verileri ve diğer uzaktan algılama ürünleri ortak bir platform altında toplanabilecek; standart metaveri yapıları kullanılarak kataloglanabilecek ve OGC standartlarına uygun servisler aracılığıyla kamu kurumlarının erişimine sunulabilecektir. Böylece veri tekrarının önlenmesi, kurumlar arası veri paylaşımının hızlandırılması ve kamu kaynaklarının daha etkin kullanılması mümkün olacaktır.

Ayrıca, son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı görüntü işleme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte uzaktan algılama arşivleri yalnızca veri saklama ortamı olmaktan çıkmış; otomatik nesne tespiti, değişim analizi, arazi örtüsü sınıflandırması, afet hasar analizi ve çevresel izleme gibi birçok analitik sürecin gerçekleştirildiği karar destek platformlarına dönüşmeye başlamıştır. Bu nedenle oluşturulacak ulusal arşiv altyapısının yalnızca depolama odaklı değil, aynı zamanda gelişmiş analiz yeteneklerini destekleyen ölçeklenebilir ve modüler bir mimariye sahip olması gerekmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin mevcut kurumsal yapısı ve ihtiyaçları dikkate alınarak merkezi bir Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı önerilmektedir. Çalışmada öncelikle mevcut durum ve ihtiyaçlar değerlendirilmekte; ardından önerilen sistem mimarisi veri depolama, metaveri yönetimi, coğrafi sorgulama, görüntü ön izleme, servis tabanlı veri paylaşımı ve yapay zekâ destekli analitik bileşenleri açısından ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Son bölümde ise önerilen altyapının ulusal ölçekte sağlayacağı teknik, kurumsal ve ekonomik katkılar tartışılarak gelecekte yapılabilecek geliştirmelere yönelik öneriler sunulmaktadır.

2. UZAKTAN ALGILAMA VERİ YÖNETİMİNİN GELİŞİMİ

2.1 Uluslararası Uzaktan Algılama Veri Altyapıları

Dünya genelinde uzaktan algılama ve Dünya gözlem verilerinin etkin kullanımına yönelik olarak geliştirilen veri altyapıları; farklı uydu görevlerinden elde edilen verilerin merkezi olarak arşivlenmesi, standartlaştırılması, sorgulanması, paylaşılması ve analiz edilmesine olanak sağlayan bütünleşik platformlar şeklinde gelişmektedir. Özellikle kamu kurumları ve araştırma kuruluşları tarafından işletilen bu altyapılar, yalnızca veri erişimini sağlamakla kalmayıp, büyük hacimli uzaktan algılama verilerinin bulut bilişim ve yüksek performanslı hesaplama ortamlarında işlenmesini de desteklemektedir.

Uluslararası uygulamalar incelendiğinde; NASA Earthdata, Avrupa Birliği Copernicus Data Space Ecosystem ve USGS EarthExplorer platformlarının, farklı yaklaşımlarla ancak benzer temel prensipler doğrultusunda yapılandırıldığı görülmektedir. Bu platformlarda ortak olarak; merkezi veri arşivi, standart metaveri, gelişmiş mekânsal ve zamansal sorgulama, açık veri erişimi, API tabanlı veri paylaşımı ve bulut tabanlı veri işleme gibi işlevler ön plana çıkmaktadır.

Copernicus Data Space Ecosystem

Avrupa Birliği tarafından yürütülen Copernicus Programı, geniş kapsamlı ve sürdürülebilir veri altyapısıyla dünyanın önde gelen sivil Dünya Gözlem programlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Program kapsamında, Sentinel uydu ailesi tarafından üretilen çok çeşitli Yer gözlem verileri kullanıcıların erişimine ücretsiz olarak sunulmaktadır. 2023 yılında hizmete alınan Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE), geleneksel uydu görüntüsü indirme ve yerel ortamda işleme yaklaşımının ötesine geçerek, Dünya gözlem verilerinin erişimi, yönetimi ve işlenmesine yönelik bütünleşik bir altyapı sunmaktadır. Ekosistem kapsamında;

- Merkezi veri arşivi,
- Bulut bilişim altyapısı,
- Çevrim içi veri analizi,
- Yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları,
- API tabanlı veri erişimi ve paylaşımı

gibi hizmetler tek bir platform altında bütünleştirilmiştir. Bu yapı sayesinde kullanıcılar, özellikle yüksek hacimli uydu görüntülerini kendi yerel sistemlerine indirmeksizin bulut ortamında doğrudan sorgulayabilmek, analiz edebilmek ve işleyebilmekte; böylece veri transferi ve yerel depolama gereksinimleri azaltılırken, yüksek performanslı hesaplama kaynaklarından etkin biçimde yararlanılabilmektedir.

Copernicus Data Space Ecosystem, uydu verilerinin yalnızca arşivlendiği ve indirilebildiği geleneksel veri portallarından farklı olarak; veri erişimi, depolama, analiz, hesaplama ve uygulama geliştirme süreçlerini bütünleştiren modern bir Dünya Gözlem veri ekosistemi sunmaktadır. Bu yaklaşım, Türkiye'de oluşturulması önerilen ulusal uydu görüntüsü platformu açısından da önemli bir referans model oluşturmaktadır.

NASA Earthdata

NASA tarafından geliştirilen Earthdata sistemi, Landsat, MODIS, SMAP, ECOSTRESS ve farklı uydu görevlerinden elde edilen geniş kapsamlı Yer gözlem verilerinin merkezi bir yapı üzerinden erişime sunulmasını sağlamaktadır. Sistem, farklı kaynaklardan üretilen uydu verilerinin standartlaştırılmış, erişilebilir ve sürdürülebilir bir veri yönetim modeli içerisinde bütünleşik olarak sunulmasına olanak tanımaktadır.

NASA Earthdata sisteminin öne çıkan temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Standartlaştırılmış metaveri yapısı: Verilerin ortak standartlar doğrultusunda tanımlanmasını ve farklı veri kaynakları arasında birlikte çalışabilirliği sağlamaktadır.
- Açık erişim yaklaşımı: Kullanıcıların geniş kapsamlı Yer gözlem verilerine erişimini kolaylaştırmaktadır.
- API desteği: Veri arama, sorgulama ve indirme süreçlerinin otomatikleştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- Bulut bilişim entegrasyonu: Büyük hacimli uydu verilerinin kullanıcı bilgisayarına indirilmesine gerek kalmadan bulut ortamında işlenmesini desteklemektedir.
- Uzun dönemli arşiv yönetimi: Uydu verilerinin sistematik biçimde saklanması, korunması ve uzun vadede erişilebilirliğinin sürdürülmesini sağlamaktadır.

NASA Earthdata'nın uzun yıllardır uyguladığı bu bütünleşik veri yönetim yaklaşımı, farklı uydu görevlerinden üretilen verilerin tek bir ekosistem içerisinde yönetilmesi, erişilebilirliğinin artırılması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından uluslararası ölçekte örnek teşkil eden uygulamalardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu yapı, Türkiye'de kamu kurumlarının ihtiyaç duyduğu uydu görüntülerinin merkezi bir platform üzerinden yönetilmesi ve kurumsal kullanıma sunulması açısından da önemli bir referans model niteliğindedir.

USGS EarthExplorer Platformu

ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey – USGS) tarafından geliştirilen EarthExplorer, çok çeşitli uzaktan algılama ve Dünya gözlem verilerinin merkezi bir platform üzerinden keşfedilmesine, sorgulanmasına ve erişilmesine olanak sağlayan yaygın kullanılan veri portallarından biridir. Platform; Landsat, Sentinel, ASTER ve SRTM gibi uydu ve uzaktan algılama veri setlerinin yanı sıra hava fotoğrafları ve farklı coğrafi veri kaynaklarını da bütünleşik bir yapı içerisinde sunmaktadır.

EarthExplorer platformunun temel özelliklerinden biri, gelişmiş coğrafi ve zamansal sorgulama yetenekleri aracılığıyla uydu ve uzaktan algılama verilerine etkin erişim sağlamasıdır. Platform; kullanıcıların harita üzerinde ilgi alanı (AOI) tanımlamasına, belirli bir tarih veya tarih aralığına göre veri sorgulamasına, görüntüleri bulutluluk oranına göre filtrelemesine ve sensör ile veri seti türüne göre seçim yapmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, belirlenen sorgu kriterlerini karşılayan veri setleri listelenebilmekte, görüntülerin önizlemeleri gerçekleştirilebilmekte ve uygun verilere erişim sağlanabilmektedir.

Bu özellikler, özellikle geniş hacimli ve farklı kaynaklardan üretilen uzaktan algılama verileri içerisinde ihtiyaca uygun görüntünün hızlı ve etkin biçimde bulunmasını mümkün kılmaktadır. EarthExplorer modeli, yalnızca veri depolama ve indirme işlevine odaklanmak yerine; gelişmiş mekânsal ve zamansal sorgulama, veri keşfi ve erişim süreçlerini bütünleşik bir platform üzerinden yönetmesi açısından önemli bir örnek oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, Türkiye'de oluşturulması planlanan ulusal uydu görüntüsü platformunda kullanıcıların ihtiyaç duyduğu görüntülere hızlı ve kriter tabanlı şekilde ulaşabilmesi açısından referans alınabilecek işlevsel bir model niteliğindedir.

2.2 Uluslararası Modellerin Karşılaştırılması

Bu üç uluslararası uygulama birlikte değerlendirildiğinde, modern uzaktan algılama veri altyapılarının yalnızca "görüntü indirme platformu" anlayışından uzaklaşarak, veri yaşam döngüsünün tamamını kapsayan bütünleşik veri ekosistemlerine dönüştüğü görülmektedir.

Tablo 1. Uluslararası Platformlarla Karşılaştırılması

Temel özellik	NASA Earthdata	Copernicus Data Space	USGS EarthExplorer
Merkezi veri arşivi	✓	✓	✓
Standart metaveri	✓	✓	✓
Mekânsal sorgulama	✓	✓	✓
Zamansal sorgulama	✓	✓	✓
API erişimi	✓	✓	✓
Bulut bilişim	✓	✓	Kısmen
Çevrim içi veri analizi	✓	✓	Sınırlı
Büyük veri işleme	✓	✓	Sınırlı
Çoklu veri kaynağı	✓	✓	✓

Kaynak: ESA Copernicus Data Space Ecosystem, NASA Earthdata, USGS EarthExplorer dokümantasyonları

Bu uluslararası örnekler, Türkiye'de oluşturulması önerilen ulusal uydu görüntüsü platformunun tasarımında dikkate alınabilecek temel işlevsel ve teknik gereksinimleri ortaya koymaktadır. Özellikle merkezi arşivleme, standart metaveri, kriter tabanlı görüntü sorgulama, API üzerinden veri erişimi, bulut tabanlı analiz ve kurumlar arası veri paylaşımı, ulusal ölçekte sürdürülebilir bir uzaktan algılama veri altyapısının temel bileşenleri olarak değerlendirilebilir.

3. SİSTEMİN BİLEŞENLERİ VE GEREKSİNİMLERİ

3.1 Sistem Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Önerilen arşiv altyapısının gereksinimleri belirlenirken Türkiye'deki kamu kurumlarının uzaktan algılama verilerini kullanım alanları ve veri yönetiminde karşılaşılan temel sorunlar değerlendirilmiştir. Mevcut yapıda verilerin farklı kurumlarda dağınık olarak tutulması, merkezi bir arşiv sisteminin bulunmaması, veri paylaşım süreçlerinin büyük ölçüde manuel yürütülmesi ve kurumlar arasında standart bir entegrasyon mekanizmasının olmaması temel problemlerdendir.

Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS), mekânsal veri yönetimi açısından önemli bir altyapı sunmakla birlikte, uzaktan algılama verilerinin üretimden arşivlemeye, erişimden paylaşımına kadar uzanan süreçleri kapsayan bütünleşik bir operasyonel model henüz tanımlanmamış olup, önerilen sistem sayesinde bu süreçte tamamlanmış olacaktır.

Ayrıca günümüzde uzaktan algılama verilerinin erişimi, paylaşımı ve yönetimine ilişkin mevcut yapı; kurumsal deneyim ve teknik kapasiteye rağmen, ulusal ölçekte bütüncül bir sistemin eksikliğini açıkça ortaya koymaktadır. Üretilen verilerin etkin biçimde paylaşılabilmesi, mükerrer üretim ve maliyetlerin azaltılması, veri güvenliği ve standartlaşmanın sağlanması; ancak merkezi ve koordineli bir veri yönetim yaklaşımı ile mümkün olabilecektir.

Bu kapsamda önerilen sistemin aşağıdaki gereksinimleri karşılaması hedeflenmiştir:

- Farklı veri kaynaklarından elde edilen uzaktan algılama verilerinin tek merkezde depolanması,

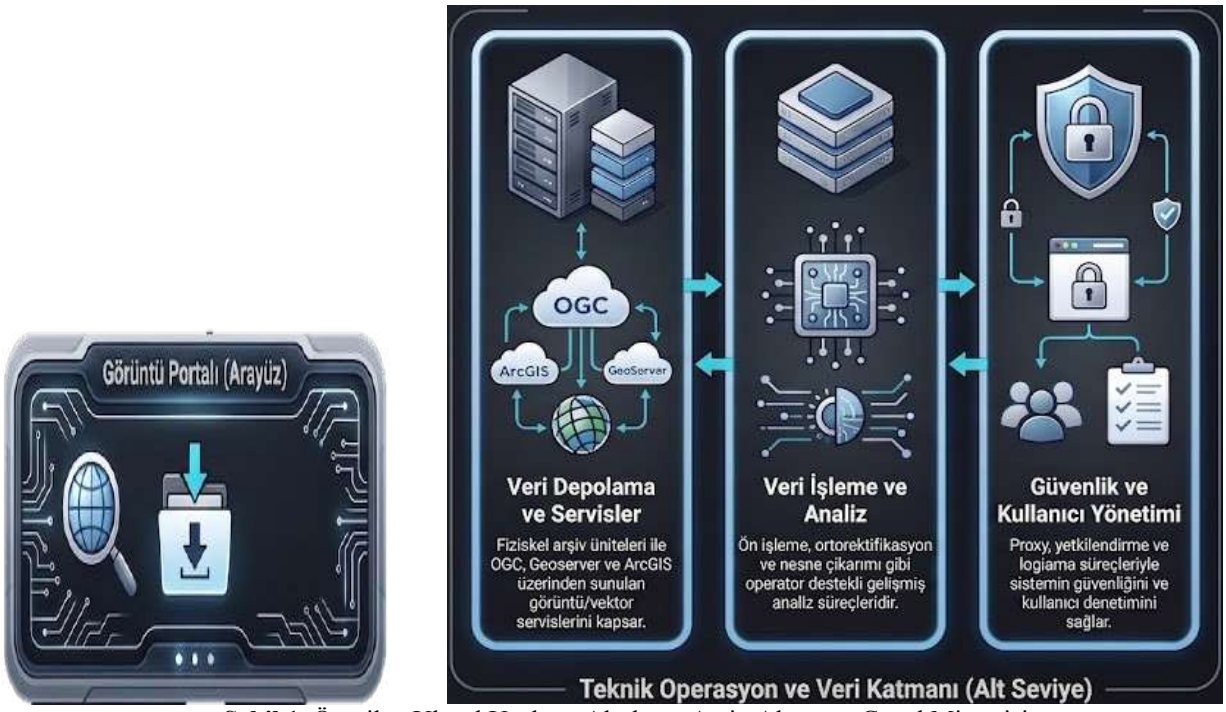
- Yüksek hacimli verilerin ölçeklenebilir depolama altyapısında yönetilmesi,
- Standart metaveri yapısının oluşturulması,
- Coğrafi sorgulama ve hızlı erişim mekanizmalarının sağlanması,
- OGC standartlarına uygun servis tabanlı veri paylaşımının gerçekleştirilmesi,
- TUCBS ile birlikte çalışabilirliğin sağlanması,
- Yapay zekâ tabanlı analizlerin desteklenmesi.

Bu gereksinimler doğrultusunda sistem mimarisi modüler bir yapı şeklinde tasarlanmıştır.

3.2 Önerilen Sistem Mimarisi

Önerilen Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı, farklı veri kaynaklarından elde edilen uzaktan algılama verilerinin ortak bir platform altında yönetilmesini sağlayan servis odaklı bir mimari olarak tasarlanmıştır. Sistem; veri depolama, metaveri yönetimi, coğrafi sorgulama, ön izleme, servis tabanlı veri paylaşımı ve analitik katmanlardan oluşmaktadır.

Bu mimarinin temel amacı yalnızca verilerin arşivlenmesi değil; aynı zamanda kullanıcıların ihtiyaç duyduğu verilere hızlı erişebilmesi, kurumlar arasında veri tekrarının önlenmesi ve analiz süreçlerinin desteklenmesidir.



Şekil 1. Önerilen Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı Genel Mimarisi

3.3 Veri Depolama Katmanı

Sistemin temel bileşenini yüksek hacimli uzaktan algılama verilerinin depolandığı veri katmanı oluşturmaktadır. Bu katmanda yalnızca ham uydu görüntüleri değil, işlenmiş ürünler ve analiz çıktıları da saklanmaktadır.

Depolama altyapısında aşağıdaki veri türlerinin birlikte yönetilmesi öngörülmektedir:

- Ham uydu görüntüleri,
- Ortorektifiye görüntüler,
- Mozaik görüntüler,
- Sayısal Yükseklik Modelleri (DEM/DSM),
- İHA görüntüleri,
- LiDAR nokta bulutları,
- Yapay zekâ analiz çıktıları.

Veri depolama mimarisinin büyük hacimli raster verileri destekleyen dağıtık depolama teknolojileri üzerine kurulması önerilmektedir. Böylece hem veri güvenliği hem de sistem ölçeklenebilirliği artırılmış olacaktır.

3.4 Metaveri Yönetimi

Uzaktan algılama verilerinin etkin, sürdürülebilir ve bütünleşik bir biçimde yönetilebilmesi için standartlaştırılmış bir metaveri yapısının oluşturulması kritik öneme sahiptir. Farklı uydu görevlerinden, sensörlerden ve kurumlardan elde edilen verilerin ortak bir metaveri modeli üzerinden tanımlanması; veri keşfi, sorgulama, paylaşım ve birlikte çalışabilirlik süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır.

Önerilen sistem kapsamında, her bir uzaktan algılama verisine ilişkin temel tanımlayıcı ve teknik bilgilerin standart bir metaveri yapısı içerisinde tutulması planlanmaktadır. Bu kapsamda;

- Veri kaynağı,
- Sensör tipi,
- Görüntü tarihi,
- Mekânsal çözünürlük,
- Koordinat sistemi,
- Bulutluluk oranı,
- Lisans ve kullanım bilgileri,
- Veri kalitesi,
- Veri üreticisi

gibi temel metaveri bileşenlerinin yanı sıra, ihtiyaç duyulması halinde veri işleme süreçlerine ve ürün özelliklerine ilişkin ilave teknik bilgilerin de sisteme dahil edilmesi öngörülmektedir.

Metaveri bilgilerinin uluslararası kabul görmüş standartlar ve birlikte çalışabilirlik ilkeleri doğrultusunda yapılandırılması sayesinde, farklı kurumlar tarafından üretilen ve kullanılan uzaktan algılama verilerinin ortak bir sistem içerisinde tanımlanması ve yönetilmesi mümkün olacaktır. Böylece kurumlar arası veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirlik artırılırken, kullanıcıların ihtiyaç duyduğu görüntülere yönelik sorgulama ve veri keşfi süreçleri de hızlandırılacaktır.

Bu yaklaşım, önerilen ulusal uydu görüntüsü platformunun yalnızca bir veri depolama ve arşivleme sistemi olarak değil, aynı zamanda farklı kurum ve veri kaynaklarını ortak standartlar altında bir araya getiren bütünleşik bir uzaktan algılama veri altyapısı olarak yapılandırılmasına katkı sağlayacaktır.

3.5 Coğrafi Sorgulama Altyapısı

Kullanıcıların ihtiyaç duydukları verilere hızlı erişebilmesi amacıyla sistemde gelişmiş coğrafi sorgulama mekanizmaları tasarlanmıştır.

Kullanıcıların;

- Harita üzerinden alan seçebilmesi,
- İl/ilçe bazlı sorgulama yapabilmesi,
- Tarih aralığı belirleyebilmesi,
- Sensör seçebilmesi,
- Bulutluluk oranına göre filtreleme yapabilmesi

Öngörülmekte olup, bu yapı sayesinde milyonlarca görüntü içerisinden ihtiyaç duyulan veri kısa sürede bulunabilecektir.

3.6 Görüntü Ön İzleme Servisi

Yüksek çözünürlüklü görüntülerin tamamının indirilmesi zaman ve bant genişliği açısından önemli maliyet oluşturmaktadır. Bu nedenle sistemde kullanıcıların görüntüyü indirmeden önce değerlendirebilmesine olanak sağlayan ön izleme mekanizması önerilmektedir.

Ön izleme servislerinde; RGB görüntü, düşük çözünürlüklü ön izleme, NDVI ve bulut maskesi gibi farklı gösterimlerin sunulması planlanmaktadır. Böylece kullanıcılar veri indirme kararı vermeden önce görüntünün uygunluğunu değerlendirebilecektir.

3.7 Veri İşleme ve Analiz

Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Sisteminin "Veri İşleme ve Analiz" bileşeni, ham görüntülerin standart ürünlere ve anlamlı bilgilere dönüştürüldüğü aşamadır. Bu süreç, operatör desteğiyle yürütülen dört temel ve ardışık işlemden

oluşur. Verilerin temel analize hazır hale getirilmesi için yapılan ilk düzenleme aşamasıdır. Görüntülerin yer yüzü koordinatlarıyla eşlenmesi ve geometrik bozuklukların giderilmesi işlemidir. Görüntü üzerindeki detayların belirlenmesi ve tematik kategorilere ayrılması sürecidir. Bölgenin yükseklik ve topografya bilgilerini içeren üç boyutlu modelin oluşturulmasıdır.



Şekil 2. Veri İşleme ve Analiz İş Akışı

3.8 Servis Tabanlı Veri Paylaşımı

Sistem, farklı kurumların aynı veri havuzundan yararlanmasını sağlayacak servis odaklı bir mimari üzerine kurulmuştur. Veri paylaşımında; WMS, WMTS, WFS, WCS, OGC API, STAC API gibi uluslararası standartların desteklenmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde farklı CBS yazılımları ve kurumsal bilgi sistemleri aynı veri kaynağına erişebilecek, veri tekrarının önüne geçilecek ve birlikte çalışabilirlik artırılacaktır.

3.9 Yapay Zekâ Destekli Analitik Katman

Önerilen mimarinin yenilikçi bileşenlerinden biri yapay zekâ destekli analiz modülüdür. Bu modül ile birlikte arşivde bulunan görüntüler üzerinde otomatik olarak;

- Değişim Analizi,
- Nesne Tespiti,
- Bina Çıkarımı,
- Arazi Kullanım Sınıflandırması,
- Tarımsal İzleme,
- Orman Yangını Analizi,
- Afet Hasar Değerlendirmesi,
- Kaçak Yapı Tespiti

gibi işlemler gerçekleştirilebilecektir.

Bu analizler hem karar destek süreçlerini hızlandıracak hem de kurumların manuel analiz yükünü azaltacaktır. Özellikle afet yönetimi, çevresel izleme ve mekânsal planlama çalışmalarında yapay zekâ tabanlı analizlerin önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

4. BEKLENEN FAYDALAR

4.1 Önerilen Mimariye İlişkin Bulgular

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı, Türkiye'de farklı kamu kurumları tarafından üretilen veya temin edilen uzaktan algılama verilerinin ortak bir platform altında yönetilmesini sağlayacak bütünleşik bir sistem modeli sunmaktadır. Önerilen mimari; veri depolama, metaveri yönetimi, coğrafi sorgulama, görüntü ön izleme, servis tabanlı veri paylaşımı ve yapay zekâ destekli analitik katmanlardan oluşmaktadır. Bu bileşenler, uluslararası iyi uygulama örnekleri dikkate alınarak tasarlanmış olup Türkiye'nin kurumsal ihtiyaçlarına uyarlanmıştır.

Mevcut durumda uzaktan algılama verilerinin farklı kurumlar tarafından bağımsız biçimde yönetilmesi; veri tekrarına, yüksek maliyetlere ve veri paylaşımında gecikmelere neden olmaktadır. Önerilen mimari, merkezi bir veri yönetim modeli ile bu sorunların azaltılmasını hedeflemektedir. Böylece aynı görüntünün farklı kurumlar tarafından tekrar temin edilmesinin önüne geçilmesi ve kamu kaynaklarının daha etkin kullanılması mümkün olacaktır.

Ayrıca sistemin modüler yapıda tasarlanması, yeni veri kaynaklarının (yüksek çözünürlüklü ticari uydu görüntüleri, hiperspektral sensörler veya yeni nesil İHA sistemleri gibi) ilerleyen dönemlerde mimariye kolaylıkla eklenebilmesine

olanak sağlamaktadır. Bu özellik, sistemin teknolojik gelişmelere uyum sağlayabilecek ölçeklenebilir bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

4.2 Kurumsal Katkılar

Söz konusu sistemin uygulanmasıyla birlikte, kamu kurumlarının uzaktan algılama verilerini yönetme biçiminde önemli değişiklikler beklenmektedir. Sistem sayesinde farklı kurumların aynı uydu görüntülerini mükerrer olarak satın almasının önüne geçilecek, bu durum kamu bütçesinde ciddi bir tasarruf sağlayacaktır. Ayrıca merkezi arşiv yapısı sayesinde geçmiş yıllara ait görüntülere erişim kolaylaşacak ve uzun dönemli çevresel değişim analizleri daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilecektir.

Çevresel izleme; su kaynaklarının takibi, kıyı alanlarının yönetimi, orman varlığının güncellenmesi, yangın sonrası hasar tespiti ve biyokütle tahmini gibi süreçlerde uzaktan algılama verilerinin düzenli ve sistematik olarak kullanıldığı başlıca alanlardan biridir.

TUCBS ile bütünleşik çalışacak servis tabanlı mimari sayesinde kurumlar arasında standart veri paylaşımı mümkün olacak, veri bütünlüğü korunacak ve farklı kurumlar aynı veri üzerinden eş zamanlı çalışabilecektir. Bu altyapı; mekânsal planlama, çevresel izleme, tarım ve su yönetimi gibi birçok sektörde karar destek süreçlerini önemli ölçüde güçlendirecektir.

4.3 Afet Yönetimine Katkıları

Afet yönetimi, uzaktan algılama verilerinin en kritik kullanım alanlarından biridir. Deprem, sel, heyelan, orman yangını ve benzeri afetlerde olay öncesi risk analizi, afet anında durum tespiti ve afet sonrası hasar değerlendirme çalışmalarında uydu görüntüleri, hava fotoğrafları ve İHA verileri birlikte kullanılmaktadır. Anket bulgularında, afet anlarında güncel ve güvenilir görüntüye hızlı erişimin büyük önem taşıdığı, veri paylaşım süreçleri nedeniyle zaman zaman gecikmeler yaşandığı ifade edilmiştir. Kısacası Türkiye'nin deprem, sel, heyelan, orman yangını ve çığ gibi doğal afetlere maruz kalan bir ülke olması nedeniyle güncel uzaktan algılama verilerine hızlı erişim büyük önem taşımaktadır.

Bahsedildiği üzere mevcut durumda farklı kurumlarda bulunan görüntülerin temini ve paylaşımı zaman alabilmektedir. Önerilen sistem sayesinde; afet öncesi referans görüntüler, afet anı görüntüleri, afet sonrası değişim analizleri tek platform üzerinden yönetilebilecektir. Bu durum; hasar tespiti, müdahale planlaması, yeniden yapılaşma, risk analizi çalışmalarının daha kısa sürede tamamlanmasına katkı sağlayacaktır.

Ayrıca yapay zekâ destekli analiz modülleri sayesinde bina hasarı, yol kapanmaları, taşkın alanları ve orman yangını sınırları gibi bilgilerin otomatik olarak üretilebilmesi mümkün olacaktır.

4.4 Yapay Zekâ Entegrasyonunun Sağlayacağı Kazanımlar

Günümüzde uzaktan algılama verilerinin miktarı klasik görüntü yorumlama yöntemleriyle analiz edilemeyecek düzeye ulaşmıştır. Bu nedenle önerilen mimaride yapay zekâ destekli analiz katmanının sistemin temel bileşenlerinden biri olarak tasarlanması önemli bir yenilik olarak değerlendirilmektedir.

Öğrenme tabanlı algoritmalar kullanılarak; otomatik bina çıkarımı, arazi kullanım sınıflandırması, tarımsal ürün takibi, değişim analizi, orman yangını tespiti ve kaçak yapı belirleme gibi uzaktan algılama uygulamalarının büyük ölçüde otomatikleştirilmesi mümkün olacaktır. Bunun sonucunda hem analiz süreleri azalacak hem de insan kaynaklı yorum farklılıklarının önüne geçilecektir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uzaktan algılama teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, insansız hava aracı (İHA) verileri, LİDAR ölçüleri ve yapay zekâ tabanlı analizlerin kamu kurumları tarafından daha yoğun kullanılmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, veri hacmindeki sürekli artış; yalnızca depolama kapasitesinin artırılmasını değil, verilerin standartlara uygun biçimde yönetilmesini, güvenli olarak paylaşılmasını ve sürdürülebilir bir altyapı içerisinde işletilmesini de zorunlu hâle getirmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'de kamu kurumlarının uzaktan algılama verilerine yönelik mevcut ihtiyaçları dikkate alınarak Ulusal Uzaktan Algılama Arşiv Altyapısı için kavramsal bir sistem modeli önerilmiştir. Proje hedefleri doğrultusunda geliştirilen bu model; düzenli görüntü temini, merkezi arşivleme ve verilerin TUCBS çatısı altında paylaşılması yaklaşımını esas almaktadır. Önerilen mimari sayesinde farklı veri sağlayıcılarından elde edilen uydu görüntüleri, hava fotoğrafları, İHA verileri ve diğer uzaktan algılama ürünlerinin ortak bir platform altında yönetilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca farklı kurumların aynı veri havuzundan güvenli ve standart biçimde yararlanabilmesi mümkün olacaktır. TUCBS ile bütünleşik çalışması, ulusal kamu kurumlarının ihtiyaçlarına göre tasarlanması, İHA ve LİDAR verilerini aynı platformda yönetebilmesi ve yapay zekâ destekli analizleri sistem mimarisine entegre etmesi bakımından Türkiye'ye özgü bir çözüm sunmaktadır.

Önerilen altyapının hayata geçirilmesiyle birlikte;

- Kamu kurumları arasında mükerrer veri temininin azaltılması,
- Uydu görüntülerine erişim sürelerinin kısaltılması,
- Afet ve acil durumlarda güncel verilere hızlı erişim sağlanması,
- Çevresel izleme ve doğal kaynak yönetiminin güçlendirilmesi,
- Mekânsal planlama çalışmalarında karar destek süreçlerinin hızlandırılması,
- Kamu kaynaklarının daha verimli kullanılması,
- Ulusal ölçekte sürdürülebilir bir uzaktan algılama veri ekosisteminin oluşturulması gibi önemli kazanımlar elde edilmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, Türkiye'de uzaktan algılama verilerinin yalnızca depolanmasını değil; üretilmesi, yönetilmesi, paylaşılması ve analiz edilmesini kapsayan bütünleşik bir ulusal altyapı modeli önermektedir. Geliştirilen mimarinin, uluslararası standartlarla uyumlu, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir yapıda olması; ülkemizin coğrafi bilgi yönetimi kapasitesinin artırılmasına, afet yönetimi ve çevresel izleme süreçlerinin güçlendirilmesine ve kamu kurumları arasında etkin veri paylaşımının sağlanmasına önemli katkılar sunacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

URL-1 https://tucbs.gov.tr/wp-content/uploads/2025/10/Ulusal-Uzaktan-Algilama-Verilerinin-Entegre-Yonetimi-Stratejisi [Erişim tarihi: 10.07.2026].

URL-2 https://www.csb.gov.tr/turkce/index.php [Erişim tarihi: 10.07.2026].

URL-3 https://www.esa.int/About_Us/ESTEC/European_Space_Research_and_Technology_Centre_ESTEC2 [Erişim tarihi: 15.07.2026].

URL-4 https://dataspace.copernicus.eu/ecosystem/services [Erişim tarihi: 15.07.2026].

URL-5 https://www.earthdata.nasa.gov/ [Erişim tarihi: 11.07.2026].

URL-6 https://earthexplorer.usgs.gov/ [Erişim tarihi: 10.07.2026].

URL-7 https://ucbp.tucbs.gov.tr/metaveri-arama [Erişim tarihi: 10.07.2026].

TÜRKİYE ULUSAL GÖZLEMEVLERİNİN ERZURUM MERKEZ YERLEŞKESİNDE SP02-L GÜNEŞ FOTOMETRESİNİN KALİBRASYONU VE AEROSOL OPTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Fethullah POLAT[1], İsmail Hakkı GÖKGÖZ[2], Kazım KABA[3], Cahit YEŞİLYAPRAK[4,5]

[1]YL Ögr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, fethullah.polat24@ogr.atauni.edu.tr
[2]Tknr., Türkiye Ulusal Gözlemevleri, DAG, 25240, Yakutiye, Erzurum, hakkig@trgozlemevleri.gov.tr
[3]Dr.Öğr.Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, kazimkaba@atauni.edu.tr
[4]Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, cahity@atauni.edu.tr
[5]Türkiye Ulusal Gözlemevleri, DAG, 25240, Yakutiye, Erzurum, cahity@atauni.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) yüksek rakımlı istasyonuna (~3170 m) kurulması planlanan SP02-L güneş fotometresinin, kurulum öncesi kalibrasyon katsayılarını belirlemek ve donanımsal kararlılığını test etmek amacıyla yürütülen yer tabanlı ön ölçümler sunulmuştur. Ölçümler, Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum Merkez Yerleşkesinde (~1892 m), 21 Şubat 2026 tarihinde, yerel saatle 08:08-11:05 arasında (hava kütlesi 2≤m≤6) gerçekleştirilmiştir. Cihazın dört spektral kanalı (CH1:413 nm, CH2:500 nm, CH3:676 nm ve CH4:860 nm) için yapılan Langley Grafik analizlerinde, geliştirilen iteratif 2σ-kırpma algoritması bulutlu pikselleri başarıyla elemiş ve son derece yüksek belirlilik katsayıları (R_{413}^2=0.9967, R_{500}^2=0.9933, R_{676}^2==0.9869, R_{860}^2=0.9781) ile dünya dışı kalibrasyon sabitleri (V_{0_413}=3.6548 V, V_{0_500}=4.2042 V, V_{0_676}=3.9122 V, V_{0_860}=2.4319 V) saptanmıştır. Toplam optik derinlikten yerel basınç (~808.64 hPa) bazlı Rayleigh saçılması ve 300 DU Chappuis bandı ozon soğurması arındırılarak spektral AOD değerleri (AOD_{413} =0.1232, AOD_{500}=0.1111, AOD_{676}=0.1006, AOD_{860}=0.0973) elde edilmiştir. Angstrom güç yasası fitinden genel Angstrom üsteli α≈0.32 ve bulanıklık katsayısı β≈0.10 hesaplanmıştır. Spektral eğrilik analizinde ($\alpha_{413-500}$≈0.53, $\alpha_{500-860}$≈0.18, Δα≈+0.35) elde edilen pozitif değerler, ölçüm sırasında ince modlu kentsel kirlilik ile kaba modlu tozların bir arada bulunduğu çift modlu bir aerosol yapısını kanıtlamıştır. Ayrıca, optik astronomi gözlemleri için türetilen anlık sönümlenme katsayıları (k_{413}≈0.40, k_{500}≈0.26 mag/airmass), yerleşkenin kentsel sönümlenme referansını oluşturmuştur. Sonuçlar, SP02-L fotometresinin yüksek radyometrik hassasiyetini doğrulamakta ve DAG zirvesinde yapılacak temiz gökyüzü ölçümleri için güçlü bir yöntem altyapısı sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Aerosol optik derinlik, Langley kalibrasyonu, sönümleme katsayıları, SP02-L, Türkiye Ulusal Gözlemevleri.

ABSTRACT

CALIBRATION AND DETERMINATION OF AEROSOL OPTICAL PROPERTIES OF THE SP02-L SUN PHOTOMETER AT THE ERZURUM CENTRAL SITE OF THE TÜRKIYE NATIONAL OBSERVATORIES

In this study, ground-based pre-installation measurements, conducted to determine the calibration constants and test the hardware stability of the SP02-L sun photometer planned to be installed at the high-altitude station of the Eastern Anatolia Observatory (DAG, ~3170 m), are presented. The measurements were carried out at the Erzurum Central Site of the Türkiye National Observatories (~1892 m) on February 21, 2026, between 08:08 and 11:05 local time (air mass range 2≤m≤6). In the Langley Plot analyses performed for the four spectral channels of the device (CH1: 413 nm, CH2: 500 nm, CH3: 676 nm, and CH4: 860 nm), the developed iterative 2σ-clipping algorithm successfully eliminated cloud-contaminated pixels, yielding exceptionally high coefficients of determination (R_{413}^2=0.9967, R_{500}^2=0.9933, R_{676}^2==0.9869, R_{860}^2=0.9781) and extraterrestrial calibration constants (V_{0_413}=3.6548 V, V_{0_500}=4.2042 V, V_{0_676}=3.9122 V, V_{0_860}=2.4319 V). By subtracting local pressure-based (~808.64 hPa) Rayleigh scattering and 300 DU Chappuis band ozone absorption from the total optical depth, spectral AOD values (AOD_{413} =0.1232, AOD_{500}=0.1111, AOD_{676}=0.1006, AOD_{860}=0.0973) were retrieved. From the Angstrom power-law fit, the overall Angstrom exponent was calculated as α≈0.32 and the turbidity coefficient as β≈0.10. Positive values obtained in the spectral curvature analysis ($\alpha_{413-500}$≈0.53, $\alpha_{500-860}$≈0.18, Δα≈+0.35) proved a bimodal aerosol mixture consisting of fine-mode urban pollution and coarse-mode dust during the measurement period. Furthermore, the instantaneous extinction coefficients derived for optical astronomy observations (k_{413}≈0.40, k_{500}≈0.26 mag/airmass) established the urban extinction baseline of the site. The results validate the high radiometric sensitivity of the SP02-L photometer and provide a robust methodological framework for future pristine-sky measurements at the DAG site.

Keywords: Aerosol optical depth, Langley calibration, extinction coefficients, SP02-L, Türkiye National Observatories.

1.GİRİŞ

Atmosferik aerosoller havada asılı kalabilen, katı veya sıvı formda bulunan mikroskobik partiküllerdir. Bu parçacıklar, bulut yoğuşma çekirdeği işlevi görerek bulut mikrofiziğini düzenlemenin yanı sıra; hava kalitesinde düşüşe, insanlarda solunum rahatsızlıklarına ve astronomik gözlemlerde sönümlenmeye yol açarak çevre, sağlık ve iklim alanlarında çok yönlü etkilere neden olmaktadır (Lohmann & Feichter, 2005; Pöschl, 2005). Bu karmaşık etkilerin anlaşılabilmesi ve iklim modellerindeki belirsizliklerin azaltılabilmesi, aerosol miktarının zamansal ve mekânsal olarak sürekli izlenmesini zorunlu kılmaktadır.

Aerosollerin atmosferik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en güvenilir ve yaygın yöntemlerden biri yer tabanlı güneş radyasyonu ölçümleridir. Bu doğrultuda geliştirilen güneş fotometreleri, atmosferin aerosol optik kalınlığını (AOD - Aerosol Optical Depth) ve Angstrom katsayısını yüksek doğrulukla elde etmeye olanak tanır. Langley grafik yöntemi, monokromatik ışınımın atmosferdeki zayıflamasını tanımlayan Beer-Lambert-Bouguer yasasını temel alarak ardışık ölçümlerden yararlanan matematiksel bir yaklaşımdır (Holben vd., 1998). Bu cihazların hassas ölçümler yapabilmesi, düzenli aralıklarla yapılan kalibrasyon çalışmalarına bağlıdır.

Bu çalışmada, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) yüksek rakım istasyonuna (~3170 m) kurulması planlanan SP02-L güneş fotometresinin, kurulum öncesinde Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum Merkez Yerleşkesinde (~1892 m) kalibrasyon katsayılarının belirlenmesi ve bölgesel aerosol optik özelliklerinin karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen veriler, cihazın donanımsal kararlılığını test etmenin yanı sıra DAG yerleşkesindeki temiz atmosfer ölçümleri için referans bir kentsel temel oluşturmaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve Atmosferik Koşullar

Bu çalışmanın yer tabanlı ön ölçümleri, Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum Merkez Yerleşkesinde gerçekleştirilmiştir (Enlem: 39.897621^0 K, Boylam: 41.250219^0 D, Rakım: 1892 m). Ölçüm konumu, Erzurum şehir merkezinin (Yakutiye) kentsel ve yarı-kentsel sınır tabakası içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). Ölçümlerin yapıldığı kış döneminde (21 Şubat 2026) Erzurum kentsel havzası; topoğrafik çanak yapısı nedeniyle sıcaklık enverziyonu, yerel ısınma emisyonları ve taşıt trafiğine bağlı aerosol birikimleri gerçekleştirmektedir. Bu kentsel sınır tabaka özellikleri, cihazın kentsel arka plan ve yüksek aerosol yükü altındaki performansını test etmek için ideal bir laboratuvar sunmaktadır. Bu sahada elde edilen veriler, Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum DAG Yerleşkesinde ölçülecek olan kararlı ve temiz atmosfer koşullarıyla karşılaştırmak üzere referans bir kentsel temel oluşturmaktadır.



Şekil 1. Atmosferik aerosol ölçüm sahası (https://trgozlemevleri.gov.tr/photos/campus/erzurum-merkez/erzurum-merkez-ulasim.png)

2.2. SP02-L Güneş Fotometresi

Atmosferik aerosol ölçümleri, doğrudan güneş radyasyonunu izleyen kararlı bir güneş takip mekanizmasına sahip SP02-L güneş fotometresi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Cihaz, atmosferik sönümlenmeyi karakterize etmek için spektral olarak optimize edilmiş dört bağımsız kanala sahiptir: CH1 (413 nm), CH2 (500 nm), CH3 (676 nm) ve CH4 (860 nm). Cihazın doğrudan güneş ışınımına bağlı olarak ürettiği voltaj çıktıları, her saniye yüksek çözünürlüklü olarak kaydedilmiş ve analizlerde bu voltaj değerleri temel veri girdisi olarak kullanılmıştır.




Şekil 2. Atmosferik aerosol ölçümlerinde kullanılan SP02-L güneş fotometresi

2.3. Langley Grafik Yöntemi

Langley yöntemi, yeryüzünden yapılan doğrudan güneş radyasyonu ölçümleriyle atmosfer dışı kalibrasyon sabitini (V_0) belirleyen fiziksel esasa dayalı bir metottur. Yöntem, Beer-Lambert-Bouguer kanununa dayanır (Eşitlik 1). Eşitlik 1'de, $I(\lambda)$ yeryüzünde ölçülen monokromatik güneş ışınımını, $I_0(\lambda)$ atmosfer dışındaki (dünya dışı) güneş ışınımını, m göreli optik hava kütlesini ve $\tau_{toplam}(\lambda)$ toplam atmosferik optik derinliği temsil etmektedir.

Güneş fotometresinin ürettiği elektrik voltajı (V), algıladığı güneş ışınımı (I) ile doğrudan orantılı olduğundan, denklem voltaj cinsinden yeniden yazılabilir (Eşitlik 2). Eşitlik 2'de, $V_0(\lambda)$, cihazın atmosfer dışı kalibrasyon sabitidir. Bu üstel ifadenin doğal logaritması alınarak elde edilen Eşitlik (3) bağıntısı, doğrusal bir regresyon modeli ($y = ax+b$) oluşturur. Farklı hava kütlelerinde ölçülen *ln(V)* değerlerinin *m* değerlerine karşılık grafiğe aktarılması ve *m=0* noktasına ekstrapole edilmesiyle kalibrasyon sabiti hesaplanır.

Güneş zenit açısına bağlı olarak değişen göreli optik hava kütlesi (m), atmosferik kırılma ve eğrilik etkilerini hesaba katan Kasten-Young (1989) formülüyle hesaplanmıştır (Eşitlik 4). Eşitlik 4'te θ_z, derece cinsinden güneş zenit açısıdır. Güneş zenit açısı, ölçümün yapıldığı istasyonun enlem, boylam ve rakım bilgileri ile UTC zaman damgası kullanılarak, gök mekaniği algoritmaları barındıran PyEphem kütüphanesiyle hesaplanmıştır. Regresyon kararlılığını sağlamak amacıyla literatüre uygun olarak $2 \le m \le 6$ hava kütlesi aralığı sınır şartı olarak uygulanmıştır.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-m\tau_{toplam}(\lambda)} \tag{1}$$

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) e^{-m\tau_{toplam}(\lambda)} \tag{2}$$

$$\ln[V(\lambda)] = \ln[V_0(\lambda)] - m\tau_{toplam}(\lambda) \tag{3}$$

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z + 0.50572 * (96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}} \tag{4}$$

2.4. Bulut Filtreleme Algoritması

Doğal atmosfer koşullarında, gökyüzünden geçen ince bulut tabakaları doğrudan güneş ışınımını anlık olarak bloke ederek voltajda ani düşüşlere ve Langley doğrusal fiti üzerinde gürültülere yol açar. Bu gürültülü verileri otomatik olarak temizlemek amacıyla kod içerisinde 5 adımlı iteratif sigma-kırpma algoritması çalıştırılmıştır. Filtrelenmemiş ham veriler üzerinde ilk doğrusal regresyon analizi yapılır ve geçici bir fit doğrusu çizilir. Her bir veri noktasının bu fit doğrusuna olan dikey uzaklığı (artık değerler) hesaplanır. Artık değerlerin standart sapması (σ) hesaplanır. Fit doğrusuna olan dikey uzaklığı 2σ sınırının dışında kalan tüm aykırı noktalar (bulut geçişleri) "gürültü" olarak etiketlenip veri kümesinden elenir. Kalan temiz verilerle doğrusal regresyon yeniden kurulur. Bu döngü ardışık olarak 5 kez tekrarlanarak sadece açık gökyüzü piksellerinin kalması sağlanır.

2.5. Aerosol Optik Derinliğinin (AOD) Fiziksel Olarak Ayrıştırılması

Doğrunun eğiminden elde edilen toplam optik derinlik $\tau_{toplam}(\lambda)$, atmosferdeki tüm sönümleme süreçlerinin (moleküller saçılma ile gaz ve aerosol saçılma ve soğurmalarının) birleşik etkisidir. Net aerosol sönümlemesini $AOD(\lambda)$ bulabilmek için toplam sönümleme derinliğinden Rayleigh saçılması ($\tau_{Ralyeigh}(\lambda)$) ve Ozon soğurması ($\tau_{Ozon}(\lambda)$) çıkarılmıştır (Eşitlik 5). Hava moleküllerinin neden olduğu Rayleigh saçılması, istasyonun yerel atmosferik

basıncına doğrudan bağlıdır. Erzurum Hizmet Binası'nın rakımı (H=1892 m) dikkate alınarak, standart yer seviyesi basıncından (P=1013.25 hPa) yerel basınç (P) Eşitlik 6'daki hidrostatik formülle türetilmiştir. Hesaplanan bu yerel basınç üzerinden, her dalga boyuna özel molekül başına saçılma kesiti ($\tau_{Rstd}(\lambda)$) Eşitlik 7 ve Rayleigh optik derinliği ($\tau_{Ralyeigh}(\lambda)$) Eşitlik 8 , Bodhaine vd. (1999) formülasyonu ile hesaplanır. Eşitlik 8'de, σ molekül başına saçılma kesiti, A Avogadro sayısını, m_a kuru havanın ortalama moleküler ağırlığını ve g lokal yerçekimi ivmesini temsil etmektedir (Bodhaine vd., 1999).

Atmosferdeki ozon gazının güneş ışınlarını soğurma gücü, dalga boyuna ve atmosferdeki toplam ozon miktarına bağlıdır. Eşitlik (9)'de sunulan fiziksel model, bu sönümleme miktarını iki temel parametrenin çarpımı olarak hesaplar. Ozon soğurma katsayısı ($\alpha_{Ozon}(\lambda)$) ozon gazının, birim kalınlıkta ve standart sıcaklık-basınç koşullarında, belirli bir dalga boyundaki ışığı soğurma kabiliyetini gösteren katsayıdır. Birimi atm-cm^{-1}'dir. SP02-L fotometresinin kanalları için Serdyuchenko vd. (2014) çalışmasından elde edilen tesir kesitleriyle Loschmidt sabiti çarpılarak sırasıyla, CH1 (413 nm) ve CH4 (860) için sıfır (soğurma yok) ve CH2 (500 nm) ve CH3 (676 nm) için 0.030 atm-cm^{-1} ve 0.043 atm-cm^{-1} ozon soğurma katsayıları kullanılmıştır. Toplam ozon ($Ozon_{kolon}$) ölçüm yapılan istasyonun tam üzerindeki dikey atmosfer sütununda bulunan toplam ozon gazı miktarıdır. Meteorolojide ve atmosfer bilimlerinde ozon miktarı standart olarak Dobson Birimi (DU) ile ifade edilir. Ancak, denklemin fiziksel olarak çözülebilmesi ve birimlerin sadeleşebilmesi için Dobson Birimi, "atm-cm" (atmosfer-santimetre) birimine dönüştürülmelidir (1 DU = 0.001 atm-cm, orta enlemler için standart kabul edilen toplam ozon yükü 300 DU = 0.3 atm-cm). Atmosferik ozon tabakasının görünür spektrumdaki soğurma etkisi, standart 300 Dobson (0.3 atm-cm) toplam ozon yükü ve her kanala özel soğurma katsayıları çarpılarak hesaplanmıştır. Bu fiziksel arındırma adımlarının ardından, her spektral kanala ait AOD değerleri elde edilmiştir.

$$AOD(\lambda) = \tau_{toplam}(\lambda) - \tau_{Ralyeigh}(\lambda) - \tau_{Ozon}(\lambda) \tag{5}$$

$$P = P_0\left(1 - 2.25577 * 10^{-5} * H\right)^{5.25588} \approx 808.64 \ \ hPa \tag{6}$$

$$\sigma\left(x\,10^{-28}\,c\,m^2\right) = \frac{1.0455996 - 341.29061\,\lambda^{-2} - 0.90230850\,\lambda^{2}}{1 + 0.0027059889\,\lambda^{-2} - 85.968563\,\lambda^{2}} \tag{7}$$

$$\tau_R(\lambda) = \sigma\,\frac{PA}{m_a\,g} \tag{8}$$

$$\tau_{Ozon}(\lambda) = \alpha_{Ozon}(\lambda) * Ozon_{kolon} \tag{9}$$

2.6. Angstrom Parametrelerinin Matematiksel ve Fiziksel Temeli

AOD dalga boyuna göre değişimi, parçacık boyutu ve yapısı hakkında doğrudan bilgi sağlar. Bu ilişki, Angstrom (1929) tarafından geliştirilen Angstrom Güç Yasası ile ifade edilir (Eşitlik 10). Eşitlikte; $\tau_a(\lambda)$ seçilen dalga boyundaki (λ) AOD ($AOD(\lambda)$), λ mikrometre (μm) cinsinden dalga boyunu, α parçacık boyutuna duyarlı olan boyutsuz Angstrom Katsayısını (Angstrom Exponent) ve β ise atmosferik aerosol miktarını temsil eden Angstrom Bulanıklık Katsayısını (Turbidity Coefficient) ifade etmektedir. Eşitlik (10)'daki üstel ifadenin doğal logaritması alınarak doğrusal bir modele (Eşitlik 11) dönüştürülmesiyle, en küçük kareler regresyon yöntemiyle α (Angström katsayısı) ve β (bulanıklık katsayısı) türetilir. Ayrıca aerosol boyut dağılımının spektral eğriliğini ve çift modlu yapısını karakterize etmek amacıyla, farklı dalga boyu kombinasyonları üzerinden dalga boyu çifti bazlı Angstrom katsayıları (Eşitlik 12) hesaplanmıştır.

$$\tau_a(\lambda) = \beta * \lambda^{-\alpha} \tag{10}$$

$$\ln\left[\tau_a(\lambda)\right] = \ln[\beta] - \alpha * \ln(\lambda) \tag{11}$$

$$\alpha_{\lambda_1-\lambda_2} = -\frac{\ln\left[\tau_\alpha(\lambda_1)/\tau_\alpha(\lambda_2)\right]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \tag{12}$$

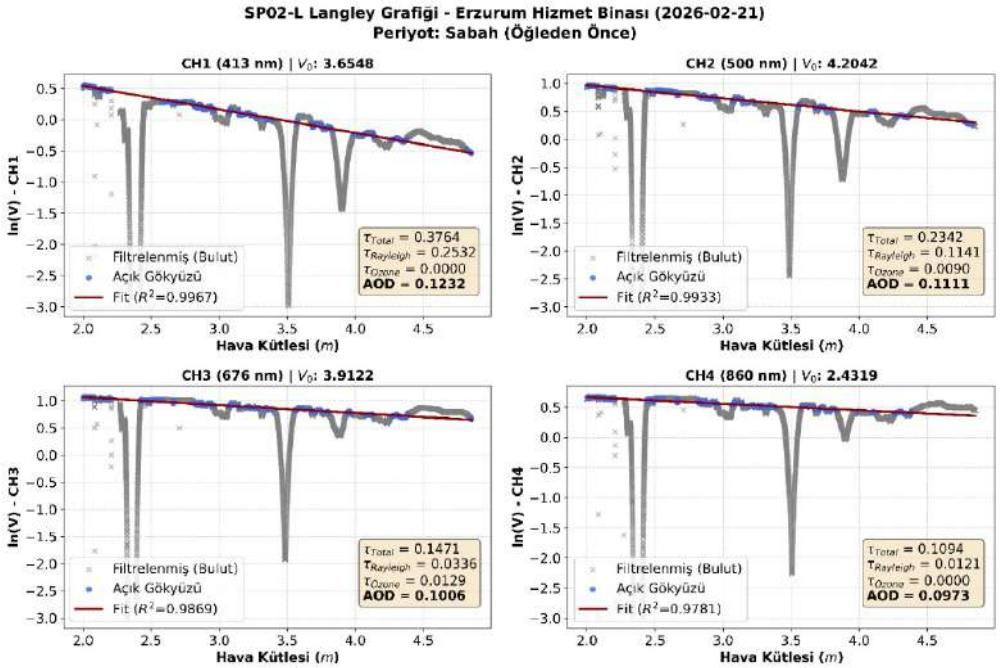
Angstrom katsayısı (α), aerosol sönümlenmesinin spektral seçiciliğini gösteren ve parçacık boyutuyla ters orantılı olan boyutsuz bir parametredir. Yüksek α değerleri, yarıçapı r < 0.5 μm olan kurum ve egzoz gibi ince modlu

parçacıkların kısa dalga boylarındaki güçlü sönümlemesini; sıfıra yakın düşük α değerleri ise r > 1.0 μm olan mineral toz ve deniz tuzu gibi kaba parçacıkların dalga boyundan bağımsız (seçici olmayan) sönümlemesini ifade eder. Bu çalışmada sınır tabaka spektral eğriliğini tanımlamak için dört farklı dalga boyu çifti (α413-500, α413-676, α413-860, α500-860) modellenmiştir. Mavi/yeşil bölgesine odaklanan α413-500 katsayısı ince modlu antropojenik kirliliğe duyarlıyken, yeşil/yakın-kızılötesi bölgesini kapsayan α500-860 katsayısı kaba modlu mineral ve yol tozlarına hassastır. Bu çiftlerin karşılaştırılması, atmosferdeki aerosollerin homojen mi yoksa kentsel kirlilik ile kaba tozun oluşturduğu çift modlu bir karışım mı olduğunu ortaya koymaktadır. β, 1 μm dalga boyundaki net AOD'yi temsil ederek atmosferdeki toplam aerosol yükünü ve optik geçirgenliği gösterir. Düşük β değerleri temiz ve berrak gökyüzünü, orta düzey değerler hafif puslu koşulları, yüksek β değerleri ise kentsel kirlilik veya toz taşınımı kaynaklı düşük optik geçirgenliğe sahip bulanık atmosferik koşulları temsil etmektedir.

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

3.1. Langley Regresyon Başarımı

Şekil 3 ve Tablo 1'de sunulan spektral Langley grafikleri ve hesaplamalar incelendiğinde, geliştirilen iteratif 2σ-kırpma algoritmasının, kış atmosferindeki bulut gürültülerini temizlemedeki başarısı net bir şekilde izlenebilmektedir. Özellikle hava kütlesinin 2.3≤m≤2.5 ve 3.4≤m≤3.6 olduğu zaman aralıklarında, doğrudan güneş radyasyonunu anlık olarak kesen parçalı bulut geçişleri, voltajda aşağı doğru çok keskin sönümlemeler (gri x işaretleri) oluşturmuştur. Algoritma bu gürültülü pikselleri başarılı bir şekilde izole etmiş ve sadece açık gökyüzünü temsil eden kararlı pikseller (mavi noktalar) üzerinden regresyon doğrularını çizmiştir. Filtreleme sonucunda elde edilen belirlilik katsayıları (R^2); en kısa dalga boyu olan CH1 (413 nm) kanalında 0.9967, CH2 (500 nm) kanalında 0.9933, CH3 (676 nm) kanalında 0.9869 ve en uzun dalga boyu olan CH4 (860 nm) kanalında 0.9781 gibi son derece yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu yüksek R^2 değerleri, 21 Şubat 2026 öğleden önceki ölçüm periyodunda saha semalarındaki atmosferik homojenliğin ve kararlılığın mükemmele yakın olduğunu ve yapılan Langley kalibrasyonunun radyometrik açıdan yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Her kanala ait dünya dışı kalibrasyon voltaj sabitleri (V_0); sırasıyla 3.6548 V, 4.2042 V, 3.9122 V ve 2.4319 V olarak yüksek hassasiyetle saptanmıştır.



Şekil 3. 21 Şubat 2026 tarihli sabah ölçümlerinden elde edilen SP02-L spektral Langley grafikleri ve optik derinlik bileşenlerinin fiziksel ayrışım analizleri. (Mavi noktalar 2σ-kırpma filtresinden geçen açık gökyüzü verilerini, gri x işaretleri elenen bulut geçişlerini, düz kırmızı çizgiler ise doğrusal regresyon fitlerini temsil etmektedir.)

Tablo 1. 21 Şubat 2026 tarihli ön ölçümlerden Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum yerleşkesinde SP02-L güneş fotometresi spektral kanalları için hesaplanan Langley kalibrasyon sabitleri (V_0), doğrusal fit belirlilik katsayıları (R^2) ve elde edilen ortalama AOD değerleri.

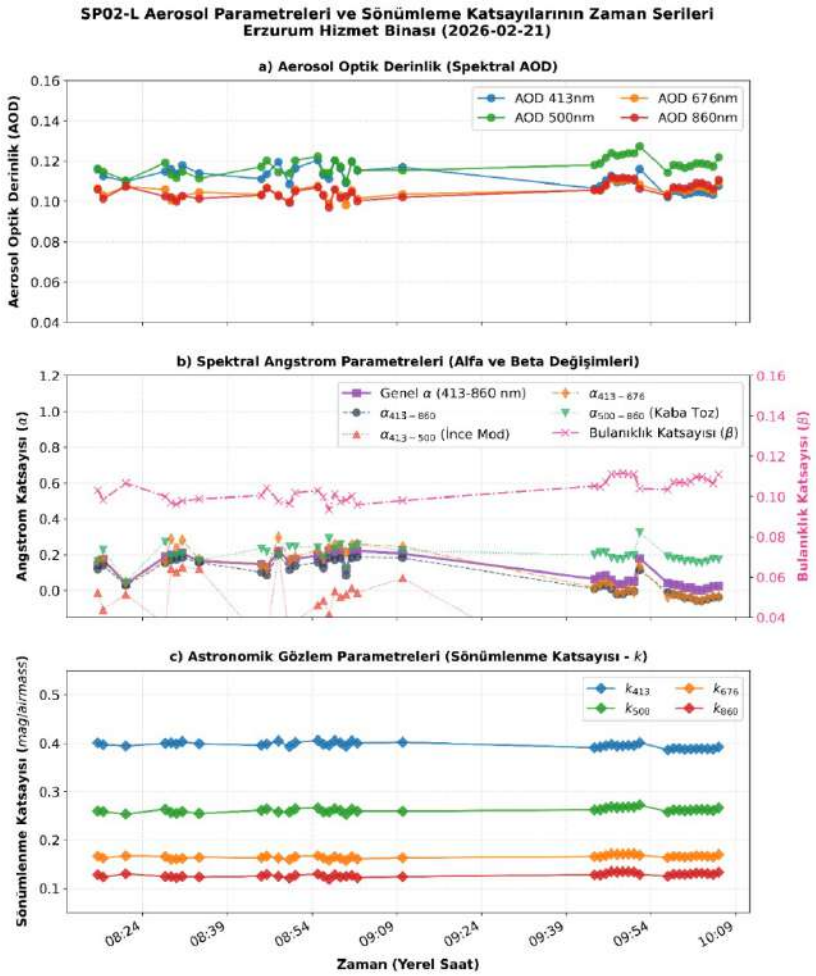
Kanal	V_0	R^2	AOD
CH1: 413 nm	3.6548	0.9967	0.1232
CH2: 500 nm	4.2042	0.9933	0.1111
CH3: 676 nm	3.9122	0.9869	0.1006
CH4: 860 nm	2.4319	0.9781	0.0973

3.2. Spektral Sönümlenme ve Fiziksel Bileşenlerin Dağılımı

Doğrusal fitlerin eğiminden elde edilen toplam sönümlenme (τ_{toplam}) değerleri dalga boyu arttıkça beklendiği üzere azalmaktadır ($\tau_{toplam(413\ nm)}$=0.3764, ve $\tau_{toplam(860\ nm)}$=0.1094). Bu toplam sönümlenmenin fiziksel bileşenlerine ayrıştırılması, Ölçüm sahasının 1892 m rakımındaki moleküler atmosfer yapısını doğrulamaktadır. Moleküler Rayleigh saçılması ($\tau_{Ralyeigh}$), en kısa dalga boyunda (413 nm) 0.2532 değeriyle toplam sönümlenmenin %67.27'sini oluştururken, en uzun dalga boyunda (860 nm) 0.0121 değeriyle toplam sönümlenmenin sadece %11.06'sını oluşturmaktadır. Bu durum, Rayleigh saçılmasının dalga boyunun dördüncü kuvvetiyle ters orantılı (λ^{-4}) değiştiği fiziksel yasayı tam olarak doğrulamaktadır. CH2 (500 nm) kanalında τ_{Ozon}=0.0090 ve CH3 (676 nm) kanalında τ_{Ozon}=0.0129 düzeyinde hafif bir ozon soğurması saptanırken, ozonun soğurma yapmadığı CH1 ve CH4 kanallarında bu değer sıfır (0.0000) çıkmıştır. Yapılan oran analizine göre, ozon soğurmasının toplam atmosferik sönümlenme içindeki yüzdesel payı; CH2 (500 nm) kanalında %3.84, CH3 (676 nm) kanalında ise %8.77 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, görünür ışık spektrumunda aktif olan soğurma bandının kırmızı dalga boyuna doğru (CH3: 676 nm) gidildikçe şiddetlendiğini fiziksel ve nicel olarak doğrulamaktadır.

3.3. Aerosol Parametreleri ve Astronomik Sönümleme Katsayılarının Zaman Serileri

21 Şubat 2026 tarihli ön ölçümlere ait 1 dakikalık ortalama spektral AOD, Angstrom parametreleri (α, β) ve astronomik sönümlenme katsayıları (k) Şekil 4'te sunulmuştur. Üç panelli bu zaman serisi, kentsel sınır tabakadaki aerosol dinamiklerini çok yönlü bir yaklaşımla ortaya koymaktadır. Şekil 4 üst panelinde, 09:21–09:47 saatleri arasındaki bulut geçişi 2σ-kırpma filtresiyle başarıyla arındırılmıştır. Açık gökyüzü periyotlarında mavi (413 nm) ve yeşil (500 nm) AOD değerlerinin kırmızı ve yakın kızılötesi kanallara kıyasla yüksek seyretmesi, sönümlenmenin dalga boyuyla ters orantılılık kuralıyla uyumludur. AOD değerleri 0.09–0.13 aralığında kararlı bir seyir izlemiştir.



Şekil 4. 21 Şubat 2026 ön ölçümlerinden Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum Hizmet Binasının bahçesinde kaydedilen dakikalık spektral AOD, Angstrom parametreleri ve sönümlenme katsayılarının zaman serileri. (a) Dört spektral kanala ait AOD değerleri, (b) Sol dikey eksende spektral Angstrom katsayısı (α), sağ dikey pembe eksende ise bulanıklık katsayısı (β) değerleri, (c) Dört kanala ait anlık astronomik sönümlenme katsayıları (k).

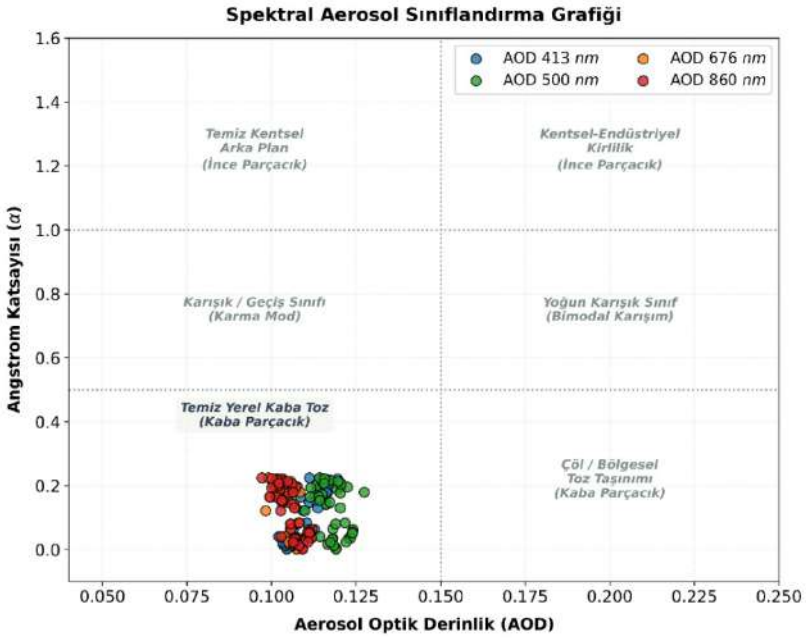
Orta paneldeki Bulanıklık Katsayısı (β) 0.10 seviyesinde kararlı seyrederek orta berraklıkta bir atmosferi doğrulamaktadır. Genel α parametresi iki faza ayrılır: Bulut öncesi dönemde (08:20–09:10) genel α 0.15–0.22 arasında değişirken; α(413-500) (0.10) ve α(500-860) (0.20) değerleri ince ve kaba parçacıkların dengeli karışımına işaret eder. Bulut geçişi sonrasında (09:47–10:10) genel α 0.02–0.05 seviyesine düşmüş; ince parçacıklara duyarlı α(413-500) değerinin negatifleşmesi, bulut neminin ince partikülleri çökelterek havada yalnızca kaba tozların kaldığını göstermiştir. α(500-860) katsayısının ise 0.18'de kararlı kalması, dikey kirlilik taşınımının durduğunu ancak kaba tozların asılı kaldığını doğrulamaktadır.

Alt panelde 4 spektral kanala ait anlık astronomik sönümlenme katsayıları (k) sırasıyla 0.40, 0.26, 0.16 ve 0.12 mag/airmass olarak hesaplanmıştır. Mavi/görünür bölgedeki 0.40 mag/airmass'lik sönümlenme referansı, ileride DAG yerleşkesinde yapılacak ölçümlerle karşılaştırılacaktır. DAG'daki düşük basınç (~700 hPa) sayesinde Rayleigh saçılımının %13 azalacağı ve kentsel sınır tabakanın yokluğuyla sönümlenme katsayılarının fotometrik gece limitlerinin altına (<0.15) düşeceği öngörülmektedir.

3.4. Aerosol Sınıflandırması ve Spektral Dağılım Analizi

Atmosferik aerosollerin sönümleme gücü (AOD) ile parçacık boyutları (α) arasındaki ilişkiler, aerosol kaynaklarının spektral parmak izini çıkarmak için temel bir yöntemdir. Bu kapsamda, 21 Şubat 2026 ölçüm verileri kullanılarak dört farklı dalga boyundaki (413, 500, 676, 860 nm) anlık AOD değerlerinin X ekseninde çakıştırıldığı çok dalga boylu aerosol sınıflandırma diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 5). Şekil 5 incelendiğinde, en kısa dalga boyuna sahip mavi (413 nm) pikseller en yüksek sönümleme bölgesinde ($0.110 \leq AOD \leq 0.128$) kümelenirken; dalga boyu arttıkça sönümleme gücü düzenli olarak azalarak en uzun dalga boyundaki kırmızı (860 nm) piksellerde en düşük seviyeye ($0.095 \leq AOD \leq 0.110$) gerilemektedir. Piksellerin sergilediği bu yatay spektral kayma, Angstrom sönümleme yasasının dalga boyu bağımlılığını doğrudan kanıtlamaktadır.

Ölçülen tüm piksellerin AOD ≤ 0.15 ve α ≤ 0.5 sınırlarıyla tanımlanan "Temiz Yerel Kaba Toz" bölgesinde yer alması, kaba parçacıkların optik olarak baskın olduğunu göstermektedir. Grafikteki noktaların dikey eksende iki alt küme oluşturduğu görülmektedir: Sabah erken saatleri temsil eden üst küme (α ≈ 0.15–0.22) ince-kaba karışımını yansıtırken; bulut geçişi sonrasındaki alt küme (α ≈ 0.00–0.06) ince partiküllerin bulut nemiyle süpürülmesi sonucu yalnızca kaba tozların kaldığını doğrulamakta ve Şekil 4'teki iki fazlı atmosferik dönüşümü desteklemektedir.



Şekil 5. 21 Şubat 2026 ön ölçümlerden saptanan anlık α ve spektral AOD değerlerinin iki değişkenli dağılım diyagramı üzerinden çok dalga boylu spektral aerosol sınıflandırması.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) yüksek rakımlı istasyonuna (~3170 m) kurulması planlanan SP02-L güneş fotometresinin, kurulum öncesi donanımsal kararlılığını test etmek, kalibrasyon sabitlerini belirlemek ve aerosol optik özelliklerini karakterize etmek amacıyla yürütülen yer tabanlı ön ölçümler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Türkiye Ulusal Gözlemevleri Erzurum Merkez Yerleşkesinde (~1892 m) 21 Şubat 2026 tarihinde elde edilen yüksek çözünürlüklü spektral veriler üzerinden yapılan analizlerden elde edilen temel sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Geliştirilen algoritma ile parçalı bulut geçişleri verilerden başarıyla temizlenmiş ve tüm kanallarda son derece yüksek belirlilik katsayıları ($R^2 \geq 0.978$) elde edilmiştir. Bu doğrusal kararlılıkla, cihazın atmosfer dışı (dünya dışı) kalibrasyon sabitleri (V_0); 413, 500, 676 ve 860 nm spektral kanalları için sırasıyla 3.6548 V, 4.2042 V, 3.9122 V ve 2.4319 V olarak saptanmıştır.
- Ölçülen ortalama AOD değerleri, dalga boyuna bağlı olarak 0.09 ile 0.13 gibi kararlı ve temiz-orta düzeyde sönümlenme aralığında gerçekleşmiştir. Angstrom yasasından hesaplanan genel Angstrom üsteli (α≈0.32) ve bulanıklık katsayısı (β≈0.10), ince parçacıklar ile kaba modlu tozlarının bir arada bulunduğunu göstermiştir.
- Spektral alt dalga boyu çiftleri üzerinden yapılan analizlerde (Δα≈+0.35) elde edilen pozitif eğrilik değeri, atmosfer sütunundaki aerosollerin iki modlu (bimodal) bir parçacık dağılımına sahip olduğunu kanıtlamıştır.
- Optik astronomi gözlemleri için türetilen anlık sönümlenme katsayıları (k); mavi bölgede (k_{413}) 0.40 mag/airmass seviyesindeyken, yakın kızılötesi bölgede (k_{860}) 0.12 mag/airmass değerine düşerek yerleşkenin sönümlenme referansını oluşturmuştur.
- SP02-L fotometresinden elde edilecek anlık sönümlenme katsayıları (k), DAG teleskop kontrol sistemine gerçek zamanlı veri olarak beslenmeli ve optik gözlemler sırasında yapılacak fotometrik kalibrasyon düzeltmelerinde bir karar destek altlığı olarak kullanılmalıdır.
- Cihaz temmuz ayında DAG zirvesine kurulduktan sonra elde edilecek yüksek rakımlı temiz atmosfer verileri, bu çalışmada Erzurum Merkez Yerleşkesinde (~1892 m) elde edilen kentsel sınır tabaka verileriyle karşılaştırılarak Erzurum bölgesinin dikey aerosol gradyanı çıkarılmalıdır.

- DAG yerleşkesinde kurulacak bu altyapının, ilerleyen süreçte NASA/AERONET gibi küresel aerosol izleme ağlarına entegre edilmesi, bölgedeki iklim, hava kalitesi ve uydu validasyonu çalışmalarına uluslararası düzeyde katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) "3501 - Kariyer Geliştirme Programı" kapsamında (Proje No: 124F297) ve Türkiye Ulusal Gözlemevleri (Proje No:2025-ED-02-001) tarafından desteklenmektedir.

YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde yazarlar; veri analizinde kullanılan Python kodlarının geliştirilmesi ve hata ayıklama süreçlerine yardımcı olunması ile bildirinin dil kalitesi ve okunabilirliğinin artırılması amacıyla Gemini yapay zekâ modelinden yararlanmıştır. Bu aracın kullanımının ardından yazarlar, ilgili içeriği gerektiği şekilde gözden geçirip düzenlemiş olup, yayınlanan bildirinin bilimsel içeriğine dair tüm sorumluluğu üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, *11*, 156-166. https://doi.org/10.2307/519399

Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. G., & Slusser, J. R. (1999). *On Rayleigh Optical Depth Calculations*. https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/16/11/1520-0426_1999_016_1854_orodc_2_0_co_2.xml

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, *66*(1), 1-16. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5

Kasten, F., & Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, *28*(22), 4735-4738. https://doi.org/10.1364/AO.28.004735

Lohmann, U., & Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: A review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *5*(3), 715-737. https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005

Pöschl, U. (2005). Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angewandte Chemie International Edition*, *44*(46), 7520-7540. https://doi.org/10.1002/anie.200501122

Serdyuchenko, A., Gorshelev, V., Weber, M., Chehade, W., & Burrows, J. P. (2014). High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2: Temperature dependence. *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(2), 625-636. https://doi.org/10.5194/amt-7-625-2014

GÖK MEKANİĞİ VE ULUSAL UYDULAR

Orhan KURT

[1]Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41380, Umuttepe, Kocaeli, orhan.kurt@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Gelecekteki uydu konumları hesaplarken uzun yay yörünge bilgilerinden yararlanılır. Uzun yay yörünge bilgileri için en uygun yörünge parametreleri, bir başlangıç epoğuna göre hesaplanan 6 adet Kepler yörünge elemanlarıdır. Kepler yörünge elemanları, gök mekaniğinin temel eşitliği olan Newton denklemlerinin homojen çözümü sonucunda oluşan altı adet integral sabitine karşılık gelir. Graviteye bağımlı ve bağımsız etkilerden kaynaklanan bozucu etkilerin hesaplanması, Newton denkleminin homojen olmayan çözümüne karşılık gelir. Bu bozucu etkiler polinomsal ve/ya da trigonometrik fonksiyonların kombinasyonları şeklinde modellenir.

Planlamada kullanılan uzun yay yörünge bilgilerinin bir kısmında {SEM, YUMA, GLONASS (AGP, OE)} yükselme düğüm noktasının boylam değişimi yörünge parametrelerine eklenir. GLONASS (AGL) yörünge formatında ise uydu türüne göre uyduların dolanım sürelerinin ve yörünge düzlemi eğim açılarının (CDMA:40544 saniye ve 64.8 derece, FDMA:43200 saniye ve 63.0 derece) sabit değerleri bilinir. Bu yörünge formatında, dolanım sürelerinin doğrusal katsayıları ve yörünge eğim açısının düzeltme terimleri ek parametreler olarak verilir. Uzun periyotlu yörünge hesaplamada en yaygın kullanılan ve her tür yapay uydunun konumunun hesaplanabileceği TLE2 formatında ise uydunun dolanım hızını düzeltmek için referans anına göre ikinci derece polinomsal katsayılar tercih edilmiştir.

Tercih edilen yörünge formatına göre verilen farklı bilgilerden yararlanarak 6 adet Kepler yörünge elemanı referans anına göre düzeltilir ve uydunun istenilen an için yer merkezli koordinatları hesaplanır. Bu çalışmada, gök mekaniğinin temelleri üzerinden kısa ve uzun yay yörünge bilgileri ile birlikte yörünge türleri irdelenmektedir. Güneş senkronize uydular, yer sabit, eğimlendirilmiş yer sabit, Molniya tipi uyduların kullanım nedenleri üzerinde durulmuş ve sayısal uygulama için şu anda 41 adet olan Türk uyduları kullanılmıştır. Çalışmada TLE2 formatı tanıtılmış, bu formatta verilen yörünge bilgilerinden uydu koordinatlarının hesaplanması için gerekli bağıntılar verilmiştir. Bu verileri okuyan, hesaplayan ve QGIS ortamında görselleştirilmesini sağlayan C/C++ programlama dillerinde ve GNU ortamında geliştirilen programlar kullanılmıştır. Sayısal uygulamalar bölümünde güneş uyumlu, ileriye ve geriye doğru yönlendirilmiş uydu kavramları Türk uyduları üzerinden tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Gök mekaniği, uzun yay yörünge bilgileri, zamansal çözünürlük, QGIS.

ABSTRACT

CELESTIAL MECHANICS AND NATIONAL SATELLITES

Long-arc orbit data is used when calculating future satellite positions. The most suitable orbital parameters for long-arc orbit data are six Kepler orbital elements calculated based on an initial epoch. Kepler orbital elements correspond to six integration constants resulting from the homogeneous solution of Newton's equations, the fundamental equation of celestial mechanics. Calculating perturbations due to gravity-dependent and gravity-independent effects amounts to solving the non-homogeneous solution of Newton's equation. These perturbations are modeled as combinations of polynomial and/or trigonometric functions.

In some long-arc orbital data used in planning {SEM, YUMA, GLONASS (AGP, OE)}, the longitude variation of the descending node is added to the orbital parameters. In the GLONASS (AGL) orbital format, the constant values of the orbital periods and inclination angles of the satellites are known according to the satellite type (CDMA:40544 seconds and 64.8 degrees, FDMA:43200 seconds and 63.0 degrees, respectively). In this orbital format, linear coefficients of orbital periods and correction terms for orbital inclination angles are given as additional parameters. In the TLE2 format, which is the most commonly used in long-period orbit calculations and can calculate the position of all types of artificial satellites, second-order polynomial coefficients are preferred to correct the satellite's orbital velocity relative to the reference epoch.

Using different information given according to the preferred orbital format, 6 Kepler orbital elements are corrected relative to the reference epoch, and the geocentric coordinates of the satellite for the desired epoch are calculated. In this study, orbital types are examined along with information on short and long arc orbits based on the fundamentals of celestial mechanics. The reasons for using sun-synchronous, geostationary, inclined geostationary, and Molniya-type satellites are discussed, and the 41 Turkish satellites currently in operation are used in a numerical application. The TLE2 format is introduced in the study, and the equations for calculating satellite coordinates from orbital information given in this format are provided. Some software developed in C/C++ programming languages and the GNU environment that reads, calculates, and visualizes this data in QGIS are used. In the numerical examples section, the concepts of sun-synchronous, pro-grade, and retrograde satellites were inspected using Turkish satellites.

Keywords: Celestial mechanics, long-arc ephemeris, temporal resolution, QGIS.

1. GİRİŞ

Uzay teolojilerinin gelişimi ile birlikte mesleğimizin neredeyse tüm ana bilim dalarında (Jeodezi, Uzaktan Algılama ve CBS, Fotogrametri, Ölçme Tekniği, Kamu Ölçmeleri, ...) yapay uydulardan yararlanma maksimum düzeye çıkmıştır. Buna rağmen kullanıcıların büyük çoğunluğu uzay bölümünü temelini oluşturan gök mekaniği ile ilgili konuları göz ardı etmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı gök mekaniğinin temel denklemlerinden başlayarak, Kepler yörünge elemanları ile temel eşitlikleri arasındaki ilişki, Kepler yörünge elemanları ile yörünge tiplerinin amaca uygun olarak nasıl belirlendiği ile ilgili konular üzerinde durulmuştur.

Gök Mekaniğin temel eşitliği olan Newton denklemi iki cisim problemine dayanır. Yere bağlı hareket eden uydularda, iki cisim Dünya ve yapay udular ya da Dünya ve Aydır. İkinci derece bir diferansiyel eşitlik olan Newton denklemi çeken ve çekinen iki cisim arasında ivmelenme üzerine kurulmuştur (Seeber, 2003; Sneeuw, 2006; Hofmann-Wellenhof vd., 2008; Vallado McClain (2013); Leick, 2015; Kurt, 2007,2008, 2024; Kurt vd., 2022,2023). İki cisim problemi, çalışmanın alt başlıklarında incelenmiş ve Kepler yörünge elemanları ile ilişkisi gösterilmiştir. Günümüzde kullanılan her tür uydunun yörünge elemanlarının verildiği TLEX (Two Line Ephemeris 2,3) veri formatı tanıtılmış ve bu formatta verilen Kepler yörünge elemanların ile bir uydunun yer merkezli koordinatlarının nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.

1.1 Gök Mekaniği

Çalışmada kullanılan TLE ve uydu isimlerinin de eklendiği TLE3 formatında yörünge bilgileri Kepler elemanlarına dayalıdır. TLE yörünge bilgileri uzun yay yörünge bilgileridir ve her tür uydunun yörünge bilgileri bu formatta İnternet üzerinden yayınlanır. Kepler elemanlarına dayalı yörünge bilgilerinin tamamı uzay sabit eylemsiz bir koordinat sisteminde tanımlanan iki cisim problemini temel alır. Uydu hareketlerinin izlenmesinde de halen kullanılan iki cisim problemi, Gök Mekaniği temel eşitliği (1) bağıntısı ile verilen *Newton Denklemi* ile başlar.

$$Newton: \quad \ddot{\mathbf{r}}(t) - \frac{\mu}{r(t)^3}\,\mathbf{r}(t) = \ddot{\mathbf{d}}(t) \qquad \mu = GM \text{ : Yerin Çekim Sabiti} \tag{1}$$

(1) eşitliğinde ve sonraki eşitliklerde kullanılan düz koyu değişkenler üç boyutlu konum, hız ve ivme vektörlerini temsil etmektedir. Aksi söylenmedikçe bu vektörler üç bileşenden oluşmaktadır. Koyu olmayan ve italik harfler ise skaler değişkenleri ya da sabit terimleri temsil etmektedir. Bu açıklamalar ışığında (1) eşitliğinin 3 bileşenden oluşan *ikinci derece homojen olmayan diferansiyel denklem sistemi* olduğu görülür. Eğer $\ddot{\mathbf{d}}(t) = \ddot{\mathbf{0}}(t)$ alınırsa, (1) eşitliği *ikinci derece homojen diferansiyel denklem sistemi* olur. Homojen denklem sistemlerinin iki kez integrali alınır ise 6 adet integral sabiti elde edilir. Bu integral sabitleri, seçilen bir t_0 referans anındaki yörünge elipsini tanımlar. Yörünge elipsi ve uzaydaki konumu iki şekilde belirlenebilir. Çok fazla tercih edilmeyen seçenek olan ***(a)*** yörünge elipsinin düzlemine dik *Açısal Hız Vektörü* $\vec{\mathbf{h}}(t_0) = [h_x \;\; h_y \;\; h_z]^T$ ve enberi (Perigee) doğrultusunu temsil eden $\vec{\mathbf{p}}(t_0) = [p_x \;\; p_y \;\; p_z]^T$ *Laplace Vektörü* ile belirlenebilir ya da *(b)* uydunun yörünge düzlemi içindeki konumunu belirleyen {*a*: yörünge elipsinin büyük yarı ekseni, *e*: yörünge elipsinin dış merkezlik elemanı, M_0: t_0 anında ortalama anomali} ve yörünge düzleminin uzayda yerleştirilmesini sağlayan {*w*: perigee argümanı, i:yörünge eğim açısı, Ω: yörünge yükselme düğüm noktasının sağa açılımı (RAAN: Right Ascension of the Ascending Node)} Kepler yörünge elemanları ile temsil edilebilir (Şekil 1). Uygulamada üretilen yörünge bilgilerinin büyük çoğunluğu, Kepler elemanlarına dayalı olarak üretilmektedir.

Yukarıda (1) ile verilen diferansiyel denkleminin homojen çözümü (2) bağıntıları ile verilen üç korunum kanunu üzerinden gerçekleştirilir.

$$\dot{\mathbf{r}}(t)\cdot Newton \;\Rightarrow\; \frac{\mu}{r(t)} - \frac{v(t)^2}{2} = -\frac{\mu}{2\,a} \qquad \text{Enerjinin Korunumu (Yaşayan Enerji)} \tag{2a}$$

$$\mathbf{r}(t)\times Newton \;\Rightarrow\; \vec{\mathbf{h}} \qquad \text{Açısal Momentumun Korunumu (Açısal Hız Vektörü)} \tag{2b}$$

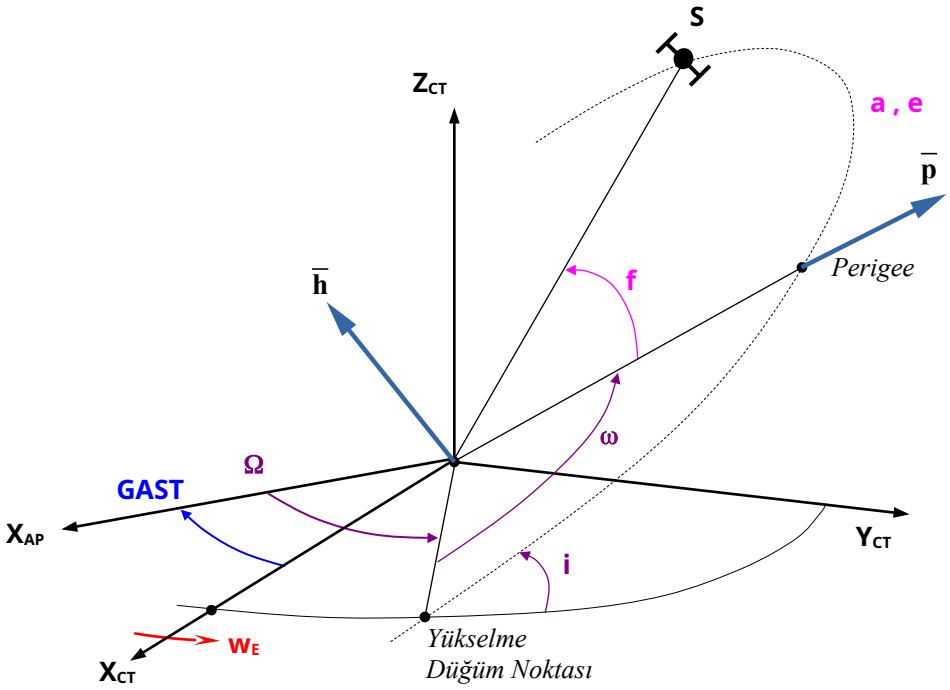
$$Newton\times\vec{\mathbf{h}} \;\Rightarrow\; \vec{\mathbf{p}} \qquad \text{Laplace Vektörü (Perigee Doğrultusu)} \tag{2c}$$

Enerjinin Korunumu (2a), potansiyel ve kinetik enerji toplamı sabittir. Uydu potansiyel ve kinetik enerjinin oluşturduğu momentum ile hiçbir ek enerjiye ihtiyaç duymadan hareket eder. Buna yaşayan enerji (*living energy*) denir.

Açısal Momentumun Korunumu (2b), homojen diferansiyel çözüm sonucunda yörünge düzlemine dik olan uydunun açısal hız vektörü sabit vektördür.

Laplace Vekörünün Korunumu (2c), homojen diferansiyel denklemin çözümü sonucunda enberi (Perigee) doğrultu vektörü olan Laplace vektörü korunur. Bu vektör aynı zamanda yörünge elipsinin şeklini belirleyen dış merkezlik elemanı (e) ile de ilişkilidir.

(1) eşitliğinin verilen $\ddot{\vec{\mathbf{d}}}(t)$ vektörü, Kepler yörünge elemanlarının zamana bağlı olarak bozulması sonucunda konumun ivmesinin değişimini temsil eder. Bu değişim graviteye bağımlı ve bağımsız bozucu etkilerden kaynaklanır. *Homojen olmayan ikinci derece diferansiyel denklemelerin* çözümü (bir başaka deyişle $\ddot{\vec{\mathbf{d}}}(t)$ vektörünün belirlenmesi işlemi), bir referans anına göre belirlenen Kepler elemanları ile hesaplanan konum ile izlenen konum arasındaki farklara göre modellenir. Modelleme işlemi kararsız olan Kepler elemanlarının düzeltilmesini sağlayan polinomsal ve/yada trigonometrik fonksiyon katsayıları yardımı ile sağlanır. Söz gelimi Yayın Yörüngelerinde zamana göre değişimi fazla olan Kepler elemanlarının düzeltilesinde birinci derece polinomlar ve ikinci basamak trigonometrik fonksiyonlar kullanılır (Kurt vd., 2022, 2023; Güldaş, 2023).



Şekil 1. Kepler yörünge elemanları, Açısal Hız vektörü ve Laplace vektörü (Kurt, 2008).
(AP: Apparent Place = Bahar Noktası, CT:Conventional Terrestrial = ITRS ~ WGS84, PZ90, TUREF)

Farklı yörünge belirleme türlerine de örnek Kurt (2014 ve 2018) yayınlarında verilen koordinat bileşenlerinin polinomsal ve trigonometrik fonksiyonlar ile modellenmesi verilebilir (Kurt, 2014; 2018). Çalışmada kullanılan ve uzun periyotlu yörünge bilgileri olan TLE formatında durum farklıdır. 6 adet Kepler yörünge elemanından büyük yarı eksen (a) yerine uydunu ortalama açısal hızının ($n_0 = \dot{M}$) ikinci ($\dot{n} = \ddot{M}$) ve üçüncü derece türev ($\ddot{n} = \dddot{M}$) katsayıları verilir. Yörünge referans anı (t_0), ölçme anı (t_k) ve referans anından itibaren geçen süre ($\Delta t = t_k - t_0$) olmak üzere, yörünge elipsin büyük yarı ekseni düzeltilen $n_k = n_0 + (\dot{n}/2)\cdot\Delta t + (\ddot{n}/6)\cdot\Delta t^2$ yardımı ile $a_k = (\mu/n_k^2)^{1/3}$ bağıntısı kullanılarak bulunur. Uydunun yer sabit koordinatları, Kepler elemanlarına dayalı olarak Kurt (2007, ve 2008) kaynaklarında da verilen yaygın olarak bilinen bağıntılara göre hesaplanır.

Diğer Kepler yörünge elemanlarına dayalı olarak üretilen yörünge formatlarından farklı olan TLE formatında, uzay sabit koordinat sistemindeki Kepler elemanları verilir. Uydunun önce uzay sabit koordinatları hesaplandığından, yer sabit koordinatlara geçebilmek için GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time) değerinin hesaplanması gerekir. Bu parametre dışarıdan hesaplanmalıdır.

1.2 TLE Formatı ve Bozucu Etkinin Modellenmesi

Çalışmada kullanılan TLE formatı Çizelge 1 de gösterilmiştir (Çizelge 1). Çizelge 1 ile verilen parametreler birimleri de yanlarına yazılmıştır. Uydu koordinatlarının hesaplanmasında kullanılan parametreler özellikle renklendirilerek verilmiştir. TLE formatında, 1 ve 2 ile başlayan iki satır vardır. Her iki satırdaki ilk rakam uydunun NORAD-ID olarak adlandıran uluslararası numarasını gösterir (Kurt, 2007).

Çizelge 1. TLE2 (1,2) ve TLE3 (Uydu adı ile TLE) formatındaki Kepler Yörünge Bilgileri ve TURKSAT 3A Uydusunun 07 Ağustos 2026 günü civarındaki TLE verileri (Şekil 1).

TURKSAT 3A			t_0= YrYrday	$\frac{\dot{n}}{2}\left[\frac{rev}{day^2}\right]$	$\frac{\ddot{n}}{6}\left[\frac{rev}{day^3}\right]$	$B\left[\frac{kg}{m^2}\right]$		
1	33056U	08030B	26218.8608619	0.00000149	0.00000e-0	0.00000e-0	0	9998
2	33056	0.0128	73.1969	0.0004531	49.6226	184.4938	1.00274203	52864
		i [◦]	Ω [◦] (RAAN)	e [ ]	ω [◦]	M_0 [◦]	$n_0\left[\frac{rev}{day}\right]$	

Bir önceki başlık altında gök mekaniği ile konu bütünlüğü sağlayabilmek için giriş yapılan uydunun açısal hızının (rev: devir, day: gün) değişimi konusunu biraz açmakta yarar vardır. Aslında uydunun ortalama açısal hızı (n_0) ortalama anomalinin (M_0) hızıdır. Referans anından itibaren geçen süre $\Delta t = t_k - t_0$ olmak üzere, hesap (ölçü) anındaki (t_k) ortalama anomali (M_k), M_0 başlangıç değerine göre Taylor serisine açılırsa (3a) eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin zamana göre türevi alınır ise $n_k = \dot{M}_k$ve $n_0 = \dot{M}$ olur. Diğer terimlerde bu tanıma göre düzenlenerek (3b) bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı hesap anındaki açısal hız değerinin $\{(n_k = n(t_k)\}$ hesaplanmasında kullanılır.

$$M_k = M_0 + \frac{\dot{M}}{1!}\cdot\Delta t + \frac{\ddot{M}}{2!}\cdot\Delta t^2 + \frac{\dddot{M}}{3!}\cdot\Delta t^3 + \cdots \tag{3a}$$

$$n_k = n_0 + \frac{\dot{n}}{2}\cdot\Delta t + \frac{\ddot{n}}{6}\cdot\Delta t^2 + \cdots \tag{3b}$$

TLE formatında bozucu etkiler sonucu oluşan $\ddot{\mathbf{d}}(t)$ vektörü, uydunun yörüngedeki açısal hızı (n_k) üzerinde modelinmiş olur. Bu aynı zamanda yörünge elipsinin büyük yarı ekseni $\{a_k = a(t_k)\}$ parametresinin modellenmesi anlamına da gelir. n_k ve a_k arasındaki ilişki (4a) eşitliği ile sağlanır.

$$a_k = \sqrt[3]{\frac{\mu}{n_k}} \tag{4a}$$

$$M_k = + M_0 + n_k\cdot\Delta t \tag{4b}$$

Hesap anındaki ortalama anomaliyi (4b) ve yörünge elipsi büyük yarıçapı (4a) eşitlikleri ile belirlendikten sonra uydunun yer sabit Kartezyen koordinatları bir sonraki alt başlıkta verilen şekilde hesaplanır.

1.3 Uydu Koordinatlarının Hesaplanması

Kepler denklemi yardımı dış merkezli anomali iteratif olarak bulunur. İlk değer $E_k^{(0)} = M_k$ olarak alınır ve (5a) eşitliği $|E_k^{(j+1)} - E_k^{(j)}| \le$ 1e-14 koşulu sağlayana kadar iterasyonlu olarak çözülür.

$$E_k^{(j+1)} = M_k + e\cdot\sin E_k^{(j)} \tag{5a}$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}_{OR} = a\cdot\begin{bmatrix} \cos E_k - e \\ \sqrt{1-e^2}\cdot\sin E_k \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Yörünge düzlemindeki koordinatlar} \tag{5b}$$

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix}_{AP} = \Re_3(-\Omega)\cdot\Re_1(-i)\cdot\Re_3(-\omega)\cdot\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}_{OR} \quad \text{Uzay sabit koordinatlar} \tag{5c}$$

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix}_{CT} = \Re_3(GAST)\cdot\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix}_{AP} \quad \text{Yer sabit koordinatlar} \tag{5d}$$

TLE formatı ile verilen parametreler ile önce uzay sabit koordinatlar hesaplanabilir. Yer sabit koordinatlara geçebilmek için GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time) değerinin hesaplanması gerekir. Kurt (2007) ya da İnternet üzerinden GAST değeri hesaplayan bağıntılara ya da istenilen dilde kodlara erişilebilir (Şekil 1).

1.4 Materyal ve Veriler

Bu çalışma kapsamında kullanılan bilgi işlem araçlarının (işletim sistemi, derleyiciler, yardımcı programlar, ofis programları) tamamı ve veriler aşağıda WEB adresleri verilen GNU ortamlardan elde edilmiştir (Çizelge 2). Çalışma için geliştirilen yazılımlar C/C++ programlama ortamında yazılmış, çizimler QGIS ve GnuPlot kullanılarak çizdirilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan GNU yazılımlar amaçları, adları ve erişilebilecek WEB adresleri.

Amacı	Adı	WEB Adresi
İşletim Sistemi	Linux Mint 22.3 Zena Ubuntu 24.04 Noble Debian 12.2.0	https://linuxmint.com/ https://ubuntu.com/ https://www.debian.org/
Masaüstü	Cinnamon 6.6.9	https://tracker.debian.org/pkg/cinnamon
Yazılımların Derleyicileri Derleyici Arayüzü	GCC, GNU Compiler Collection Code::Blocks (IDE)	https://gcc.gnu.org/ https://www.codeblocks.org/
Derleyici Editörü	Geany IDE	https://www.geany.org/
Görüntü Manipülasyonlu	Pix 3.4.10 Drawing 1.0.2	https://github.com/linuxmint/pix https://maoschanz.github.io/drawing/
Ofis Araçları	LibreOffice 26.2.4.2	https://www.libreoffice.org/
Çizim	GNU Plot 6.0 QGIS 3.44 Solothorn	http://www.gnuplot.info/ https://qgis.org/en/site/index.html
Veri Manipülasyonu	Sublime Kate 23.08.5 Gedit 46.2	https://www.sublimetext.com/ https://kate-editor.org/ www.gedit.org
TLE2 ve TLE3 Verileri	N2YO.com CelesTrak	https://www.n2yo.com https://celestrak.org/

Çalışmada kullanılan TLE3 verileri, tablonun son satırında yer alan İnternet adreslerinden indirilmiştir.

2. SAYISAL UYGULAMA

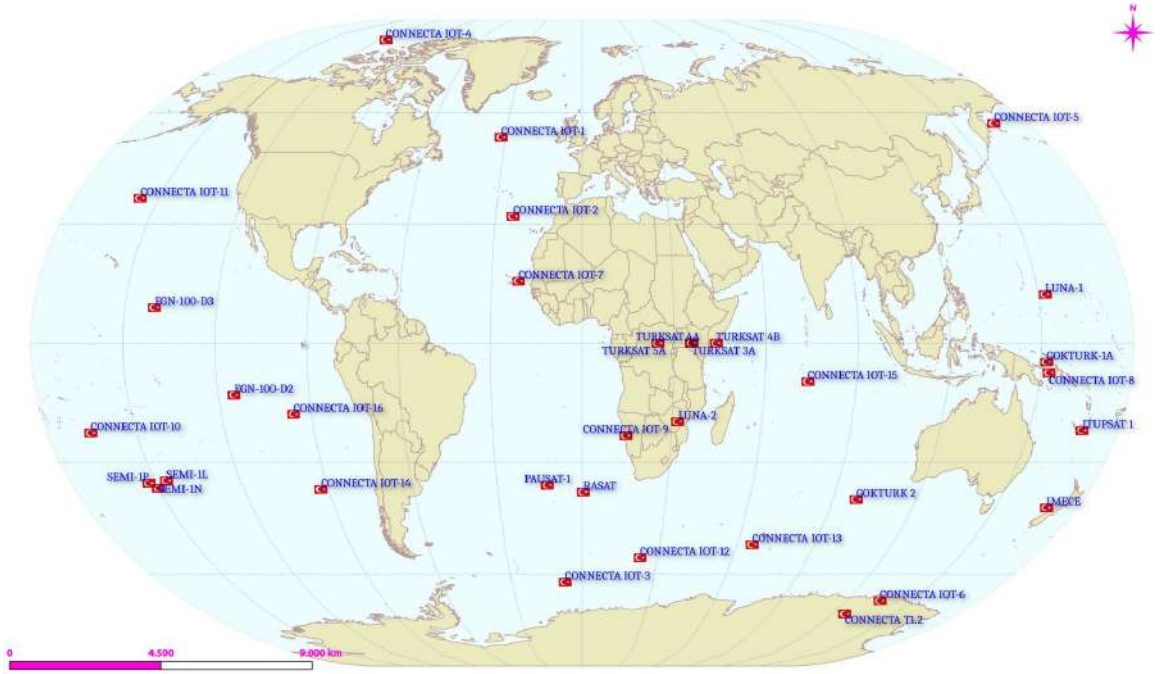
Çalışmada C/C++ ortamında geliştirilen bir yazılım kullanılmıştır. Yazılım, uluslararası geçerliliği olan NORAD numarası ile uydunun TLE formatındaki yörünge elemanlarını okur. Uyduya ait uzay sabit konum, yer sabit konum, jeodezik eğri koordinatları hesaplar ve WKT (Well Known Text) formatında dosyalar üreterek QGIS ortamında sergilenmesini sağlar (Şekil 2). Geliştirilen yazılım ile 41 adet olan Türk uydularının 07 Ağustos 2026 saat 12 için konumları hesaplatılmıştır ve QGIS ortamında çizdirilmiştir (Şekil 2).

Büyük çoğunluğu (32/41) uzaktan algılama amaçlı kullanılan AYY (Alçak Yer Yörüngeli, LEO: Low Earth Orbit) ve genellikle haberleşmede kullanılan (9/41) ulusal YSY (Yer Sabit Yörüngeli, GEO:Geostationary Earth Orbit) uydulardır (Şekil 2). YSY uydular yörünge eğim açıları sıfıra yakın ve yükseklikleri yaklaşık 35000 km olan uydulardır. Yer ile eşit hızda döndükleri için yer sabit uydular olarak adlandırılır.

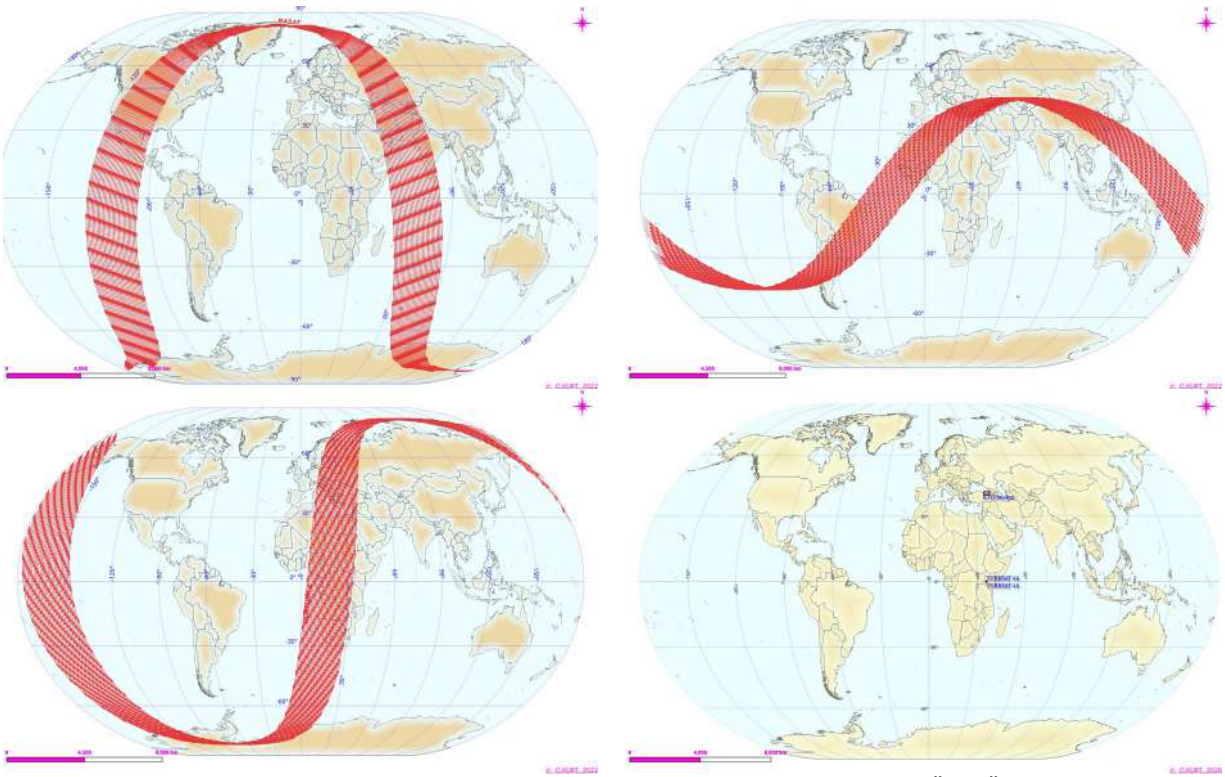
Uzaktan algılama ve güvenlik amaçlı kullanılan uydular da amaca göre değişiklik gösterir. Yerden yüksekliği yaklaşık 7000 km civarı olan bu uyduların eğim açıları ile ilgili bilgilere yörünge izlerinden ulaşılabilir. Yaklaşık 2 saat periyoda sahip olan bu uyduların izleri kuzey doğuya doğru yükseliyor ya da kuzey batıdan aşağıya azalıyor ise öne eğimlendirilmiş (i<90 derece) uydulardır. Tersi yönlerde hareket ediyor ise uydular ters eğimlendirilmiş (i>90 derece) uydulardır. Eğim açısı 90 derece yakın uydular güneş senkronize olması gereken uzaktan algılama uydularıdır (Şekil 3). Şekil 3 de iki günlük hareket izleri verilen RASAT ve Göktürk-2 uyduların gibi AYY uydularımızın büyük çoğunluğu ters eğimlendirilmiş uydulardır. Uzaktan algılama ya da görüntü alma amaçlı kullanılan uyduların kısa sürede dünyayı taraması istenir. Bu tip uydular yaklaşık 2 saat civarında bir turlarını tamamlar ve yörünge eğim açıları 90 derece civarındadır. Uzaktan algılama uydularının güneşin yaydığı radyasyonun yerden yansıma değerlerini kaydetme özelliği, bu tip uyduların güneş ile mümkün olduğunca da senkronize olması ihtiyacını doğurur.

Şekil 3'de verilen öne eğimlendirilmiş (i<90 derece) FGN-100-D2 uydusunu hareketinin bir önceki paragrafta anlatılan hareket özelliği için iyi bir örnektir. Şekil 3 hareket izi verilen TÜRKSAT-4A uydusu ise yerden yaklaşık olarak 36000 km civarındadır. Bu uydular yerin dönme hızına eşit hızda döndükleri için iki günlük yörünge izinin

yaklaşık aynı noktada kaldığı görülür. Kısaca özetlemek gerekir ise uyduların hareket yönlerinde ve yerden yüksekliklerinden onlar ile ilgili bir çok bilgi edinmemizi sağlar (Şekil 3).



Şekil 2. 07 Ağustos 2026 – 12:00:00 UTC (Cuma) anında Türk Uydularının Konumları (36/41). (Not: Burada yer almayan 5 uydumuzun yörünge referans anı 2026 yılı 218.866420 günü (JD=2461259.36641961) olan TLE formatındaki yörünge bilgilerinin yer almamasıdır)



Şekil 3. Ters eğimlendirilmiş (i>90 derece) Türk uyduları, sol üstte RASAT ve alta GÖKTÜRK-1. Sağ üste düz eğimlendirilmiş bir uydu FGN-100-D2 (i~45 derece) ve sağ alta TURKSAT 4A (i~0 derece) yer sabit Türk uydularının 06-08 Ağustos 2026 tarihlerindeki hareket izleri.

Kuzey ülkelerinde tercih edilen bir başka yörünge türü de Molniya türü yörünge tipleridir. Dış merkezliği büyük olan ve haberleşme amalı kullanılan bu tip uyduların kuzey bölgesinde daha uzun kalması istendiği için perige noktası güney yarım kürede tasarlanan eğimlendirilmiş sabit uydulardır. Temel düşüncesi enberi noktasında

maksimum hıza ulaşan uydunun, yörüngesindeki dolanımın süresinin büyük bir bölümünü kuzey yarım küre üzerinde harcamasıdır. Rusya ve Kanada gibi ülkeler bu tip yörüngeleri haberleşme amaçlı kullanmak için tercih ederler.

Uzaktan algılama çalışmalarında uydu konum doğruluğu önemlidir. Çok hızlı hareket eden bu tür uydular ile yapılan değerlendirmelerde görüntü üzerinde yüksek doğruluklu kontrol noktalarının önemi göz ardı edilmemelidir. Bu tip yörünge bilgileri ile referans anına yakın uydu konumu dahi ±3-5 km doğruluğundadır. Yörünge referans anında uzaklaştıkça uydunun konum doğruluğu hızla kötüleşir. Bu tür yörünge bilgileri planlama amaçlıdır.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada gök mekaniğinin temel kavramları tanıtılmış, uygulamalarda ulusal uydular üzerinde teori ve pratik arasındaki ilişkinin önemi vurgulanmaya çalışılmıştır. Uygulama bölümünde ulusal uydularımız tercih edilmiş, gök mekaniği ve pratik uygulamalar arasındaki ilişkiler ulusal uydularımız üzerinden irdelenmiştir.

TLE formatı uzun periyotlu tasarlanan bir yörünge formatıdır. Uzun periyotlu yörünge bilgileri kısa periyotlu yörünge bilgilerine göre daha kaba sonuçlar verir. Yörünge referans anından uzaklaştıkça sonuçlar daha hatalı olur. Zamansal çözünürlüğün önemli olduğu uzaktan algılama çalışmalarında istenilen görüntünün çalışılan alanı istenilen ölçüde kapsatılamamasının nedeni de yörünge bilgilerinin yeterli güvenirlikte elde edilmemesinden kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR

Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy Foundations*, *Methods, Applications*, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin, ISBN 3-11-017549-5.

Sneeuw, N., 2006, *Dynamic Satellite Geodesy*, Lecture Notes, Institute of Geodesy, Universität Stuttgart, Germany.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite Systems; GPS, Glonass, Galileo & More*. Springer, Wien, New York, 501.

Kurt, O., 2007, *Temel Koordinat Sistemleri,* Kocaeli Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, DOI: 10.13140/RG.2.2.26114.18887.

Kurt, O., 2008, *GNSS Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi*, Kocaeli Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, DOI: 10.13140/RG.2.2.25930.68805.

Vallado, D.A. and McClain, W.D., 2013, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Fourth Edition, Microcosm Press, ISBN 978-1883203.

Kurt, O., 2014, Spectral Analysis of Keplerian Orbit Elements of GNSS Satellites, *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Trabzon, https://ieeexplore.ieee.org/document/6830671.

Leick, A., Rapoport, L. and Tatarnikov, D. (2015), *GPS Satellite Surveying*, 4th Edition, Wiley, ISBN: 9781118675571; 1118675576; 9781119018285; 1119018285; 9781119018612; 1119018617.

Kurt, O., 2018, *On Non-Linearity and Convergence in Non-Linear Least Squares*, Capter 4 in Optimization Algorithms, https://www.intechopen.com/chapters/61147.

Kurt, O., Güldaş, B.G. ve Uyanık, H., 2022, Yörünge Belirleme, *Turkish National Geodesy Commission 2022 Scientific Meeting*, 02-04 November 2022, Kocaeli / Turkey, https://www.researchgate.net/publication/365361729.

Kurt, O., Güldaş, B.G. ve Uyanık, H., 2023, Parameter Dependency in Broadcast Ephemerides Estimation, *3rd International Black Sea Modern Scientific Reserch Congress,* 23-24 March 2023, Samsun/Turkey. https://www.researchgate.net/publication/369738163.

Güldaş, B.G., 2023, Gerçek Zamanlı Yayın Yörünge Bilgisi Kestirimi, *Yüksek Lisans Tezi,* Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Jeoinformasyon ABD., Kocaeli.

Kurt, O., 2024, Gök Mekaniği ve Güncel Uygulamalar, *Ulusal Astronomi Kongresi 2024 (UAK-2024)*, İstabul Üniversitesi, 02-06 Eylül 2024, https://uak.info.tr/2024/Kitapcik, p.119, İstanbul/Türkiye, https://www.researchgate.net/publication/384190045.

TARİHİ YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (TYBM)'NİN KÜLTÜR VARLIKLARINI KORUMA VE RESTORASYON SÜREÇLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI

Esra SEMİZ [1], Naci YASTIKLI [2], Uzay YERGÜN [3]

[1]Y.Harita Müh & Mimar, Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, esra.semiz@std.yildiz.edu.tr
[2]Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul, ynaci@yildiz.edu.tr
[3]Dr. Öğr. Üyesi., Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, yergun@yildiz.edu.tr

ÖZET

Günümüzde kültür varlıkları; savaşlar, tabii afetler, iklim değişikliği ve insan kaynaklı müdahaleler nedeniyle zarar görmekte ve yok olma riskiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, kültür varlıklarının yüksek doğruluklu modern ölçme yöntemleriyle belgelenmesi, elde edilen verilerin sürdürülebilir biçimde arşivlenmesi ve bu verilerin kültür varlıklarının yönetimi süreçlerinde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Kültür varlıklarını koruma ve restorasyon süreçlerinin rölöve üretimi aşamasında kültür varlıklarının mevcut durumları sayısal fotogrametri ve yersel lazer tarama yöntemleri ile belgelenmektedir. Belgeleme aşamasında elde edilen yüksek doğruluklu üç boyutlu (3B) nokta bulutu verileri çoğunlukla yalnızca arşivleme amacıyla kullanılmakta ve restorasyon süreçlerine etkin bir biçimde entegre edilememektedir. Kültür varlıklarının restorasyon süreçlerinde, yapıya farklı tarihlerde yapılan müdahaleler nedeniyle genellikle farklı dönemlere ait mimari unsur ve kalemişi tezyinat katmanları karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte bu dönemlerden sadece bir tanesi esas alınarak gerçekleştirilen restorasyon süreci, kültür varlıklarına ait çok katmanlı yapının ortadan kalkmasına neden olabilmektedir. Bu durum, kültür varlıklarının geçirdiği restorasyon evrelerinin anlaşılmasını ve elde edilen verilerin gelecekteki restorasyon projelerinde etkin biçimde kullanılmasını olanaksız hale getirmektedir. Bu noktada Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM), kültür varlıklarının geometrik ve geometrik olmayan verilerinin bütüncül biçimde yönetilmesine olanak sağlayan yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. TYBM; fotogrametrik veriler, nokta bulutları ve parametrik modelleme teknikleriyle entegre çalışabilmesi sayesinde kültür varlıklarının tarihsel süreç içindeki farklı dönem mimari unsurları ve kalemişi tezyinat katmanlarıyla belgelenmesi, analog arşivler yerine dijital arşiv oluşturulması, restorasyon süreçlerinin yönetimi ve gelecek nesillere aktarılmasında önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM) yaklaşımının kültür varlıklarını koruma ve restorasyon süreçlerindeki kullanım olanaklarının araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, çalışma alanı olarak seçilen Teşvikiye Camii'nin arşiv verileri kullanılarak harim (ana ibadet mekanı) bölümünün 1970'li yıllara tarihlenen 4. dönem restitüsyonuna ilişkin bir TYBM modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinden kültür varlıklarının belgeleme, dijital arşivleme, koruma ve restorasyon süreçlerinde, TYBM yönteminin sağladığı olanaklar ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Fotogrametri, kültür varlığı, nokta bulutu, restorasyon, tarihi yapı bilgi modellemesi (TYBM).

ABSTRACT

THE USE OF HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELING (HBIM) IN CULTURAL HERITAGE CONSERVATION AND RESTORATION PROCESSES

Today, cultural heritage assets are increasingly exposed to deterioration and risk of loss due to wars, natural disasters, climate change, and human-induced interventions. Therefore, documenting cultural heritage assets using high-precision modern surveying methods, sustainably archiving the obtained data, and utilizing this information in cultural heritage management processes are of critical importance. During the measured survey phase of cultural heritage conservation and restoration processes, the existing conditions of cultural heritage assets are documented using digital photogrammetry and terrestrial laser scanning methods. The high-accuracy three-dimensional point cloud data obtained during the documentation phase are mostly used only for archival purposes and cannot be effectively integrated into restoration processes. In restoration processes of cultural heritage assets, architectural elements and wall painting ornamentation layers belonging to different historical periods commonly emerge due to interventions carried out at different times. However, restoration processes conducted by considering only one of these historical periods can result in the loss of the multi-layered character of cultural heritage assets. This situation makes it difficult to understand the restoration phases that cultural heritage assets have undergone and prevents the effective use of the obtained data in future restoration projects. At this point, Historic Building Information Modeling (HBIM) emerges as an innovative approach enabling the holistic management of both geometric and non-geometric data related to cultural heritage assets. By integrating photogrammetric data, point clouds, and parametric modeling techniques, HBIM provides significant advantages in documenting architectural elements and wall painting ornamentation layers from different historical periods, creating digital rather than analog archives, managing restoration processes, and transferring cultural heritage assets to future generations.

This study aims to investigate the potential use of the Historic Building Information Modeling (HBIM) approach in cultural heritage conservation and restoration processes. For this purpose, an HBIM model was developed for the fourth-period restitution

of the harim (main prayer hall) of the Teşvikiye Mosque, selected as the study area, representing the 1970s, using archival data. Through this model, the capabilities provided by the HBIM approach in the documentation, digital archiving, conservation and restoration processes of cultural heritage assets were demonstrated.

Keywords: Photogrammetry, cultural heritage, point cloud, restoration, historic building information modeling (HBIM).

1. GİRİŞ

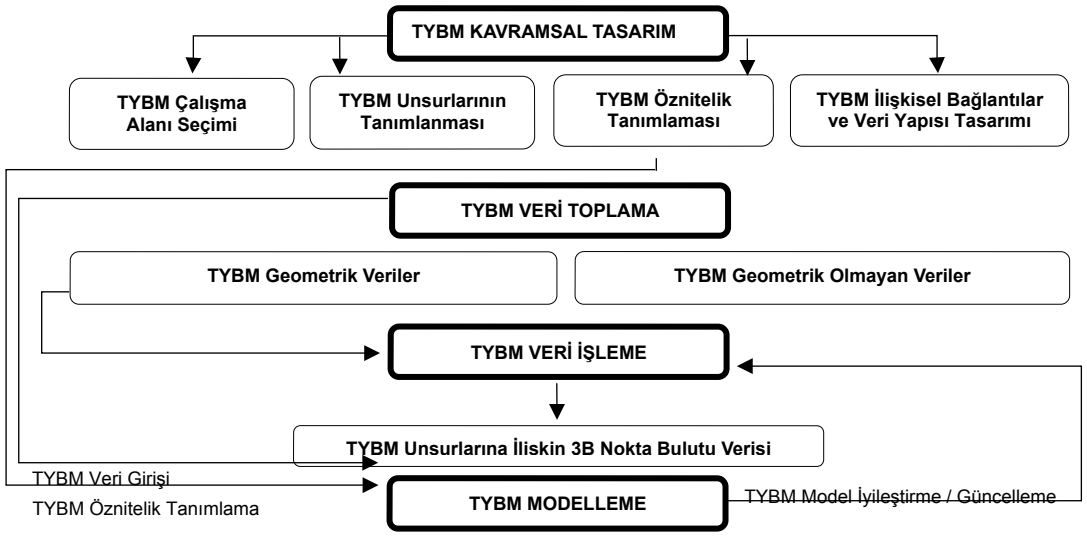
Kültür varlıklarını koruma ve restorasyon süreçlerinin en temel aşamalarından biri olan belgeleme, günümüzde sayısal yersel fotogrametri ve yersel lazer tarama yöntemleri ile başarıyla yüksek doğruluklu, yoğun nokta bulutu verisi de üretilerek gerçekleştirilebilmektedir (Yastıklı, 2007). Sayısal Yersel Fotogrametri ve Yersel Lazer Tarama (TLS) yöntemleriyle elde edilen yüksek doğruluklu veriler kültür varlıklarının dijital olarak modellenmesi için kullanılan, tarihi yapının analiz ve restorasyon çalışmalarına yönelik özelleştirilmiş bir Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) uygulaması olan Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM)'ne entegre edilerek başarıyla kullanılmaktadır. TYBM, restorasyon ve koruma süreçlerinin planlanması, tarihi verilerin arşivlenmesi ve erişilebilir hale getirilmesi, 3B modeller üzerinden analiz ve simülasyon yapılması, kültür varlığına ilişkin sanal gerçeklik deneyimi sunulması, restorasyon sonrası sürecin yönetilebilmesi gibi pek çok farklı amaca hizmet etmektedir (Munoz-Pandiella vd., 2024). TYBM kavramı, farklı kaynaklarda Historic/Historical/Heritage Building Modelling gibi farklı adlandırmalarla ele alınmakta; bazı çalışmalarda ise kültürel mirasın dijital ortamda temsil edilmesi ve yönetilmesine yönelik yaklaşımlar Dijital Twin (Dijital İkiz) kavramı ile ilişkilendirilmektedir. Ülkemizde, Duran (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, TYBM üretiminde, Yersel Lazer Tarama (TLS) ve Sayısal Fotogrametri yöntemleri ile elde edilen nokta bulutu verileri üzerinden manuel modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Garip (2023), gerçekleştirdiği çalışmada, İzmit'teki ahşap Ferdane Hanım Konağı'nın belgelenmesinde kullanılan geleneksel 2B belgeleme yöntemleri ve lazer tarama ile elde edilen nokta bulutu verileri ile manuel olarak üretilen TYBM'ni sağladıkları imkan ve avantajları bakımından karşılaştırmıştır. Anaç (2022) ise yaptığı çalışmada, Gaziantep geleneksel sivil mimarisine yönelik mevcut 2B çizimler üzerinden manuel modelleme yaklaşımı ile bir dijital arşiv modeli geliştirmiş, bu modeli veri tabanı kimlik kodları üzerinden TYBM ile ilişkilendirerek, bir nesne kütüphanesi oluşturmuştur. Uluslararası alanda Oreni vd. (2014) tarafından 2009 L'Aquila depreminde ciddi hasar gören Basilica di Collemaggio isimli dini yapı için gerçekleştirilen çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak İnsansız Hava Aracı (İHA) destekli veri toplanmış ve karmaşık geometrilerin modellenmesinde NURBS (Non Uniform Rational Basis-Splines) yöntemini kullanarak TYBM gerçekleştirilmiştir. Tapponi vd. (2015), Durham Katedrali için oluşturdukları TYBM modelinde yapı elemanlarının fiziksel durum ve müdahale önceliklerini parametreler ve renk kodlarıyla ilişkilendirerek bakım/onarım programları hazırlamıştır. Murphy vd. (2013), yaptıkları çalışmada nesneleri lazer tarama verileri ile eşleştiren tersine TYBM iş akışı önermiştir. Yang vd. (2019), TYBM üretimi için "mesh-to-HBIM (yüzey ağından TYBM'ne aktarım)" iş akışını önermiş ve ontolojinin önemini vurgulamıştır. Tan vd. (2022), Dijital İkiz teknolojisi ile Çin'in Sichuan bölgesindeki geleneksel ahşap mimarisinin belgelenmesini amaçlanmıştır. Munoz-Pandiella vd. (2024) ise Dijital İkiz yaklaşımıyla kültür varlıklarının tarihsel gelişim süreçlerini ve katmanlarını daha çok görselleştirme ve grafik modelleme tekniklerine odaklanarak dijital ortamda sunmuştur. Ulusal ve Uluslararası alanda yapılan çalışmalardaki TYBM uygulamalarında veri toplama sürecinin çoğunlukla yapının mevcut durumunun belgelenmesi ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Koruma süreçlerinin tamamını kapsayan çok katmanlı ve bütünleşik veri arşivi içeren bir TYBM uygulamasına rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, TYBM yaklaşımının kültür varlıklarının koruma ve restorasyon süreçlerindeki kullanım olanaklarının literatür bağlamında incelenmesi ve seçilen çalışma alanı için bir TYBM modeli geliştirilmesidir. Bu kapsamda, çalışma alanı olarak seçilen İstanbul ili, Şişli ilçesinde yer alan Teşvikiye Camii harim (ana ibadet mekanı) bölümüne ait arşiv verileri kullanılarak; 1970'li yıllara tarihlenen 4. dönem restitüsyonuna ilişkin Autodesk Revit ortamında manuel modelleme yaklaşımı ile bir TYBM oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model üzerinden TYBM'nin kültür varlıklarının koruma ve restorasyon süreçlerindeki kullanım olanakları değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM)'nin kültür varlıklarının koruma ve restorasyon süreçlerindeki kullanım olanaklarını araştırmak amacıyla literatür incelemesi ve uygulamaya dayalı bir araştırma yürütülmüştür. TYBM üretim süreci, TYBM Kavramsal Tasarım, TYBM Veri Toplama, TYBM Veri İşleme, TYBM Modelleme olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). TYBM üretim sürecinin ilk aşaması olan TYBM kavramsal tasarım; TYBM çalışma alanı seçimi, TYBM unsurlarının tanımlanması, TYBM öznitelik tanımlaması ve TYBM ilişkisel bağlantılar ve veri yapısı tasarımı aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşama, yapının fiziksel modellemesinden önce veri yapısının ve veri organizasyonunun planlandığı aşamadır (Yang vd., 2019). TYBM kavramsal tasarım aşamasında, seçilen çalışma alanına ilişkin TYBM unsurları (yapı elemanları) ve bu unsurlara ilişkin özellikleri tanımlayan malzeme türü, özgünlük durumu, yapım tarihi ve dönemi, bilinen onarım geçmişi vb. öznitelikler belirlenerek bu unsurların birbirleriyle olan ilişkileri mantıksal düzeyde tanımlanmıştır. TYBM üretim

sürecinin ikinci aşaması olan TYBM veri toplama; seçilen kültür varlığı niteliğindeki çalışma alanına ilişkin geometrik ve geometrik olmayan verilerin temin edilerek sistematik biçimde bir araya getirilmesini kapsamaktadır.



Şekil 1. TYBM (Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi) üretimi aşamaları.

Bu aşamada, farklı kaynaklardan sağlanan arşiv verileri, yerinde gerçekleştirilen inceleme ve belgeleme çalışmaları ile farklı veri toplama yöntemleri aracılığıyla elde edilen veriler değerlendirilerek, oluşturulacak TYBM'nin amacı ve kapsamı doğrultusunda kullanılacak veri setlerinin kapsamı ve niteliği belirlenmektedir. Geometrik olmayan veriler; tarihi fotoğraflar, kalemişi bezeme renklendirme paftaları, tarihi haritalar, raporlar, yazılı belgeler, arşiv projeleri (el çizimleri) ve restorasyon uygulama süreçlerine ait fotoğraflar gibi çalışma alanına ilişkin tarihsel, belgesel ve görsel nitelikteki kaynaklardan oluşmakta ve yapının tarihsel gelişimi, fiziksel özellikleri, mevcut durumu ve geçirdiği müdahalelere ilişkin bilgi sağlamaktadır. Geometrik veriler ise 2B bilgisayar destekli tasarım (CAD) çizimleri, farklı dönem restitüsyonlarına ilişkin ortofotolar ve 3B nokta bulutu verileri gibi yapının geometrik özelliklerinin belgelenmesine olanak sağlayan sayısal verileri kapsamaktadır. Bu veriler, çalışma alanının özellikleri ve TYBM'nin gereksinimleri doğrultusunda Yersel Lazer Tarama (TLS–Terrestrial Laser Scanning), Fotogrametri (Image-Based Modeling), İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı görüntüleme ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi uygun veri toplama ve belgeleme yöntemleri aracılığıyla elde edilebilmektedir (Yastıklı, 2007). Bu aşamada elde edilen geometrik ve geometrik olmayan veriler, TYBM'nin oluşturulması ve bilgi yapısının geliştirilmesi amacıyla sistematik biçimde sınıflandırılmakta ve sonraki veri işleme ve modelleme aşamalarında kullanılmak üzere düzenlenmektedir.

TYBM üretim sürecinin üçüncü aşaması olan TYBM veri işleme, veri toplama aşamasında elde edilen geometrik ve geometrik olmayan verilerin işlenerek, TYBM modelleme sürecine altlık oluşturacak 3B nokta bulutu verisinin hazırlanmasını kapsamaktadır. Bu aşamanın temel amacı, farklı yöntemlerle ve farklı formatlarda elde edilen verilerin, TYBM modelleme sürecinde kullanılabilecek uygun veri yapısı ve formatına dönüştürülmesidir. 3B nokta bulutu verisi elde etme sürecinde Fotogrametri ve/veya Yersel Lazer Tarama (TLS) gibi farklı veri toplama yöntemlerinin kullanılması, kullanılan yöntemin ve elde edilen verinin niteliğine bağlı olarak farklı veri işleme adımlarının uygulanmasını gerektirmektedir (Yastıklı, 2007; Murphy vd., 2013). Yersel Lazer Tarama (TLS) yöntemiyle elde edilen 3B nokta bulutu verilerinin işlenmesinde, farklı tarama konumlarından elde edilen verilerin kayıt ve birleştirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi, gereksiz ve hatalı verilerin ayıklanması, gürültülerin temizlenmesi, koordinat sisteminin düzenlenmesi ve verilerin modelleme sürecinde kullanılabilecek uygun formatlara dönüştürülmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Fotogrametri ve/veya İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı görüntüleme yöntemleriyle elde edilen bindirmeli fotoğraf verilerinin işlenmesinde ise öncelikle SFM (Structure from Motion)yöntemi kullanılarak fotoğraflardan 3B nokta bulutu oluşturulmakta (Yastıklı vd., 2022), elde edilen nokta bulutu, modelleme sürecine altlık oluşturacak niteliğe getirilmek üzere gerekli temizleme, hatalı ve gereksiz verilerin ayıklanması, referanslandırma ve uygun veri formatına dönüştürme işlemlerinden geçirilmektedir. Birden fazla fotogrametrik veri setinin bulunması durumunda ise, ilgili nokta bulutlarının kayıt ve birleştirme işlemleri de gerçekleştirilmektedir.

TYBM üretim sürecinin son aşaması olan TYBM modelleme, veri işleme aşamasında hazırlanan 3B nokta bulutu ve diğer geometrik veri setleri referans alınarak, çalışma alanına ilişkin tanımlanan TYBM unsurlarından parametrelere bağlı geometrik model üretilmesi sürecidir. Bunun yanı sıra modelleme süreci, TYBM unsurlarına ilişkin yapılan öznitelik tanımlamalarının ve bu tanımlamalara karşılık gelen bilgilerin veri girişi ile modelle ilişkilendirilmesini de kapsamaktadır. Bu aşamada, yapı unsurları; elde edilen geometrik verilerin doğruluğu ve modelin kullanım amacı doğrultusunda uygun detay düzeyinde, manuel, otomatik veya hibrit modelleme yaklaşımları kullanılarak modellenmektedir. TYBM modelleme ile yapıya ilişkin tarihsel, belgesel ve görsel nitelikteki geometrik olmayan veriler ilişkilendirilerek, modelin yalnızca 3B geometrik bir temsil niteliğinde kalmayarak, iyileştirilebilir ve

güncellenebilir bir yapıya sahip olması esas alınmaktadır ve yapının geçmişine ve mevcut durumuna ilişkin bilgileri içeren, geleceğe yönelik veri yönetiminin sağlanabildiği güncellenebilir bir model oluşturulmaktadır. Yukarıda verilen aşamalar sonucunda oluşturulan TYBM modeli, kültür varlıklarının belgelenmesi, dijital arşivlenmesi, korunması ve sonraki restorasyon süreçlerinde kullanılabilecek çok katmanlı ve bütünleşik bir veri arşivi oluşturulmasını sağlamaktadır.

3. UYGULAMA

Bu bölümde, yöntem bölümünde tanımlanan aşamalar doğrultusunda çalışma alanı olarak seçilen İstanbul ili, Şişli ilçesinde yer alan Teşvikiye Camii harim (ana ibadet mekanı) bölümüne ait gerçekleştirilen Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM) uygulama sürecine ilişkin ayrıntılı bilgiler verilmiştir. TYBM oluşturulması kapsamında, kavramsal tasarım oluşturulması, arşiv verilerinin toplanması, işlenmesi ve model oluşturma aşamalarına yönelik çalışmalar açıklanmış; oluşturulan TYBM modeli üzerinden kültür varlığının belgelenmesi, dijital arşivlenmesi, korunması ve restorasyon süreçlerinde TYBM'nin kullanım olanakları değerlendirilmiştir.

3.1. TYBM Kavramsal Tasarım

TYBM kavramsal tasarımının oluşturulması kapsamında çalışma alanı olarak İstanbul ili, Şişli ilçesinde yer alan Teşvikiye Camii'nin harim (ana ibadet mekanı) bölümü seçilmiştir (Şekil 2a, 2b, 2c). Teşvikiye Camii geçmişten günümüze çeşitli onarımlar geçirmiştir. Bu onarımlara ilişkin bulgular, 2017-2021 yılları arasındaki son restorasyon çalışmaları sırasında tespit edilmiş ve bu doğrultuda dört farklı restitüsyon dönemi tanımlanmıştır. Bunlar; 1. Dönem (Sultan Abdülmecid Dönemi - Saltanat: 1839–1861), 2. Dönem (Sultan II. Abdülhamit Dönemi - Saltanat: 1876–1909), 3. Dönem (Cumhuriyet Dönemi I - muhtemel 1940'lar) ve 4. Dönem (Cumhuriyet Dönemi II - muhtemel 1970'ler) şeklindedir. Bu dönem restitüsyonlarına ait yapı unsurları ve kalemişi tezyinat katmanlarının (Şekil 2d) Teşvikiye Camii'nin harim bölümünde bir arada bulunması, bu yapının çalışma alanı olarak seçiminde etkili olmuştur.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 2. Teşvikiye Camii harim bölümü restorasyon sonrası genel görünümü, 2021(a-c) ve farklı dönem restitüsyonlarına ilişkin kalemişi bezeme katmanları(d) (Vakıflar Genel Müdürlüğü -VGM Arşivi).

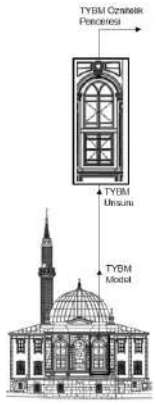
Restorasyon çalışmalarında, 2. dönem restitüsyonu esas alınmış ve harim bölümü bu döneme ait yapı unsurları ve kalemişi tezyinat programı doğrultusunda ihya edilmiştir. Bunun sonucu olarak, 2. döneme ait kalemişi tezyinat katmanı üzerinde yer alan 3. ve 4. dönem kalemişi bezeme katmanları raspa edilmiş ve yapı unsurlarında; pencere kurgusunun değiştirilmesi, hat yazı kuşağının kaldırılması ve ahşap kafeslerin eklenmesi gibi değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, 4. dönem restitüsyonuna ait günümüzde gözlemlenemeyen yapı unsurları ve kalemişi tezyinat programının TYBM ortamında bütüncül olarak temsil edilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda, 4. dönem restitüsyonu esas alınarak TYBM modeli oluşturulmuştur. Bu döneme ait TYBM unsurları (yapı elemanları), mimari, taşıyıcı (strüktürel), dini yapı ve sanatsal (tezyinat) unsurlar olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Mimari unsurlar; pencere, revzen, döşeme, kubbe ve korkuluk; taşıyıcı (strüktürel) unsurlar; duvar, kubbe kasnağı, sütun, paraçol ve ayak (paye); dini işlevli yapı unsurları; minber, mihrap ve vaaz kürsüsü; sanatsal (tezyinat) unsurlar ise kalemişi tezyinat ve hat yazı kuşağı olarak sınıflandırılmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. Bu unsurlar tanımlama gereği ayrı başlıklar altında sınıflandırılmış olsa da birbirleriyle yakından ilişkilidir. Bu sınıflandırma, yapı unsurlarının TYBM içerisinde ayrı bileşenler olarak modellenmesini ve geometrik ve geometrik olmayan verilerin bu unsurlarla ilişkilendirilmesine yönelik temel veri yapısının oluşturulmasını sağlamıştır.

Çizelge 1. 4. dönem restitüsyonuna ilişkin TYBM unsurları.

Mimari Unsurlar	Taşıyıcı Unsurlar	Dini İşlevli Yapı Unsurları	Sanatsal Unsurlar
Pencere	Duvar	Minber	Kalemişi Tezyinat
Revzen	Kubbe Kasnağı	Mihrap	Hat Yazı Kuşağı
Döşeme	Sütun	Vaaz Kürsüsü	
Kubbe	Paraçol		
Korkuluk	Ayak (Paye)		

Sonraki aşamada, TYBM unsurlarının modelleme aşmasında kullanılmak üzere gerekli tüm öznitelik tanımlamaları yapılmış ve veri girişi aşmasında bu öznitelik tanımlamalarına karşılık gelecek öznitelik bilgileri belirlenmiştir. Bu kapsamda TYBM öznitelikleri; TYBM Unsur Türü, Adı, Alt Adı, Kodu, Konumu, Tipi, Malzeme Türü, Yapım Tekniği, Özgünlük Durumu, Yapım Tarihi, Dönemi, Bilinen Onarım Geçmişi, Mevcudiyet Durumu, Mevcudiyetten Çıkış Tarihi, Mevcut Hasar Durumu, Güçlendirme Durumu, Yüzey Tezyinat Durumu, Yüzey Tezyinat Dönemi, Yüzey Tezyinat Üslubu ve Geometrik Olmayan Veriler olarak tanımlanmıştır. Öznitelik tanımlamalarına örnek olarak, TYBM pencere unsurunun ilişkili olduğu öznitelikler ve bunlara karşılık gelen öznitelik bilgileri Çizelge 2'de verilmiştir. Kullanıcının TYBM modeli üzerinde pencere unsurunu seçmesiyle görüntülenen öznitelik penceresi, ilgili unsura ait bilgilerin görüntülenmesine ve güncellenmesine olanak sağlayacak şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 2. TYBM pencere unsuru öznitelik tanımlamaları ve öznitelik bilgileri.



TYBM Pencere Unsuru	
Öznitelik Tanımlaması	**Öznitelik Bilgisi**
TYBM Unsur Türü	Mimari Unsur
TYBM Unsur Adı	Pencere
TYBM Unsur Kodu	P1/ P2/ P3/ P4/ P5/ P6/ P7/ P8
TYBM Unsur Konumu	Kuzeydoğu D. / Güneybatı D. / Mihrap D.
TYBM Unsur Tipi	Çift Kanatlı Kemersiz Pencere
TYBM Unsur Malzeme Türü	Ahşap
TYBM Unsur Özgünlük Durumu	Özgün / Muhdes
TYBM Unsur Yapım Tarihi	1970'ler
TYBM Unsur Dönemi	4. Dönem
TYBM Unsur Bilinen Onarım Geçmişi	Yok / 1986 / 2005
TYBM Unsur Mevcudiyet Durumu	Var / Yok
TYBM Unsur Mevcudiyetten Çıkış Tarihi	2017-2021
TYBM Unsur Güçlendirme Durumu	Var / Yok
TYBM Unsur Yüzey Tezyinat Durumu	Var / Yok
TYBM Unsur Geometrik Olmayan Veriler	Tarihi ve Güncel Fotoğraflar, Detaylar vb.

TYBM modeli içinde birbiriyle ilişkilendirilmesi gerekli TYBM unsurları olarak pencere-duvar ve revzen-duvar unsurları belirlenmiştir. Pencere ve revzen unsurları ile duvar unsuru arasındaki ilişkinin, bu unsurların yer aldıkları duvardaki boşlukların bu unsurlara ilişkin ilgili parametreler ile tanımlanması ve otomatik olarak oluşturularak gerektiğinde güncellenebilmesi yoluyla kurulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, yapı unsurlarının birbirleriyle olan ilişkilerinin yanı sıra, geometrik bilgileri ile tarihsel, belgesel ve görsel nitelikteki geometrik olmayan bilgilerin ilişkilendirilmesine yönelik veri yapısı oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, TYBM unsurları, öznitelikleri ve bunlar arasındaki ilişkiler tanımlanarak TYBM'nin veri yapısına ilişkin kavramsal tasarım tamamlanmıştır.

3.2. TYBM Veri Toplama

Bu aşamada, Teşvikiye Camii'nin harim bölümünün geçmişine ve son restorasyon sürecine ilişkin geometrik ve geometrik olmayan arşiv verileri bir araya getirilmiştir. Geometrik olmayan arşiv verileri; tarihi fotoğraflar, renklendirme paftaları, tarihi haritalar, raporlar ve yazılı belgeler, arşiv projeleri (el çizimleri), restorasyon uygulama fotoğrafları ve diğer tarihi belgelerden oluşmaktadır. Geometrik arşiv verileri ise 2B CAD arşiv projeleri ile farklı dönem restitüsyonlarına ait, restorasyon sürecinde elde edilen yersel lazer tarama yöntemi ile elde edilmiş 3B nokta bulutu verilerinden oluşmaktadır (Çizelge 3). Toplanan arşiv verileri, TYBM modelinin oluşturulmasında kullanılacak geometrik ve geometrik olmayan bilgilerin belirlenmesi amacıyla içerik ve kapsam açısından değerlendirilmiştir.

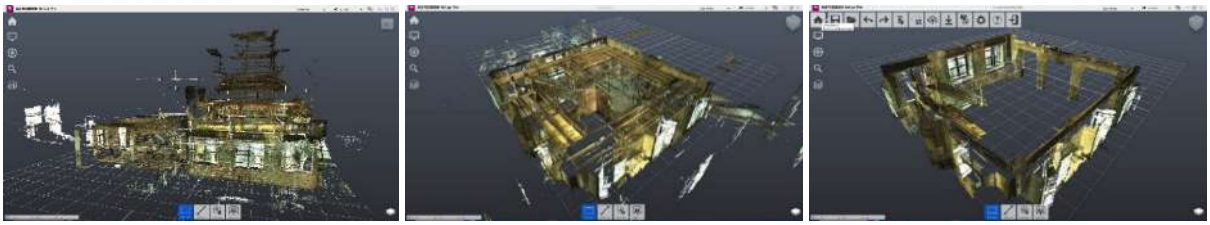
Farklı dönemlere ait restitüsyon verileri incelenmiş olmakla birlikte, TYBM modelinin oluşturulmasında 4. dönem restitüsyonuna ait geometrik veriler esas alınmıştır. Geometrik olmayan arşiv verileri ise yapı unsurlarına ilişkin öznitelik tanımlamalarının yapılması ve öznitelik bilgilerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Çizelge 3. TYBM kapsamında kullanılan veri türleri, veri toplama yöntemleri ve veri formatları.

Veri	Veri Türü	Veri Top.Yöntemi	Veri Formatı
3B Nokta Bulutu	Geometrik V.	Yersel Lazer Tarama	IMP, E57
Arşiv Projeleri (2D CAD)	Geometrik V.	-	DWG, PDF
Tarihi Fotoğraflar	Geometrik Olmayan V.	-	JPEG, TIFF
Renklendirme Paftaları	Geometrik Olmayan V.	-	JPEG, TIFF
Tarihi Haritalar	Geometrik Olmayan V.	-	JPEG, TIFF, PDF
Raporlar ve Yazılı Belgeler	Geometrik Olmayan V.	-	PDF
Arşiv Projeleri (El Çizimi)	Geometrik Olmayan V.	-	JPEG
Restorasyon Uyg. Fotoğ.	Geometrik Olmayan V.	-	JPEG, TIFF
Tarihi Belgeler	Geometrik Olmayan V.	-	PDF

3.3. TYBM Veri İşleme

Bu aşamada, Teşvikiye Camii'nin Harim bölümüne ilişkin restorasyon sürecinde gerçekleştirilen Yersel Lazer Tarama çalışması sonucunda elde edilen 3B nokta bulutu verileri, TYBM modelleme aşamasında geometrik altlık olarak kullanılabilecek duruma getirilmiştir. Bu süreçte, nokta bulutu verisinin işlenmesinde Autodesk ReCap ve CloudCompare nokta bulutu yazılımları kullanılmıştır. Leica marka lazer tarayıcı kullanılarak elde edilen imp formatında bulunan büyük boyutlu 3B nokta bulutu verisi, daha etkin biçimde yönetilebilmesi ve işlenebilmesi amacıyla, farklı kot ve konumlarda gerçekleştirilen tarama oturumlarına göre altı parçaya ayrılmış ve Autodesk ReCap yazılımının desteklediği E57 formatına dönüştürülmüştür. Böylece, yüksek boyutlu nokta bulutu verilerinin işlenmesi sırasında ortaya çıkabilecek donanımsal kısıtlamalar azaltılmıştır. Autodesk ReCap yazılımına aktarılan her bir 3B nokta bulutu veri parçası için ayrı proje dosyaları oluşturulmuştur. Restorasyon sürecinde gerçekleştirilen lazer tarama çalışmaları sırasında çalışma alanında bulunan iskeleler, yürüme platformları, geçici merdivenler, yerinde koruma altına alınmış yapı öğeleri, onarım çalışmalarına ilişkin ekipmanlar vb. geçici unsurlar, mevcut 3B nokta bulutu arşiv veri seti içerisinde yer almaktadır. Veri setini optimize etmek için temizlenmek istenen alan sınırlandırma aracı kullanılarak x, y ve z düzlemlerinde belirlenmiş; çalışma alanı dışında kalan veriler geçici olarak gizlenerek manuel veri temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a, 3b, 3c). Bu kapsamda, gürültülü, hatalı ve modelleme açısından gereksiz veriler ayıklanarak yüksek boyutlu veri yükü azaltılmıştır. Böylece, TYBM modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere düzenlenmiş nokta bulutu veri seti elde edilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3. Autodesk ReCap yazılımında 3B nokta bulutu verisinin temizlenmesi; öncesi (a, b) ve sonrası durumu (c).

Temizleme işlemleri tamamlanan altı parçadan oluşan 3B nokta bulutu veri setinin, TYBM modelleme aşamasında geometrik altlık olarak kullanılabilmesi amacıyla aynı koordinat sistemi içerisinde ilişkilendirilmesi ve birleştirilmesi gerekmiştir. Bu amaçla Autodesk ReCap yazılımına aktarılarak, ilişkilendirilecek her iki nokta bulutu veri dosyası arasında en az üç ortak kontrol noktası belirlenmiş ve eşleştirme işlemleri milimetre düzeyinde hassasiyetle gerçekleştirilmiştir (Şekil 4a). Bu işlem tüm veri dosyaları için tekrarlanmış ve Merge Scan (tarama birleştime) aracı kullanılarak nokta bulutu veri setleri ortak koordinat sistemi içerisinde birleştirilmiştir (Şekil 4b). Lazer tarama

çalışmaları sırasında kubbe kotunda bulunan geçici iskele platformları nedeniyle yeterli sayıda ortak kontrol noktası belirlenemeyen tarama verisi dosyası ise CloudCompare yazılımındaki Align (hizalama) aracı kullanılarak diğer veri dosyası ile birleştirilmiştir (Şekil 4c). Böylece, TYBM modelleme çalışmalarında altlık olarak kullanılmak üzere hazır 3B nokta bulutu verisi elde edilmiştir (Şekil 4d).



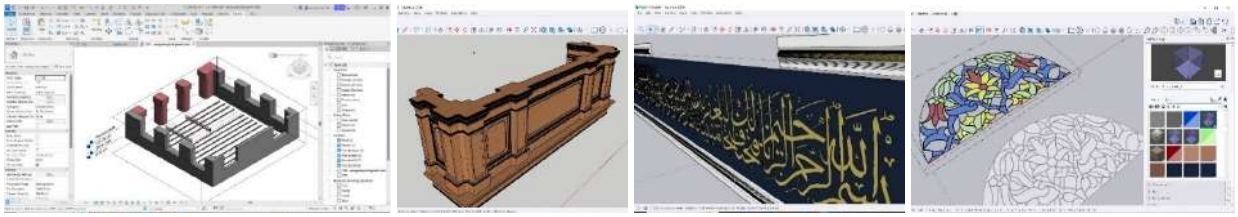
(a) (b) (c) (d)

Şekil 4. Nokta bulutu veri dosyaları arasında ortak kontrol noktalarının belirlenmesi (a), Recap (b) ve CloudCompare (c) yazılımlarında birleştirilmesi ve veri işleme süreci tamamlanmış 3B nokta bulutu (d).

3.4. TYBM Modelleme

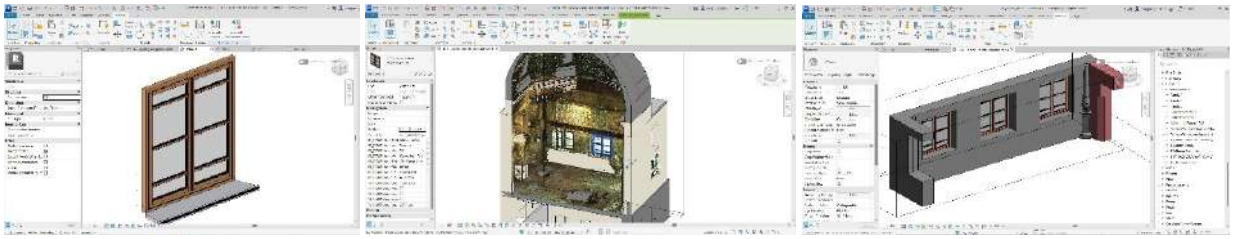
Modelleme çalışmalarında, Teşvikiye Camii'nin harim bölümüne ilişkin neoklasik üsluptaki kalemişi tezyinat programının bulunduğu 4. dönem restitüsyonu esas alınmıştır. Bu dönem restitüsyonu, yapısal unsurlar bakımından yapının restorasyon öncesi durumunu temsil etmektedir. Modelleme süreci, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) yazılımı olan Autodesk Revit ortamında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Teşvikiye Camii'nin Harim bölümüne ilişkin TYBM çalışmaları için yeni bir proje dosyası oluşturulmuş ve projeye ait kimlik bilgileri sisteme tanımlanmıştır. Modelleme çalışmaları, yazılım içerisinde farklı veri ve model bileşenleri için ayrı çalışma setleri (Worksets) oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 4. döneme ait yapı unsurları, 3B nokta bulutu verisi ve kalemişi tezyinat katmanları için ayrı çalışma setleri oluşturulmuştur. Böylece, her bir çalışma setinin gereksinim doğrultusunda düzenlenebilmesi, kilitlenebilmesi, görünürlüklerinin açılıp kapatılabilmesi ve diğer çalışma setlerinden bağımsız olarak görüntülenebilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, model organizasyonunun daha etkin biçimde yürütülmesine ve büyük hacimli verilerin yönetilerek sistem performansının kontrol altında tutulmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca, oluşturulan çalışma seti düzeni, farklı dönemlere ait verilerin de ilerleyen aşamalarda modele sistematik ve düzenli bir biçimde eklenebilmesine olanak sağlamıştır.

Modellemeye altlık oluşturacak 3B nokta bulutu verisi, E57 formatında Autodesk Revit ortamına aktarılmıştır. Ardından, 3B nokta bulutu verisi ile yapıya ait onaylı proje çizimleri ve kot bilgileri referans alınarak proje plan düzlemleri, kat seviyeleri ve kesit yerleri tanımlanmıştır. Proje tarayıcısında (Project Browser), kat planları, kesitler, görünüşler ve modelin farklı yönlerden incelenmesine ve geometrik doğruluğunun kontrol edilmesine yönelik 3B görünümler (3D Views) oluşturulmuştur. Böylece, tarihi yapının geometrik özelliklerinin 3B nokta bulutu ve mevcut proje verileri referans alınarak modellenmesine yönelik temel modelleme altyapısı oluşturulmuştur. TYBM unsurlarından pencere, revzen, döşeme, kubbe, korkuluk, duvar, kubbe kasnağı, sütun, paraçol, ayak (paye), kubbe ve hat yazı kuşağı gibi TYBM unsurları, her biri 2B CAD çizim altlıkları ve 3B nokta bulutu verisi referans alınarak manuel olarak modellenmiştir (Şekil 5a, 5b, 5c, 5d). Revit ortamında modellenen TYBM unsurları yazılımın mimari modelleme araçları kullanılarak ve unsurla ilişkili özellikler tanımlanarak (duvar için en, boy, yükseklik, kalınlık, malzeme vb.) gerçekleştirilmiştir. Revit ortamında doğrudan modellenmesi güç olan organik ve serbest formlara sahip TYBM unsurlarının modellenmesinde ise Revit'e ek olarak SketchUp yazılımından yararlanılmıştır. SketchUp ortamında oluşturulan modeller, uygun dosya formatlarında dışa aktarılarak her biri ayrı Revit aile (Family) modelleme alt dosyalarına aktarılmış ve TYBM modelinin bileşenleri olarak kullanılmıştır. Autodesk Revit doğrudan modelleme araçlarının karmaşık geometriye ve organik 3B bezemelere sahip unsurların modellenmesinde yetersiz kalması nedeniyle, dini yapı unsurları (minber, mihrap ve vaaz kürsüsü) modelleme sürecine dahil edilmemiştir. Modellenen TYBM unsurları 3B nokta bulutu verisi referans alınarak model içerisindeki gerçek konumlarına yerleştirilmiştir. Bu yaklaşımın TYBM pencere unsurlarına uygulanmasında, zemin kat kotunda yer alan çift kanatlı ahşap pencereler ile mahfil kat kotundaki alçı revzen pencerelerin geometrileri oluşturularak Autodesk Revit'te ilgili pencere ailelerine aktarılmıştır (Şekil 6a, 6b, 6c). Pencere unsurları için genişlik, yükseklik ve derinlik parametreleri tanımlanmış; ayrıca boşluk oluşturma aracı ile pencere ve duvar açıklıkları arasında parametrik bir ilişki kurulmuştur. Böylece pencere boyutlarında yapılan değişikliklerin ilgili duvar açıklığına yansıtılması sağlanmıştır (Şekil 7a, 7b, 7c).



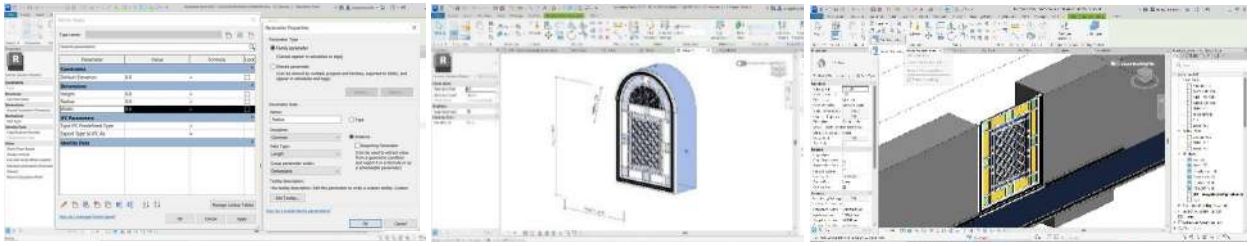
(a) (b) (c) (d)

Şekil 5. TYBM duvar, döşeme, ayak unsurlarının (a) Revit'te; korkuluk (b), hat yazı kuşağı (c) ve revzen unsurlarının SketchUp'ta modellenmesi (d).



(a) (b) (c)

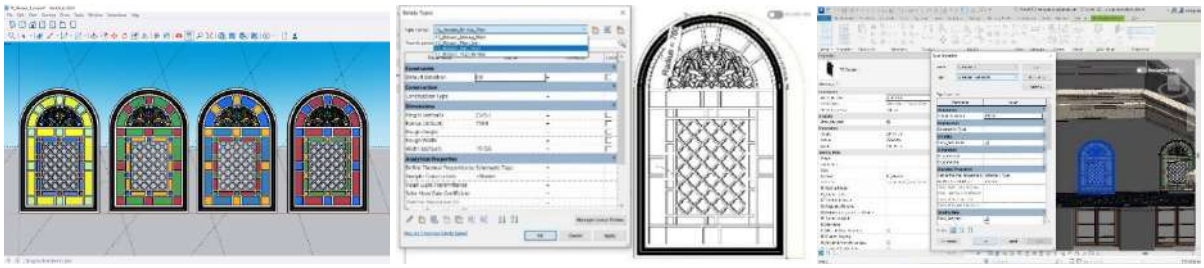
Şekil 6. TYBM zemin kat çift kanatlı pencere unsuru aile dosyası (a) ve nokta bulutu kullanılarak model içerisinde konumlandırılması (b,c).



(a) (b) (c)

Şekil 7. TYBM revzen unsuru için parametre tanımlaması (a,b) ve yer aldığı duvar üzerinde boşluk oluşturulması (c).

Mahfil katındaki revzen pencereler geometrik olarak aynı tipolojiye sahip olmakla birlikte, dört farklı vitray renk düzeninden oluşmaktadır. Yapıda her renk düzeninden ikişer adet olmak üzere toplam sekiz adet revzen pencere bulunduğundan, farklı renk düzenlerine sahip revzenler ayrı ayrı modellenmiştir (Şekil 8a). Bu geometrilerin tek bir aile içerisinde yönetilebilmesi amacıyla dört farklı Type (tip) tanımlanmış ve her vitray düzeni için "Yes/No" görünürlük parametreleri oluşturulmuştur (Şekil 8b). Böylece ilgili tip seçildiğinde yalnızca o tipe ait vitray geometrisinin görünür olması sağlanmıştır. Bu yöntem sayesinde modeldeki unsur ve aile tekrarının önüne geçilmiş ve tanımlanan parametreler ve aile ilişkileri aracılığıyla farklı revzen tiplerinin tek bir aile yapısı içerisinde parametrik olarak yönetilmesi sağlanmıştır (Şekil 8c).

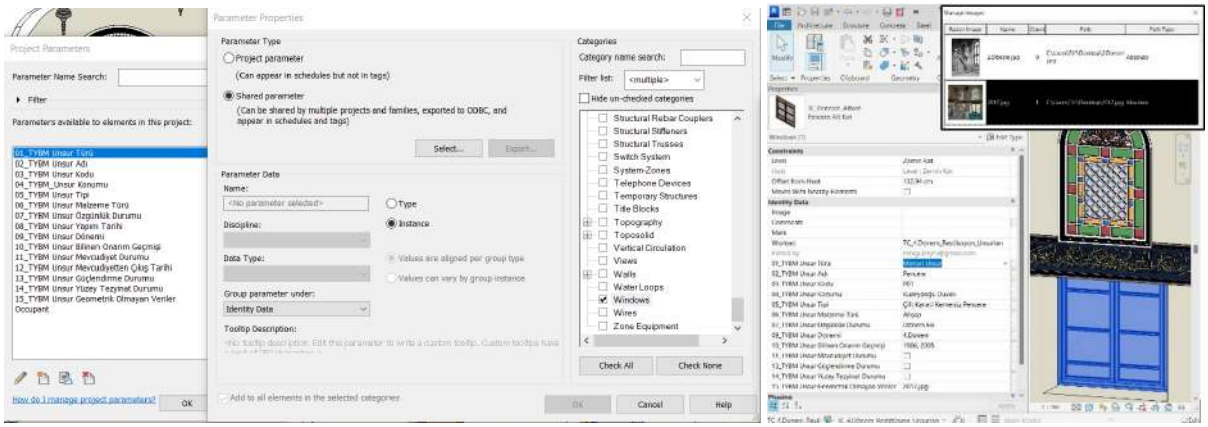


(a) (b) (c)

Şekil 8. Farklı renk düzenlerine sahip revzen modelleri (a), farklı revzen tipleri ve görünürlük parametresi tanımlanması (b) ve tek bir aile yapısı içerisinde yönetilmesi (c).

Modelleme sürecinin ardından, TYBM unsurlarına ilişkin belirlenen özniteliklerin ve geometrik olmayan bilgilerin veri girişi ile modele tanımlanması ve ilişkilendirilmesi aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda, TYBM pencere unsuruna ilişkin kavramsal tasarım aşamasında belirlenen öznitelikler Revit ortamında ilgili parametreler klasöründe tanımlanmış ve bu özniteliklere karşılık gelen öznitelik bilgilerinin veri girişi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9a, 9b). Böylece oluşturulan geometrik model ile yapıya ilişkin geometrik olmayan veriler ilişkilendirilmiştir. Pencere unsuru

özelinde gerçekleştirilen uygulama sonucunda, tanımlanan öznitelikler ve bu özniteliklerle ilişkilendirilen verilere ilgili yapı unsuru üzerinden erişilebildiği görülmüştür. Bu uygulama ile TYBM modeli yalnızca 3B geometrik bir temsil olarak değil, yapı unsurlarına ilişkin farklı nitelikteki bilgilerin tanımlanabildiği, güncellenebildiği ve yönetilebildiği bütünleşik bir bilgi modeli olarak oluşturulmuştur.



(a) (b)

Şekil 9. TYBM pencere unsuruna ilişkin öznitelik tanımlama (a) ve özniteliklere karşılık gelen öznitelik bilgilerinin veri girişi (b).

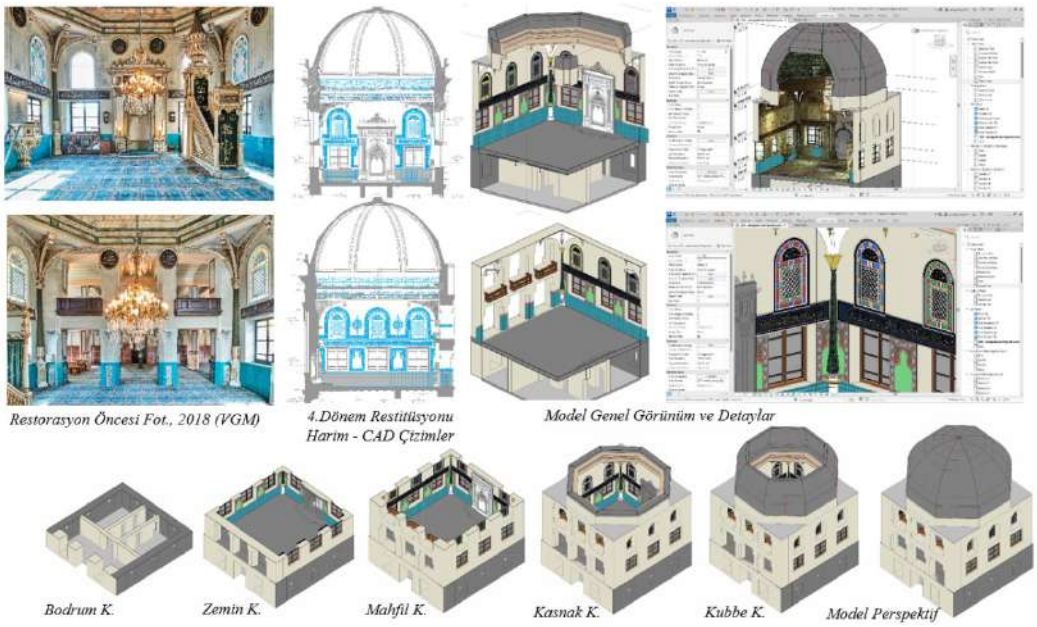
Bu çalışma kapsamında, kültür varlığının 4. dönem restitüsyonuna ilişkin yapı unsurlarının geometrik olarak modellenmesi, öznitelik tanımlaması ve veri girişinin yapılmasının yanı sıra, 4. dönem restitüsyonuna ait zemin kat kotu kalemişi tezyinat katmanları da TYBM modeline entegre edilmiştir. Zemin kat pencere parapet kotunda yer alan firuze renkli çini kaplamalar ile pencereler arasında bulunan kalemişi bezeme modüllerinin modellenmesi için ayrı aile dosyaların içerisinde 1 mm kalınlığında yüzeye bağlı (Face-Based) yüzey elemanları oluşturulmuş (Şekil 10a) ve ilgili duvar yüzeylerine yerleştirilmiştir. Oluşturulan aileler malzeme parametreleri ile ilişkilendirilerek kalemişi tezyinat katmanının model içerisinde yönetilmesi sağlanmıştır. Ardından, Revit'in malzeme yönetim araçları kullanılarak ilgili yüzeylere, 4. dönem kalemişi bezemelerine ait renklendirme paftaları bire bir ölçekte doku (texture) olarak atanmıştır (Şekil 10b, 10c). Böylece halihazırda yapıda bulunmayan zemin kat kotundaki çini kaplamalar ve kalemişi bezemeler, TYBM modeli içerisinde özgün konumları ile renk ve desen özellikleri korunarak temsil edilebilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 10. Yüzeye bağlı yüzey elemanlarının oluşturulması (a) ve malzeme yönetim araçları ile renklendirme paftalarının doku olarak modele entegre edilmesi (b, c).

Bu çalışmada, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (TYBM) yaklaşımının kültür varlıklarını koruma ve restorasyon süreçlerinde kullanım olanakları araştırılmış ve İstanbul ili, Şişli ilçesinde yer alan Teşvikiye Camii harim (ana ibadet mekanı) bölümünün 1970'li yıllardaki durumunu temsil eden 4. dönem restitüsyonuna ilişkin bir TYBM modeli üretilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Oluşturulan TYBM modelinin genel görünümü ve detayları.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda, 3B nokta bulutu verileri ve mevcut CAD çizimleri referans alınarak 4. dönem restitüsyonuna ait yapı unsurlarının TYBM ortamında modellenebildiği; bu unsurlara ilişkin özniteliklerin tanımlanabildiği ve tarihsel, belgesel ve görsel nitelikteki geometrik olmayan verilerin ilgili yapı unsurları ile ilişkilendirilebileceği ortaya konulmuştur. Pencere unsurları üzerinden gerçekleştirilen uygulamada, geometrik parametreler ile pencere-duvar unsurları arasında parametrik ilişkiler kurulmuş; farklı vitray renk düzenlerine sahip revzenler ise tek bir aile yapısı içerisinde tipler ve görünürlük parametreleri aracılığıyla yönetilmiştir. Bu uygulama, TYBM unsurlarının geometrik özelliklerinin yanı sıra parametrik özelliklerinin de model içerisinde yönetilebildiğini göstermektedir. Çalışmanın öne çıkan sonuçlarından biri, 4. dönem restitüsyonuna ait zemin kat kalemişi tezyinat katmanlarının TYBM modeline başarı ile entegre edilmesidir. Bu kapsamda, yapısal unsurların yanı sıra geometrik ve geometrik olmayan veriler ile döneme ait kalemişi tezyinat katmanları tek bir TYBM modeli içerisinde bütünleştirilmiştir. Böylece 4. dönem restitüsyonunun yapısal unsurları ve tezyinat katmanlarıyla birlikte dijital olarak temsil edilmesi ve bu bilgilere model üzerinden erişilebilmesi sağlanmıştır. Çalışma, bu yönüyle TYBM'nin belirli bir tarihsel döneme ait yapı unsurları ve bezeme katmanlarının arşiv verileriyle birlikte bütünleşik biçimde yönetilmesine yönelik kullanımını ortaya koyan uygulamalı bir örnek sunmaktadır.

Bu çalışma ile, kültür varlıklarını koruma ve restorasyon süreçleri veri yönetiminin 2B, analog tabanlı yöntemler yerine; 3B dijital veri tabanlı TYBM yaklaşımı kullanılarak daha bütüncül ve sürdürülebilir biçimde gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. TYBM yaklaşımının sağladığı; model ile etkileşime girme, filtreleme, planlama, nitelik yükleyebilme (malzeme, özgünlük durumu vb.), modele yeni veri ekleyebilme ve düzenleyebilme gibi olanaklar bu çalışma kapsamında sunulmuştur. Elde edilen bulgular, TYBM yaklaşımının kültür varlıklarının korunması ve restorasyon süreçlerinde farklı nitelikteki verilerin yapı unsurlarıyla ilişkilendirilerek bütünleşik bir bilgi modeli içerisinde yönetilmesine; veri koordinasyonunun sağlanabilmesine ve gelecekteki restorasyon çalışmalarına altlık oluşturmak üzere kullanabilmesine olanak sağladığını göstermektedir. Yapılan modelleme ile TYBM ile verilerin yalnızca dijital olarak arşivlemediği, aynı zamanda aktif biçimde yönetilebildiği görülmüştür.

Çalışma sonucunda, TYBM'nin kültür varlıkları koruma ve restorasyon sürecinde kullanılabilecek etkin bir araç olma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, uygulama sürecinde bazı sınırlılıklar tespit edilmiş, özellikle yüksek boyutlu 3B nokta bulutu verilerinin işlenmesi ve yönetilmesinde donanımsal ve yazılımsal açıdan güçlükler yaşanmıştır. Ayrıca, hat yazı kuşağı gibi organik ve serbest formlu unsurların manuel olarak modellenmesi zaman alıcı olmakla birlikte, Autodesk Revit doğrudan modelleme araçlarının, karmaşık geometriye ve organik 3B bezemelere sahip unsurların modellenmesinde sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda, bu unsurların modellenmesinde nokta bulutu verilerinden yararlanılarak otomatik ve/veya yarı otomatik modelleme yöntemlerinin TYBM üretim süreçleriyle bütünleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, TYBM yaklaşımının gelecekte ülke ölçeğinde yaygınlaştırılabilmesi ve envanter çalışmalarında kullanılabilmesi için bu hususta standartların geliştirilerek yasal altyapının güçlendirilmesi önem arz etmektedir. Buna ek olarak, TYBM modellerinin sanal gerçeklik çalışmalarıyla ilişkilendirilmesi ile kültürel mirasın tanıtımı ve turizme katkı sunulması mümkündür. Öte

yandan, özellikle bir deprem ülkesi olan Türkiye'de TYBM'nin afet risk yönetimi kapsamındaki hasar tespit, müdahale ve rekonstrüksiyon çalışmalarına entegre edilmesi, süreçte zaman, maliyet ve veri yönetimi açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Anaç, M. 2022. HBIM Destekli Dijital Arşiv Modeli. *Doktora Tezi*. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enst., Gaziantep.

Duran, Z. 2017. From Point Cloud To HBIM: Investigating The Possibilities Of Using High Resolution Data Acquisition Techniques. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Garip, D. 2023. Türkiye'deki Tarihi Yapıların Restorasyon ve Koruma Projelerinin Yönetim Sürecinin HBIM Teknolojisiyle İlişkilendirilmesi: Bir Vaka Çalışması. *Yüksek Lisans Tezi.* Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Munoz-Pandiella, I., Bosch, C., Guardia, M., Cayuela, B., Pogliani, P., Bordi, G., Paschali, M., Andujar, C., Charalambous, P. 2024. Digital 3D Models For Medieval Heritage: Diachronic Analysis And Documentation Of Its Architecture And Paintings. *Personal and Ubiquitous Computing*, 28: 521–547.

Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S. 2013. Historic Building Information Modelling – Adding Intelligence To Laser and Image Based Surveys Of European Classical Architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76: 89–102.

Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., Barazzetti, L., & Previtali, M. 2014. Survey Turned Into HBIM: The Restoration And The Work Involved Concerning The Basilica Di Collemaggio After The Earthquake (L'Aquila). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5: 267–273.

Tan, J., Leng, J., Zeng, X., Feng, D., & Yu, P. 2022. Digital Twin For Xiegong's Architectural Archaeological Research: A Case Study Of Xuanluo Hall, Sichuan, China. *Buildings*, 12(7): 1053.

Tapponi, O., Kassem, M., Kelly, G., Dawood, N., White, B. 2015. Renovation of Heritage Assets Using BIM: A Case Study Of The Durham Cathedral. *Proceedings of the 32nd International Conference of CIB Eindhoven*, Netherlands, W78, 32, p: 706–715.

Yang, X., Lu, Y. C., Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P. 2019. HBIM Modeling From The Surface Mesh And Its Extended Capability Of Knowledge Representation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7): 301.

Vakıflar Genel Müdürlüğü (VGM), İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü Arşivi. Teşvikiye Camii'ne İlişkin Arşiv Belgeleri.

Yastıklı, N. 2007. Documentation Of Cultural Heritage Using Digital Photogrammetry And Laser Scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4): 423–427.

Yastıklı, N., Çetin, Z., & Asamaka, E. 2022. The Production of Line-Drawing and 3D Modeling of Historical Mehmet Ali Bey Fountain with SfM Approach. *Cultural Heritage and Science*, 3(1): 19–24.

02

Poster Bildiriler

15 BİLDİRİ

ULUSAL UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİ ENTEGRE YÖNETİMİ: LİDER KURUMLARIN ORTAK VİZYONU VE TEMATİK ÇÖZÜMLEMELER

Fulya BATTAL ŞAMİLOĞLU[1], Ahmet ÖRCÜN[2], Reyhan YILDIZ AYDOĞAN[3] , Tuğba YEŞİLNACAR[4]

[1]Dr., Çevre,Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemeleri Genel Müdürlüğü, 06510, Çankaya, Ankara, fulya.battal@csb.gov.tr
[2]Çevre,Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemeleri Genel Müdürlüğü, 06510, Çankaya, Ankara,
[3]Çevre,Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemeleri Genel Müdürlüğü, 06510, Çankaya, Ankara
[4]Çevre,Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemeleri Genel Müdürlüğü, 06510, Çankaya, Ankara

ÖZET

Giriş

Türkiye'nin uzaktan algılama verilerinin etkin yönetimi ve entegrasyonu, sürdürülebilir ulusal kalkınma hedeflerine ulaşılmasında en kritik altyapılardan birini oluşturmaktadır. Bu bildiri, 49 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi kapsamında kurulan ve ülkenin önde gelen kurumlarının (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesindeki ilgili Genel Müdürlükler, AFAD, HGM, OGM ve stratejik özel sektör temsilcileri) uzmanlarının katılımıyla oluşturulan "Uzaktan Algılama Verilerinin Entegre Yönetimi Stratejisi Çalışma Heyeti"nin ortak vizyonunu sunmaktadır. Temel amaç; mükerrer yatırımları önleyerek veri toplama süreçlerini standardize etmek ve ulusal kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlayacak stratejik çerçeveyi çizmektir.

Veri Yönetimi ve Koordinasyon Stratejisi

Ulusal bazda yürütülen çalışmalarda, Harita Genel Müdürlüğü (HGM) koordinasyonunda yıllık çekim planlarının yapılması, kamu kurumlarının mevcut kapasitelerinin (hava fotoğrafı çekim uçakları, geniş format sayısal kameralar, LİDAR vb.) geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda toplanan verilerin, Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) standartlarındaki 32 coğrafi veri teması ile tam uyumlu olarak işlenmesi ve ulusal entegrasyonun sağlanması stratejinin merkezinde yer almaktadır. Mekânsal, spektral, radyometrik ve zamansal çözünürlük gereksinimleri, kurumsal bilgi formlarından elde edilen çıktılarla ulusal bir takvime bağlanmıştır.

Bölgesel ve Sektörel İhtiyaçların Modellenmesi

Türkiye'nin zengin coğrafi çeşitliliği, uzaktan algılama verilerinde bölgesel ve mikro ölçekli bir strateji geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Çalışma heyetinin vizyonu doğrultusunda şu stratejik ayrımlar yapılmıştır:

- *Kentsel ve Tarımsal Alanlar: Şehirleşme takibi ve mülkiyet analizi için yüksek mekânsal çözünürlüklü optik, SAR ve termal veriler planlanırken; tarım alanlarında hassas gübreleme ve rekolte tahmini için multispektral sensörler stratejiye dâhil edilmiştir. Tarım bölgelerindeki değişimlerin altıgen (hexagon) grid sistemleri üzerinden hücresel bazda izlenmesi ve analiz süreçlerinin standardize edilmesi öngörülmektedir.*
- *Su, Kıyı, Orman ve Dağlık Bölgeler: Orman yangınları ve karbon emisyon takibinde termal algılayıcıların yanı sıra, doğal koruma alanlarında biyolojik çeşitliliğin günün her saati izlenebilmesi için aktif algılama yapan RADAR/SAR teknolojilerinin entegrasyonu şart koşulmuştur.*
- *Afet Yönetimi ve İleri Teknoloji Entegrasyonu: Stratejinin en güçlü dayanaklarından biri, iklim değişikliği ve tektonik hareketliliğin getirdiği afet risklerine karşı sürdürülebilir bir yönetim modeli sunmasıdır. AFAD ile iş birliği içerisinde kurgulanan sistemde; optik, LİDAR ve SAR (özellikle PS-InSAR ve SBAS-InSAR) verilerinin entegre kullanımı esastır. Geleneksel afet takibinin ötesine geçilerek, GNSS zaman serilerinin ve L-bandı/C-bandı SAR görüntülerinin derin öğrenme (deep learning) algoritmalarıyla işlenmesi; bu sayede yüzey deformasyonlarının ve sismik hareketliliğin kestirimci modellerle (erken uyarı sistemleri) analiz edilmesi kurumsal bir hedef olarak benimsenmiştir.*

Sonuç ve Değerlendirme

Lider kurumların geniş katılımı ve ortak mutabakatı ile hazırlanan bu Ulusal Uzaktan Algılama Stratejisi, verinin salt toplanmasından ziyade, karar destek mekanizmalarına dönüşümünü güvence altına almaktadır. Doğru sensör ve platform seçimi, standartlaşmış tema entegrasyonu ve kurumlar arası güçlü iş birliği ağı sayesinde Türkiye, uzaktan algılama ve mekânsal analiz teknolojilerinde dünya standartlarına ulaşacak vizyonu ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: uzaktan algılama, afet yönetimi, coğrafi bilgi sistemleri, TUCBS.

ABSTRACT

INTEGRATED MANAGEMENT OF NATİONAL REMOTE SENSİNG DATA: SHARED VİSİON OF LEADİNG INSTİTUTİONS AND THEMATİC ANALYSES

Introduction

The effective management and integration of Turkey's remote sensing data constitute one of the most critical infrastructures in achieving sustainable national development goals. This paper presents the shared vision of the "Integrated Management of Remote Sensing Data Strategy Working Group," established under Presidential Decree No. 49 with the high-level participation of the country's leading institutions (relevant General Directorates within the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, AFAD, HGM, OGM, and strategic private sector representatives). The primary objective is to outline the strategic framework that will standardize data collection processes by preventing duplicate investments and ensuring the most efficient use of national resources.

Data Management and Coordination Strategy

In the studies conducted on a national scale, it is aimed to make annual aerial photography plans under the coordination of the General Directorate of Mapping (HGM) and to develop the existing capacities of public institutions (aerial photography aircraft, large format digital cameras, LiDAR, etc.). The processing of the data collected within this scope in full compliance with the 32 geographical data themes in the Turkish National Geographic Information System (TUCBS) standards and ensuring national integration lie at the center of the strategy. Spatial, spectral, radiometric, and temporal resolution requirements have been tied to a national schedule using the outputs obtained from institutional information forms.

Modeling Regional and Sectoral Needs

Turkey's rich geographical diversity has necessitated the development of a regional and micro-scale strategy for remote sensing data. In line with the vision of the working group, the following strategic distinctions have been made:

- *Urban and Agricultural Areas: While high spatial resolution optical, SAR, and thermal data are planned for urbanization monitoring and property analysis; multispectral sensors for precision fertilization and yield estimation in agricultural areas have been included in the strategy. It is envisioned to monitor changes in agricultural regions on a cellular basis via hexagon grid systems and to standardize the analysis processes.*
- *Water, Coastal, Forest, and Mountainous Regions: In addition to thermal sensors for tracking forest fires and carbon emissions, the integration of RADAR/SAR technologies, which perform active sensing, has been mandated to monitor biodiversity in natural conservation areas around the clock.*
- *Disaster Management and Advanced Technology Integration: One of the strongest pillars of the strategy is that it offers a sustainable management model against disaster risks brought about by climate change and tectonic mobility. In the system designed in cooperation with AFAD, the integrated use of optical, LiDAR, and SAR (especially PS-InSAR and SBAS-InSAR) data is essential. Going beyond traditional disaster monitoring, processing GNSS time series and L-band/C-band SAR images with deep learning algorithms, and thereby analyzing surface deformations and seismic mobility with predictive models (early warning systems), has been adopted as an institutional goal.*

Conclusion and Evaluation

Prepared with the broad participation and joint consensus of leading institutions, this National Remote Sensing Strategy ensures the transformation of data into decision support mechanisms rather than its mere collection. Through correct sensor and platform selection, standardized theme integration, and a strong inter-institutional cooperation network, Turkey has put forward the vision to reach world standards in remote sensing and spatial analysis technologies.

Keywords: remote sensing, disaster management, geographic information systems (GIS), TUCBS.

SENTİNEL-2 TABANLI SPEKTRAL İNDEKS VE DOKU ANALİZİ İLE DEPREM SONRASI HASAR ÖN DEĞERLENDİRMESİ: HATAY ÖRNEĞİ

Seda Kara[1], Taner Yılmaz[2],

[1]Globetech Coğrafi Bilgi Teknolojileri Limited Şirketi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06530, Çankaya, Ankara, seda.kara@globetech.com.tr
[2]Dr. Öğretim Üyesi, Özyeğin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34794, Çekmeköy, İstanbul, taner.yilmaz@ozyegin.edu.tr

ÖZET

Deprem sonrasında hasarlı bölgelerin hızlı biçimde belirlenmesi, acil müdahale ve saha önceliklendirme süreçleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden ciddi şekilde etkilenen Hatay ilinde meydana gelen kentsel yüzey değişimlerinin Sentinel-2 optik uydu görüntüleri kullanılarak ön değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, deprem öncesi ve sonrası görüntüler üzerinden bitki örtüsü ve su yüzeylerinin etkisi azaltılmış; yapılaşmış alanlar, çıplak zemin, moloz/yıkıntı birikimi ve kentsel yüzey bozulmalarına duyarlı BAEI, NDBI ve BSI indekslerinden yararlanılmıştır. İndekslerdeki değişim büyüklükleri ve bu değişimlere ait dokusal özellikler birlikte değerlendirilerek, potansiyel hasarlı alanların görsel olarak ayrıştırılmasına yönelik indeks ve doku bilgisine dayalı bir RGB kompozit görüntü üretilmiştir. Bulgular, özellikle ΔNDBI değişim haritasının ve çok indeksli RGB doku kompozitinin yoğun yıkım gözlenen alanlarda çevre dokudan belirgin biçimde ayrışan örüntüler sunduğunu göstermektedir. Elde edilen çıktı, nihai bir yapısal hasar haritası olarak değil; deprem sonrası potansiyel hasarlı alanların belirlenmesini ve saha çalışmalarının önceliklendirilmesini destekleyen bir ön değerlendirme ürünü olarak ele alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sentinel-2, Deprem sonrası hasar ön değerlendirme, Spektral İndeksler, Doku Analizi, RGB Kompozit

ABSTRACT

POST-EARTHQUAKE POTENTIALLY DAMAGE ASSESSMENT USING SENTINEL-2-BASED SPECTRAL INDICES AND TEXTURE ANALYSIS: THE CASE OF HATAY, TÜRKIYE

Rapid identification of potentially damaged areas after earthquakes is critical for emergency response and field prioritization. This study aims to provide a potentially assessment of urban surface changes in Hatay, one of the provinces severely affected by the 6 February 2023 Kahramanmaras earthquakes, using Sentinel-2 optical satellite imagery. In this context, the influence of vegetation and water-covered areas was reduced using pre- and post-earthquake images, while BAEI, NDBI, and BSI indices were employed to emphasize changes related to built-up areas, bare soil, debris/rubble accumulation, and urban surface disturbances. The magnitude of index-based changes and their textural characteristics were jointly evaluated to produce an index-based RGB texture composite for the visual discrimination of potentially damaged areas. The findings indicate that the ΔNDBI change map and the multi-index RGB texture composite reveal patterns that are distinctly different from the surrounding urban fabric in areas of intense destruction. The resulting output is not considered a final structural damage map, but rather a potentiallyy assessment product that supports the identification of potentially damaged areas and the prioritization of post-earthquake field surveys.

Keywords: Sentinel-2, post-earthquake potentially damage assessment, spectral indices, texture analysis, RGB composite

1. GİRİŞ

Depremler, kısa sürede geniş alanlarda can kaybına, yapı hasarına ve altyapı kesintilerine yol açabilen en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Afet sonrasında hızlı ve doğru hasar değerlendirmesinin yapılması, acil müdahale planlaması açısından kritik öneme sahip olup can kayıplarının azaltılması, etkilenen nüfusun ihtiyaçlarının belirlenmesi ve insani krizlerin hafifletilmesine katkı sağlamaktadır (Havivi vd., 2022). Ancak deprem gibi geniş alanları etkileyen doğal afetlerin ardından saha tabanlı hasar tespit çalışmalarının yürütülmesi, zaman alıcı olmasının yanı sıra erişim koşulları ve güvenlik kısıtları nedeniyle sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle uzaktan algılama verileri, afet öncesi ve sonrası duruma ilişkin hızlı veri sağlayabilmesi ve geniş alanlarda analizlere olanak tanıması nedeniyle afet yönetimi çalışmalarında giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Khan vd., 2023).

Doğal afetlerin izlenmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla optik uydu görüntülerinden yararlanan çok sayıda yöntem geliştirilmiş olup, özellikle deprem sonrası hasar tespiti ve değişim analizi çalışmalarında farklı görüntü işleme ve sınıflandırma yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzaktan algılama teknolojilerinin temel kullanım alanlarından biri olan değişim tespiti, aynı coğrafi alana ilişkin farklı tarihlerde elde edilen uydu görüntülerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesiyle zamansal değişimlerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Alizadeh vd., 2022). Bununla birlikte, deprem sonrasında müdahale ekiplerinin en kısa sürede yönlendirilmesi gerektiğinden, hızlı ve kolay uygulanabilir analizler büyük önem taşımaktadır.

Depremlerin neden olduğu başlıca yıkımlardan biri olan bina hasarlarının uzaktan algılama verileriyle değerlendirilmesinde yüksek ve çok yüksek çözünürlüklü optik görüntüler, SAR verileri ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle CNN tabanlı yöntemlerin bina düzeyinde hasar konumlandırma ve sınıflandırma açısından başarılı sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir (Qing vd., 2022). Bununla birlikte, bu tür yöntemler çoğunlukla yeterli miktarda etiketli eğitim verisine, yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntülere ve görece daha yüksek hesaplama kapasitesine ihtiyaç duymaktadır (Wang vd., 2024). Bu durum, afet sonrasında hızlı ön değerlendirme gerektiren uygulamalarda veri erişilebilirliği ve işlem süresi açısından sınırlayıcı olabilmektedir.

Buna karşılık açık erişimli orta mekânsal çözünürlüklü optik veriler ve spektral indekslere dayalı yaklaşımlar, geniş alanların daha düşük işlem maliyetiyle ve kısa sürede değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak kentsel alanların heterojen yapısı, indeks tabanlı yöntemlerin tek başına kullanılması durumunda çeşitli belirsizliklere yol açabilmektedir. Örneğin NDBI, yapılaşmış alanların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmasına karşın, yapılaşmış yüzeyler ile çıplak veya boş arazilerin benzer spektral tepkileri nedeniyle bu sınıfları her durumda güvenilir biçimde ayıramamaktadır (He vd., 2010).

Benzer şekilde, deprem sonrasında gözlenen spektral değişimlerin tamamının doğrudan yapısal hasarla ilişkilendirilmesi mümkün değildir (Tian vd., 2026). Arazi örtüsü değişimleri, açık zeminler, hava koşulları veya insan faaliyetleri de indeks değerlerinde değişime neden olabilmektedir. Bu nedenle hızlı hasar haritalamasında indeks tabanlı yöntemler düşük hesaplama gereksinimi ve kolay uygulanabilirlik açısından avantaj sağlasa da sonuçların kesin bina hasar sınıflandırması yerine ön değerlendirme amacıyla yorumlanması daha uygun görülmektedir.

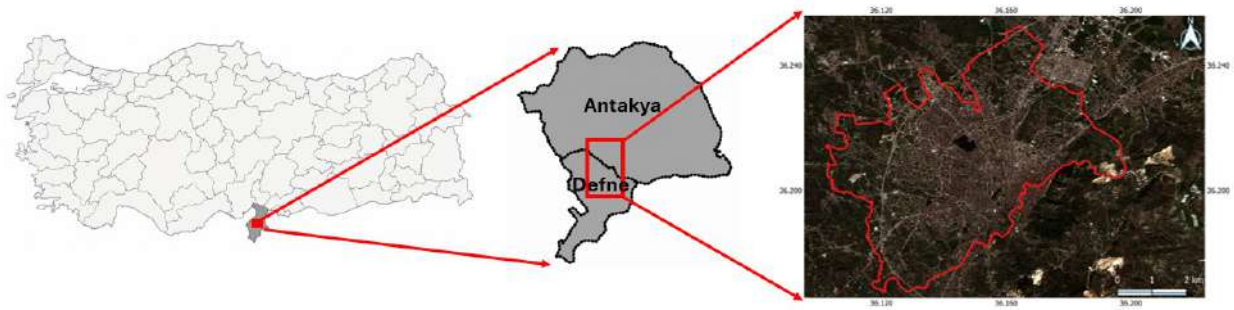
Bu bağlamda bu çalışmanın katkısı, Sentinel-2 görüntülerinden türetilen BAEI, NDBI ve BSI indekslerinin deprem öncesi ve sonrası değişimlerinin yalnızca mutlak fark değerleri üzerinden değil, aynı zamanda 3×3 piksel komşuluğunda hesaplanan yerel standart sapmaya dayalı dokusal değişkenlikleriyle birlikte değerlendirilmesidir. Bitki örtüsü ve su yüzeylerinin etkisi NDVI ve MNDWI tabanlı maskelerle azaltılmış; elde edilen spektral ve dokusal değişim çıktıları bina bazındaki yersel hasar verileriyle birlikte mekânsal olarak yorumlanmıştır. Böylece çalışma, kesin bina hasar sınıflandırması üretmek yerine, potansiyel hasarla ilişkili kentsel değişimlerin hızlı ve yorumlanabilir biçimde ön değerlendirilmesine ve afet sonrası müdahale önceliklerinin desteklenmesine odaklanmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

2.1 Çalışma Alanı

Türkiye'nin güneyinde, Akdeniz Bölgesi'nin doğu ucunda yer alan Hatay ili, tarihsel süreç boyunca farklı medeniyetlere ev sahipliği yapmış Türkiye'nin en eski ve önemli yerleşim alanlarından biridir. Bununla birlikte il, Doğu Anadolu Fay Sistemi, Ölü Deniz Fay Zonu ve bölgedeki aktif tektonik yapıların etkisi nedeniyle yüksek deprem tehlikesine sahip alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir (AFAD, 2023; Emre vd., 2012).

Hatay, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremlerden ciddi şekilde etkilenmiştir ve hasar tespit raporları doğrultusunda 13.517 yapının yıkık, 8.162 yapının acil yıkılması gereken ve 67.346 yapının ağır hasarlı olduğu tespit edilmiştir (Avcı, 2023). Söz konusu depremler sonucunda bölgede yaygın yapı hasarı ve yüzey değişimleri gözlenmiş; bu çalışmada analiz alanı, söz konusu hasarların bir bölümünü kapsayacak şekilde Antakya ve Defne ilçelerinde yer alan 43 adet mahalleyi kapsayacak şekilde seçilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Hatay'daki analiz alanının konumu ve çalışma alanı sınırları.

2.2 Kullanılan Veriler

Bu çalışmada, deprem öncesi ve sonrası dönemde meydana gelen kentsel yüzey değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla Sentinel-2 optik uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Yıkıntı/moloz birikimi ve kentsel yüzeylerde meydana gelen değişimlerin spektral indeksler aracılığıyla incelenmesi amacıyla, deprem öncesinde Ocak 2023 dönemini ve deprem sonrasında Şubat–Mart 2023 dönemini kapsayan Sentinel-2 optik uydu görüntüleri seçilmiştir.

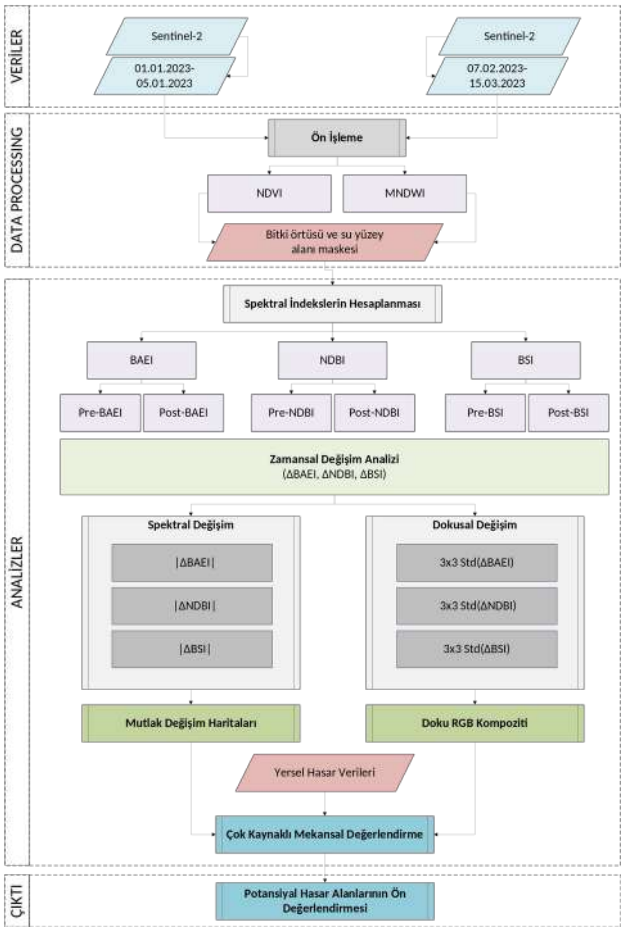
Bununla birlikte, deprem öncesi ve sonrası koşulları doğrudan karşılaştırmak amacıyla 25.01.2023 ve 09.02.2023 tarihli Sentinel-2 görüntüleri seçilmiş ve web tabanlı coğrafi bilgi sistemleri analiz platformu Globeos üzerinden değişim analizleri uygulanmıştır. Böylece, çalışma alanında deprem sonrasında meydana gelen yüzey değişimleri farklı analiz ortamları üzerinden değerlendirilerek öncelikli inceleme gerektiren alanların belirlenmesine yönelik indeks tabanlı bir ön değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Kullanılan uydu görüntülerinin teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Sentinel-2 uydusunun temel özellikleri.

Teknik Özellikler	Sentinel-2
Spektral Çözünürlük	13 bant Coastal Blue:433- 453 Blue: 458–523 Green: 543–578 Red: 650–680 Red-Edge (RE1): 698–713 Red-Edge (RE2): 733–748 Red-Edge (RE3): 773–793 NIR: 785–899 NIR Narrow:855-875 Water Vapour:935-955 SWIR Cirrus:1360-1390 SWIR1: 1565–1655 SWIR2: 2100–2280
Mekansal Çözünürlük	10 m / 20 m / 60 m
Zamansal Çözünürlük	5 gün (Sentinel-2A/B birlikte; tek uydu için 10 gün)
Radyometrik Çözünürlük	12 bit

3. YÖNTEM

Şekil 2'de sunulan metodolojik akış kapsamında, Sentinel-2 görüntülerine ön işleme ve NDVI–MNDWI tabanlı maskeleme uygulanmış; ardından BAEI, NDBI ve BSI indeksleri üzerinden deprem öncesi ve sonrası yüzey değişimleri analiz edilmiştir. İndekslerin mutlak farkları ile spektral değişim, 3×3 standart sapma analizi ile dokusal değişim belirlenmiş ve elde edilen çıktılar yersel hasar verileriyle birlikte değerlendirilerek potansiyel hasar alanlarının ön değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında gerçekleştirilen çok kaynaklı mekânsal değerlendirmelerde referans veri olarak kullanılmak üzere, 124M396 numaralı "Depremde Karayolu Kapanma Olasılığının Tahmini ve İyileşme Süreci Analizi" başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı HTSİ veri tabanından elde edilen 2.621 betonarme binaya ait hasar verisinden yararlanılmıştır.



Şekil 2: Kullanılan metodolojinin akış şeması.

3.1 . Sentinel-2 Görüntülerinin Seçimi ve Ön İşleme

Çalışmada, deprem öncesi ve sonrası kentsel yüzey değişimlerinin belirlenmesi amacıyla Sentinel-2 verilerinden yararlanılmıştır. Google Earth Engine (GEE) platformunda Copernicus Sentinel-2 Surface Reflectance Harmonized (S2 SR Harmonized) veri koleksiyonu kullanılmış; deprem öncesi dönem 1 Ocak–5 Şubat 2023, deprem sonrası dönem ise 7 Şubat–15 Mart 2023 olarak tanımlanmıştır.

Globeos platformunda gerçekleştirilen değişim analizlerinde ise deprem öncesini temsil eden 25.01.2023 ve deprem sonrasını temsil eden 09.02.2023 tarihli Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Çalışma alanını kapsayan görüntüler arasından bulutluluk oranı %30'un altında olan veriler seçilmiştir. Bulut, bulut gölgesi, ince sirrus ve kar/buz etkilerini azaltmak amacıyla Sentinel-2 Scene Classification Layer (SCL) bandı kullanılmış; SCL sınıflarından bulut gölgesi, orta ve yüksek olasılıklı bulut, ince sirrus ve kar/buz olarak tanımlanan pikseller analiz dışında bırakılmıştır. Ön işleme sonrasında her iki dönem için medyan piksel değerlerinden oluşan deprem öncesi ve sonrası kompozit görüntüler üretilmiştir (Şekil 3).



(a) (b)

Şekil 3: Deprem öncesi ve sonrası için seçilen Sentinel-2 medyan kompozit görüntüler: (a) Deprem öncesi, (b) Deprem sonrası.

3.2 Spektral İndekslerin Hesaplanması

Deprem öncesi ve sonrası uydu görüntülerinden Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI), Normalleştirilmiş Fark Yapı İndeksi (NDBI), Çıplak Toprak İndeksi (BSI) ve Kentsel Alan Çıkarma İndeksi (BAEI) hesaplanmıştır. NDVI ve MNDWI öncelikle bitki örtüsü ile su yüzey alanların analiz dışı bırakılması amacıyla kullanılırken; NDBI, BSI ve BAEI deprem sonrasında yapılaşmış ve açık yüzeylerde meydana gelen spektral değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Tablo 2'de kullanılan indeksler ve formüllerine yer verilmiştir.

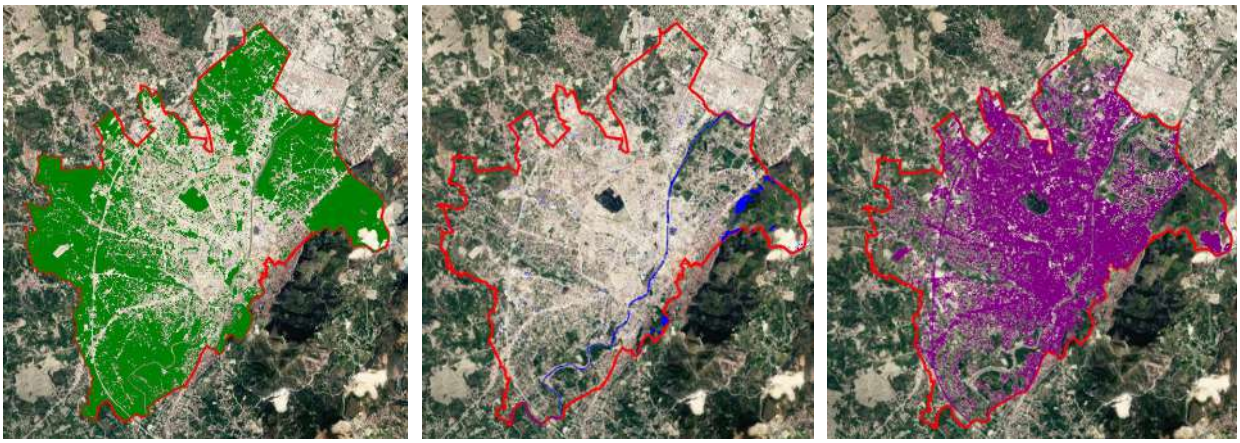
BAEI hesabında, indeks formülünde yer alan 0,3 sabitinin yüzey yansıtım değerleriyle uyumlu biçimde kullanılabilmesi amacıyla Sentinel-2 SR görüntülerinin B3, B4 ve B11 bantları 0–10000 ölçeğinden 0–1 aralığındaki yüzey yansıtım değerlerine dönüştürülmüştür. Ardından BAEI değeri bu dönüştürülmüş bantlar kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 2: Çalışmada kullanılan spektral indeksler ve formülleri.

İndeks	Formül	Çalışmadaki kullanım
NDVI	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	Bitki maskesi
MNDWI	$\frac{(Green - SWIR1)}{(Green + SWIR1)}$	Su yüzey maskesi
NDBI	$\frac{(SWIR1 - NIR)}{(SWIR1 + NIR)}$	Yapılaşmış alan değişimi
BSI	$\frac{((SWIR1 + Red) - (NIR + Blue))}{((SWIR1 + Red) + (NIR + Blue))}$	Açık/Çıplak yüzey değişimi
BAEI	$\frac{(Red + 0.3)}{(Green + SWIR1)}$	Yapay yüzey değişimi

3.3 Bitki ve Su Yüzeylerinin Maskelenmesi ve Değişim Analizi

Deprem kaynaklı olmayan spektral değişimlerin analiz üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla bitki örtüsü ile su yüzey alanları analiz dışında bırakılmıştır. Deprem öncesi veya sonrası kompozitlerin herhangi birinde NDVI değerinin 0,25'in üzerinde olması durumunda ilgili piksel bitki örtüsü olarak değerlendirilmiş ve analiz dışında bırakılmıştır. Bu eşik, Sentinel-2 verileri kullanılarak vejetasyon ile vejetasyon dışı yüzeylerin ayrımında 0,25 NDVI değerinin kullanıldığı önceki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir (Dvorakova vd., 2021; Choudhury vd., 2026). Benzer şekilde, MNDWI değerinin 0'ın üzerinde olması durumunda ilgili piksel su yüzeyi karakteri gösteren alan olarak değerlendirilmiş ve analiz dışında bırakılmıştır. MNDWI için 0 eşik değeri, açık su yüzeylerinin ayrımında yaygın olarak kullanılan başlangıç eşiği dikkate alınarak seçilmiştir (Xu, 2006). Bu iki koşuldan en az birini sağlayan pikseller dışlanarak nihai analiz maskesi oluşturulmuş (Şekil 4) ve sonraki spektral değişim ve doku analizleri yalnızca geçerli kentsel ve açık yüzey pikselleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 4: NDVI ve MNDWI tabanlı analiz maskesinin oluşturulması: (a) NDVI ile belirlenen bitki alanları, (b) MNDWI ile belirlenen su yüzey alanları, (c) bitki ve su yüzey alanlarının maskelenmesi sonucu elde edilen nihai analiz alanı

Maskelenmiş deprem öncesi ve sonrası indeks görüntüleri arasındaki spektral değişimler piksel bazında hesaplanmıştır. Her bir indeks için yönlü değişimi ifade eden

$$\Delta I = I_{deprem\ sonrası} - I_{deprem\ öncesi} \quad (1)$$

ve değişimin yönünden bağımsız büyüklüğünü ifade eden

$$|\Delta I| = |I_{deprem\ sonrası} - I_{deprem\ öncesi}| \quad (2)$$

katmanları üretilmiştir. Yönlü fark görüntüleri yüzey özelliklerinde meydana gelen artış ve azalışların değerlendirilmesini sağlarken, mutlak fark görüntüleri değişimin yönünden bağımsız olarak toplam spektral değişim büyüklüğünün ortaya konulmasında kullanılmıştır. Hasar ön değerlendirmesinde özellikle NDBI, BSI ve BAEI değişimleri dikkate alınmıştır.

Deprem öncesi ve sonrası görüntülerden elde edilen BAEI, NDBI ve BSI fark katmanlarındaki mekânsal değişimin belirlenmesi amacıyla 3×3 piksel hareketli pencere kullanılarak yerel standart sapma tabanlı doku analizi uygulanmıştır. Elde edilen doku katmanları ayrı ayrı değerlendirilmiş, ayrıca indekslerin birlikte yorumlanabilmesi amacıyla çok bantlı bir RGB doku kompoziti oluşturulmuştur.

4. UYGULAMA

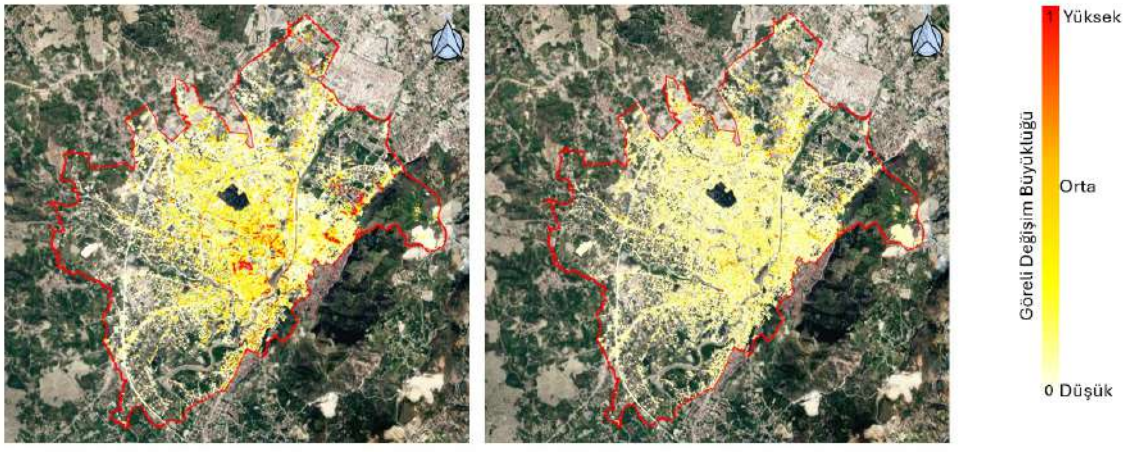
Belirlenen analiz yaklaşımı çalışma alanına uygulanarak deprem öncesi ve sonrası dönemlere ait spektral ve dokusal değişimler mekânsal olarak incelenmiştir. Bu aşamada üretilen indeks fark katmanları ile doku temelli çıktılar birlikte değerlendirilmiş, değişimin yoğunlaştığı kentsel alanların ön değerlendirilmesine odaklanılmıştır. Elde edilen bulgular, yersel hasar verileriyle birlikte değerlendirilerek uydu tabanlı değişim örüntülerinin mekânsal ilişkisi açısından yorumlanmıştır.

4.1 Spektral Değişim Analizi

Deprem öncesi ve sonrası Sentinel-2 görüntülerinden hesaplanan BAEI, NDBI ve BSI indeksleri arasındaki değişim, mutlak fark yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan |ΔBAEI|, |ΔNDBI| ve |ΔBSI| haritaları aracılığıyla yüzey özelliklerinde meydana gelen değişimin büyüklüğü mekânsal olarak ortaya konmuştur.

Şekil 5'te yer alan BAEI ve BSI spektral değişim haritaları incelendiğinde, her iki indeksin de çalışma alanında belirgin yüzey değişimlerini ortaya koyduğu görülmüştür. BAEI değişimlerinin özellikle yoğun yapılaşmış merkezi ve güney kesimlerde daha kümelenmiş bir dağılım sergilediği, BSI değişimlerinin ise daha geniş ve parçalı alanlara yayıldığı belirlenmiştir.

Bu farklılık, BAEI'nin yapılaşmış yüzey karakterindeki değişimlere daha duyarlı olmasına karşılık, BSI'nın çıplak yüzey ve yüzey örtüsündeki değişimlere de tepki vermesiyle ilişkilendirilebilir. Bu nedenle indekslerin tek başına doğrudan yapı hasarını temsil etmekten ziyade, deprem sonrası yüzey değişiminin farklı bileşenlerini ortaya koyduğu değerlendirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5: Deprem öncesi ve sonrası Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen mutlak spektral değişim haritaları: (a) |ΔBAEI| ve (b) |ΔBSI|. Lejant, her indeks için düşükten yükseğe göreli değişim büyüklüğünü göstermektedir.

4.2 Dokusal Değişim Analizi ve RGB Doku Kompoziti

Spektral değişimlerin yerel mekânsal heterojenliğini değerlendirmek amacıyla doku analizi uygulanmıştır. Bu kapsamda, her piksel için 3×3 piksellik hareketli pencere içerisindeki standart sapma hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Xu vd. (2017) spektral indekslere ait yerel standart sapma değerlerini 3×3 piksel komşuluk içerisinde mekânsal bilgi bileşeni olarak kullanmıştır. Standart sapmanın yüksek olduğu bölgeler, komşu pikseller arasında daha yüksek spektral değişkenliğe ve dolayısıyla yerel heterojenliğin daha belirgin olduğu alanlar olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 6'da deprem öncesi ve sonrası Sentinel-2 görüntüleriyle birlikte verilen 3×3 hareketli pencere tabanlı Std(ΔNDBI) doku haritasında, çalışma alanının özellikle merkezi ve güney kesimlerinde yüksek yerel değişkenlik gösteren bölgelerin yoğunlaştığı görülmektedir. Std(ΔNDBI) değerlerinin yüksek olması, komşu pikseller arasındaki NDBI değişiminin daha heterojen bir mekânsal yapı sergilediğini göstermektedir. Bu heterojenlik; yapı bütünlüğündeki bozulmalar, çatı ve yüzey geometrilerindeki değişimler, moloz oluşumu ve açık yüzeylerin ortaya çıkması gibi deprem sonrası etkilerle ilişkili olabilir. Bununla birlikte, NDBI farklı yüzey türlerinden ve deprem dışındaki yüzey değişimlerinden de etkilenebildiğinden, yüksek Std(ΔNDBI) değerleri doğrudan yapı hasarı olarak değil, NDBI değişiminin mekânsal heterojenliğini gösteren bir değişim göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

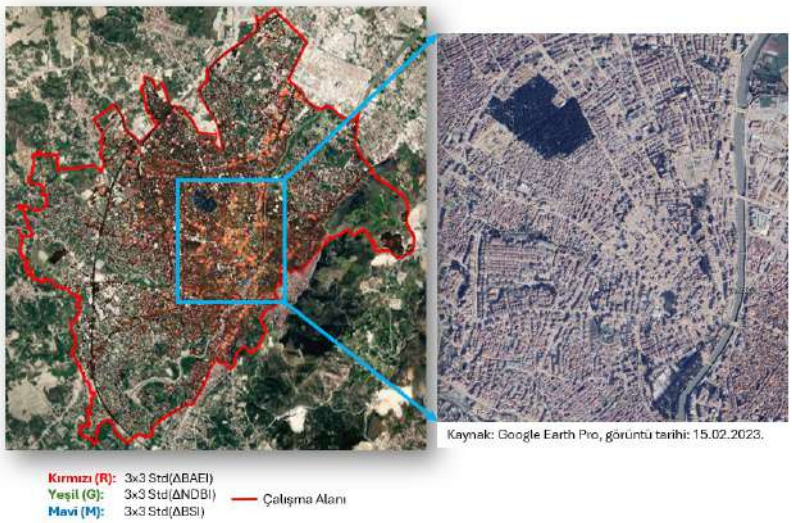


(a) (b) (c)

Şekil 6: Deprem öncesi ve sonrası Sentinel-2 görüntüleri ile NDBI değişiminin yerel mekânsal değişkenliği: (a) deprem öncesi Sentinel-2 görüntüsü, (b) deprem sonrası Sentinel-2 görüntüsü, (c) 3×3 hareketli pencere ile hesaplanan Std(ΔNDBI) doku haritası.

Farklı spektral indekslerin yüzey değişimine verdiği tepkilerin eş zamanlı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ΔBAEI, ΔNDBI ve ΔBSI fark görüntülerinin 3×3 komşulukta hesaplanan standart sapma katmanları bir RGB kompozit içerisinde birleştirilmiştir. Bu kompozitte ΔBAEI doku bilgisi kırmızı (R), ΔNDBI doku bilgisi yeşil (G) ve ΔBSI doku bilgisi mavi (B) kanala atanmıştır (Şekil 7).

Kompozit, indekslerdeki dokusal değişimlerin mekânsal olarak birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamış ve özellikle kentsel alanlarda değişimin yoğunlaştığı bölgelerin görsel olarak belirginleştirilmesini sağlamıştır. Ek olarak, çalışma alanının merkezinde ve güney kesimlerine doğru gözlenen turuncu tonların baskınlığı, kırmızı ve yeşil kanallara karşılık gelen BAEI ve NDBI kaynaklı dokusal değişimlerden BAEI kanalının kısmen öne çıktığını göstermektedir. Bu durum, söz konusu alanlarda yapılaşmış yüzey karakterine ilişkin değişimlerin hem BAEI hem de NDBI tabanlı dokusal bileşenlere yansıdığını ve BAEI bileşeninin yer yer daha güçlü katkı sağladığını göstermektedir.

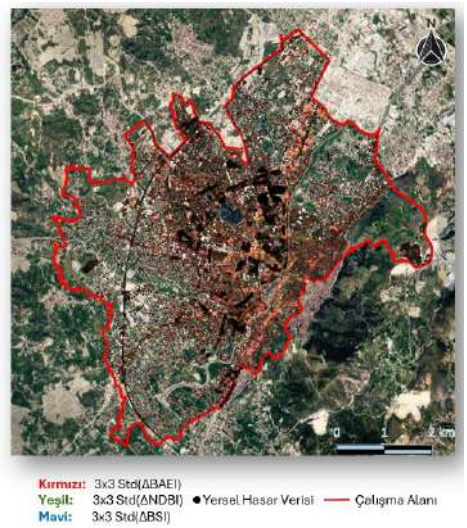


Şekil 7: Doku RGB kompozitinde değişimin yoğunlaştığı örnek alanın 15.02.2023 tarihli yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü ile görsel olarak incelenmesi. RGB kompozitinde kırmızı kanal (R) Std(ΔBAEI), yeşil kanal (G) Std(ΔNDBI) ve mavi kanal (B) Std(ΔBSI) değerlerini temsil etmektedir.

4.3 Çok Kaynaklı Mekânsal Değerlendirme

Gerçekleştirilen spektral ve dokusal değişim analizleri sonucunda, deprem öncesi ve sonrası dönemler arasında kentsel yüzey özelliklerinde belirgin mekânsal farklılıklar gözlenmiştir. Elde edilen mutlak değişim haritaları, doku temelli çıktılar ve bina bazlı yersel hasar verileri birlikte değerlendirilerek değişimin yoğunlaştığı alanların mekânsal dağılımı incelenmiştir.

Doku RGB kompoziti bina bazlı yersel hasar verileri ile değerlendirildiğinde, hasar kayıtlarının özellikle dokusal değişimin belirginleştiği merkezi ve güney kesimlerde yoğunlaştığı görsel olarak gözlenmektedir. (Şekil 8). Özellikle kırmızı ve yeşil kanalların birlikte etkili olduğu turuncu tonların yaygınlaştığı bölgelerde yersel hasar verilerinin de kümelenmesi, BAEI ve NDBI tabanlı dokusal değişimlerin hasar gözlenen kentsel alanlarla mekânsal bir ilişki sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu örtüşme doğrudan bir sınıflandırma doğruluğu olarak değerlendirilmemiş; yersel veriler uydu tabanlı değişim örüntülerinin mekânsal yorumlanmasını destekleyici referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 8: Doku RGB kompoziti ile yersel hasar verisinin mekânsal karşılaştırılması.

Bu değerlendirmelere ek olarak, Globeos platformunda yer alan Katman Profili aracı kullanılarak, Doku RGB Kompozitinde değişimin yüksek olarak gözlendiği merkezi kentsel bölgelerden geçen aynı güzergâh boyunca deprem öncesi ve sonrası NDBI değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Analiz edilen iki dönemde benzer genel eğilimler görülmekle birlikte, belirli konumlarda belirgin genlik farklılıkları ortaya çıkmıştır.

Deprem öncesi ve sonrası NDBI profilleri karşılaştırıldığında, özellikle 100–200 m aralığında deprem sonrası değerlerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Yaklaşık 200 m konumunda ise deprem sonrası NDBI değerinin deprem öncesi döneme kıyasla belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu artış, yapılaşmış yüzey karakterindeki değişime işaret edebilmekle birlikte, deprem sonrasında ortaya çıkan moloz, açığa çıkmış yüzeyler veya yapı kalıntılarının da NDBI değerini etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu değişkenlik, deprem sonrasında yapılaşmış yüzey karakterinin profil hattı boyunca daha heterojen bir yapı sergilediğine işaret etmektedir.



(a) (b)

Şekil 9: Globeos platformunda aynı profil hattı boyunca elde edilen NDBI profil grafikleri: (a) deprem öncesi, (b) deprem sonrası.

Profil hattının dokusal değişimin yoğunlaştığı alan üzerinden seçilmiş olması, NDBI'deki yerel dalgalanmaların Doku RGB Kompozitinde gözlenen mekânsal örüntülerle birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, NDBI değerlerindeki değişim tek başına yapı hasarının doğrudan göstergesi olarak değerlendirilmemiş; spektral ve dokusal değişim haritalarını destekleyen tamamlayıcı bir bulgu olarak kullanılmıştır. Profil boyunca gözlenen değişimlerin tümü deprem kaynaklı yapı hasarıyla ilişkilendirilemeyeceğinden, sonuçların diğer spektral göstergeler, doku analizleri ve yersel hasar verileri ile ön değerlendirme olarak yorumlanması gerekmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen bulgular, deprem sonrası kentsel yüzey değişimlerinin çalışma alanının özellikle merkezi ve güney kesimlerinde yoğunlaştığını ve kullanılan spektral göstergelerin bu değişimlere farklı mekânsal tepkiler verdiğini göstermiştir. BAEI ve NDBI tabanlı değişimler belirli kentsel bölgelerde daha kümelenmiş örüntüler sergilerken, BSI değişimleri daha geniş ve parçalı bir dağılım göstermiştir. Doku RGB kompoziti ile yersel hasar verilerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, dokusal değişimin belirginleştiği bazı bölgelerin hasar kayıtlarının yoğunlaştığı alanlarla mekânsal olarak benzer örüntüler sergilediği görülmüştür.

Çalışmanın temel katkısı, spektral indeks değişimlerinin yalnızca değişim büyüklükleri üzerinden değil, yerel standart sapmaya dayalı dokusal değişkenlikleriyle birlikte ele alınması ve bu bilgilerin çok indeksli bir RGB kompozit içerisinde bütünleştirilmesidir. Açık erişimli Sentinel-2 verilerinin kullanılması ve yaklaşımın indeks tabanlı, düşük işlem gereksinimli yapısı; yöntemin erişilebilir, hızlı ve tekrarlanabilir bir ön değerlendirme aracı olarak uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, Sentinel-2'nin mekânsal çözünürlüğü ve spektral göstergelerin farklı yüzey koşullarından etkilenebilmesi nedeniyle elde edilen değişimler doğrudan yapısal hasar olarak yorumlanmamalıdır. Bu nedenle önerilen yaklaşım, kesin hasar sınıflandırması üretmekten ziyade, potansiyel hasarla ilişkili kentsel değişimlerin hızlı biçimde taranmasına ve saha incelemelerinin önceliklendirilmesine yönelik bir ön değerlendirme yöntemi olarak ele alınmıştır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1709-EUREKA Eurostars Yenilik Destek Programı kapsamında desteklenmektedir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2023). 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 depremleri raporu. AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü, Deprem Dairesi Başkanlığı. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf

Alizadeh, N., Asghari Beirami, B., & Mokhtarzade, M. (2022). Damage detection after the earthquake using Sentinel-1 and 2 images and machine learning algorithms (Case study: Sarpol-e Zahab earthquake). In 2022 12th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE) (pp. 343–347). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCKE57176.2022.9960127

Avcı, S. (2023, 8 Nisan). Grafikli - Depremlerin vurduğu Hatay'da en ağır yıkım Antakya'da. Habertürk. https://www.haberturk.com/hatay-haberleri/30796509-grafikli-depremlerin-vurdugu-hatayda-en-agir-yikim-antakyada

Choudhury, M. A. M., Modica, G., Praticò, S., & Marcheggiani, E. (2026). A scalable GEOBIA framework for urban landscape monitoring with Sentinel-2 data: A case study in Hue City, Vietnam. Earth, 7(2), 51. https://doi.org/10.3390/earth7020051

Dvorakova, K., Heiden, U., & van Wesemael, B. (2021). Sentinel-2 exposed soil composite for soil organic carbon prediction. Remote Sensing, 13(9), 1791. https://doi.org/10.3390/rs13091791

Emre, Ö., Duman, T. Y., & Olgun, Ş. (2012). 1:250.000 ölçekli Türkiye diri fay haritası serisi: Antakya (NJ 37-13) paftası (Seri No. 39). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Havivi, S., Rotman, S. R., Blumberg, D. G., & Maman, S. (2022). Damage assessment in rural environments following natural disasters using multi-sensor remote sensing data. Sensors, 22(24), Article 9998. https://doi.org/10.3390/s22249998

He, C., Shi, P., Xie, D., & Zhao, Y. (2010). Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. Remote Sensing Letters, 1(4), 213–221. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.481681

Khan, S. M., Shafi, I., Butt, W. H., de la Torre Diez, I., López Flores, M. A., Castanedo Galán, J., & Ashraf, I. (2023). A systematic review of disaster management systems: Approaches, challenges, and future directions. Land, 12(8), Article 1514. https://doi.org/10.3390/land12081514

Qing, Y., Ming, D., Wen, Q., Weng, Q., Xu, L., Chen, Y., Zhang, Y., & Zeng, B. (2022). Operational earthquake-induced building damage assessment using CNN-based direct remote sensing change detection on superpixel level. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 112, 102899. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102899

Tian, X., Chen, Y., Wang, Y., Wang, S., Chen, X., Li, J., Liu, X., Tian, J., & Cheng, H. (2026). Three-dimensional co-seismic deformation monitoring and rapid building-damage mapping of the 2023 Türkiye earthquake doublet utilizing combined Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Pure and Applied Geophysics, 183, 1647–1671. https://doi.org/10.1007/s00024-026-03935-y

Wang, L., Wu, J., Yang, Y., Tang, R., & Ya, R. (2024). Deep learning models for hazard-damaged building detection using remote sensing datasets: A comprehensive review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17, 15301–15318. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3449097

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Xu, Z., Mountrakis, G., & Quackenbush, L. J. (2017). Impervious surface extraction in imbalanced datasets: Integrating partial results and multi-temporal information in an iterative one-class classifier. International Journal of Remote Sensing, 38(1), 43–63. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259677

UZAKTAN ALGILAMA VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ANKARA'DA SU KIRILGANLIĞININ MEKANSAL ANALİZİ

Yeter CANBOLAT[1] , Sema KARATAŞ[2] , Ahmet Tarık TORUN[3]

[1] Öğrenci, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Emniyet, 06560, canbolat.yeter@ogr.hbv.edu.tr
[2] Öğrenci, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Emniyet, 06560, karatas-fatmanur@ogr.hbv.edu.tr
[3] Dr,Öğr,Üyesi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, Emniyet, 06560, ahmet-torun@hbv.edu.tr

ÖZET

Su kaynakları, iklim değişikliği, hızlı kentleşme ve artan nüfus baskısı nedeniyle giderek daha kırılgan hale gelmektedir. Özellikle yarı kurak iklim özellikleri gösteren bölgelerde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, doğal ve beşeri faktörlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada, Ankara ilinin su kırılganlığı, Tehlike-Duyarlılık-Maruziyet çerçevesi temelinde, Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve makine öğrenmesi yöntemleri birlikte kullanılarak analiz edilmiştir. Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden Sentinel-2, MODIS, CHIRPS, SRTM ve ESA WorldCover verilerinden 11 katmanlı bir gösterge seti üretilmiş; bu göstergeler Python ortamında Tehlike, Duyarlılık ve Maruziyet bileşenlerine indirgenerek ağırlıklı bir kırılganlık indeksi oluşturulmuş ve Random Forest sınıflandırıcısıyla modellenmiştir. Model, bağımsız test bloklarında %76,7 doğruluk ve 0,633 ortalama IoU değeriyle kırılganlık örüntüsünü başarılı şekilde öğrenmiş; RF sınıflandırmasının kural tabanlı kırılganlık sınıflarıyla %81,0 oranında tam örtüştüğü görülmüştür. Sonucun, çalışmada hiç kullanılmayan bağımsız bir gösterge olan Bitki Sağlığı İndeksi (VHI) ile karşılaştırılması, istatistiksel olarak anlamlı ve beklenen yönde bir ilişki ortaya koymuştur (Spearman ρ=-0,381; p<0,001). Değişken önem analizine göre kırılganlığı en çok belirleyen etken yağış anomalisi olup, bunu yüzey sıcaklığı ve eğim izlemektedir. Elde edilen bulgular, Ankara'da su kırılganlığının öncelikle iklimsel değişkenlikten, kentsel merkezde ise nüfus ve yapılaşma baskısından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Üretilen kırılganlık haritasının, riskli bölgelerin belirlenmesi ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimiyle mekânsal planlama çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ankara, coğrafi bilgi sistemleri, Random Forest, su kırılganlığı, uzaktan algılama

ABSTRACT

SPATIAL ANALYSIS OF WATER VULNERABILITY IN ANKARA USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING

Water resources are becoming increasingly vulnerable due to climate change, rapid urbanization, and growing population pressure. Particularly in semi-arid regions, sustainable water resource management requires the integrated assessment of both natural and human-induced factors. In this study, water vulnerability in Ankara Province was analyzed within a Hazard–Sensitivity –Exposure framework by integrating Remote Sensing, Geographic Information Systems (GIS), and machine learning methods. An 11-layer indicator dataset was generated using Sentinel-2, MODIS, CHIRPS, SRTM, ESA WorldCover, and population density data through the Google Earth Engine (GEE) platform. These indicators were grouped into Hazard, Sensitivity, and Exposure components in a Python environment, and a weighted vulnerability index was developed and modeled using the Random Forest classifier. The model achieved 76.7% accuracy and a mean IoU of 0.633 on independent test blocks. The Random Forest classification showed 81.0% exact agreement with the rule-based vulnerability classes. Independent validation using the Vegetation Health Index (VHI), which was not included in the vulnerability model, revealed a statistically significant negative relationship (Spearman's $\rho = -0.381$; $p < 0.001$). Variable importance analysis indicated that precipitation anomaly was the most influential factor, followed by land surface temperature and slope. The results demonstrate that water vulnerability in Ankara is primarily driven by climatic variability, while population and urbanization pressures become more prominent in the urban center. The resulting vulnerability map is expected to contribute to the identification of vulnerable areas and support sustainable water resource management and spatial planning.

Keywords: Ankara, geographic information systems, machine learning, remote sensing, water vulnerability

1. GİRİŞ

Su kaynakları, iklim değişikliği, hızlı kentleşme ve artan nüfus baskısı nedeniyle giderek daha kırılgan hale gelmektedir; küresel ölçekte sıcaklık artışları ve yağış rejimindeki değişimler birçok bölgede su stresi riskini yükseltmektedir (Karaman ve Gökalp, 2010; Turan, 2018). Dünya nüfusunun büyük bölümünün kentlerde yaşaması ve buna bağlı su talebindeki artış, hızlı kentleşmeyi ve arazi kullanım değişimlerini su kaynaklarının kırılganlığını artıran temel beşeri faktörler hâline getirmektedir (Padowski ve Jawitz, 2012; Srinivasan vd., 2013). Bu bağlamda su kaynaklarının izlenmesinde geleneksel arazi gözlemleri geniş alanlarda yetersiz kalmakta; uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri, farklı mekânsal ve zamansal çözünürlükteki verilerin bütünleşik değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Büyük hacimli mekânsal verilerin analizinde ise Random Forest gibi makine öğrenmesi algoritmaları, doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi ve değişken önem analizine olanak sağlaması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Breiman, 2001; Ghobadi ve Kang, 2023; Ahmed vd., 2024). Ankara ili, yarı kurak iklim özellikleri, hızlı nüfus artışı, genişleyen kentsel alanlar ve artan su talebi nedeniyle Türkiye'de su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından öncelikli çalışma alanlarından biridir. Kentleşme, arazi kullanım değişimleri ve iklim değişikliğinin ortak etkileri dikkate alındığında, su kırılganlığının yalnızca iklimsel değişkenlerle değil, doğal ve beşeri faktörlerin birlikte değerlendirilmesiyle analiz edilmesi gerekmektedir (Köle, 2012; Köle, 2014). Bu

çalışmada, uzaktan algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve makine öğrenmesi yöntemleri birlikte kullanılarak Ankara ili için su kırılganlığını etkileyen doğal ve beşeri faktörlerin bütüncül olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen spektral indisler, yağış, yüzey sıcaklığı, topoğrafik değişkenler, arazi kullanım bilgileri ve nüfus yoğunluğu verileri kullanılarak oluşturulan veri seti üzerinden Random Forest algoritması uygulanmış; elde edilen sonuçlarla Ankara'nın su kırılganlığının mekânsal dağılımı ve bu kırılganlığı etkileyen temel faktörlerin göreli önemi ortaya konulmuştur. Bu çalışmada su kırılganlığı kavramı, meteorolojik kuraklıktan ayrıştırılarak, iklimsel baskıyı ifade eden Tehlike, arazinin bu baskıya açıklığını ifade eden Duyarlılık ve baskıdan etkilenecek nüfus ile arazi kullanımını ifade eden Maruziyet bileşenlerinin birleşimi olarak ele alınmaktadır; bu üçlü çerçeve, yalnızca kuraklık şiddetini değil, kuraklığın etkileyeceği alanların ve toplumun savunmasızlığını da bütüncül biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın araştırma alanını Ankara ili oluşturmaktadır. Çalışma alanı, Google Earth Engine (GEE) ortamına yüklenen Ankara il sınırı verisi kullanılarak tanımlanmıştır. Su kırılganlığının Tehlike, Duyarlılık ve Maruziyet bileşenleri temelinde değerlendirilmesi amacıyla uzaktan algılama, iklim, topografya ve arazi örtüsü verileri birlikte kullanılmıştır. Temel uzaktan algılama verisi olarak Sentinel-2 Surface Reflectance görüntüleri, 2025 yılı Nisan-Ekim büyüme mevsimi için bulut maskelemesi uygulanarak medyan kompozit hâlinde kullanılmış; bu görüntülerden bitki örtüsünü (NDVI), su içeriğini (NDWI) ve yapılaşmayı (NDBI) temsil eden spektral indisler hesaplanmıştır. Tehlike bileşeni için MODIS Kara Yüzey Sıcaklığı ile CHIRPS verisinden türetilen 2025 yılı yağış anomalisi (1991-2020 uzun dönem ortalamasına oranı); Duyarlılık bileşeni için SRTM'den türetilen eğim, bakı ve yükseklik; Maruziyet bileşeni için ise ESA WorldCover arazi örtüsü ve GHSL nüfus yoğunluğu verileri kullanılmıştır. Tüm katmanlar 100 m çözünürlükte 11 bantlı tek bir raster veri seti olarak dışa aktarılmıştır. Bağımsız doğrulama amacıyla, kırılganlık hesaplamasında hiç kullanılmayan Bitki Sağlığı İndeksi (VHI = 0,5×VCI + 0,5×TCI) MODIS'in çok yıllık (2001-2024) kayıtlarından ayrıca üretilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında hedef değişken olarak Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI-12) denenmiştir; ancak bu indeksin türetildiği CHIRPS verisinin çözünürlüğü (~5,5 km) ile diğer göstergelerin (10-30 m) çözünürlüğü arasındaki uyumsuzluk nedeniyle model bağımsız test bölgelerinde genelleme yapamamıştır. Bu ölçek uyuşmazlığı, hedef değişkenin SPI-12 yerine tüm göstergelerle aynı ölçekte tanımlı bir kırılganlık indeksiyle değiştirilmesiyle çözülmüştür. Göstergeler min-maks normalizasyonuyla 0-1 aralığına ölçeklenmiş ve üç bileşen altında birleştirilerek Kırılganlık İndeksi (Kİ = w_1·Tehlike + w_2·Duyarlılık + w_3·Maruziyet) elde edilmiştir. İndeks, kantil yöntemiyle 1 (çok düşük) ile 5 (çok yüksek) arasında beş sınıfa ayrılmıştır; bileşen ağırlıkları eşit (1/3) alınmıştır. İndeks tabanlı sınıflar, 11 gösterge katmanıyla, rastgele seçilen 8.000 örnek nokta üzerinde eğitilen bir Random Forest sınıflandırıcısıyla yeniden üretilmeye çalışılmıştır. Mekânsal otokorelasyondan kaynaklanan sahte başarıyı önlemek amacıyla çalışma alanı ~25 km'lik coğrafi bloklara ayrılmış, model grup çapraz doğrulama (GroupKFold) ve bağımsız bir test kümesiyle değerlendirilmiştir. Model performansı doğruluk, F1-skoru ve sınıf bazlı IoU ile; bağımsız tutarlılığı ise kırılganlık ile VHI arasındaki Spearman sıra korelasyonuyla ölçülmüştür.

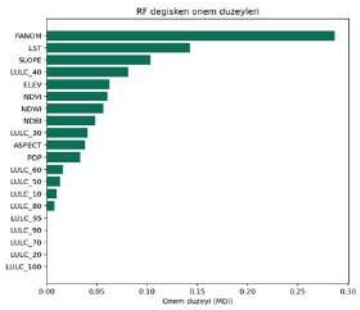
3. BULGULAR

3.1 Model Peformansı

Çizelge 1. Mekânsal çapraz doğrulama F1'i (0,787) ile bağımsız test F1'i (0,773) birbirine çok yakındır. Bu yakınlık, modelin ezberlemediğinin ve yeni bölgelere genelleyebildiğine işaret etmektedir.

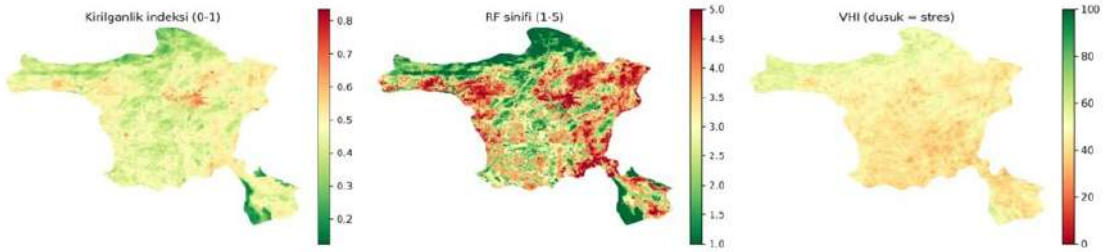
Metrik	Değer	Yorum
Mekânsal CV F1	0,787 ± 0,024	Katlar arası kararlı, düşük sapma
Test doğruluğu	0,767	10 pikselden ~8'i doğru sınıf
Test F1 (makro)	0,773	Sınıflar dengeli tahmin ediliyor
IoU (makro)	0,633	Sınıf örtüşmesi iyi düzeyde

3.2 Değişken Önem Analizi



Şekil 1. Random Forest değişken önem düzeyleri (MDI - Mean Decrease in Impurity).

3.3 Haritalar



Şekil 2. (a) Kırılganlık indeksi, (b) Random Forest sınıflandırması ve (c) VHI doğrulama katmanı.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Ankara ilinin su kırılganlığı Tehlike-Duyarlılık-Maruziyet çerçevesinde, uzaktan algılama verileri ve Random Forest algoritması bütünleştirilerek haritalanmıştır. Bağımsız test bloklarında model %76,7 doğruluk, 0,773 F1-skoru (macro) ve 0,633 ortalama IoU değeri elde etmiştir. Mekânsal çapraz doğrulama başarımının (F1=0,787±0,024) bağımsız test başarımına (F1=0,773) yakın çıkması, modelin aşırı öğrenme göstermediğini ve farklı bölgelere genelleyebildiğini ortaya koymaktadır. Random Forest sınıflandırması ile kural tabanlı kırılganlık sınıfları arasında %81,0 tam, %99,3 ise ±1 sınıf uyum bulunmuştur; hataların büyük ölçüde komşu sınıflar arasında yoğunlaşması, kırılganlığın sürekli bir olgu olarak yapay biçimde sınıflandırılmasından kaynaklanmaktadır. Kırılganlık indeksi ile bağımsız VHI göstergesi arasındaki Spearman korelasyonu -0,381 ($p<0,001$) olarak hesaplanmış; bu istatistiksel olarak anlamlı negatif ilişki, kırılganlığı yüksek olan bölgelerde beklendiği gibi bitki sağlığı stresinin arttığını göstererek kurulan modelin fiziksel tutarlılığını desteklemektedir. Korelasyonun çok yüksek çıkmaması (örneğin -0,9 düzeyinde olmaması) beklenen ve sağlıklı bir sonuçtur; zira VHI yalnızca bitki örtüsüne dayalı bir gösterge iken, kırılganlık indeksi VHI'nin ölçmediği maruziyet (nüfus, arazi kullanımı) ve topoğrafya boyutlarını da içermektedir. Değişken önem analizine göre kırılganlığı en çok belirleyen etken yağış anomalisi olup, bunu yüzey sıcaklığı ve eğim izlemektedir; bu bulgu, Ankara'da su kırılganlığının esas olarak iklimsel değişkenlikten kaynaklandığını, kentsel merkezde ise nüfus ve yapılaşma baskısının öne çıktığını göstermektedir. Elde edilen kırılganlık haritasının, riskli bölgelerin belirlenmesi ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimiyle mekânsal planlama çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmanın temel sınırlılıkları arasında tek yıllık (2025) veriyle çalışılması ve bileşen ağırlıklarının eşit varsayılması yer almaktadır; gelecek çalışmalarda çok yıllı analiz ve ağırlık duyarlılık testleri önerilmektedir.

5.KAYNAKÇA

Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production, 441*, 140715. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Ghobadi, F., & Kang, D. (2023). Application of machine learning in water resources management: A systematic literature review. *Water, 15*(4), 620. https://doi.org/10.3390/w15040620

Karaman, S., & Gökalp, Z. (2010). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences, 3*(1), 59–66.

Köle, M. M. (2012). *Ankara örneklemi üzerinde iklim değişikliğinin su kaynakları yönetimine etkisi* (Doktora tezi). Ankara Üniversitesi.

Köle, M. M. (2014). Ankara örneklemi üzerinde Cumhuriyet dönemi su kaynakları yönetim modelleri. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi, 181*(181), 69–86.

Padowski, J. C., & Jawitz, J. W. (2012). Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resources Research, 48*(12). https://doi.org/10.1029/2012WR012335

Srinivasan, V., Seto, K. C., Emerson, R., & Gorelick, S. M. (2013). The impact of urbanization on water vulnerability: A coupled human–environment system approach for Chennai, India. *Global Environmental Change, 23*(1), 229–239. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.002

Turan, E. S. (2018). Türkiye'nin iklim değişikliğine bağlı kuraklık durumu. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4*(1), 63 –69.

CBS İLE KENTSEL ISI ADASI ANALİZLERİ İÇİN METEOROLOJİK VERİ İŞLEME EKLENTİSİ GELİŞTİRİLMESİ

İsmail Sefa ESGÜN[1], Deniz DEMİRHAN[2], Himmet KARAMAN[3]

[1]Araş. Gör, İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, esgun19@itu.edu.tr
[2]Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, demirhand@itu.edu.tr
[3]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, karamanhi@itu.edu.tr

ÖZET

Kentsel Isı Adası (KIA), şehirleşmenin iklim üzerindeki en belirgin sonuçlarından biridir. Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) kapsamında, çoklu afet riskinin yüksek olduğu bölgede KIA etkisini incelemek için CBS tabanlı analiz modelleri kurulmuştur. İstasyonların seyrekliği nedeniyle kesintisiz sıcaklık yüzeyleri oluşturmak için ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi) mevsimselERA5 ve ERA5-Land verileri kullanılmıştır. Çalışmada, veri işleme süreçlerini otomatikleştirmek amacıyla QGIS yazılımında Python tabanlı "ERA5/ERA5-Land Climate Statistics" eklentisi geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen performans değerlendirmelerinde; geleneksel ardışık yöntemlerle 6 ila 12 saat süren ve bellek yetersizliğiyle çöken 45 yıllık (1980-2025) saatlik iklim verisi analizi, eklentinin paralel hesaplama mimarisi sayesinde yalnızca 7 dakikada (~419 saniye) hatasız olarak tamamlanmıştır. Doğrulama (validation) analizlerinde ise eklenti çıktılarının geleneksel referans yazılımla (CDO) kıyaslandığında on binde üç (~0.003 K) gibi ihmal edilebilir bir farkla çalıştığı kanıtlanmıştır. Bu sayede iklim ve KIA analizleri, bilimsel hassasiyetten ödün verilmeden CBS ortamında tam otomatik hale getirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: ERA5/ERA5-Land, CBS, Kentsel Isı Adası

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A METEOROLOGICAL DATA PROCESSING PLUGIN FOR URBAN HEAT ISLAND ANALYSES USING GIS

The Urban Heat Island (UHI) effect is a prominent local climate consequence of urbanization. Within the Marmara Region Disaster Risk Reduction Plan (MARAP), GIS-based workflow models were established to analyze UHI in this multi-hazard region. Due to sparse meteorological stations, the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 and ERA5-Land reanalysis datasets were used to generate continuous temperature surfaces. To automate data processing, a Python-based QGIS plugin named "ERA5/ERA5-Land Climate Statistics" was developed. Performance evaluations demonstrated that processing 45 years (1980-2025) of hourly climate data—which previously took 6 to 12 hours and resulted in system crashes using traditional sequential methods—was flawlessly completed in just 7 minutes (~419 seconds) via the plugin's parallel computing architecture. Validation analyses confirmed that the plugin operates with a negligible difference (~0.003 K) when compared to traditional reference software (CDO). Consequently, climate and UHI analyses have been fully automated within the GIS environment without compromising scientific accuracy.

Keywords: ERA5/ERA5-Land, GIS, Urban Heat Island

1. GİRİŞ

Kentsel Isı Adası (KIA), kentleşmiş alanlarda ölçülen yüzeye yakın, yani yerden iki metre yükseklikteki hava sıcaklığının, bölgenin yakın çevresinde bulunan ve daha az yapılaşmanın görüldüğü kırsal alanlara göre yüksek olması durumudur (US EPA, t.y.). Bu fark, kentleşmenin yerel iklim sistemi üzerindeki en belirgin sonuçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Şehirleşme süreciyle birlikte geçirgen ve nemli doğal yüzeylerin yerini asfalt, beton, tuğla çatı gibi malzemeler ile yoğun bina dokusu almaktadır. Kentsel alanlardaki bu yapay yüzeyler, gün boyunca kısa dalga boylu Güneş radyasyonunu soğurarak ısıyı depolar. Özellikle beton ve asfalt gibi yüzeylerin yüksek ısı depolama kapasitesi eğilimi nedeniyle, şehirlerin doğal yollarla serinlemesi engellenmektedir (Stewart ve Oke, 2012).

Kentsel Isı Adası (KIA) etkisi, kentleşmiş alanlarda sıcaklıkların yükselmesine ve termal stresin artmasına neden olarak insan sağlığı, ekosistem hizmetleri ve kentsel altyapı üzerinde çok boyutlu ve önemli etkiler meydana getirmektedir. Sağlık açısından değerlendirildiğinde, 29 °C'yi aşan sıcaklıklarda meydana gelen her +1 °C'lik artışın mortalite oranlarını %4-6 seviyesinde yükselttiği rapor edilmektedir (Chen vd., 2024). Çevresel etkiler bağlamında ise oluşan kentsel mikroklima bitki ve ekosistem süreçlerini bozmaktadır. Sıcaklık artışı bitkilerin mevsimsel gelişimini hızlandırmakta veya büyüme süreçlerini kısaltmaktadır. Kentsel alanlardaki yüksek UHI, potansiyel evapotranspirasyonu %5-10 düzeyinde artırarak bitkilerin su ihtiyacını çoğaltmaktadır (Ren vd., 2023). Dolayısıyla artan buharlaşma ihtiyacı, kuraklık stresini ve zararlı böcek risklerini doğrudan artırmaktadır.

Marmara Bölgesi'nde KIA etkisinin araştırılması, Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) çerçevesinde yürütülmektedir. MARAP, çoklu afet tehlikesi ve riskinin yüksek olduğu bu bölgeye yönelik, dinamik bir Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Yapay Zekâ (YZ) altyapısı kullanarak bölgesel bir afet risk azaltma çerçevesi sunmayı hedeflemektedir (Yomralıoğlu ve Yılmaz, 2025). Proje kapsamında, afet tehlike ve risk haritalarının oluşturulması sürecinde, güncel duruma esas dinamik bir sistemin kurulabilmesi için CBS tabanlı analiz iş akışı modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu dinamik modellerin başarılı bir şekilde çalışabilmesi, geniş ölçekli iklim verilerinin CBS ortamına otomatik, hızlı ve standartlara uygun bir şekilde aktarılmasına bağlıdır. Mevcut uygulamalarda devasa yeniden analiz (re-analysis) iklim veri setlerinin manuel olarak indirilip işlenmesi, hem CBS iş akışlarını yavaşlatmakta hem de sistem entegrasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda çalışmanın amacı, KIA etkisinin belirlenmesi kapsamında kurulan modelin içine entegre edilebilir; iklim verisi indirme ve uzun dönem ortalama sıcaklık hesabı süreçlerini standart meteorolojik prosedürlere uygun olarak tam otomatik hale getiren CBS tabanlı (Python) bir eklenti geliştirmektir.

2. VERİ VE ÇALIŞMA ALANI

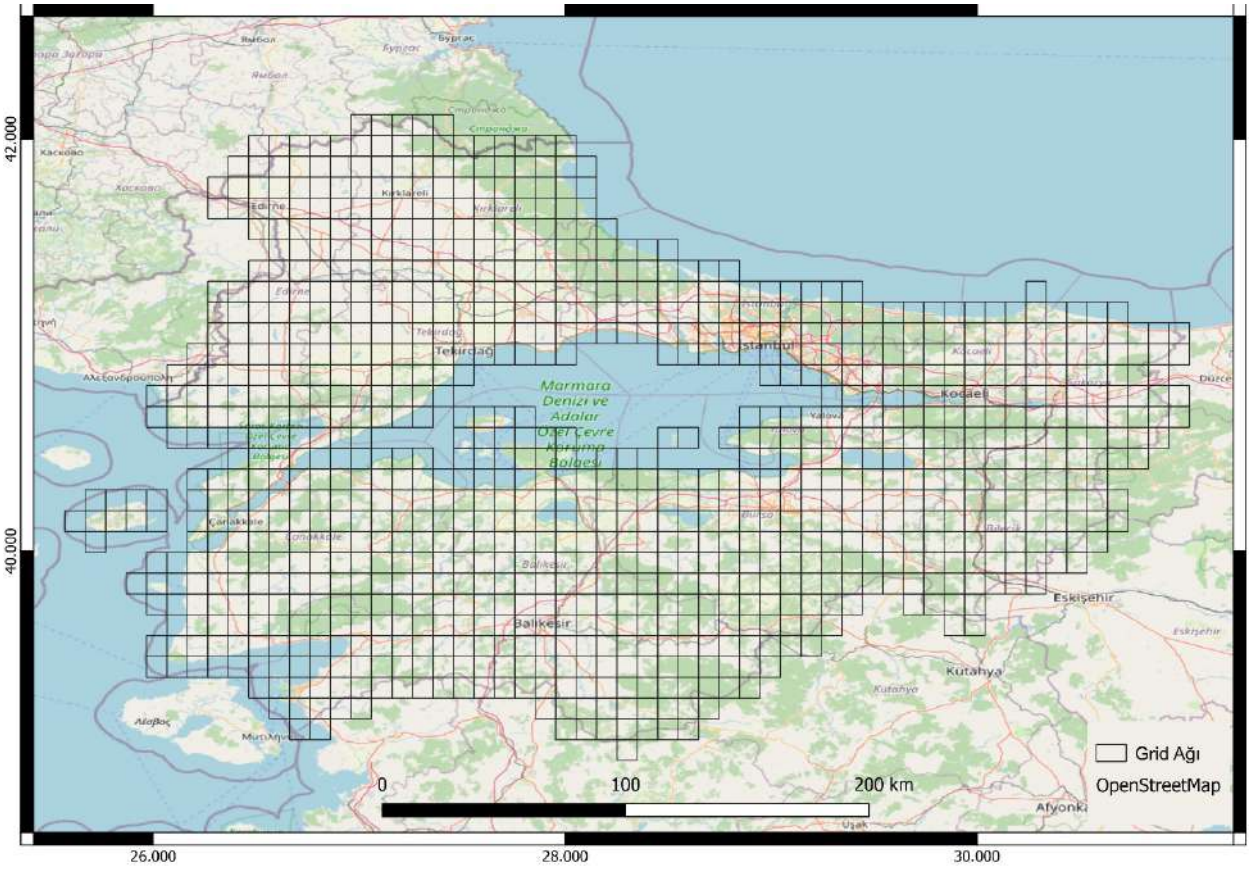
Çalışma alanı, Avrupa ve Asya'yı birbirine bağlayan ve Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Marmara Bölgesi'dir. MARAP Projesi çalışma sahasını da oluşturan bölge; İstanbul, Kocaeli, Bursa, Sakarya, Tekirdağ, Yalova, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne ve Kırklareli illerini kapsamaktadır. Çalışma alanının coğrafi sınırları ve kapsadığı iller Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde, çalışma alanının farklı iklim özelliklerinin etkili olduğu bir geçiş bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Bölge, Trakya'nın alçak ve düz alanlarından güneydeki dağlık kesimlere, Bursa ve Balıkesir çevresindeki iç havzalara ve İstanbul gibi yoğun kentleşmiş bir metropol alanına kadar uzanmaktadır. Bu farklı topoğrafik ve kentsel özellikler, bölgedeki iklim koşullarının alansal olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, kentsel ısı adası etkisinin bölge genelindeki alansal değişimini incelemek için Marmara Bölgesi uygun bir çalışma alanı sunmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı olan Marmara Bölgesi ve 11 ilin coğrafi sınırları.

Kentsel ısı adası analizlerinde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) ait meteorolojik gözlem istasyonlarının verileri yerine yeniden analiz (re-analysis) verilerinin kullanımı tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni, Marmara Bölgesi'ndeki meteorolojik istasyonların oldukça seyrek olması ve bölgedeki heterojen arazi kullanımıdır. Seyrek nokta verileri üzerinden enterpolasyon yöntemleri ile oluşturulacak kesintisiz sıcaklık yüzeyi grid büyüklüğü, yerel ölçekli KIA hesaplamalarının gerektirdiği hassasiyet için yeterli olmamaktadır.

Bu kısıtlılıkları aşmak ve kesintisiz bir termal yüzey elde etmek amacıyla, çalışmada 1980-2025 dönemini kapsayan saatlik ECMWF ERA5 ve ERA5-Land yeniden analiz veri setleri kullanılmıştır. ECMWF ERA5-Land verisi, yaklaşık 0.1° x 0.1° (~9 km x 9 km) çözünürlükte olup, ERA5 yeniden analiz verisinin karasal bileşeninin daha yüksek çözünürlükle elde edilmiş halidir (Muñoz Sabater, 2019). Analizlerde mekânsal tutarlılığı sağlamak için Marmara Bölgesi, Şekil 2'de sunulan ve ERA5-Land verisinin bu doğal çözünürlüğü ile tam uyumlu olan üniform vektör grid (kare ağ) sistemine bölünmüştür. Şekil 2'deki vektör grid ağı incelendiğinde, oluşturulan 9 km x 9 km boyutlarındaki hücrelerin tüm bölgeyi kesintisiz olarak kapsadığı görülmektedir. Vektör geometrinin doğrudan iklim verisi grid sistemine senkronize edilmesiyle, her bir hücre kendi içinde bağımsız bir analitik birim olarak işlev kazanmaktadır. Böylece, ikincil raster enterpolasyonundan kaynaklanabilecek istatistiksel hataların ve veri bozulmalarının önüne geçilerek yüksek doğruluklu bir mekânsal analiz altyapısı kurulmuştur.



Şekil 2. Marmara Bölgesi üzerinde veri senkronizasyonu için oluşturulan 9 km x 9 km boyutlarındaki üniform vektör grid ağı.

Kentsel ısı adası analizlerinde kritik olan husus, kentsel ve kırsal alanlar arasındaki sıcaklık farkını homojen ve tutarlı bir biçimde ortaya koymaktır. ECMWF ERA5 ve ERA5-Land veri setleri yapısal olarak farklı üretim yaklaşımlarına ve çözünürlüklere sahiptir (Çizelge 1). Çizelge 1'de gösterildiği üzere, ERA5-Land kara yüzeyi odaklı daha yüksek çözünürlüklü bir yapı sunarken, kapsama alanının bulunmadığı, denizel etkiye açık veya kıyıya çok yakın dar kara parçalarındaki veri boşluklarını doldurmak amacıyla ~27,8 km çözünürlüklü ERA5 verisinden tamamlayıcı olarak yararlanılmıştır.

Çizelge 1. UHI analizleri bağlamında ECMWF ERA5 ve ERA5-Land veri setlerinin yapısal farklılıkları.

Boyut	ECMWF ERA5	ECMWF ERA5-Land
Üretim Yaklaşımı	Tam atmosferik yeniden analiz + 4D-Var veri asimilasyonu	Çevrimdışı (offline) kara modelinin tekrar çalıştırılması; gözlemler modele doğrudan girmez
Çözünürlük	~27,8 km (ERA5 HRES)	~9 km (HRES, TCo1279)
CDS Dağıtım Gridi	Climate Data Store'da düzenli enlem-boylam interpolasyonu	0.1° düzenli enlem-boylam (TCo1279'dan yeniden gridlenmiş)
Kapsam	Atmosfer, kara ve okyanus dalgası vb. geniş ürün ailesi	Kara yüzeyi odaklı (sadece kara değişkenleri)

ECMWF ERA5-Land veri seti, KIA analizlerinde gözlem istasyonlarının ölçüm hatalarından veya yerel çevre etkilerinden bağımsız, standart bir veri altyapısı sağlamaktadır. Literatürde de yeniden analiz verilerinin bu tür çalışmalardaki geçerliliği kanıtlanmıştır. Zhao vd. (2021) küresel ölçekte şehirleşmenin yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisini ECMWF ERA5 tabanlı analizlerle ortaya koyarken, Li vd. (2020) şehir–kırsal sıcaklık farklarının yeniden analiz verileriyle güvenilir şekilde temsil edilebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, Zhou ve Shepherd (2010) yeniden analiz verilerinin kullanımının KIA'nın mekânsal değişimini anlamada güçlü bir yaklaşım olduğunu vurgulamıştır. Literatürdeki bu bulgular, ERA5-Land veri setinin Marmara Bölgesi gibi heterojen alanlarda kentsel ısı adası analizi için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

3. GELİŞTİRİLEN QGIS EKLENTİSİ: "ECMWF ERA5/ERA5-LAND CLIMATE STATISTICS"

Çalışmanın temel amacına yönelik olarak, araştırmacıları devasa boyutlardaki iklim verilerini manuel olarak indirme, harici yazılımlarla birleştirme ve saatlerce süren hesaplama iş yükünden kurtarmak amacıyla "ERA5/ERA5-Land Climate Statistics" adlı bir eklenti geliştirilmiştir. Açık kaynak kodlu CBS yazılımı QGIS ortamında, Python programlama dili kullanılarak tasarlanan bu araç, veri erişiminden klimatolojik haritalamaya kadar olan tüm süreci tek bir arayüzde otomatize ederek hesaplama sürelerini radikal biçimde kısaltmaktadır. Eklentinin temel iş akışı dört ana aşamadan oluşmaktadır:

3.1 Veri İndirme

ECMWF Copernicus Climate Data Store (CDS) servisinin Python uyumlu API hizmeti olan CDS API Kütüphanesi entegre edilerek, kullanıcının belirlediği sınırlandırıcı kutu (bounding box) koordinatları ve zaman aralıklarına (yıl, ay) ait ERA5/ERA5-Land saatlik 2 metre sıcaklık verileri doğrudan indirilmektedir. Eklentide kentsel ısı adası analizi için gerekli 2 metre hava sıcaklığı değişkeni ön tanımlı olarak kullanılmakla birlikte, CDS tarafından sunulan diğer iklimsel parametreler de aynı altyapı ile indirilebilmektedir.

3.2 Veri Temizleme ve Zaman Dönüşümü

İndirilen ham NetCDF dosyaları, büyük veri setlerinin işlenmesinde yüksek performans sağlayan xarray ve paralel hesaplama yeteneği sunan dask kütüphaneleri kullanılarak okunmaktadır. Özellikle dask kütüphanesinin gecikmeli yükleme (lazy parallel loading) mimarisi sayesinde, sistem belleği (RAM) aşırı tüketilmeden devasa iklim dizileri saniyeler içerisinde işlenebilir hale getirilmiştir. Ön işleme aşamasında, veri setlerindeki zaman boyutlarına ait olası uyuşmazlıklar otomatik olarak giderilmekte ve hatalı/boş pikseller (FillValue) NaN olarak maskelenerek istatistiksel sapmaların önüne geçilmektedir.

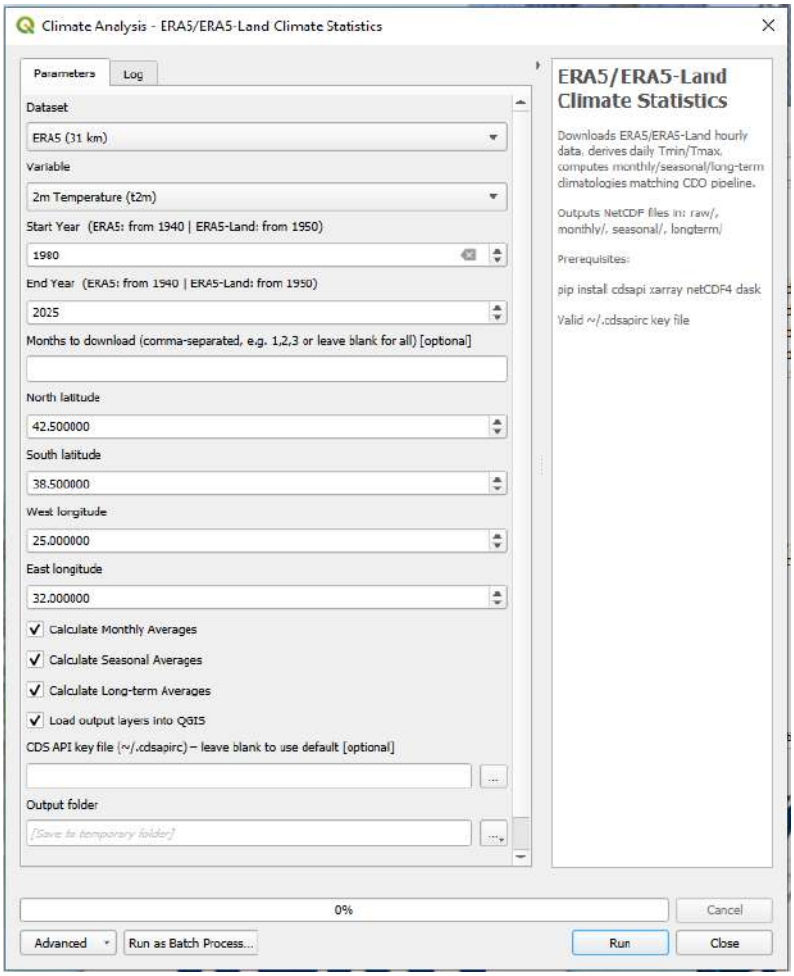
3.3 İklimsel İstatistiklerin Hesaplanması

Kentsel Isı Adası (KIA) analizlerinde zaman serilerinin yalnızca günlük ortalamalar üzerinden hesaplanması, kentsel alanların termal özelliklerinden kaynaklanan gün içi (diurnal) sıcaklık dalgalanmalarını ve özellikle gece saatlerinde belirginleşen ısıl yükleri maskelemektedir. Bu bağlamda, eklentinin iklimsel istatistik hesaplama modülü, meteorolojik veri işleme standartlarına tam uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır.

İşlem adımında ilk olarak, gün içi farklılıkları doğru yansıtabilmek amacıyla, gece sıcaklıklarını temsilen hücresel bazda günlük minimum (T_{min}) değerler ve gündüz sıcaklıklarını temsilen günlük maksimum (T_{max}) değerler izole edilmektedir. Ardından, elde edilen bu ekstrem değerler üzerinden standart meteorolojik mevsim tanımlamalarına uygun olarak (Kış: Aralık-Ocak-Şubat; İlkbahar: Mart-Nisan-Mayıs; Yaz: Haziran-Temmuz-Ağustos; Sonbahar: Eylül-Ekim-Kasım) mevsimsel gruplandırmalar yapılmaktadır. Eklenti, oluşturulan bu mevsimsel grupları kullanarak istenilen zaman dilimi (örneğin 1980-2025 arası) için aylık, mevsimsel ve uzun dönem klimatolojik ortalamaları otomatik olarak hesaplamaktadır. Bu metodolojik yaklaşım, elde edilen istatistiklerin basit birer aritmetik ortalama olmaktan çıkıp şehirlerin gece soğuma kapasitesini ve gündüz ısınma trendlerini temsil eden, fiziksel tutarlılığa sahip meteorolojik çıktılara dönüşmesini sağlamaktadır.

3.4 Çıktı Üretimi

İşlem adımları tamamlanan veriler, sonuçların coğrafi referansları ve meta verileri korunarak tek bantlı NetCDF (.nc) dosyası formatında dışa aktarılmaktadır. Üretilen bu raster çıktılar, ek bir kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan doğrudan aktif QGIS projesine yüklenerek analiz ve haritalama süreçlerine hazır hale getirilmektedir.



Şekil 3. Geliştirilen ERA5/ERA5-Land Climate Statistics eklentisinin QGIS arayüzü ve parametre girdi ekranı.

3.5 Algoritma Doğrulama Yaklaşımı

Geliştirilen eklentinin ürettiği iklimsel istatistiklerin bilimsel geçerliliğini ve matematiksel hassasiyetini kanıtlamak amacıyla bir doğrulama prosedürü kurgulanmıştır. Bu kapsamda, eklenti içerisindeki Python tabanlı hesaplama modülünün ürettiği uzun dönem ortalama değerler, iklim araştırmalarında küresel bir standart olarak kabul gören komut satırı aracı CDO (Climate Data Operators) çıktılarıyla nicel olarak karşılaştırılmıştır. Doğrulama aşamasında, aynı ham NetCDF veri setleri her iki platformda da işlenerek rastgele seçilen örneklem koordinatları üzerinden piksel bazlı (Kelvin cinsinden) çapraz kontroller gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

Geliştirilen "ERA5/ERA5-Land Climate Statistics" eklentisinin hesaplama verimliliği ve operasyonel performansı, Marmara Bölgesi sınırları dâhilinde 1980-2025 periyoduna ait 45 yıllık saatlik 2 m hava sıcaklığı veri seti (toplam 16.802 gün, 552 NetCDF dosyası) üzerinden test edilmiştir.

Büyük veri (big data) boyutundaki bu iklim dizilerinin, paralel hesaplama mimarisi (örneğin Dask kütüphanesi) entegre edilmeksizin, geleneksel ardışık (sequential) veri işleme algoritmalarıyla analiz edildiği senaryolar, çalışmada referans (baseline) modeller olarak değerlendirilmiştir. İşlem kayıtları ve performans metrikleri incelendiğinde; söz konusu referans yaklaşımların mevcut donanım kapasiteleri üzerinde ciddi bir iş yükü oluşturduğu ve analiz sürelerinin 6 ila 12 saat (24.274 ile 44.566 saniye) bandına kadar uzadığı tespit edilmiştir. Dahası, sistem belleğinin aşırı yüklenmesi sonucunda bellek yönetimi darboğazları ve zaman boyutu indeksleme hataları meydana gelmiş; analiz süreçleri donanımsal yetersizlikler sebebiyle tamamlanamayarak sistem çökmesiyle sonuçlanmıştır

. Buna karşın, geliştirilen eklenti mimarisine entegre edilen eşzamanlı işlem ve gecikmeli yükleme (lazy parallel loading) algoritmaları sayesinde veri işleme süreçleri hesapsal açıdan tamamen optimize edilmiştir. Uygulama kapsamında eklenti; CDS API arayüzü üzerinden 552 adet aylık NetCDF dosyasının indirilmesi, eksik veya hatalı piksellerin maskelenmesi ve hücresel bazda günlük ekstrem (minimum ve maksimum) sıcaklık değerlerinin hesaplanması işlemlerini otonom bir şekilde gerçekleştirmiştir. Takip eden süreçte, 45 yıllık periyoda ait aylık,

mevsimsel ve uzun dönem klimatolojik istatistikleri barındıran 34 adet sonuç haritasının (raster) üretilerek doğrudan QGIS ortamına aktarılması işlemi yalnızca 419,31 saniyede (yaklaşık 7 dakika) hatasız olarak tamamlanmıştır.

Ek olarak, ilgili NetCDF veri setlerinin yerel önbellekte hazır bulunduğu optimum işletim senaryolarında veri indirme aşaması atlanmış; devasa boyutlardaki iklim dizileri üzerindeki tüm istatistiksel hesaplama ve mekansallaştırma işlemlerinin 51,07 saniye gibi oldukça düşük bir sürede sonuçlandırıldığı ölçülmüştür. Elde edilen bu nicel performans bulguları, geliştirilen eklentinin araştırmacılar üzerindeki manuel veri erişimi ve hesaplama iş yükünü tamamen elimine ettiğini göstermektedir. Ayrıca, çok boyutlu iklimsel zaman serilerinin, geleneksel yöntemlere kıyasla asimptotik olarak çok daha yüksek bir işlem hızında, minimum bellek tüketimiyle ve CBS ortamından çıkılmadan işlenebildiği kanıtlanmıştır.

Hesapsal hız ve otomasyon kazanımlarının yanı sıra, eklentinin ürettiği verilerin meteorolojik hassasiyeti de doğrulanmıştır. Seçilen iki farklı koordinat noktası üzerinde, eklenti ve standart CDO aracı kullanılarak hesaplanan ERA5 uzun dönem günlük maksimum sıcaklık (Kelvin) ortalamaları Çizelge 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 2. CDO ve geliştirilen QGIS eklentisi arasında ERA5 uzun dönem günlük maksimum sıcaklık (K) ortalaması karşılaştırması.

Nokta	Enlem	Boylam	İl	CDO Çıktısı (K)	Eklenti Çıktısı (K)
1	28.995747	41.002368	İstanbul	285.7440	285.7476
2	28.993039	40.003028	Bursa	279.4586	279.4580

Çizelge 2 incelendiğinde, geliştirilen eklentinin hesapladığı sıcaklık değerleri ile geleneksel referans yazılımın (CDO) çıktıları arasındaki farkın yalnızca on binde üç (yaklaşık ~0.003 K) düzeyinde olduğu, bu farkın yuvarlama hassasiyetinden kaynaklandığı ve pratik meteorolojik uygulamalar için tamamen ihmal edilebilir bir seviyede bulunduğu görülmektedir. Bu doğrulama analizi, eklentinin işlem hızını artırırken istatistiksel ve bilimsel doğruluktan hiçbir şekilde ödün vermediğini açıkça ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Marmara Bölgesi gibi çoklu afet tehlikesinin yüksek olduğu alanlarda, iklim araştırmalarının hızlı ve doğru bir şekilde mekânsallaştırılması kritik önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen QGIS eklentisi, dışa bağımlı, zaman alıcı ve hata payı yüksek olan meteorolojik veri işleme prosedürlerini tek bir açık kaynaklı CBS arayüzü altında tam otomatik hale getirmeyi başarmıştır.

Uygulama bulguları, araştırmacıların yüzlerce dosyayı (NetCDF) grid bazında tek tek birleştirmesi ve veri setlerindeki uyuşmazlıkları manuel olarak gidermesi gibi saatler, hatta günler süren geleneksel iş yüklerinin dakikalar seviyesine indirildiğini göstermiştir. Özellikle 45 yıllık saatlik veri gibi devasa veri setlerinin işlenmesinde sıkça karşılaşılan bellek yönetimi çökmelerinin ve zaman kısıtlarının, Python tabanlı paralel işlem yetenekleri sayesinde aşıldığı doğrulanmıştır.

İşlem hızındaki ve otomasyondaki bu radikal artışın yanı sıra, gerçekleştirilen doğrulama analizleri eklentinin bilimsel güvenilirliğini de tescillemiştir. Geleneksel meteorolojik analiz standartlarını temsil eden CDO yazılımı ile yapılan çapraz karşılaştırmalarda elde edilen ihmal edilebilir fark (~0.003 K), eklentinin istatistiksel hassasiyetten hiçbir şekilde ödün vermediğini kanıtlamaktadır. Bu sonuç, CBS kullanıcılarının dış meteorolojik yazılımlara olan bağımlılığının bilimsel kaliteden taviz verilmeden ortadan kaldırılabileceğini göstermektedir.

Geliştirilen bu meteorolojik veri işleme eklentisi; sadece Kentsel Isı Adası hesaplamalarında değil, MARAP projesi kapsamında yürütülecek taşkın, kuraklık ve tarımsal rekolte analizleri gibi diğer iklim değişikliği ve afet risk azaltma uygulamaları için de standart, tekrarlanabilir ve yüksek performanslı bir veri altyapısı sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, eklenti mimarisinin doğrudan hidrolojik/hidrodinamik modelleme araçlarıyla entegre edilerek, CBS ortamında bileşik afet risklerinin eşzamanlı olarak değerlendirilmesine olanak tanıyacak şekilde geliştirilmesi hedeflenmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi ve AFAD ortaklığıyla yürütülen Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) projesi çerçevesinde hazırlanmış ve desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Chen, H., Mamitimin, Y., Abulizi, A., Huang, M., Tao, T., & Ma, Y. (2024). Seasonal and Diurnal Characteristics and Drivers of Urban Heat Island Based on Optimal Parameters-Based Geo-Detector Model in Xinjiang, China. *Atmosphere*, 15(11), 1377. https://doi.org/10.3390/atmos15111377

Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2020). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074006.

Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.68d2bb30 [Erişim Tarihi: 06/19/2026]

Ren, J., Shi, K., Li, Z., Kong, X., & Zhou, H. (2023). A review on the impacts of urban heat islands on outdoor thermal comfort. *Buildings*, 13(6), 1368. https://doi.org/10.3390/buildings13061368

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), t.y. Learn About Heat Island Effects. https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-island-effects [Erişim Tarihi:06/19/2026]

Yomralıoğlu, T. ve Yılmaz, G., 2025. Türkiye'de Afet Risklerinin Azaltılmasında Bölgesel DüzeyliPlanlama Yaklaşımının Gerekliliği: MARAP Projesi Örneğinde Yeni Bir Model Önerisi. *7. Uluslararası Dirençlilik Kongresi*, Elazığ, 39-43.

Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., … & Liu, X. (2021). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044012.

Zhou, D., & Shepherd, J. M. (2010). Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies. *Natural Hazards*, 52(3), 639–668

.

YEREL YÖNETİMLERDE CBS TABANLI ALTYAPI KOORDİNASYON VE KAZI YÖNETİMİ: TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ AYKOME ÖRNEĞİ

Osman DUMAN[1], Osman YAVUZYILMAZ[2]

[1]Bilg. Müh., Trabzon Büyükşehir Belediyesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 61000, Ortahisar, Trabzon, osmanduman@trabzon.bel.tr
[2]Bilg. Müh., Trabzon Büyükşehir Belediyesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 61000, Ortahisar, Trabzon, osmanyavuzyilmaz@trabzon.bel.tr

ÖZET

Kent içi altyapı kazılarında aynı yol ağında birden çok kurum çalışır. Kazının yerinin doğru belirlenmesi, sahada denetlenmesi, ruhsatlandırılması, bedelinin tahakkuk ettirilmesi ve kurum onaylarının alınması aynı dosya üzerinde yürür; bu da kazı yönetimini çok aktörlü bir iş hâline getirir. Bu çalışmada Trabzon Büyükşehir Belediyesinde yaklaşık dört yıldır aktif olarak kullanılan AYKOME uygulaması, CBS tabanlı bir kazı yaşam döngüsü modeli olarak incelenmiştir. Yöntem olarak uygulama örneği incelemesi, süreç analizi ve operasyon kayıtlarının betimsel analizi birlikte kullanılmıştır. İş akışı kurumsal başvurudan ilişik kesmeye kadar izlenmiştir: güzergâhın haritada çizilmesi ya da KML/KMZ ile aktarılması, ilçe-mahalle ve yol sahipliğinin otomatik belirlenmesi, rol tabanlı atama, saha keşfi, nihai geometri ve metrajın üretilmesi, zemin türüne göre bedel hesabı, gerektiğinde UKOME/hafriyat onayı, kurum adına borçlandırma, banka entegrasyonu, e-imzalı ruhsat, son keşif ve fark tahakkuku. İzlenebilirlik aktör-durum-zaman kayıtlarıyla, raporlanabilirlik kurum, ruhsat türü, zemin, metraj ve mali kayıtların sorgulanabilmesiyle ölçülmüştür. Bütünleşiklik için CBS, saha, mali süreç, banka, e-imza ve kapanış işlemlerinin aynı yaşam döngüsünde yürüyüp yürümediğine bakılmıştır. Veritabanında başlangıç tarihi 01.01.2021-22.09.2026 arasında olan 1.142 planlı kazı ruhsatı bulunmaktadır. 2026 yılında 22 Eylül'e kadar 247 planlı, 282 acil ve 25 kazısız olmak üzere 554 ruhsat kaydı vardır. Aynı dönemde planlı kazıların uzunluk bazlı metrajı yaklaşık 105,8 km'dir. Bulgular, AYKOME'de CBS'nin kurumsal iş akışı, mali kontrol ve dijital ruhsatlandırmayla aynı süreç içinde bir karar ve süreç yönetimi bileşeni olarak kullanıldığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: altyapı koordinasyonu, AYKOME, CBS, kazı yönetimi, yerel yönetimler

ABSTRACT

GIS-BASED INFRASTRUCTURE COORDINATION AND EXCAVATION MANAGEMENT IN LOCAL GOVERNMENTS: THE CASE OF TRABZON METROPOLITAN MUNICIPALITY AYKOME

Several utility organizations work on the same urban road network, and every excavation has to be located accurately, inspected in the field, permitted, charged and approved by the relevant institutions. Excavation management is therefore a multi-actor problem. This study examines the AYKOME application, which Trabzon Metropolitan Municipality has used in daily operations for about four years, as a GIS-based model for managing the excavation lifecycle. The study combines a case-study approach, process analysis and descriptive analysis of operational records. The workflow was traced from the institutional application to administrative closure: route digitization on a web map or KML/KMZ import, automatic identification of district, neighborhood and road ownership, role-based assignment, field inspection, production of final geometry and quantities, surface-type-based fee calculation, UKOME/excavation-waste approvals where required, debt creation on behalf of the utility, banking integration, electronically signed permits, final inspection and differential accrual. Traceability was assessed through actor-status-timestamp records and reportability through queries on institutions, permit types, surfaces, quantities and financial records. For integration, the study checked whether GIS, field, financial, banking, e-signature and closure steps run within one lifecycle. The database contains 1,142 planned excavation permits with start dates between 1 January 2021 and 22 September 2026. In 2026, up to 22 September, 554 permits were recorded: 247 planned, 282 emergency and 25 non-excavation. Planned excavations in 2026 amount to about 105.8 km in length-based quantity. In AYKOME, GIS works as a process and decision-support component within the same workflow as institutional approvals, financial control and digital permitting.

Keywords: AYKOME, excavation management, GIS, infrastructure coordination, local governments

1. GİRİŞ

Elektrik, doğalgaz, içme suyu, kanalizasyon ve telekomünikasyon hizmeti veren kurumlar çoğunlukla aynı kamusal alanda ve aynı yol ağında çalışır. Bu yüzden bir kazıyı yönetirken konumsal veri, yetki alanı, zamanlama, trafik ve yol güvenliği, saha denetimi, ruhsat, mali yükümlülük ve kurumlar arası koordinasyon birlikte hesaba katılmalıdır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), konumsal ve öznitelik verilerini ortak bir referans çerçevesinde yönetmeye, sorgulamaya ve karar süreçlerinde kullanmaya imkân verdiği için altyapı yönetiminin temel bilgi teknolojilerinden biridir (Yomralıoğlu, 2009; Longley vd., 2015).

Belediye altyapı bilgi sistemlerinde varlıkları harita üzerinde göstermek yeterli olmaz. İş süreçleri, veri tabanları ve kurumlar birbirine bağlanmadığında bilgi akışı kopar, kayıtlar yinelenir ve kararlar gecikir. Halfawy vd. (2004), belediye altyapı varlıkları için merkezi bir veri modeline ve CBS arayüzüne dayanan, bakım ve maliyet iş akışlarını da aynı ortamda birleştiren bir çerçeve önermiştir. Türkiye'de Karataş ve Bıyık (2017), teknik altyapıya ait grafik ve sözel verilerin bütünleşik bir bilgi sistemiyle yönetilmesinin belediyelerin planlama ve karar verme kapasitesini desteklediğini göstermiştir.

Yeraltı altyapı verilerinin kurumlar arasında paylaşılması ve birlikte kullanılabilmesi, kazı güvenliği ve koordinasyon için ayrı bir sorundur. OGC'nin Underground Infrastructure Concept Study Engineering Report çalışmasına göre parçalı ve standart dışı altyapı kayıtları kazı planlamasında ve sahada ciddi belirsizlik yaratmaktadır; bu yüzden konumsal veri entegrasyonu ve birlikte çalışabilirlik temel gereksinimdir (Lieberman ve Ryan, 2017). Daha yeni çalışmalarda BIM ve CBS birleştirilerek altyapı bilgilerinin tasarım, yapım ve işletme aşamalarında ortak bir ortamda yönetilebildiği gösterilmiştir (Sharafat vd., 2021). Bu çalışmaların çoğu altyapı varlığının geometrisine, veri modeline ve teknik birlikte çalışabilirliğine odaklanır. Yerel yönetimlerde kazı başvurusundan tahsilata, e-imzalı ruhsattan son keşif ve ilişik kesmeye uzanan idari süreci gerçek işlem kayıtlarıyla inceleyen uygulama örnekleri ise azdır.

Türkiye'de büyükşehir belediyelerinde altyapı koordinasyonu, 5216 sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu (Büyükşehir Belediyesi Kanunu, 2004) ve Büyükşehir Belediyeleri Koordinasyon Merkezleri Yönetmeliği çerçevesinde yürütülür. AYKOME'nin kuruluşu, görev ve yetkileri ve kurumlar arası koordinasyon yapısı bu yönetmelikte tanımlanmıştır (Büyükşehir Belediyeleri Koordinasyon Merkezleri Yönetmeliği, 2006). Yönetmelikte 24.12.2020 tarihinde yapılan değişikliğe (Büyükşehir Belediyeleri Koordinasyon Merkezleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2020; bundan sonra Değişiklik Yönetmeliği) göre, büyükşehir belediyesinin sorumluluğundaki yerlerde altyapı kazısı yapacak gerçek ve tüzel kişilere izin ve kazı ruhsatı vermek ve bunun bedelini belirlemek büyükşehir belediyesinin görevidir. Değişiklik Yönetmeliği, bu yerlerdeki kazı gelirlerinin büyükşehir bünyesinde açılan altyapı yatırım hesabında toplanmasını ve amacı dışında kullanılmamasını da öngörür. Kazı ruhsatı, bedel hesabı ve tahsilat böylece AYKOME sürecinin mevzuatla belirlenmiş adımlarıdır. Dijital bir AYKOME uygulaması da bu görev, onay ve mali adımları konumsal verilerle ilişkilendirebilmelidir.

Bu çalışmada Trabzon Büyükşehir Belediyesi AYKOME uygulaması CBS tabanlı bir süreç yönetimi modeli olarak incelenmiş, sistemin izlenebilirlik, raporlanabilirlik, bütünleşiklik ve mekânsal karar destek nitelikleri operasyon kayıtlarıyla değerlendirilmiştir. Çalışma üç soruya yanıt aramaktadır: (i) kazı yaşam döngüsü hangi işlevsel aşamalar ve aktör grupları üzerinden yürütülmektedir, (ii) sistemin izlenebilir, raporlanabilir ve bütünleşik olduğu hangi gözlenebilir ölçütlerle gösterilebilir, (iii) gerçek operasyon kayıtları sistemin kullanım ölçeği ve kazıların dağılımı hakkında hangi nicel bulguları vermektedir?

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Bağlamı ve Yasal Çerçeve

Çalışma alanı Trabzon Büyükşehir Belediyesi sınırlarıdır. Uygulama, belediyenin AYKOME süreçlerini ve elektrik, doğalgaz, içme suyu-kanalizasyon, telekomünikasyon gibi altyapı kurumlarının kazı başvurularını aynı dijital ortamda yönetmektedir. Altyapı kurumuna kullanıcı tanımlanırken kullanıcı bağlı olduğu kurumla ilişkilendirilir, rolü ve yetkileri de buna göre belirlenir. Uygulama yaklaşık dört yıldır aktif olarak kullanılmaktadır; rapor modüllerinde ise kayıtlar 01.01.2021'den itibaren sorgulanabilmektedir. Bu nedenle uzun dönem sayılar "sistemde raporlanan kayıtlar" olarak ele alınmış, aktif kullanımın başladığı tarihle aynı kabul edilmemiştir.

Araştırmada kişi bazlı kişisel veri kullanılmamış, sayısal bulgular toplulaştırılmış operasyon kayıtlarından üretilmiştir. Ekran görüntülerinde kişi ve finansal hesap bilgileri anonimleştirilmiştir. Çalışma, sistemin kurumsal süreçlerini ve göstergelerini betimleyen bir uygulama örneğidir; nedensel etki analizi yapılmamıştır.

2.2. Araştırma Deseni, Veri Kaynakları ve Analiz Yaklaşımı

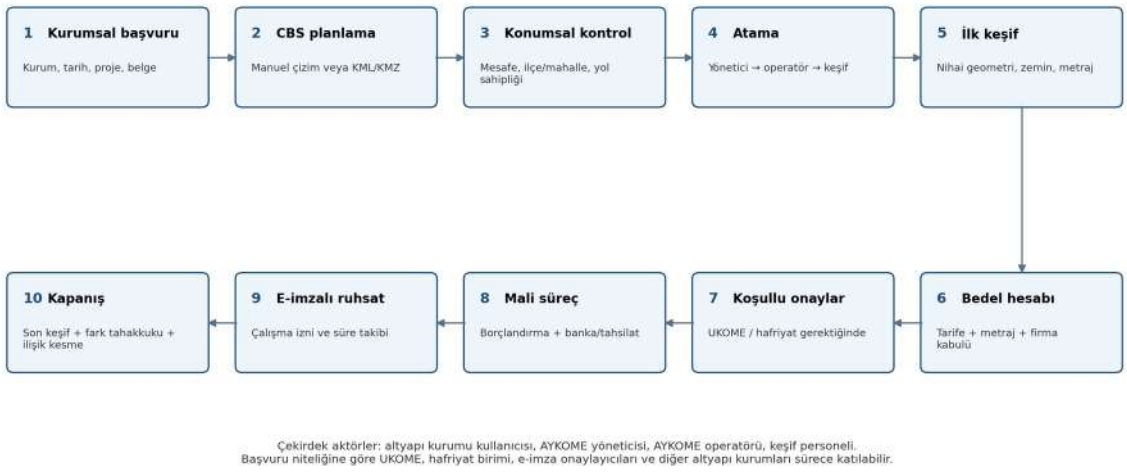
Yöntem olarak tek kurumlu uygulama örneği incelemesi, süreç analizi ve operasyon kayıtlarının betimsel analizi birlikte kullanılmıştır. İlk adımda kullanıcı rollerinin ve durum geçişlerinin görülebildiği süreç kayıtlarından kazı yaşam döngüsü modellenmiştir. Ardından CBS tabanlı başvuru ve saha işlevleri, mali ve tahsilat bileşenleri, e-imza ve ilişik kesme süreçleri incelenmiştir. Son olarak sistemin rapor ekranlarından ruhsat türü, kurum dağılımı ve zemin türüne göre metraj alınmış; sayı, oran ve toplam uzunluk düzeyinde betimsel istatistikler hesaplanmıştır. Raporlarda ruhsat başlangıç tarihi esas alınmıştır. Veri kaynakları ve her birinin analizdeki amacı Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri kaynakları ve değerlendirme amaçları.

Veri kaynağı	İncelenen alanlar	Analiz amacı
Süreç kayıtları	Durum, aktör, işlem zamanı, kalan ruhsat süresi	İzlenebilirlik ve süreç modeli
CBS başvuru/keşif verileri	Güzergâh geometrisi, mesafe, ilçe-mahalle, yol sahipliği, zemin ve metraj	Mekânsal doğrulama ve karar destek
Ruhsat kayıtları	Planlı, acil, kazısız; kurum; başlangıç tarihi	Kullanım ölçeği ve dağılım
Mali kayıtlar	Tarife kalemleri, tahakkuk/borç, ceza, ödeme hareketleri	Mali bütünleşiklik ve kontrol
Belge/onay kayıtları	E-imzalı ruhsat, UKOME/hafriyat koşulları, ilişik kesme	Kurumsal onay ve kapanış

2.3. Süreç Modelleme ve Aktörler

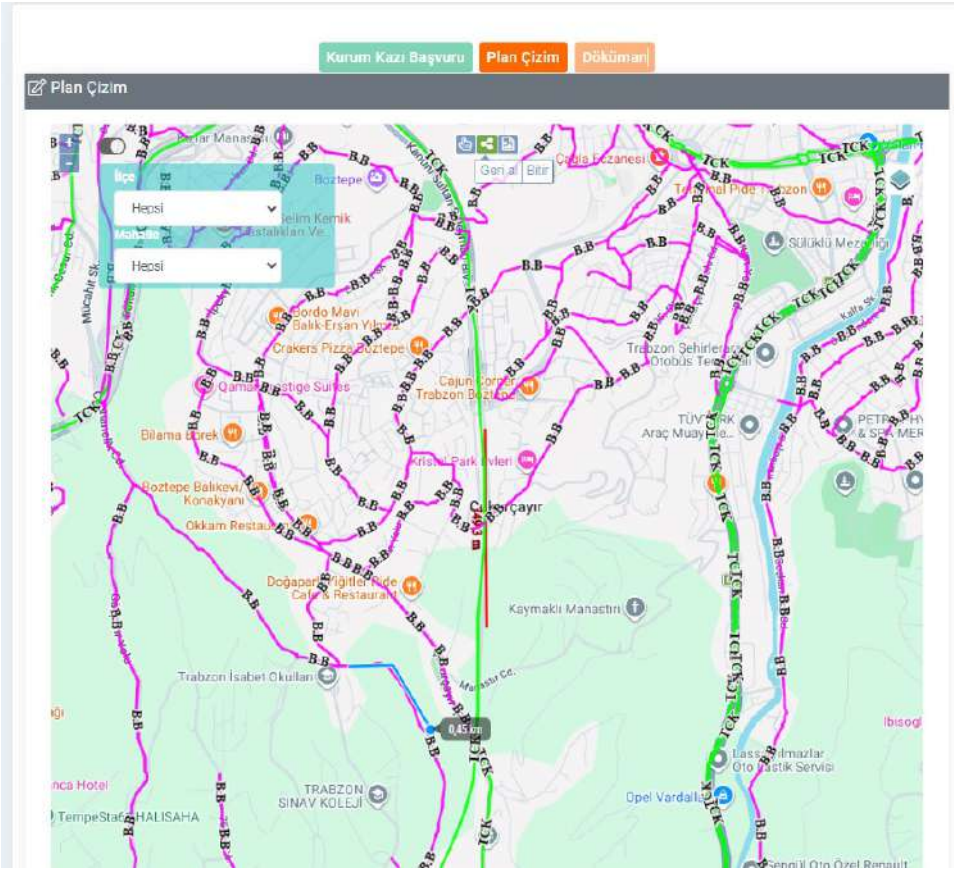
İş akışı, analiz için on işlevsel aşamada gruplanmıştır (Şekil 1). Bu aşamalar altı ana adımda toplanabilir: kurumsal başvuru, CBS ile konumsal kontrol, rol tabanlı atama, saha keşfi ve metraj, koşullu onay ve mali süreç, e-imza ve kapanış. Çekirdek akışta dört aktör grubu yer alır: altyapı kurumu kullanıcısı, AYKOME yöneticisi, AYKOME operatörü ve keşif personeli. Başvurunun niteliğine göre UKOME, hafriyat birimi, e-imza onaylayıcıları ve diğer altyapı kurumları da sürece katılabilir; dolayısıyla bir dosyadaki aktör sayısı başvuru türüne ve gereken onaylara göre değişir. Durum değişiklikleri zaman damgasıyla kaydedilir ve kullanıcılar bekleyen işlerini rollerine göre açılan ekranlarda görür.



Şekil 1. AYKOME kazı yaşam döngüsünün işlevsel süreç modeli.

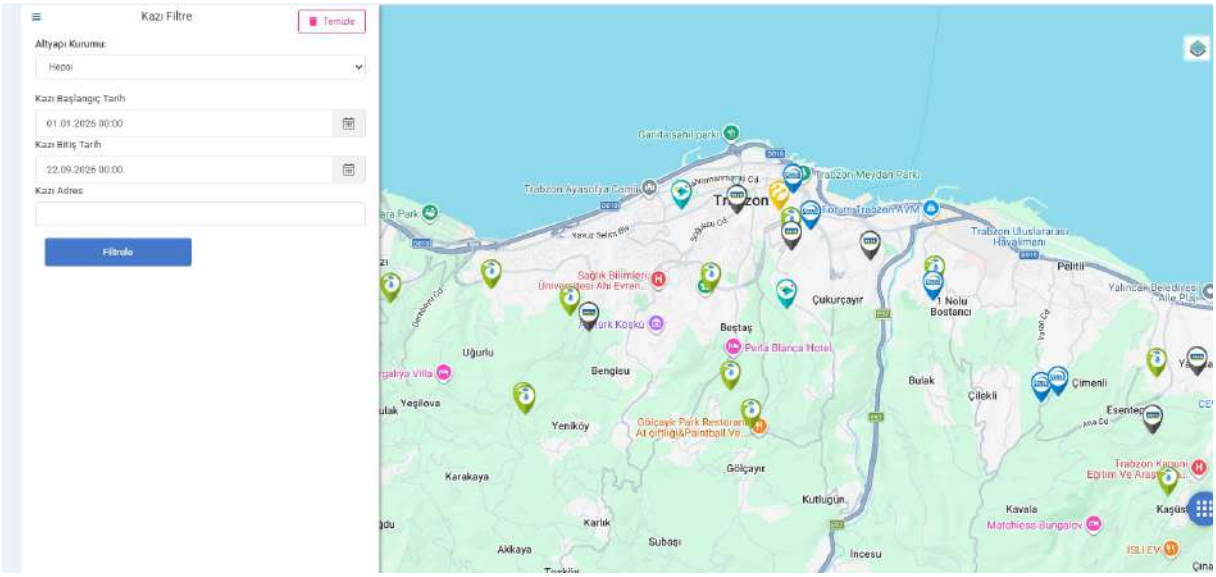
2.4. CBS Tabanlı Veri Üretimi ve Mekânsal Kontrol

Başvuru sahibi kazı güzergâhını web haritasında doğrudan çizebilir ya da önceden hazırladığı veriyi KML/KMZ formatında yükleyebilir. KML için kullanılan standart OGC KML 2.3 Implementation Standard'dır (OGC 12-007r2; Burggraf, 2015). Geometri kaydedildiğinde güzergâh uzunluğu hesaplanır; ilçe ve mahalle bilgisi, idari sınır katmanlarıyla mekânsal ilişki kurularak belirlenir. Yol sahipliği katmanı, güzergâhtan sorumlu kurumun belirlenmesine ve başvurunun yetkili kuruma yönlendirilmesine yardımcı olur. Zemin türü ve metraj başvuruda girilir. Ruhsata ve mali hesaba esas nihai geometriyi ise keşif personeli saha incelemesinden sonra oluşturur (Şekil 2).



Şekil 2. CBS tabanlı plan çizimi, otomatik mesafe ve idari birim ilişkilendirme ekranı.

Sistemde ayrıca kayıtlı kazıları altyapı kurumu, tarih aralığı ve adrese göre süzüp aynı haritada gösteren bir kazı haritası ekranı bulunur. Bu ekranla tek bir başvurunun konumu doğrulanabildiği gibi, belli bir dönemde hangi kurumun nerede kazı yaptığı da izlenebilir (Şekil 3).



Şekil 3. Kurum ve tarih filtreleriyle kazıların harita tabanlı izlenmesi.

2.5. Değerlendirme Ölçütleri

İzlenebilirlik, raporlanabilirlik ve bütünleşiklik kavramları öznel nitelendirme olarak kalmasın diye sistemde gözlenebilen kanıtlarla tanımlanmıştır. İzlenebilirlik, bir başvurunun durum geçişlerinin aktör ve zaman bilgisiyle geriye doğru takip edilebilmesidir. Raporlanabilirlik, operasyon kayıtlarının farklı boyutlarda sorgulanıp toplulaştırılabilmesini ifade eder. Bütünleşiklik ile mekânsal, idari, saha ve mali işlemlerin aynı yaşam döngüsü içinde birbirine bağlı yürütülmesi kastedilmektedir. Mekânsal karar destek ise kazıların geometri, kurum ve zaman ölçütleriyle sorgulanabilmesi anlamında kullanılmıştır (Çizelge 2).

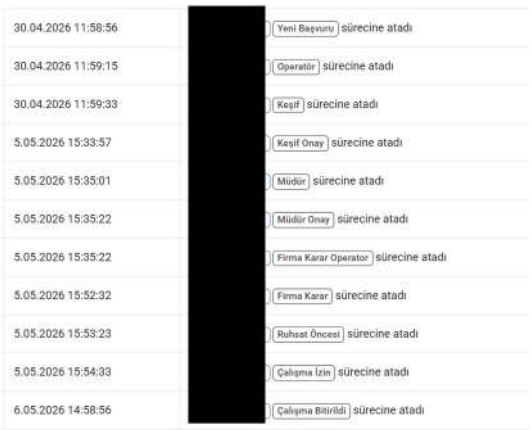
Çizelge 2. Değerlendirme ölçütleri ve sistemdeki gözlenebilir karşılıkları.

Ölçüt	Gözlenebilir sistem kanıtı
İzlenebilirlik	Durum + aktör + zaman damgası; rol bazlı bekleyen işler; ruhsat süresi takibi
Raporlanabilirlik	Ruhsat türü, kurum, zemin, metraj, borç, ceza ve süreç durumlarının raporlanması
Bütünleşiklik	CBS + keşif + tarife/borç + banka + e-imza + son keşif/ilişik kesme
Mekânsal karar destek	Kurum/tarih/adres filtreleri; güzergâh ve geçmiş/aktif kazıların harita üzerinde sorgulanması

3. BULGULAR

3.1. İş Akışı ve İzlenebilirlik

Örnek süreç kayıtlarında yeni başvuru, operatör, keşif, keşif onayı, yönetici/onay, firma kararı, ruhsat öncesi, çalışma izni ve çalışma bitişi durumlarının her biri ayrı bir zaman damgasıyla saklanmaktadır. Böylece bir başvurunun hangi aşamaya ne zaman ve hangi aktördeyken geçtiği geriye dönük olarak izlenebilir. Rol bazlı iş listelerinde ruhsat süresi kalan ya da geçen gün olarak gösterildiği için süre takibi de operasyon ekranından yapılabilmektedir (Şekil 4).

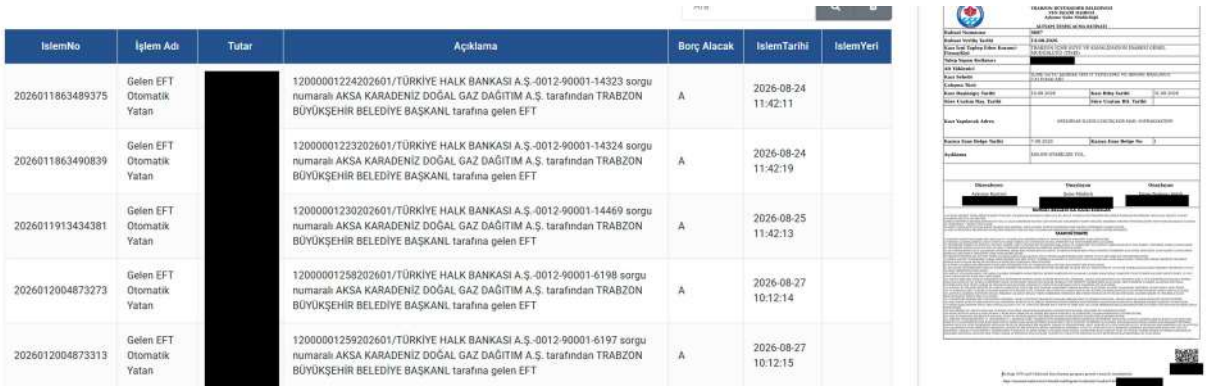


Şekil 4. Zaman damgalı süreç geçişlerinden anonimleştirilmiş bir örnek.

3.2. Koşullu İş Akışı, Saha Doğrulaması ve Mali Entegrasyon

Başvuruların hepsi aynı rotayı izlemez. UKOME kararı gereken başvurular onay aşamasına, hafriyat belgesi gerekenler hafriyat sürecine yönlendirilir. İlk keşifte saha koşulları değerlendirilir; ruhsata ve hesaba esas nihai geometriyi ve zemin/metraj verisini keşif personeli oluşturur. Hesaplanacak kalemler kurumla yapılan protokole ve başvurunun özelliklerine göre belirlenir. Zemin tahribat bedeli, keşif-kontrol bedeli, ruhsat harcı, teminat ve süre uzatım bedeli parametrik formüllerle hesaplanabilmektedir.

Firma ya da kurum hesaplanan bedelleri kabul ettiğinde borç kaydı ilgili altyapı kurumu adına açılır. AYKOME hesabına gelen banka hareketleri sistemde görüntülenebildiği için tahsilat da iş akışına bağlanmış olur. Vadesi iki ayı aşan borcu bulunan kurumun yeni başvuru yapması engellenir; mali kayıtlar böylece bir iş kuralı olarak da kullanılır. Ruhsat e-imzalı olarak üretilir ve QR/doğrulama bilgisi taşır. Çalışma bittikten sonra yapılan son keşifte ilk ruhsata göre fark çıkarsa fark tahakkuku oluşturulabilir. Dosya, gerektiğinde diğer altyapı kurumlarının onaylarını da içeren ilişik kesme süreciyle kapatılır (Şekil 5).



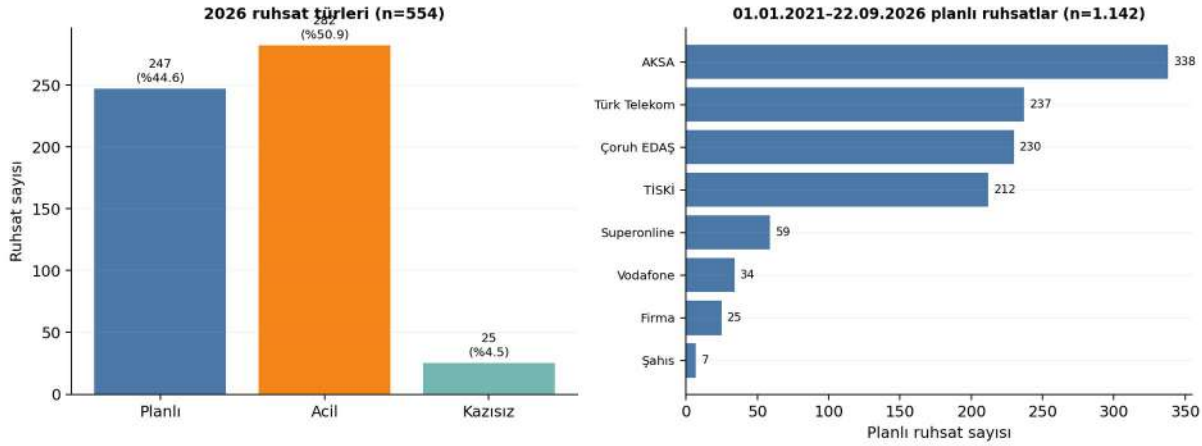
IslemNo	İşlem Adı	Tutar	Açıklama	Borç Alacak	IslemTarihi	IslemYeri
2026011863489375	Gelen EFT Otomatik Yatan	[redacted]	12000001224202601/TÜRKİYE HALK BANKASI A.Ş.-0012-90001-14323 sorgu numaralı AKSA KARADENİZ DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANL tarafına gelen EFT	A	2026-08-24 11:42:11	
2026011863490839	Gelen EFT Otomatik Yatan		12000001223202601/TÜRKİYE HALK BANKASI A.Ş.-0012-90001-14324 sorgu numaralı AKSA KARADENİZ DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANL tarafına gelen EFT	A	2026-08-24 11:42:19	
2026011913434381	Gelen EFT Otomatik Yatan		12000001230202601/TÜRKİYE HALK BANKASI A.Ş.-0012-90001-14469 sorgu numaralı AKSA KARADENİZ DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANL tarafına gelen EFT	A	2026-08-25 11:42:13	
2026012004873273	Gelen EFT Otomatik Yatan		12000001258202601/TÜRKİYE HALK BANKASI A.Ş.-0012-90001-6198 sorgu numaralı AKSA KARADENİZ DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANL tarafına gelen EFT	A	2026-08-27 10:12:14	
2026012004873313	Gelen EFT Otomatik Yatan		12000001259202601/TÜRKİYE HALK BANKASI A.Ş.-0012-90001-6197 sorgu numaralı AKSA KARADENİZ DOĞAL GAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANL tarafına gelen EFT	A	2026-08-27 10:12:15	

Şekil 5. Mali işlem/banka hareketi ile e-imzalı ruhsatın aynı yaşam döngüsündeki örnekleri (anonimleştirilmiştir).

3.3. Operasyonel Kayıtların Nicel Değerlendirmesi

Veritabanında ruhsat başlangıç tarihi 01.01.2021 ile 22.09.2026 arasında olan 1.142 planlı kazı ruhsatı vardır. Kurumlara göre ilk dört sırada AKSA Karadeniz Doğal Gaz 338 (%29,6), Türk Telekom 237 (%20,8), Çoruh EDAŞ 230 (%20,1) ve TİSKİ 212 (%18,6) kayıtla yer almaktadır. Bu dört kurum uzun dönem planlı ruhsatların %89,1'ini oluşturur. Kalan kayıtların 59'u Superonline, 34'ü Vodafone, 25'i firma ve 7'si şahıs başvurusudur. Doğalgaz, telekomünikasyon, elektrik ve su-kanalizasyon kurumlarının aynı süreçte yer alması, sistemin farklı hizmet alanlarındaki kurumları ortak bir süreçte yönettiğini gösterir (Şekil 6).

2026 yılında, ruhsat başlangıç tarihine göre 01.01.2026-22.09.2026 aralığında 247 planlı, 282 acil ve 25 kazısız olmak üzere 554 ruhsat kaydı bulunmaktadır. Bunların %50,9'u acil, %44,6'sı planlı ve %4,5'i kazısız ruhsattır (Çizelge 3). Acil ruhsatların 201'i (%71,3) TİSKİ'ye aittir. Bu dağılım, kurum ve ruhsat türü bazında farklı operasyon örüntülerine işaret etmektedir; nedenleri ise bu veri setiyle test edilmemiştir.

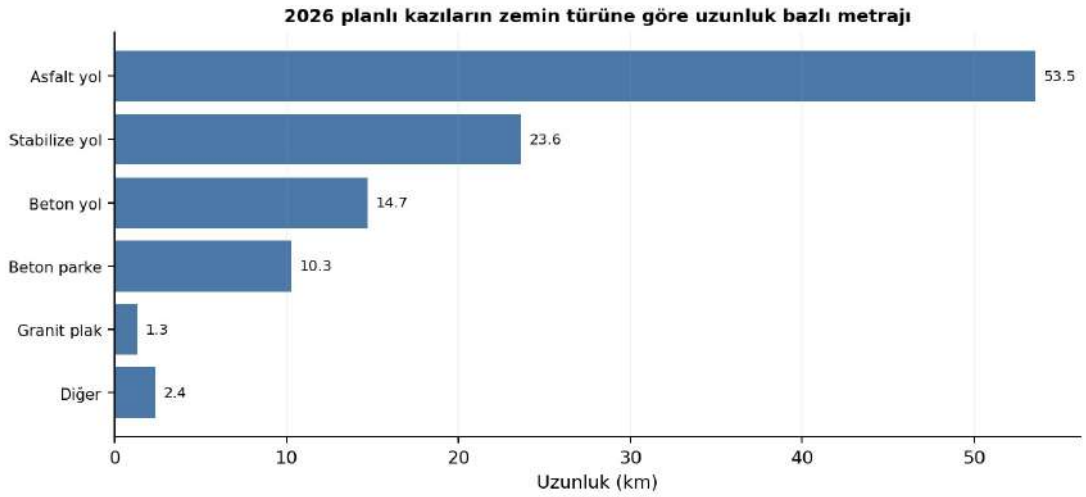


Şekil 6. Ruhsat türleri ve kurum bazlı planlı ruhsat dağılımı.

Çizelge 3. 01.01.2026-22.09.2026 döneminde ruhsat türü dağılımı.

2026 ruhsat türü	Sayı	Pay (%)
Planlı	247	44,6
Acil	282	50,9
Kazısız	25	4,5
Toplam	554	100,0

2026 planlı kazı kayıtlarında uzunluk bazlı metraj toplamı 105.799,3 m'dir (yaklaşık 105,8 km). Bunun 53,5 km'si asfalt yol, 23,6 km'si stabilize yol, 14,7 km'si beton yol ve 10,3 km'si beton parke sınıfındadır (Şekil 7). Kalan 3,7 km diğer zemin sınıflarındadır; ilk dört sınıf toplam metrajın yaklaşık %96,5'ini oluşturur. Zemin sınıfı tarife ve metrajla birlikte bedel hesabına girdiği için saha verisi mali sürece doğrudan bağlanmaktadır.



Şekil 7. 2026 planlı kazılarında zemin türlerine göre uzunluk bazlı metraj.

4. TARTIŞMA

Halfawy vd. (2004), bütünleşik veri modellerine ve iş akışlarına dayanan ortak bir CBS ortamının belediye altyapı varlıklarının yönetiminde karar desteği sağlayabildiğini bir kanalizasyon yönetim sistemi prototipiyle göstermiştir. AYKOME'de bu birleşme, konumsal başvurunun saha keşfi, tarife, borçlandırma, banka hareketi, e-imza ve kapanış işlemlerine doğrudan bağlanmasıyla gerçekleşmektedir. Sistemin merkezinde kazı izninin yaşam döngüsü bulunmaktadır.

Karataş ve Bıyık (2017), Trabzon örneğinde teknik altyapıya ait grafik ve grafik olmayan verilerin ortak bir bilgi sisteminde tutulmasının belediyeler için önemini ortaya koymuştur. AYKOME bu yaklaşımı günlük operasyona taşımaktadır: güzergâh geometrisi, idari sınırlar ve yol sahipliği gibi mekânsal bilgiler; kurum, aktör, durum, metraj, tarife ve ödeme gibi sözel ve işlemsel verilerle aynı dosyada ilişkilendirilir. Kurum ve tarih filtreli kazı haritası ise tek tek ruhsatların dışında kent ölçeğinde bir genel görünüm sağlar.

OGC'nin yeraltı altyapı çalışmaları, farklı kurumlarda tutulan altyapı verilerinin birlikte kullanılabilirliğini temel sorunlardan biri olarak tanımlar (Lieberman ve Ryan, 2017). AYKOME bu soruna yeraltı hatlarının ortak 3B modelini kurarak yaklaşmaz. Kazı faaliyeti etrafındaki kurumsal koordinasyonu standart mekânsal başvuru, yol sahipliği kontrolü, KML/KMZ aktarımı ve kurumlar arası onaylarla destekler. Çalışmanın katkısı, konumsal veriyi idari ve mali süreçlerle bağlayan bu kurumsal iş akışı modelidir. Sharafat vd. (2021) tarafından önerilen BIM-CBS yaklaşımı, teknik yaşam döngüsünde bütünleşik mekânsal bilginin önemini göstermektedir. Bu çalışma ise yerel yönetimdeki ruhsat sürecinin idari ve mali yaşam döngüsünün CBS ile bütünleşmesine ilişkin bir saha örneği sunmaktadır.

Çalışmanın bir sınırlılığı, sistem öncesi yöntemle doğrudan karşılaştırma yapılamamasıdır. Sistem öncesine ait işlem süresi, başvuru sayısı ve hata kayıtları aynı veri modeliyle tutulmadığı için güvenilir bir nicel öncesi-sonrası karşılaştırma mümkün olmamıştır. Karşılaştırma bu yüzden işlevsel düzeyde, literatürde tanımlanan parçalı bilgi yönetimi sorunlarıyla mevcut sistemin gözlenebilir özellikleri arasında yapılmıştır (Çizelge 4). Arşiv kayıtlarından sistem öncesi işlem süreleri güvenilir biçimde çıkarılabilirse ruhsat süresi, yeniden işlem oranı, saha kontrol sayısı ve tahsilat süresi gibi göstergelerle nedensel olmayan, karşılaştırmalı bir performans analizi yapılabilir.

Çizelge 4. Literatür temelli işlevsel karşılaştırma. Bu çizelge Trabzon'da sistem öncesi nicel performans karşılaştırması değildir.

Boyut	Literatürde tanımlanan parçalı yaklaşım sorunu	AYKOME'de gözlenen karşılık
Konum tanımı	Parçalı/2B kayıtların ve farklı kaynakların uyumsuzluğu literatürde temel sorun olarak belirtilmektedir.	Web haritasında çizim veya KML/KMZ; otomatik uzunluk, ilçe/mahalle ve yol sahipliği ilişkisi
İş akışı	Ayrı sistem ve birimler arasında bilgi akışının kopması entegrasyon sorununa yol açabilir.	Rol tabanlı durum geçişleri; koşullu UKOME/hafriyat dalları; zaman damgası
Saha doğrulaması	Saha ve masa başı kayıtlarının ayrışması güncellik sorununa yol açabilir.	Keşif personelinin nihai geometri, zemin ve metrajı üretmesi
Mali süreç	Teknik kayıt ve mali kaydın ayrık yönetilmesi tekrar veri üretimine neden olabilir.	Tarife formülleri, kurum borcu, banka hareketi ve borca bağlı iş kuralı
Belge/kapanış	Onay ve kapanış belgelerinin ayrı kanallarda yürütülmesi izlenebilirliği azaltabilir.	E-imzalı ruhsat, son keşif, fark tahakkuku ve kurumlar arası ilişik kesme

Çalışma tek bir belediyeye dayanmaktadır, bulgular ağırlıklı olarak betimseldir ve rapor ekranlarındaki veriler giriş kalitesine bağlıdır. Acil ve planlı kazılarda zemin metrajları farklı birimlerde (m, m² ve m³) tutulabildiği için tek bir toplamda birleştirilmemiştir; 105,8 km değeri yalnızca planlı kazıların uzunluk bazlı metrajıdır. Kullanıcı memnuniyeti, işlem maliyeti ve sistemin kullanılabilirliği çalışmanın kapsamı dışında kalmıştır.

5. SONUÇ

AYKOME incelemesi, yerel yönetimlerde kazı yönetiminin konumsal, idari, saha ve mali bileşenlerinin tek bir dijital yaşam döngüsünde birleştirilebildiğini göstermiştir. Başvurunun alınmasından ilişik kesmeye kadar her adım aynı dosyaya bağlı ilerlemekte, konumsal kontrol ve mali hesap da bu dosya üzerinden yapılmaktadır.

Çalışmanın katkısı, izlenebilirlik, raporlanabilirlik ve bütünleşiklik kavramlarını sistemde gözlenebilen kayıtlarla tanımlaması ve bu tanımları gerçek operasyon verisiyle desteklemesidir. 2026'da 22 Eylül'e kadar 554 ruhsat kaydedilmiş, bunların %50,9'u acil ruhsat olmuş ve planlı kazılarda yaklaşık 105,8 km uzunluk bazlı metraj oluşmuştur. Bu sayılar sistemin operasyonel ölçekte kullanıldığını gösterir. Uzun dönemde raporlanan 1.142 planlı ruhsat da modelin farklı altyapı kurumlarını aynı süreçte yönetebildiğine dair bir uygulama kanıtıdır.

Sonraki çalışmalarda süreç kayıtlarından başvuru, keşif ve ruhsat aşamalarının işlem ve bekleme süreleri çıkarılabilir, kurumlar ve ruhsat türleri arasında darboğaz analizi yapılabilir. İlk keşif ile son keşif arasındaki farklar ve fark tahakkukları, tahakkuk-tahsilat süreleri ve kazıların mekânsal yoğunluğu da incelenebilir.

6. TEŞEKKÜR

Yazarlar, AYKOME uygulamasının geliştirilmesine ve operasyonel kullanımına katkı sağlayan Trabzon Büyükşehir Belediyesi AYKOME birimine ve ilgili altyapı kurumu kullanıcılarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Burggraf, D. (Ed.), 2015. OGC KML 2.3 Implementation Standard (OGC 12-007r2). Open Geospatial Consortium, Wayland, ABD.

Büyükşehir Belediyeleri Koordinasyon Merkezleri Yönetmeliği, 2006. Resmî Gazete, 15 Haziran 2006, Sayı: 26199.

Büyükşehir Belediyeleri Koordinasyon Merkezleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2020. Resmî Gazete, 24 Aralık 2020, Sayı: 31344.

Büyükşehir Belediyesi Kanunu, 2004. 5216 sayılı Kanun. Resmî Gazete, 23 Temmuz 2004, Sayı: 25531.

Halfawy, M.R., Vanier, D.J. ve Hubble, D., 2004. Integration of Municipal Information Systems for Sustainable Management of Infrastructure Assets. Environmental Informatics Archives, 2: 375-386.

Karataş, K. ve Bıyık, C., 2017. Importance for Municipalities of Infrastructure Information Systems in Turkey. TEM Journal, 6(3): 503-511.

Lieberman, J. ve Ryan, A. (Ed.), 2017. OGC Underground Infrastructure Concept Study Engineering Report (OGC 17-048). Open Geospatial Consortium, Wayland, ABD.

Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. ve Rhind, D.W., 2015. Geographic Information Science and Systems. 4. basım, Wiley, Hoboken.

Sharafat, A., Khan, M.S., Latif, K., Tanoli, W.A., Park, W. ve Seo, J., 2021. BIM-GIS-Based Integrated Framework for Underground Utility Management System for Earthwork Operations. Applied Sciences, 11(12): 5721.

Yomralıoğlu, T., 2009. Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar. 5. basım (ilk basım 2000), Akademi Kitabevi, Trabzon.

KENTSEL TAŞKIN RİSKİNİN CBS VE HEC-RAS ENTEGRASYONU İLE ANALİZİ: KAYSERİ İLİ DOĞU BÖLGESİ ÖRNEĞİ

Merve Ercan, Fatih Mehmet Durmuşçelebi, Emre Karadaş, Selman Sal

1. GİRİŞ

Kentsel taşkınlar, iklim değişikliğinin etkisiyle artan kısa süreli ve yüksek şiddetli yağışlar ile birlikte kentlerde daha sık görülen doğal afetlerden biri hâline gelmiştir. Bunun yanında hızlı kentleşme, geçirimsiz yüzey oranlarının artması ve mevcut yağmur suyu drenaj sistemlerinin tasarım kapasitelerinin yetersiz kalması, yüzey akışını artırarak taşkın riskini önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu durum yalnızca fiziksel çevreyi değil; ulaşım, altyapı sistemleri, ekonomik faaliyetler ve kent yaşamını da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle taşkınların yalnızca hidrolojik açıdan değil, topoğrafya, arazi kullanımı ve mevcut altyapı sistemleri birlikte değerlendirilerek analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), farklı kaynaklardan elde edilen mekânsal verilerin bütünleştirilmesi, analiz edilmesi ve görselleştirilmesine olanak sağlayarak taşkın risk analizlerinde etkin bir karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında HEC-RAS hidrolik modelleme yazılımı, farklı yağış senaryoları altında suyun davranışını modelleyebilmesi sayesinde taşkın yayılım alanlarının, su derinliklerinin ve akım karakteristiklerinin belirlenmesine imkân tanımaktadır. CBS ve HEC-RAS yazılımlarının birlikte kullanılması, taşkın riskinin mekânsal boyutunun daha ayrıntılı değerlendirilmesini ve elde edilen sonuçların planlama süreçlerine aktarılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, Kayseri ili doğu bölgesi örneğinde kentsel taşkın riskinin CBS ve HEC-RAS 6.6 entegrasyonu ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 5 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli, mevcut yağmur suyu drenaj ağı, arazi kullanım verileri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Q50, Q100 ve Q500 tekerrür sürelerine ait tasarım yağışları kullanılarak bütünleşik bir analiz yaklaşımı oluşturulmuştur. Çalışmanın, taşkın açısından öncelikli risk alanlarının belirlenmesi ve yerel yönetimlerin altyapı planlaması ile afet risk yönetimi süreçlerine katkı sağlayacak mekânsal bir karar destek modeli ortaya koyması hedeflenmektedir.

2. ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışmada, Kayseri Büyükşehir Belediyesi sınırları içerisinde yer alan doğu bölgesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bölge, son yıllarda artan kentleşme, yeni yerleşim alanlarının gelişmesi ve geçirimsiz yüzey oranındaki artış nedeniyle yoğun yüzey akışının görülebildiği alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle kısa süreli ve yüksek şiddetli yağışlar sonrasında mevcut yağmur suyu drenaj sistemlerinin kapasitesinin zorlanması, bazı bölgelerde yüzeysel su birikmeleri ve taşkın riskinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle çalışma alanı, kentsel taşkın riskinin CBS ve hidrolik modelleme yöntemleriyle değerlendirilmesi açısından uygun bir örnek alan olarak belirlenmiştir. Çalışmada, Kayseri Büyükşehir Belediyesi ve KASKİ bünyesinde oluşturulan mekânsal altyapı verileri kullanılmıştır. Çalışma alanına ait 5 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), mevcut yağmur suyu drenaj ağı, arazi kullanım verileri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Q50, Q100 ve Q500 tekerrür sürelerine ait tasarım yağışları birlikte değerlendirilmiştir. CBS ortamında gerçekleştirilen analizlerle eğim, akış yönü ve potansiyel su birikim alanları belirlenmiş, mevcut drenaj altyapısı bu verilerle bütünleştirilerek HEC-RAS 6.6 hidrolik modelinin oluşturulmasına esas veri altyapısı hazırlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Kayseri Büyükşehir Belediyesi doğu bölgesinde kentsel taşkın riskinin değerlendirilmesi amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile HEC-RAS 6.6 hidrolik modelleme yazılımı birlikte kullanılmıştır. Çalışma kapsamında mekânsal veri hazırlama ve analiz işlemleri QGIS 3.34.2 ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setini; 5 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), KASKİ Coğrafi Bilgi Sistemi veri tabanından temin edilen mevcut yağmur suyu drenaj ağı, arazi kullanım verileri ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Q50, Q100 ve Q500 tekerrür sürelerine ait tasarım yağışları oluşturmuştur. Çalışma kapsamında tüm mekânsal veriler ortak koordinat sisteminde düzenlenmiş, geometri ve topoloji kontrolleri gerçekleştirilerek analiz sürecine uygun hâle getirilmiştir. QGIS 3.34.2 ortamında gerçekleştirilen mekânsal analizler ile çalışma alanının topoğrafik özellikleri değerlendirilmiş, eğim ve yüzey akışını etkileyen temel faktörler belirlenmiştir. Hazırlanan veri altyapısı HEC-RAS 6.6 yazılımına aktarılarak farklı tekerrür sürelerine ait yağış senaryoları için hidrolik model oluşturulmuştur. Model sonucunda elde edilen taşkın yayılımı, su derinliği ve akım karakteristiklerine ilişkin çıktılar yeniden CBS ortamına aktarılarak mevcut yağmur suyu drenaj sistemi, topoğrafya ve arazi kullanımı ile birlikte değerlendirilmiş; çalışma alanında taşkın açısından öncelikli risk oluşturabilecek bölgelerin belirlenmesine yönelik mekânsal analizler gerçekleştirilmiştir.

4. VERİ SETİ

Çalışmada kullanılan veri setini; 5 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), KASKİ Coğrafi Bilgi Sistemi veri tabanından temin edilen mevcut yağmur suyu drenaj ağı, arazi kullanım verileri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan Q50, Q100 ve Q500 tekerrür sürelerine ait tasarım yağışları oluşturmaktadır. Kullanılan veri setleri, çalışma alanının topoğrafik yapısının belirlenmesi, hidrolik modelin oluşturulması ve taşkın riskinin mekânsal olarak değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli, çalışma alanının topoğrafik özelliklerinin ortaya konulması ile eğim ve akış yönü analizlerinin gerçekleştirilmesinde temel veri kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Mevcut yağmur suyu drenaj ağı verileri hidrolik modelin oluşturulmasında kullanılırken, arazi kullanım verileri geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesi ve yüzey akışının değerlendirilmesine katkı sağlamıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan farklı tekerrür sürelerine ait tasarım yağışları ise hidrolik modelde farklı yağış senaryolarının oluşturulmasına esas teşkil etmiştir. Analiz sürecinde kullanılan tüm mekânsal veriler QGIS 3.34.2 ortamında ortak koordinat sistemine dönüştürülmüş, geometri ve topoloji kontrolleri gerçekleştirilerek analizlere uygun hâle getirilmiştir. Hazırlanan bütünleşik veri altyapısı, HEC-RAS 6.6 hidrolik modeline aktarılmış ve taşkın riskinin değerlendirilmesinde temel girdi olarak kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Kayseri Büyükşehir Belediyesi doğu bölgesinde kentsel taşkın riskinin değerlendirilmesine yönelik olarak Coğrafi Bilgi Sistemleri ve HEC-RAS 6.6 hidrolik modelleme yazılımının birlikte kullanıldığı bütünleşik bir analiz yaklaşımı sunulmuştur. Çalışmada kullanılan mekânsal veri altyapısı ile hidrolik modelleme çıktılarının birlikte değerlendirilmesi, taşkın davranışının yalnızca hidrolik açıdan değil, topoğrafik yapı, arazi kullanımı ve mevcut yağmur suyu drenaj sistemi ile ilişkili olarak ele alınmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular, CBS ve HEC-RAS entegrasyonunun kentsel taşkın riskinin belirlenmesi, taşkın açısından kritik bölgelerin tespit edilmesi ve mevcut altyapının değerlendirilmesinde etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşımın, özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle artan taşkın olaylarına karşı yerel yönetimlerin altyapı planlaması, taşkın yönetimi ve afet risk azaltma çalışmalarına bilimsel bir karar destek mekanizması sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, CBS tabanlı hidrolik modelleme çalışmalarının kentsel taşkın riskinin yönetiminde etkin bir araç olduğu ve farklı veri kaynaklarının bütünleşik olarak değerlendirilmesinin daha güvenilir analizlerin elde edilmesine katkı sağladığı görülmektedir. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda gerçek taşkın gözlemleri ve farklı hidrolik parametrelerin modele dâhil edilmesiyle analizlerin doğruluğunun artırılması ve karar verme süreçlerinin daha etkin biçimde desteklenmesi hedeflenmektedir.

BİREYSEL AĞAÇ TACI SEGMENTASYONU İÇİN SÜPERPİKSEL TABANLI ÇEKİRDEK TESPİT YAKLAŞIMI

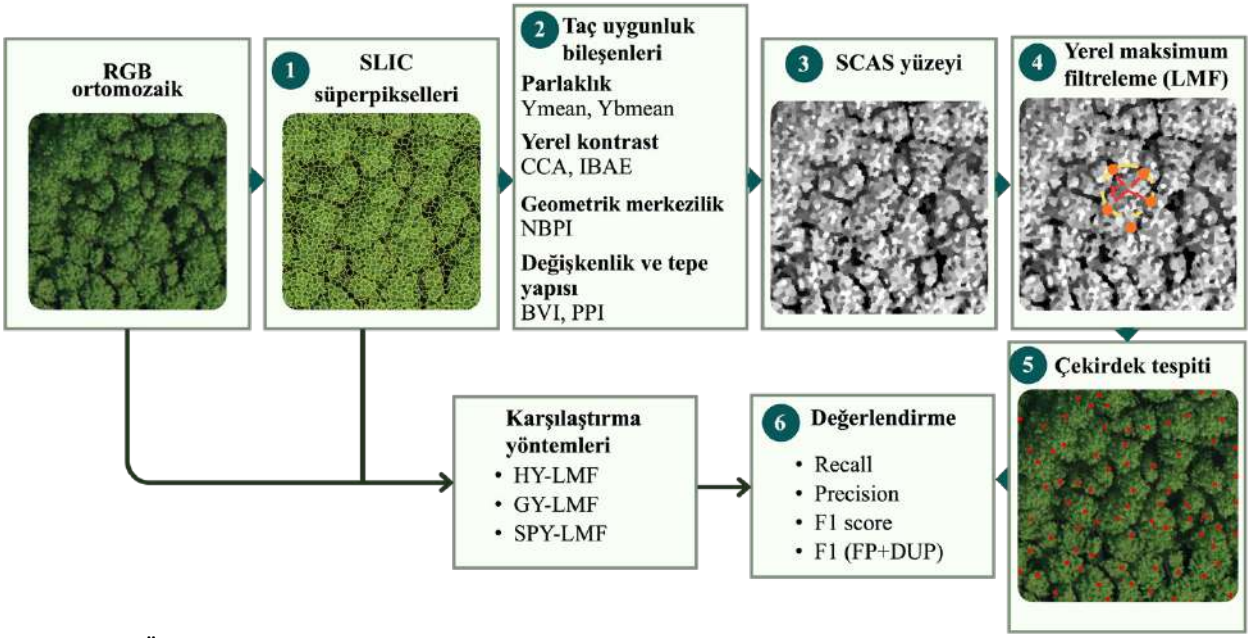
Sude Gül YEL[1], Esra TUNÇ GÖRMÜŞ[2],

[1]Öğr. Gör., Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, 08100, Seyitler, Artvin, sudegyildiz@artvin.edu.tr
[2]Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, etuncgormus@ceng.ktu.edu.tr

ÖZET

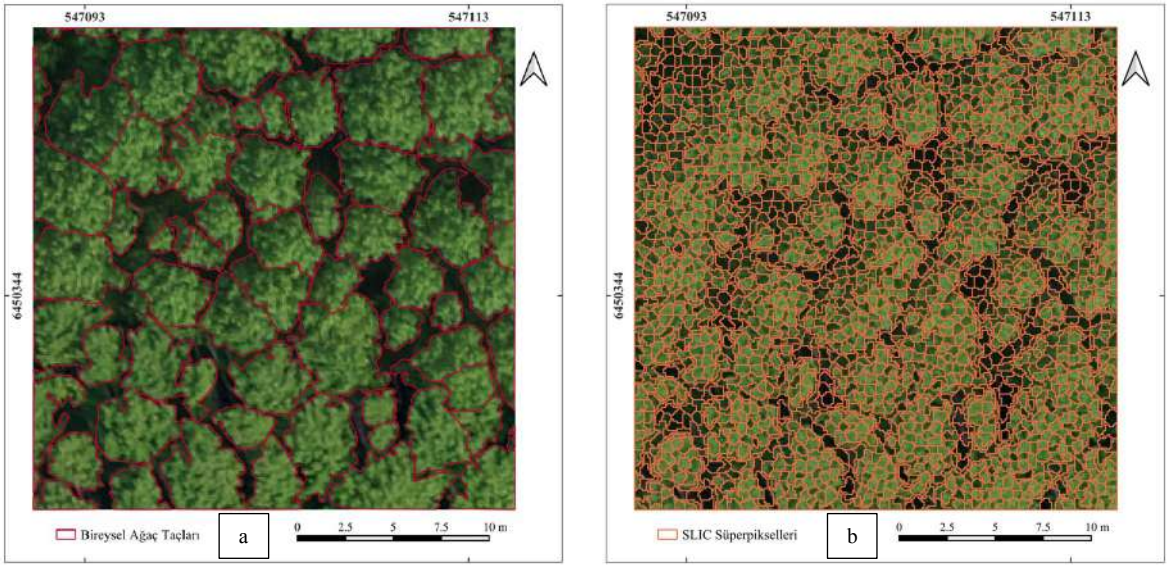
Orman ekosistemlerinin izlenmesi, planlanması ve sürdürülebilir yönetimi açısından bireysel ağaç tacı düzeyinde elde edilen bilgiler büyük önem taşımaktadır. Bu tür verilere ulaşmak için geleneksel olarak başvurulan arazi gözlemleri ve ölçümleri, geniş alanlar söz konusu olduğunda zaman alıcı, maliyetli ve operasyonel olarak sınırlayıcı olabilmektedir (Dale vd., 2001; Hycza vd., 2018; Yrttimaa vd., 2020). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen uzaktan algılama tabanlı yaklaşımlar, özellikle yüksek çözünürlüklü optik verilerin kullanımıyla birlikte, bireysel ağaç taçlarının tespitini mümkün kılmıştır (Immitzer vd., 2012; Zhao vd., 2020; Zhang vd., 2023). Bu amaçla literatürde, işaretleyici/çekirdekten yayılan bireysel ağaç tacı segmentasyonu yaklaşımları geliştirilmiştir (Wang vd., 2004; Gu vd., 2020). Yüksek konumsal çözünürlüklü optik görüntüler taçların detaylı izlenmesine olanak sağlarken dal, gölge, yaprak arası boşluk ve arka plan pikselleri gibi yerel gürültü kaynakları, çekirdekten büyüme sürecini erken sonlandırabilmekte ve tek bir tacın çok parçalı biçimde üretilmesine neden olabilmektedir. Bu sorunu azaltmak amacıyla bazı araştırmacılar pikseller yerine, piksel topluluklarından oluşan over-segment nesneleri kullanmıştır (Gu ve Congalton, 2022).

Bu çalışma kapsamında bir taç-uygunluk yüzeyi olan Superpixel-Based Crown Apex Suitability Surface (SCAS) geliştirilmiş ve bu yüzeye yerel maksimum filtreleme (LMF; Wulder vd., 2000) uygulanarak çekirdekten genişleyen segmentasyon algoritmalarında kullanılmak üzere bireysel ağaç tacı çekirdekleri tespit edilmiştir (Şekil 1). Çalışma, Perm Krayı'nda (Rusya) yer alan, yoğun ve karmaşık taç yapısına sahip Plot 1 üzerinde yürütülmüştür (Dubrovin vd., 2024). Çalışma alanı 100 × 50 m (0.5 ha) büyüklüğünde olup baskın türler titrek kavak, ıhlamur, göknar ve ladindir. Analizlerde Temmuz 2021'de elde edilen 0.10 m/piksel konumsal çözünürlüklü RGB ortomozaik kullanılmıştır (Şekil 2a; UTM Zone 40N, EPSG:32640).



Şekil 1. Önerilen SCAS-LMF yaklaşımının iş akışı: RGB ortomozaiğin SLIC süperpiksellere ayrılması, taç uygunluk bileşenlerinden SCAS yüzeyinin oluşturulması, yerel maksimum filtreleme (LMF) ile çekirdek/tepe noktalarının tespiti ve sonuçların karşılaştırma yöntemleri kullanılarak doğruluk ölçütleriyle değerlendirilmesi.

İlk olarak RGB görüntü, SLIC algoritması ile küçük, homojen ve mekânsal olarak tutarlı süperpiksel birimlerine ayrılmıştır (Achanta vd., 2012) (Şekil 2b).



Şekil 2. a) Çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü RGB görüntüsü ve manuel olarak sayısallaştırılmış bireysel ağaç tacı poligonları, b) SLIC süperpikselleri

Ardından RGB görüntü, parlaklık bilgisini renk bileşenlerinden ayırmak amacıyla YCbCr renk uzayına dönüştürülmüş; her süperpiksel için Ymean, Ybmean, CCA, IBAE, NBPI, BVI ve PPI özellikleri hesaplanmıştır. Bu özellikler sırasıyla süperpiksel parlaklığını, komşuluk parlaklık bağlamını, çevresine göre kontrast üstünlüğünü, göreli parlaklık avantajını, geometrik içselliği, yerel radyometrik değişkenliği ve süperpiksel içi parlaklık tepe yapısını temsil etmektedir. Uç değerlerin etkisini azaltmak amacıyla özellikler %2-%98 persentil aralığında 0-1 aralığına normalize edilmiştir. Normalize edilen taç-uygunluk bileşenleri, taç çekirdeği olma uygunluğundaki göreli katkılarını temsil eden sabit ağırlıklarla birleştirilerek Superpixel-Based Crown Apex Suitability Surface (SCAS) oluşturulmuştur. SCAS, yüksek değerlerin daha güçlü taç-içi çekirdek uygunluğunu ifade ettiği metrik tabanlı bir uygunluk yüzeyidir. Ymean, CCA, NBPI ve IBAE pozitif katkılı; yerel heterojenlik ile aşırı süperpiksel-içi tepe davranışını temsil eden BVI ve PPI ise cezalandırıcı bileşenler olarak kullanılmıştır. Nihai yüzey denklemi SCAS = 2.00Ymean + 2.00CCA + 1.20NBPI + 0.80IBAE - 1.00BVI - 0.80PPI şeklindedir.

Çekirdek tespiti aşamasında SCAS üzerine yerel maksimum filtreleme (LMF) uygulanarak, pencere içerisindeki en yüksek yüzey değerine sahip süperpiksel çekirdek olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşıma SCAS-LMF ismi verilmiştir. Pencere çapının etkisini değerlendirmek amacıyla 1–10 m arasında farklı pencere çapları test edilmiştir. Küçük pencere çaplarında çok sayıda yerel maksimum oluştuğu ve tek taçta birden fazla çekirdek tespit edildiği görülmüştür. Büyük pencere çaplarında ise fazladan çekirdek sayısı azalmasına rağmen çok sayıda taç çekirdeksiz kalmıştır. Bu denemeler sonucunda aralarında en uygun pencere çapının 3 m olduğu belirlenmiştir. Tek bir taç içinde birden fazla çekirdek bulunması aşırı segmentasyona ve tacın parçalı üretilmesine neden olabilirken, çekirdeksiz kalan taçlar sonraki segmentasyon aşamasında tamamen kaçırılabilmektedir.

Önerilen SCAS-LMF yaklaşımının katkısını değerlendirmek amacıyla farklı LMF tabanlı karşılaştırma yaklaşımları uygulanmıştır. İlk olarak, RGB görüntüden hesaplanan Y parlaklık yüzeyi üzerinde piksel düzeyinde klasik yerel maksimum filtreleme uygulanmıştır. Bu yöntem hem ham Y yüzeyi (HY-LMF) hem de Gaussian tekniği ile yumuşatılmış Y yüzeyi (GY-LMF) üzerinde test edilmiştir. Böylece klasik piksel tabanlı parlaklık maksimumu yaklaşımının performansı ve yumuşatma işleminin etkisi değerlendirilmiştir. İkinci olarak, süperpiksel temsilinin etkisini analiz etmek amacıyla süperpikselllerin ortalama Y değerine dayalı süperpiksel düzeyli LMF (SPY-LMF) yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yöntemde SLIC süperpikselleri sabit tutulmuş ve her süperpikselin ortalama Y parlaklığı karar yüzeyi olarak kullanılmıştır. Böylece önerilen SCAS'ın, hem ham ve yumuşatılmış piksel düzeyli Y değerine dayalı LMF'ye hem de yalnızca süperpiksel ortalama Y parlaklığına dayalı LMF'ye göre sağladığı ek katkı izlenmiştir.

SCAS-LMF, HY-LMF, GY-LMF ve SPY-LMF olarak isimlendirilmiş bu dört yöntemin doğruluk metrikleri hesaplanmıştır. Bunun için araziden toplanan ağaç gövde koordinatları ve göğüs çapı (DBH) bilgisinden faydalanarak manuel sayısallaştırılan 65 bireysel taç poligonu referans veri seti olarak kullanılmıştır. Bir manuel taç poligonu içinde en az bir çekirdek bulunması durumunda ilgili taç doğru tespit olarak kabul edilmiş ve TP olarak sayılmıştır. İçinde hiç çekirdek bulunmayan taçlar FN olarak değerlendirilmiştir. Herhangi bir manuel taç poligonunun içine düşmeyen çekirdekler FP olarak kabul edilmiştir. Aynı manuel taç içinde birden fazla çekirdek bulunması durumunda, bir çekirdek tespit için yeterli kabul edilmiş; aynı taç içindeki fazladan çekirdekler DUP olarak raporlanmıştır. Bu kapsamda Recall, Precision, F1-score, Precision(FP+DUP) ve F1(FP+DUP) metrikleri hesaplanmıştır. Precision(FP+DUP), TP/(TP+FP+DUP) formülüyle hesaplanmış; F1(FP+DUP) ise bu precision değeri ile recall kullanılarak elde edilmiştir. Bu ek metrik, taç tespit başarısının yanı sıra aynı taç içinde birden fazla çekirdek üretilmesini de cezalandırarak çekirdek seçimi kalitesini daha ayrıntılı değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Karşılaştırma sonuçları, önerilen SCAS-LMF yönteminin taç yakalama başarısı açısından en yüksek Recall ve klasik F1 değerlerine ulaştığını göstermiştir (Tablo 1). HY-LMF yaklaşımı 42 taç, GY-LMF yaklaşımı 50 taç ve SPY-LMF yaklaşımı 53 taç bulabilmişken, SCAS-LMF 59 ağaç tacını yakalamış ve 0.908 Recall değerine ulaşmıştır. Diğer yöntemler birer taç dışı çekirdek üretirken, SCAS-LMF taç dışı yanlış çekirdek üretmemiştir. Gaussian yumuşatma piksel düzeyinde belirgin katkı sağlamış, ancak yalnızca Y değerini kullanan süperpiksel temelli yaklaşıma göre daha fazla taç kaçırmıştır. SPY-LMF, F1(FP+DUP) açısından az farkla daha yüksek sonuç verse de SCAS-LMF daha fazla tacı tespit etmiş, kaçırılan taç sayısını azaltmış ve en yüksek klasik F1 değerine ulaşmıştır.

Tablo 1. Yöntemlerin doğruluk metriği sonuçları

Yöntem	TP	FN	FP	DUP	Recall	Precision	F1	F1(FP+DUP)
HY-LMF	42	23	1	10	0.646	0.977	0.778	0.712
GY-LMF	50	15	1	8	0.769	0.980	0.862	0.806
SPY-LMF	53	12	1	11	0.815	0.981	0.891	0.815
SCAS-LMF	59	6	0	23	0.908	1.000	0.952	0.803

Bu sonuçlar, SCAS'ın yalnızca ortalama parlaklık bilgisinden ibaret olmadığını; komşuluk kontrastı, geometrik içsellik, yerel radyometrik değişkenlik ve süperpiksel içi tepe yapısını temsil eden ek metriklerin taç çekirdeği tespitinde tamamlayıcı bilgi sağladığını göstermektedir. Özellikle çekirdek noktalarının sonraki region-growing veya benzeri segmentasyon yaklaşımlarını başlatmak için kullanılacağı durumlarda, kaçırılan taç sayısının azaltılması önemli bir avantajdır; çünkü çekirdeksiz kalan bir taç için segmentasyon süreci başlatılamamaktadır. Fazladan çekirdekler ise sonraki aşamalarda birleştirme veya temizleme stratejileriyle azaltılabilir. Bu nedenle SCAS-LMF, yükseklik bilgisi kullanılmadan yüksek çözünürlüklü RGB görüntülerden bireysel taç segmentasyonuna başlangıç çekirdeği üretmek için yüksek recall ve sıfır taç dışı çekirdek avantajı sunan umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Gelecek çalışmalarda, SCAS bileşenlerinin bu çalışmada sabit tutulan ağırlıklarının veri odaklı olarak optimize edilmesi, SLIC süperpiksel parametrelerinin taç ölçeğine göre ayarlanması ve LMF pencere çapının sistematik biçimde optimize edilmesiyle tekrarlı çekirdeklerin azaltılması ve dengeli F1 performansının artırılması hedeflenebilir. Ayrıca, yüksek recall avantajını koruyarak fazla çekirdekleri baskılayan birleştirme/konsolidasyon stratejilerinin geliştirilmesi ve yaklaşımın farklı tür bileşimlerine ve orman yapısal koşullarına sahip bağımsız veri setlerinde sınanması, yöntemin genellenebilirliğinin değerlendirilmesi açısından önemli bir sonraki adım olacaktır.

Anahtar Sözcükler: bireysel ağaç tacı çekirdek tespiti, süperpiksel, taç uygunluk yüzeyi, yerel maksimum filtreleme, SCAS.

ABSTRACT

SUPERPIXEL-BASED SEED DETECTION APPROACH FOR INDIVIDUAL TREE CROWN SEGMENTATION

Information obtained at the individual tree crown level is of great importance in terms of monitoring, planning, and sustainable management of forest ecosystems. Field observations and measurements, which are traditionally used to obtain such data, can be time-consuming, costly, and operationally limiting when large areas are concerned (Dale et al., 2001; Hycza et al., 2018; Yrttimaa et al., 2020). Remote sensing-based approaches developed to overcome these limitations have enabled the detection of individual tree crowns, especially with the use of high-resolution optical data (Immitzer et al., 2012; Zhao et al., 2020; Zhang et al., 2023). For this purpose, marker/seed-expanding individual tree crown segmentation approaches have been developed in the literature (Wang et al., 2004; Gu et al., 2020). While high spatial resolution optical images allow detailed monitoring of crowns, local noise sources such as branches, shadows, gaps between leaves, and background pixels can terminate the seed-growing process early and cause a single crown to be produced in a fragmented form. In order to reduce this problem, some researchers have used over-segment objects consisting of pixel groups instead of pixels (Gu & Congalton, 2022).

Within the scope of this study, a crown-suitability surface, the Superpixel-Based Crown Apex Suitability Surface (SCAS), was developed and local maximum filtering (LMF; Wulder et al., 2000) was applied to this surface to detect individual tree crown seeds for use in seed-expanding segmentation algorithms (Figure 1). The study was conducted on Plot 1 in Perm Krai, Russia, which has a dense and complex canopy structure (Dubrovin et al., 2024). The plot covers 100 × 50 m (0.5 ha), and the dominant species are aspen, linden, fir, and spruce. A 0.10 m/pixel RGB orthomosaic acquired in July 2021 was used in the analyses (Figure 2a; UTM Zone 40N, EPSG:32640). First, the RGB image was partitioned into small, homogeneous, and spatially coherent superpixel units using the SLIC algorithm (Achanta et al., 2012) (Figure 2b).

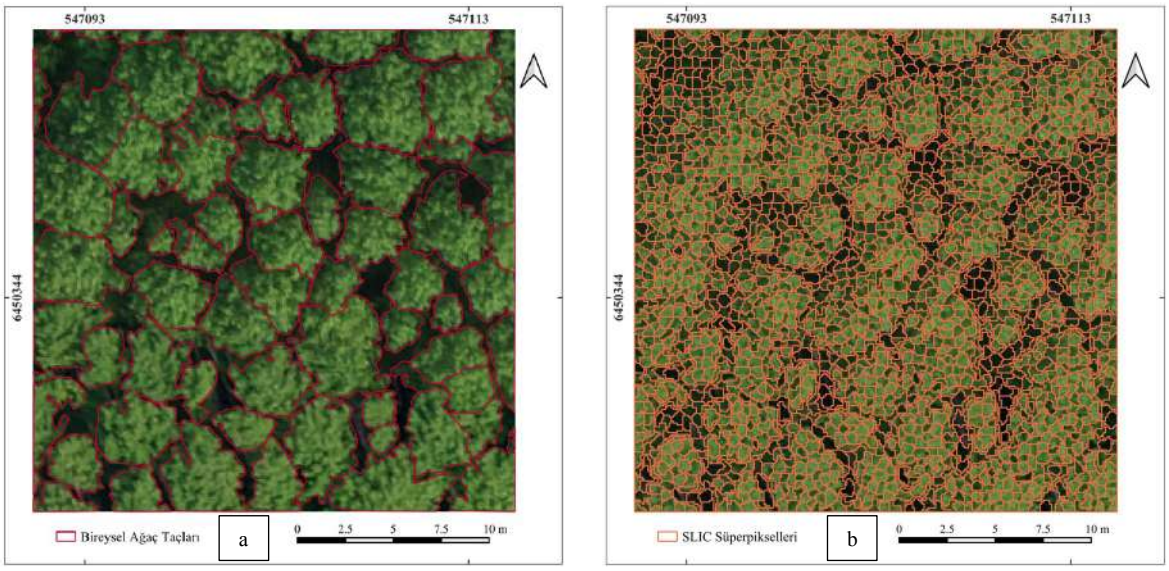


Figure 2. a) High-resolution RGB image of the study area and manually digitized individual tree crown polygons, b) SLIC superpixels.

Then, the RGB image was transformed into the YCbCr color space to separate brightness information from the color components, and Ymean, Ybmean, CCA, IBAE, NBPI, BVI, and PPI were calculated for each superpixel. These features represent superpixel brightness, neighborhood brightness context, contrast superiority relative to the surroundings, relative brightness advantage, geometric interiority, local radiometric variability, and intra-superpixel brightness peak structure, respectively. To reduce the influence of outliers, the features were normalized to the 0-1 range using the 2%-98% percentile interval. The normalized crown-suitability components were combined with fixed weights representing their relative contributions to crown-seed suitability to construct the Superpixel-Based Crown Apex Suitability Surface (SCAS). SCAS is not a physical height surface; it is a metric-based suitability surface in which higher values indicate stronger within-crown seed suitability. Ymean, CCA, NBPI, and IBAE were used as positive-contribution components, whereas BVI and PPI, representing local heterogeneity and excessive intra-superpixel peak behavior, were used as penalizing components. The final surface equation was SCAS = 2.00Ymean + 2.00CCA + 1.20NBPI + 0.80IBAE - 1.00BVI - 0.80PPI.

In the seed detection stage, local maximum filtering (LMF) was applied to the SCAS surface, and the superpixel with the highest SCAS value within each search window was selected as the seed. This approach was named SCAS-LMF. To evaluate the effect of window diameter, values between 1 and 10 m were tested. Small window diameters generated multiple seeds within the same crown, whereas large window diameters left some crowns without a seed. Considering this trade-off, 3 m was selected as the most suitable window diameter. Multiple seeds within a single crown may lead to over-segmentation and fragmented crown outputs, whereas crowns without seeds may be completely missed in the subsequent segmentation stage.

In order to evaluate the contribution of the proposed SCAS-LMF approach, different LMF-based comparison approaches were applied. First, classical local maximum filtering was applied at the pixel level on the Y brightness surface calculated from the RGB image. This method was tested both on the raw Y surface (HY-LMF) and on the Y surface smoothed with the Gaussian technique (GY-LMF). Thus, the performance of the classical pixel-based brightness maximum approach and the effect of the smoothing process were evaluated. Second, in order to analyze the effect of superpixel representation, the superpixel-level LMF (SPY-LMF) approach based on the mean Y value of superpixels was applied. In this method, SLIC superpixels were kept fixed, and the mean Y brightness of each superpixel was used as the decision surface. Thus, the additional contribution provided by the proposed SCAS compared to both LMF based on raw and smoothed pixel-level Y values and LMF based only on superpixel mean Y brightness was observed.

The accuracy metrics of the four methods, SCAS-LMF, HY-LMF, GY-LMF, and SPY-LMF, were calculated. For this purpose, 65 individual crown polygons manually digitized using tree-stem coordinates and diameter at breast height (DBH) information collected in the field were used as the reference dataset. A crown was counted as a true positive (TP) when at least one seed occurred within its reference polygon. Crowns without any seed were counted as false negatives (FN), and seeds falling outside all reference crowns were counted as false positives (FP). When more than one seed occurred within the same reference crown, one seed was accepted as sufficient for detection and the additional seeds were reported as duplicates (DUP). Recall, Precision, F1-score, Precision(FP+DUP), and F1(FP+DUP) were calculated. Precision(FP+DUP) was computed as TP/(TP+FP+DUP), and F1(FP+DUP) was then calculated using this precision value and recall. This additional metric penalizes multiple seeds within the same crown and therefore provides a more detailed assessment of seed-selection quality.

The comparison results showed that SCAS-LMF achieved the highest Recall and conventional F1 values in terms of crown detection performance (Table 1). HY-LMF detected 42 crowns, GY-LMF 50 crowns, and SPY-LMF 53 crowns, whereas SCAS-LMF detected 59 crowns and reached a Recall of 0.908. The other methods each produced one out-of-crown seed, while SCAS-LMF produced no out-of-crown false seed. Gaussian smoothing provided a clear improvement at the pixel level, but it still missed more crowns than the superpixel-based approach using only mean Y brightness. Although SPY-LMF produced a slightly higher F1(FP+DUP) value, SCAS-LMF detected more crowns, reduced the number of missed crowns, and achieved the highest conventional F1 value.

Table 1. Accuracy metric results of the methods.

Method	TP	FN	FP	DUP	Recall	Precision	F1	F1(FP+DUP)
HY-LMF	42	23	1	10	0.646	0.977	0.778	0.712
GY-LMF	50	15	1	8	0.769	0.980	0.862	0.806
SPY-LMF	53	12	1	11	0.815	0.981	0.891	0.815
SCAS-LMF	59	6	0	23	0.908	1.000	0.952	0.803

These results show that SCAS is not based on mean brightness alone; additional superpixel-based metrics representing neighborhood contrast, geometric interiority, local radiometric variability, and intra-superpixel peak structure provide complementary information for crown-seed detection. Reducing the number of missed crowns is particularly important when seed points are used to initiate subsequent region-growing or similar segmentation approaches, because the segmentation process cannot be initiated for a crown without a seed. Additional seeds, in contrast, can be reduced in subsequent stages using merging or cleaning strategies. Therefore, SCAS-LMF can be considered a promising approach for generating initial seeds for individual-crown segmentation from high-resolution RGB imagery without height information, offering high recall and zero out-of-crown seeds. Future work should focus on data-driven optimization of the currently fixed SCAS component weights, crown-scale adjustment of SLIC superpixel parameters, and systematic optimization of the LMF window diameter to reduce repeated seeds and improve balanced F1 performance. In addition, developing merging/consolidation strategies that suppress excess seeds while preserving the high-recall advantage, and testing the approach on independent datasets with different species compositions and forest structural conditions, will be important for evaluating its generalizability.

Keywords: individual tree crown seed detection, superpixel, crown suitability surface, local maximum filtering, SCAS.

KAYNAKLAR:

Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., & Süsstrunk, S. (2012). SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 34(11), 2274–2282. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.120

Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2001). Climate change and forest disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. BioScience, 51(9), 723–734. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2

Dubrovin, I., Fortin, C., & Kedrov, A. (2024). An open dataset for individual tree detection in UAV LiDAR point clouds and RGB orthophotos in dense mixed forests. Scientific Reports, 14, Article 21938. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72669-5

Gu, J., & Congalton, R. G. (2022). Individual tree crown delineation from UAS imagery based on region growing by over-segments with a competitive mechanism. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1–11. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3074289

Gu, J., Grybas, H., & Congalton, R. G. (2020). Individual tree crown delineation from UAS imagery based on region growing and growth space considerations. Remote Sensing, 12(15), Article 2363. https://doi.org/10.3390/rs12152363

Hycza, T., Stereńczak, K., & Bałazy, R. (2018). Potential use of hyperspectral data to classify forest tree species. New Zealand Journal of Forestry Science, 48, Article 18. https://doi.org/10.1186/s40490-018-0123-9

Immitzer, M., Atzberger, C., & Koukal, T. (2012). Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. Remote Sensing, 4(9), 2661–2693. https://doi.org/10.3390/rs4092661

Wang, L., Gong, P., & Biging, G. S. (2004). Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(3), 351–357. https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.351

Wulder, M., Niemann, K. O., & Goodenough, D. G. (2000). Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. Remote Sensing of Environment, 73(1), 103–114. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00101-2

Yrttimaa, T., Saarinen, N., Kankare, V., Hynynen, J., Huuskonen, S., Holopainen, M., Hyyppä, J., & Vastaranta, M. (2020). Performance of terrestrial laser scanning to characterize managed Scots pine (Pinus sylvestris L.) stands is dependent on forest structural variation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 168, 277–287. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.017

Zhang, M., Li, W., Zhao, X., Liu, H., Tao, R., & Du, Q. (2023). Morphological transformation and spatial-logical aggregation for tree species classification using hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, 1–12. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3233847

Zhao, D., Pang, Y., Liu, L., & Li, Z. (2020). Individual tree classification using airborne LiDAR and hyperspectral data in a natural mixed forest of northeast China. Forests, 11(3), Article 303. https://doi.org/10.3390/f11030303

SENTINEL-2 VERİLERİYLE MEYVE BAHÇESİ TÜRÜ SINIFLANDIRMASINDA RASTGELE ORMAN VE TABNET'İN KARŞILAŞTIRILMASI: BURSA ÖRNEĞİ

Mine Nur GÜRBULAK[1]

[1]Öğr. Gör., Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, 06790, Etimesgut, Ankara, mnmesut@thk.edu.tr

ÖZET

Doğru meyve bahçesi haritalaması, tarımsal planlama, ürün envanteri ve hassas tarım için çok önemlidir. Bununla birlikte, farklı meyve ağacı türlerinin benzer spektral özellikleri ve mevsimsel fenolojik değişimleri, meyve bahçesi türü sınıflandırmasını zorlu bir görev haline getirmektedir. Derin öğrenme son zamanlarda uzaktan algılamada makine öğrenmesine göre giderek daha fazla ilgi görmektedir. Çok zamanlı Sentinel-2 verileri kullanan makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerini değerlendiren karşılaştırmalı çalışmalar da sınırlı kalmıştır. Bu çalışma, Türkiye'nin başlıca meyve üretim bölgelerinden biri olan Bursa ilinde çok zamanlı Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak meyve bahçesi türü sınıflandırması için Rastgele Orman ve TabNet'in performansını karşılaştırmaktadır. Yüksek mekansal ve zamansal çözünürlüğü ve bitki örtüsü fenolojisini izlemek için kırmızı kenar bantlarının bulunması nedeniyle Sentinel-2 Seviye-2A Yüzey Yansıma görüntüleri seçilmiştir. Spektral bantlar, bitki örtüsü indeksleri (NDVI, SAVI, EVI, NDWI, GVI ve GDVI), zamansal fenolojik özellikler, SRTM Dijital Yükseklik Modelinden türetilen topografik değişkenler ve WorldClim veri setinden elde edilen biyoklimatik değişkenler, kapsamlı bir özellik seti oluşturmak için entegre edildi. Meyve bahçesi alanları dört kategoriye ayrıldı: armut, şeftali, ayva ve diğer meyve bahçeleri. Sağlam bir temel makine öğrenme modeli olarak Rastgele Orman seçilirken, yüksek boyutlu tablo verileri için tasarlanmış dikkat tabanlı derin öğrenme modeli olarak TabNet kullanıldı. Model performansı, beş katlı çapraz doğrulama ve doğruluk analizi sonuçları üzerinden Genel Doğruluk, Kappa, Ağırlıklı F1 ve Macro F1 ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğruluk analizi sonuçlarında Rastgele Orman 0,6943 Genel Doğruluk, 0,4946 Kappa, 0,6732 Ağırlıklı F1 ve 0,5336 Macro F1 değerlerine ulaşırken, TabNet sırasıyla 0,6487, 0,4508, 0,6509 ve 0,5325 değerlerini elde etmiştir. Beş katlı çapraz doğrulamada da Rastgele Orman daha yüksek genel performans göstermiştir. Bununla birlikte, Macro F1 değerlerinin birbirine yakın olması, iki modelin sınıflar arası ortalama performansının benzer olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Meyve bahçesi türü sınıflandırması, Sentinel-2, Rastgele Orman, TabNet, çapraz doğrulama.

ABSTRACT

COMPARISON OF RANDOM FOREST AND TABNET FOR ORCHARD TYPE CLASSIFICATION USING MULTI-TEMPORAL SENTINEL-2 IMAGERY

Accurate orchard mapping is crucial for agricultural planning, crop inventory, and precision agriculture. However, the similar spectral characteristics and seasonal phenological variations of different fruit tree types make orchard types classification a challenging task. Deep learning has recently gained increasing attention in remote sensing compared to machine learning. Comparative studies evaluating machine learning and deep learning models using multitemporal Sentinel-2 data have also been limited. This study compares the performance of Random Forest and TabNet for orchard species classification using multitemporal Sentinel-2 images in Bursa province, one of Türkiye's main fruit-producing regions. Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance images were chosen due to their high spatial and temporal resolution and the presence of red edge bands for monitoring vegetation phenology. Spectral bands, vegetation indices (NDVI, SAVI, EVI, NDWI, GVI, and GDVI), temporal phenological features, topographic variables derived from the SRTM Digital Elevation Model, and bioclimatic variables from the WorldClim dataset were integrated to create a comprehensive feature set. Orchard areas were categorized into four categories: pear, peach, quince, and other orchards. Random Forest was selected as a robust underlying machine learning model, while TabNet was used as an attention-based deep learning model designed for high-dimensional tabular data. Model performance was evaluated using five-fold cross-validation and validation analysis predictions based on Overall Accuracy, Kappa, Weighted F1, and Macro F1 metrics. In the validation analysis results, Random Forest achieved 0.6943 Overall Accuracy, 0.4946 Kappa, 0.6732 Weighted F1, and 0.5336 Macro F1, whereas TabNet achieved 0.6487, 0.4508, 0.6509, and 0.5325, respectively. Five-fold cross-validation also showed higher overall performance for Random Forest. However, the similar Macro F1 values indicate that the two models provided comparable average performance across classes.

Keywords: Orchard type classification, Sentinel-2, Random Forest, TabNet, cross-validation.

1. GİRİŞ

Meyve bahçelerinin doğru ve güncel olarak görüntülenmesi ve haritalanması; tarımsal üretimin planlanması, ürün envanterinin oluşturulması ve hassas tarım uygulamalarının desteklenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak farklı meyve türlerinin benzer spektral özellikler göstermesi ve fenolojik gelişim süreçlerinin zamansal benzerlik

içermesi, uzaktan algılama tabanlı sınıflandırma çalışmalarını güçleştirmektedir. Çok zamanlı Sentinel-2 görüntüleri, bitkilerin yıl içerisindeki fenolojik değişimlerini izleyebilmesi sayesinde meyve bahçelerinin ayırt edilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır (Chabalala, vd., 2023).

Meyve türlerinin uzaktan algılama verileri kullanılarak ayrıştırılmasına yönelik çalışmalarda, özellikle çok zamanlı Sentinel-2 verilerinin kullanımı önem kazanmıştır (Lin, vd., 2026). Farklı meyve türlerinin benzer spektral özelliklere sahip olması nedeniyle tek tarihli görüntüler sınıflandırma açısından yetersiz kalabilmekte, farklı fenolojik dönemlere ait görüntüler ise türlerin zamansal spektral davranışlarının ortaya çıkarılmasına olanak sağlamaktadır (Zhou vd., 2022; Chabalala vd., 2023a). Zhou vd. (2022), çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerini kullanarak armut, elma ve şeftali gibi farklı meyve türlerinin sınıflandırılmasını gerçekleştirmiş ve çok zamanlı verilerin tür ayrımındaki önemini ortaya koymuştur. Chabalala vd. (2023a) ise farklı fenolojik dönemlere ait Sentinel-2 verilerini kullanarak subtropikal meyve ağaçlarının ayrımı için uygun zamansal pencereyi araştırmış ve görüntüleme döneminin sınıflandırma performansı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Chabalala vd. (2023b) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise Sentinel-2 verilerinden türetilen fenolojik metrikler kullanılarak meyve ağacı dinamikleri incelenmiştir. Ayrıca meyve bahçelerinin sınıflandırılmasında NDVI, EVI ve SAVI gibi vejetasyon indekslerinin yanı sıra topografik ve biyoklimatik değişkenlerin de kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Yan vd., 2023; Xie vd., 2026).

Makine öğrenmesi yöntemleri içerisinde Rastgele Orman (RF), çok sayıda spektral ve çevresel değişken içeren uzaktan algılama problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Breiman, 2001). Bunun temel nedenleri arasında doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi, farklı ölçeklerdeki değişkenlerle çalışabilmesi ve yüksek boyutlu özellik uzaylarında güçlü bir sınıflandırma performansı sunması bulunmaktadır. Türkiye'deki güncel uzaktan algılama çalışmalarında da çok zamanlı Sentinel-2 verileri ile RF yönteminin birlikte kullanıldığı ve farklı bitki veya ağaç türlerinin başarılı biçimde ayrıştırılabildiği görülmektedir. Bu çalışmalar, özellikle farklı fenolojik dönemlerden elde edilen spektral bilgilerin sınıflandırma modellerine dahil edilmesinin tür ayrımında önemli katkı sağlayabildiğini göstermektedir.

Makine öğrenmesi yöntemleri içerisinde Rastgele Orman (RF), çok sayıda spektral ve çevresel değişken içeren uzaktan algılama problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi, farklı ölçeklerdeki değişkenlerle çalışabilmesi ve yüksek boyutlu özellik uzaylarında güçlü sınıflandırma performansı sunması bulunmaktadır (Breiman, 2001). Türkiye'deki güncel çalışmalarda da çok zamanlı Sentinel-2 verileri ile RF yönteminin birlikte kullanıldığı ve farklı bitki veya ağaç türlerinin ayrıştırılabildiği görülmektedir. Örneğin Sakarya'da fındık bahçelerinin belirlenmesine yönelik çalışmada çok zamanlı Sentinel-2 görüntüleri ve vejetasyon indeksleri kullanılmış, RF ve XGBoost karşılaştırılmış ve RF daha yüksek genel performans göstermiştir (Sengul vd., 2026).

Son yıllarda, geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine alternatif olarak tabular veri için geliştirilen derin öğrenme modelleri de uzaktan algılama ve tarım uygulamalarında değerlendirilmeye başlanmıştır. TabNet, ardışık attention mekanizması kullanarak her karar adımında ilgili özellikleri seçmek ve bu özellikler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmek üzere geliştirilmiş bir derin öğrenme mimarisidir (Arık ve Pfister, 2021). Özellikle çok sayıda spektral, fenolojik ve çevresel değişkenin birlikte kullanıldığı tabular veri yapılarında TabNet'in özellik seçimi ve temsil öğrenme yeteneği avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte, tarımsal tabular veriler üzerinde yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, derin öğrenme yöntemlerinin geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine her veri setinde üstünlük sağlamadığını göstermektedir. Richetti vd. (2023), uzaktan algılama ve meteorolojik veriler kullanılarak tarımsal verim tahmini probleminde RF, XGBoost, MLP ve TabNet'i karşılaştırmış ve modellerin performanslarının veri yapısına ve probleme bağlı olarak değiştiğini bildirmiştir.

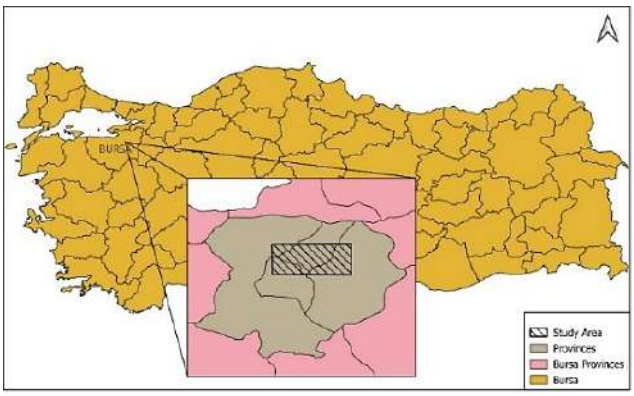
Bununla birlikte, mevcut literatürde meyve bahçelerinin genel olarak belirlenmesine yönelik çalışmaların, farklı meyve türlerinin birbirinden ayrıştırılmasına yönelik çalışmalara kıyasla daha yaygın olduğu görülmektedir. Özellikle çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen spektral ve fenolojik özelliklerin topografik ve biyoklimatik değişkenlerle birlikte kullanıldığı yüksek boyutlu tabular veri yapılarında, geleneksel makine öğrenmesi ile attention tabanlı derin öğrenme modellerinin aynı veri ve doğrulama çerçevesinde karşılaştırıldığı çalışmaların sınırlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma, Türkiye'nin önemli meyvecilik bölgelerinden biri olan Bursa'da armut, şeftali, ayva ve diğer meyve bahçelerinin sınıflandırılmasını; çok zamanlı Sentinel-2 verilerinden türetilen spektral ve fenolojik özellikler ile SRTM ve WorldClim kaynaklı çevresel değişkenleri birlikte kullanarak ele almaktadır. Çalışmanın temel katkısı, farklı veri kaynaklarından oluşturulan yüksek boyutlu tabular özellik uzayında Rastgele Orman ve TabNet modellerinin aynı örneklem ve beş katlı çapraz doğrulama çerçevesinde karşılaştırılması ve bu iki farklı model yaklaşımının meyve türü ayrımındaki performanslarının değerlendirilmesidir.

Son yıllarda derin öğrenme tabanlı modeller uzaktan algılama çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olsa da, çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen yüksek boyutlu öznitelikler üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımlarının performanslarını karşılaştıran çalışmalar da yapılmaktadır. Sakarya'daki fındık bahçelerinin haritalanmasına yönelik güncel bir çalışmada çok zamanlı Sentinel-2 görüntüleri, vejetasyon indeksleri, Rastgele Orman ve XGBoost birlikte değerlendirilmiş ve RF daha yüksek genel performans göstermiştir (Sengul vd., 2026). Ayrıca meyve ağaçlarının sınıflandırılmasında piksel tabanlı ve nesne tabanlı yaklaşımların karşılaştırıldığı

çalışmalar da bulunmaktadır (Zhou vd., 2022). Bununla birlikte, Türkiye'de özellikle Bursa ili ve ilçelerinde farklı meyve bahçesi türlerinin çok zamanlı Sentinel-2 verileri kullanılarak sınıflandırılması ve farklı makine öğrenmesi/derin öğrenme modellerinin aynı doğrulama çerçevesinde karşılaştırılması konusunda çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen spektral, fenolojik, topografik ve biyoklimatik öznitelikler kullanılarak meyve bahçesi türlerinin sınıflandırılmasında Rastgele Orman ve TabNet yöntemlerinin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

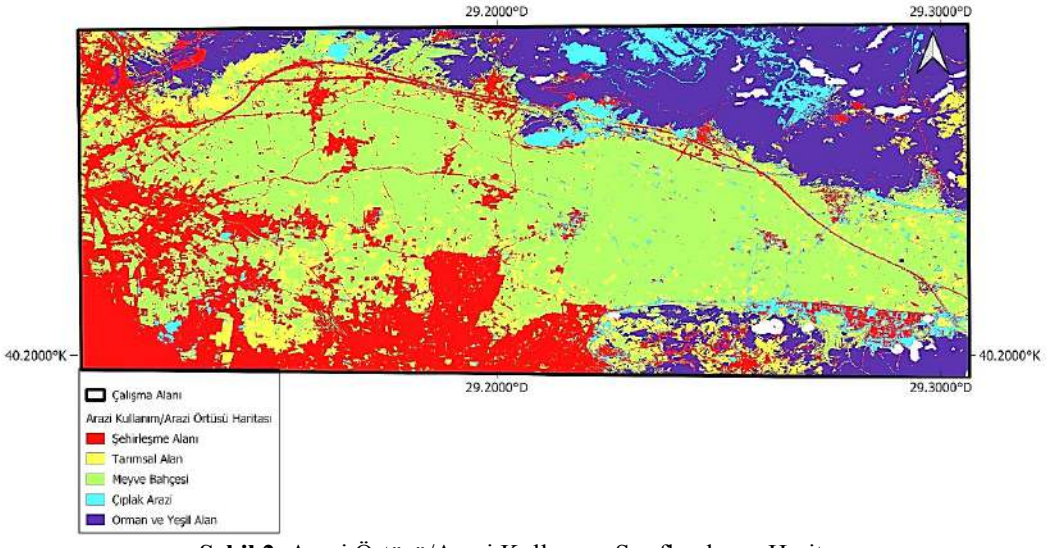
Çalışma alanı olarak Türkiye'nin önemli meyvecilik merkezlerinden biri olan Bursa ili seçilmiştir. Bursa; armut, şeftali ve ayva başta olmak üzere ekonomik değeri yüksek meyve türlerinin yoğun olarak yetiştirildiği, farklı topografik ve iklimsel özelliklere sahip geniş bahçe alanlarını barındırması nedeniyle uzaktan algılama tabanlı meyve bahçesi türü sınıflandırmaları için uygun bir çalışma alanı konumundadır.



Şekil 1. Çalışma Alanı

Çalışma Google Colab platformu kullanılarak yapılmıştır. Google Colab (Colaboratory), tarayıcı üzerinden Python kodu yazıp çalıştırmayı sağlayan bulut tabanlı bir platformdur. Kullanıcılar herhangi bir kurulum yapmadan GPU desteğine ücretsiz erişebilir, projelerini kolayca paylaşabilirler. Öğrencilerden veri bilimcilere ve yapay zeka araştırmacılarına kadar geniş bir kitle için pratik ve erişilebilir bir çalışma ortamı sunar. Google Drive'a ve Google Earth Engine'e ulaşabilmesi de çeşitli uzaktan algılama çalışmalarında kolaylık sağlamaktadır. (Colab, 2026)

Çalışmada 2025 yılına ait Nisan, Haziran, Ağustos ve Kasım aylarının çok zamanlı Sentinel-2 Level-2A Yüzey Yansıma görüntüleri kullanılmıştır (Drusch vd., 2012). Veriler Google Earth Engine'deki COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED koleksiyonundan alınmıştır. Sentinel-2 görüntüleri; mekânsal ve zamansal çözünürlükleri ve kırmızı-kenar bantlarını içermeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Meyve bahçelerinin belirlenmesi için öncelikle çalışma alanının arazi kullanımı/arazi örtüsü (LULC) haritası Rastgele Orman yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sınıflandırmada şehirleşmiş alan, tarımsal alan, su/sulak alan, meyve bahçeleri, çıplak arazi ve orman/yeşil alan olmak üzere altı sınıf için örnek poligonlar kullanılmıştır. LULC eğitim ve test poligonları %70 ve %30 oranında ayrılmıştır. Oluşturulan LULC haritası, CORINE 2018 verisiyle 100 m ortak çözünürlükte karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Arazi Örtüsü/Arazi Kullanımı Sınıflandırma Haritası

Meyve bahçesi türü sınıflandırmasında eğitim ve test verileri için Bursa'nın Gürsu ilçesinde yer alan meyve bahçelerinde yapılan arazi çalışmalarında 352 örnek meyve bahçesi Casper Via H10 Pen tabletine yüklenen QField programı üzerinden işaretlenmiştir.

QField, kurumsal ortamlarda jeo-uzamsal veri toplama ve yönetimini verimli hale getiren profesyonel bir arazi çalışması uygulamasıdır. Kullanıcı dostu arayüzü ve güçlü entegrasyon özellikleri sayesinde saha verilerinin hızlı, doğru ve güvenilir biçimde toplanmasını sağlar. Bu yönüyle, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı projelerde etkin bir saha çözümü sunar. (QField, 2026)

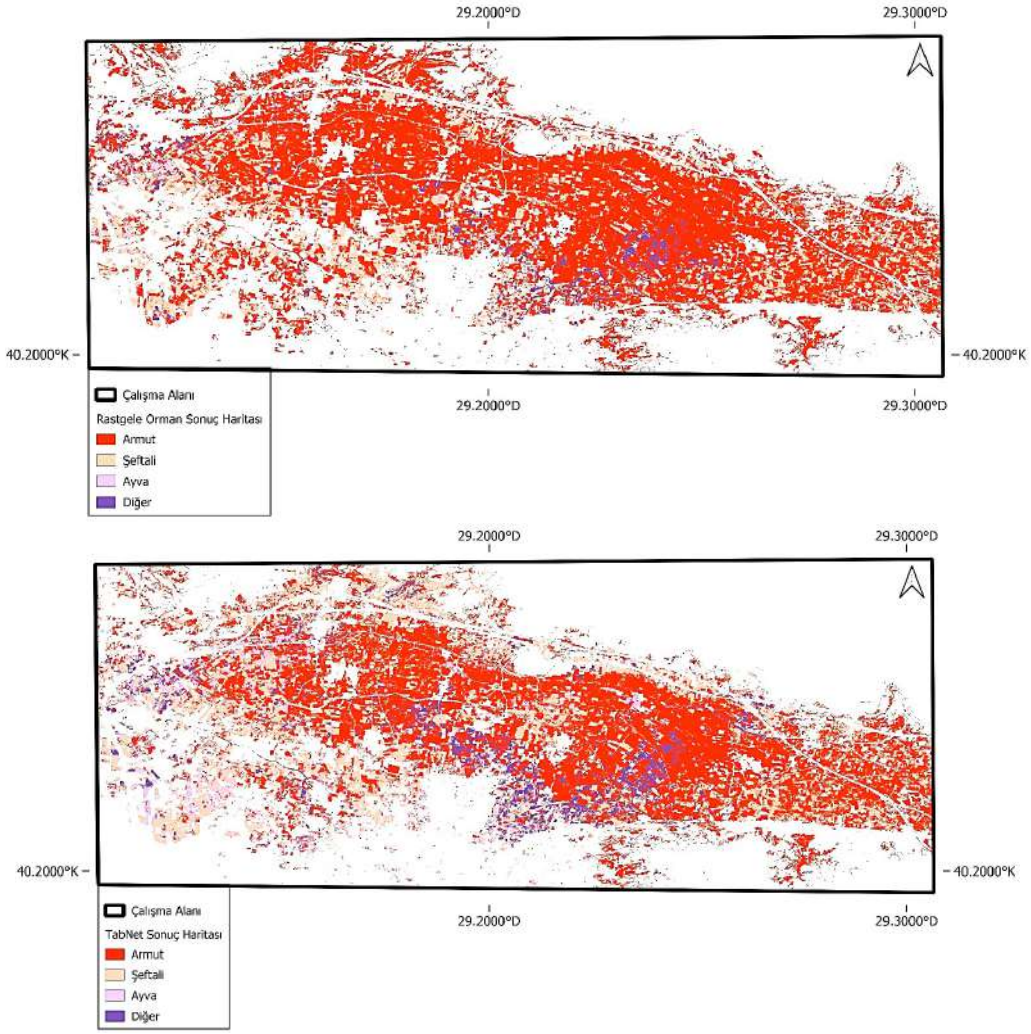
Meyve bahçesi sınıflandırması için oluşturulan yer gerçekliği verileri kullanılmıştır. Bursa'nın Gürsu ilçesindeki arazi çalışmalarında 352 örnek meyve bahçesi QField kullanılarak işaretlenmiştir. Bu örnekler saha/parsel kimlikleri korunarak beş katlı çapraz doğrulama kapsamında değerlendirilmiş; böylece aynı meyve bahçesine ait piksellerin farklı katlara dağılması engellenmiştir. Sınıflandırmada SRTM Sayısal Yükseklik Modelinden yükseklik, eğim, bakı ve eğrilik değişkenleri ile WorldClim biyoklimatik verileri kullanılmıştır (Fick ve Hijmans, 2017). Ayrıca görüntülerden NDVI, SAVI, EVI, GVI, GDVI ve NDWI spektral indeksleri hesaplanmış; zamansal ortalama, standart sapma, değişim aralığı ve mevsimsel farklardan oluşan fenolojik özellikler türetilmiştir. Böylece spektral, fenolojik, topografik ve iklimsel bilgileri birlikte temsil eden 105 özellikten oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur. Sınıflandırma için Rastgele Orman ve TabNet yöntemleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Meyve bahçesi türü sınıflandırması için kullanılan vejetasyon indeksleri

Spektral İndeks	Açıklama	Formül	
NDVI	*Normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi, genel bitki canlılığı ve yeşilliği görüntülemesi sağlar. (Rouse, 1974)*	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	(1)
SAVI	*Toprak ayarlı bitki örtüsü indeksi, toprak arka plan etkisini azaltır. (Huete A. R., 1988)*	$1{,}5\ \frac{(NIR - Red)}{NIR + Red + 0{,}5}$	(2)
EVI	*Geliştirilmiş bitki örtüsü indeksi, yoğun bitki örtüsünde doygunluk ve atmosfer/toprak etkilerini azaltmaya yöneliktir. (Huete A. D., 2002)*	$2{,}5\ \frac{NIR - Red}{NIR + 6\ \ Red - 7{,}5\ \ Blue + 1}$	(3)
GVI/GRVI	*Yeşil bitki örtüsü/Yeşillik indeksi*	$\frac{NIR}{Red}$	(4)
GDVI	*Yeşil fark bitki örtüsü indeksi, Yakın kızılötesi ile yeşil bant arasındaki farkı kullanır. (Sripada, 2006)*	$NIR - Green$	(5)
NDWI	*Normalize edilmiş fark su indeksi, su/bitki içeriği görüntülemeye yöneliktir. (Gao, 1996)*	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	(6)

Oluşturulan özellik kümesi kullanılarak meyve bahçeleri armut, şeftali, ayva ve diğer meyve bahçeleri olmak üzere dört ana sınıfta sınıflandırılmıştır. Rastgele Orman algoritması, güçlü bir geleneksel makine öğrenmesi yöntemi olması nedeniyle temel karşılaştırma modeli olarak seçilmiştir. TabNet modeli ise dikkat mekanizması sayesinde yüksek boyutlu tabular verilerde özellik seçimi ve doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesini sağlayan derin öğrenme yaklaşımını temsil etmek amacıyla kullanılmıştır (Arık ve Pfister, 2021; Richetti vd., 2023).

Modellerin performansları Genel Doğruluk (OA), Kappa katsayısı, Precision, Recall, Ağırlıklı F1 ve Macro F1 ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 3. Meyve Bahçesi Türü Sınıflandırma Sonuç Haritaları **a.** Rastgele Orman metodu (üstte), **b.** TabNet metodu sonucu (altta)

3. BULGULAR

Her iki yöntemin karışıklık matrisleri ve pooled out-of-fold tahminlerine dayalı doğruluk istatistikleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Doğruluk analizi sonuçlarına göre Rastgele Orman 0,6943 OA ile TabNet'in 0,6487 OA değerinin üzerinde performans göstermiştir.

Tablo 2. Rastgele Orman ve TabNet metodlarının doğruluk analizi sonuçları

Model	OA	Kappa	Precision	Recall	F1-Score
Rastgele Orman	0.6943	0.4946	0.6675	0.6943	0.6732
TabNet	0.6487	0.4508	0.6542	0.6487	0.6509

Karışıklık matrisinde Rastgele Orman metodu meyve bahçesi türü sınıflandırmasında Armut ve Şeftali sınıflarında daha fazla doğruluğa ulaştığı, ancak Ayva ve Diğer tür sınıflarında TabNet metodunun daha doğru sınıflandırma yaptığı görülmektedir.

Tablo 3. Rastgele Orman metodunun karışıklık matrisi

	Armut	Şeftali	Ayva	Diğer
Armut	**6919**	702	35	384
Şeftali	1211	**4061**	62	336
Ayva	479	157	**367**	91
Diğer	802	771	86	**271**

Tablo 4. TabNet metodunun karışıklık matrisi

	Armut	**Şeftali**	**Ayva**	**Diğer**
Armut	**5956**	1077	258	749
Şeftali	947	**3912**	141	670
Ayva	294	181	**434**	185
Diğer	544	736	97	**553**

Rastgele Orman ve TabNet modellerinin pooled out-of-fold sonuçları karşılaştırıldığında, Rastgele Orman genel doğruluk, Kappa ve Ağırlıklı F1 bakımından TabNet'ten daha yüksek performans göstermiştir. Rastgele Orman için OA 0,6943, Kappa 0,4946 ve Ağırlıklı F1 0,6732 iken, TabNet için bu değerler sırasıyla 0,6487, 0,4508 ve 0,6509'dur. Beş katlı çapraz doğrulamada da aynı eğilim görülmüş; Rastgele Orman için OA 0,6941, Kappa 0,4939 ve Ağırlıklı F1 0,6711 olarak hesaplanmıştır. TabNet'in beş katlı çapraz doğrulama ortalamaları ise OA 0,6484, Kappa 0,4507 ve Ağırlıklı F1 0,6487 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, genel sınıflandırma performansı açısından Rastgele Orman'ın daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, sınıflar arasındaki ortalama performansı değerlendiren Macro F1 değerleri iki model arasında oldukça yakın bulunmuştur. Doğruluk analizi değerlendirmesinde Rastgele Orman için Macro F1 0,5336, TabNet için 0,5325 olarak hesaplanmıştır. Beş katlı çapraz doğrulamada ise bu değerler sırasıyla 0,5251 ve 0,526 olarak elde edilmiştir. TabNet'in Macro F1 değeri Rastgele Orman'dan yalnızca 0,0011 daha düşük, beş katlı çapraz doğrulama ortalaması ise 0,0014 daha yüksektir. Bu farkların çok küçük olması, iki modelin sınıflar arası ortalama performans bakımından pratik olarak benzer olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, TabNet'in beş katlı çapraz doğrulamadaki Macro F1 standart sapmasının daha düşük olması (0,0398'e karşı 0,0723), katlar arasındaki performans değişkenliğinin daha düşük olduğuna işaret etmektedir.

Rastgele Orman modelinin özellik önemleri incelendiğinde, 105 özellik arasında özellikle bazı Sentinel-2 spektral değişkenleri, bitki indeksleri ve biyoklimatik değişkenlerin üst sıralarda yer aldığı görülmüştür. Tablo 4'te verilen en önemli 10 özellik içerisinde Kasım ayı GDVI, bio16, bio13, bio19, bio12, Nisan B11, bio04, Haziran B8, Ağustos F1 ve bio06 değişkenleri bulunmaktadır. Bu dağılım, meyve bahçesi türlerinin ayrımında farklı dönemlerden gelen spektral ve çevresel bilgilerin birlikte değerlendirilebileceğini göstermektedir.

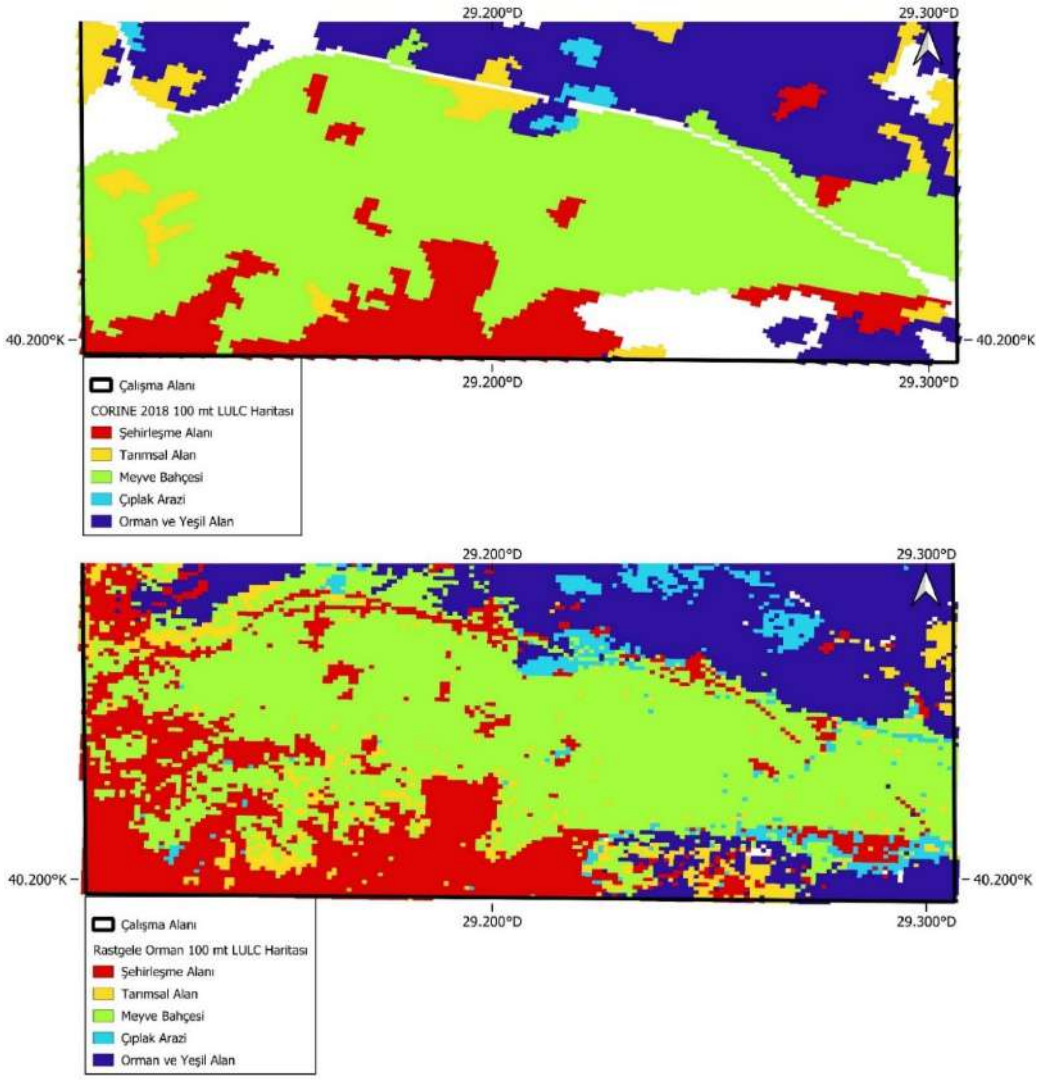
Tablo 5. Rastgele Orman metoduna göre meyve bahçesi türü sınıflandırmasında önemli 10 özellik

Özellik	**Önem**	**Özellik Tanımı**	**Özellik Kaynağı**
Nov_GDVI	0.020892	Kasım ayındaki GDVI değeri	2025 Kasım ayı Sentinel-2 Seviye-2A görüntüleri
bio16	0.019686	En yağışlı çeyrekteki toplam yağış	WorldClimate
bio13	0.019358	En yağışlı aydaki toplam yağış	WorldClimate
bio19	0.019205	En soğuk çeyrekteki toplam yağış	WorldClimate
bio12	0.018915	Yıllık toplam yağış	WorldClimate
Apr_B11	0.018712	Nisan ayındaki SWIR-1 bandı yansıma değeri	2025 Nisan ayı Sentinel-2 Seviye-2A görüntüleri
bio04	0.018598	Mevsimsel sıcaklık	WorldClimate
Jun_B8	0.018403	Haziran ayındaki NIR bandı yansıma değeri	2025 Haziran ayı Sentinel-2 Seviye-2A görüntüleri
F1_AugB3_B4	0.018355	Ağustos ayındaki Yeşil bandın kırmızı banda spectral oranı	2025 Ağustos ayı Sentinel-2 Seviye-2A görüntüleri
bio06	0.017811	En soğuk ayın minimum sıcaklığı	WorldClimate

Elde edilen sonuçlar, TabNet'in bu veri setinde Rastgele Orman'a göre genel sınıflandırma performansı açısından üstünlük sağlamadığını göstermektedir. Bu durum, derin öğrenme tabanlı modellerin tabular veriler üzerinde geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine her durumda üstünlük sağlamadığını bildiren önceki çalışmalarla uyumludur. Richetti vd. (2023), tarımsal tabular veri üzerinde RF, XGBoost, MLP ve TabNet'i karşılaştırmış ve modellerin performanslarının veri setinin özelliklerine ve probleme bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan 105 özellik; ham spektral bantların yanı sıra NDVI, SAVI, EVI, NDWI, GVI ve GDVI gibi türetilmiş bitki indeksleri, zamansal istatistikler ve mevsimsel farklar ile topografik ve biyoklimatik değişkenlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla veri setinde önemli miktarda önceden mühendislik yapılmış bilgi bulunmaktadır. Rastgele Orman'ın bu yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan ilişkiler içeren tabular veri yapısını doğrudan işleyebilmesi, modelin genel performans açısından TabNet'e göre avantaj sağlamış olabilecek nedenlerden biri olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, TabNet'in F1 değerinin Rastgele Orman ile yakın olması, özellikle sınıflar arası ortalama performans açısından rekabetçi olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, model seçiminin yalnızca genel doğruluk üzerinden yapılmaması ve sınıf bazlı performans ölçütlerinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Rastgele Orman modelinin özellik önemleri incelendiğinde, farklı dönemlere ait spektral ve bitki indeksi değişkenlerinin yanı sıra biyoklimatik değişkenlerin de yüksek önem sıralarında yer aldığı görülmüştür. Özellikle Kasım dönemine ait GDVI ve B4 bantları ile Bio04, Bio12, Bio16 ve Bio19 gibi biyoklimatik değişkenlerin üst sıralarda bulunması, meyve türlerinin ayrımında yalnızca tek bir görüntü tarihinin veya tek bir özellik grubunun yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, çok zamanlı spektral bilgilerin çevresel değişkenlerle birlikte değerlendirilmesinin meyve türlerinin ayrıştırılmasında potansiyel katkısını desteklemektedir.

Son olarak, Rastgele Orman ile oluşturulan çalışma alanı LULC haritasının CORINE 2018 ile bağımsız bir dış referans veri seti olarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için 10 m çözünürlüklü LULC haritası, piksellerin majority/mode yaklaşımıyla 100 m'ye dönüştürülmüş ve CORINE 2018'in 100 m referans gridine uyumlandırılmıştır. Geçerli referans sınıfları üzerinden yapılan örneklem değerlendirmesinde Genel Doğruluk 0,7286, Kappa 0,6326 ve Ağırlıklı F1 0,7243 olarak hesaplanmıştır. CORINE 2018 ve Rastgele Orman sonucu oluşturulan 100 m LULC haritaları Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. 100 mt Çözünürlüklü Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü Haritaları a. CORINE 2018 (üstte), b. Rastgele Orman metodu sonucu (altta)

Genel Doğruluk 0,7286, Kappa 0,6326 ve Ağırlıklı F1 0,7243 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, CORINE 2018'in 2018 yılına ait olması ve çalışma haritasının 2025 yılına ait olması nedeniyle iki veri seti arasındaki farklılıkların bir bölümü gerçek arazi örtüsü/kullanım değişimlerinden kaynaklanabilir. Ayrıca 10 m verinin 100 m'ye majority/mode yöntemiyle dönüştürülmesi, daha küçük ölçekli sınıf örüntülerinin kaybolmasına neden olabilir. Bu nedenle CORINE karşılaştırması, mutlak bir güncel yer gerçeği doğrulamasından ziyade bağımsız bir dış referans ile sınıflandırma tutarlılığının değerlendirilmesi olarak yorumlanmalıdır.

4. SONUÇ

Bu çalışma, çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerinden elde edilen spektral ve fenolojik özelliklerin SRTM ve WorldClim kaynaklı çevresel değişkenlerle birlikte kullanılmasının Bursa'daki meyve bahçesi türlerinin

sınıflandırılmasında uygulanabilir bir yaklaşım sunduğunu göstermiştir. Beş katlı çapraz doğrulama sonuçlarına göre Rastgele Orman, OA (0,6941), Kappa (0,4939 ± 0,0982) ve Ağırlıklı F1 (0,6711) bakımından TabNet'ten daha yüksek genel sınıflandırma performansı göstermiştir. Doğruluk analizi sonuçları sonuçları da aynı eğilimi doğrulamış; Rastgele Orman için OA 0,6943, Kappa 0,4946 ve Ağırlıklı F1 0,6732, TabNet için ise sırasıyla 0,6487, 0,4508 ve 0,6509 bulunmuştur. Buna karşılık, Macro F1 değerleri iki model arasında çok yakın olup doğruluk analizi değerlendirmesinde Rastgele Orman ve TabNet için sırasıyla 0,5336 ve 0,5325, beş katlı çapraz doğrulamada ise 0,5251 ve 0,5265 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, TabNet'in genel performans bakımından Rastgele Orman'a üstünlük sağlamadığını, ancak sınıflar arası ortalama performans açısından rekabetçi olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, çok zamanlı ve yüksek boyutlu tabular uzaktan algılama verilerinde model performansının kullanılan veri yapısına ve algoritmanın özelliklerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonuçlarının Bursa ve benzer meyvecilik bölgelerinde meyve bahçesi envanterlerinin oluşturulmasına ve uzaktan algılama tabanlı tarımsal izleme çalışmalarına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Arık, S. Ö., & Pfister, T. (2021). TabNet: Attentive Interpretable Tabular Learning. *The Thirty Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence* (s. 6679-6687). Association for the Advancement of Artificial Intelligence.

Bhosle, S. S., & Deshmukh, P. D. (2025). Evaluating NDVI, GNDVI, EVI and SAVI for Accurate Crop Classification: A Case Study in Mahalaxmi Kheda Village. *International Journal on Science and Technology*, s. 1-12.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, s. 1-28.

Chabalala, Y., Adam, E., & Ali, K. A. (2023). Identifying the optimal phenological period for discriminating subtropical fruit tree crops using multi-temporal Sentinel-2 data and Google Earth Engine. *South African Journal of Geomatics*, s. 262-283.

Chabalala, Y., Adam, E., & Kganyago, M. (2023). Mapping fruit tree dynamics using phenological metrics from optimal Sentinel-2 data and Deep Neural Network. *CABI Agriculture and Bioscience*, s. 1-20.

Colab. (2026, Eylül 1). Colab Research Google: https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb#scrollTo=5fCEDCU_qrC0 adresinden alındı

CORINE Land Cover 2018. (2025, Eylül 1). Land Copernicus EU: https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018 adresinden alındı

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., . . . Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *REmote Sensing of Environment*, s. 25-36.

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, s. 4302-4315.

Gao, B.-C. (1996). NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing Environment*, s. 1-10.

Huete, A. D. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, s. 195-213.

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, s. 295-309.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, s. 195-213.

Kushwaha, A., & Kudale, G. (2026). A Comparative Study of Machine Learning Algorithms for Tabular Data Classification. *International Journal of Engineering Research & Technology*, s. 1-5.

Lin, L., Fei, X., Wang, Z., Gao, Y., Xing, W., & Yan, H. (2026). Peach Orchard Identification Using Multi-Temporal Sentinel-2 NIR-SWIR Features: A Case Study of Ganyu District, Lianyungang, China. *Forests*, s. 1-32.

Nitu, A., Florea, C., Ivanovici, M., & Racoviteanu, A. (2025). NDVI and Beyond: Vegetaion Indices as Feature for Crop Recognition and Segmentation in Hyperspectral Data. *Sensors*, s. 1-26.

QField. (2026, Eylül 1). QField for QGIS: https://qfield.org/#highlights adresinden alındı

Richetti, J., Diakogianis, F. I., Bender, A., Colaço, A. F., & Lawes, R. A. (2023). A methods guideline for deep learning for tabular data in agriculture with a case study to forecast cereal yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, s. 1-12.

Rouse, J. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (s. 309-317). Washington, D.C.: NASA.

Sengul, G. S., Tumer, I. N., Sertel, E., & Ustaoglu, B. (2025). Detection of Hazelnut Orchards with Sentinel-2 imagery and machine learning classification algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-4/W18-2025* (s. 301-305). Çanakkale: ISPRS Archives.

Sripada, R. P. (2006). Attempt to validate a remote sensing-based late-season corn nitrogen requirement prediction system. *Crop Management*, s. 1-10.

Xiao, P., Qian, J., Yu, Q., Lin, X., Xu, J., & Liu, Y. (2025). Identify Tea Plantations Using Multidimensional Features Based on Multisource Remote Sensing Data: A Case Study of the Northwest Mountainous Area of Hubei Province. *Remote Sensing*, s. 1-21.

Xie, W., Song, Y., Cui, X., Yan, X., & Song, S. (2026). High-resolution distribution map of apple orchards in China based on multisource data. *Scientific Data*, s. 1-16.

Yan, Y., Tang, X., Zhu, X., & Yu, X. (2023). Optimal Time Phase Identification for Apple Orchard Land Recognition and Spatial Analysis Using Multitemporal Sentinel-2 Images and Random Forest Classification. *Sustainability*, s. 1-19.

Zhou, X.-X., Li, Y.-Y., Luo, Y.-K., Sun, Y.-W., Su, Y.-J., Tan, C.-W., & Liu, Y.-J. (2022). Research on remote sensing classification of fruit trees based on Sentinel-2 multi-temporal imageries. *Scientific Reports*, s. 1-14.

GAZİANTEP KÜLTÜREL VE GASTRONOMİ ODAKLI İKİ GÜNLÜK TURİZM ROTALARININ CBS TABANLI OPTİMİZASYONU

Semih Sami AKAY[1]

[1]Doç. Dr., İstanbul Topkapı Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 34020, Kazlıçeşme, İstanbul, semihsamiakay@topkapi.edu.tr

ÖZET

Çalışma, gastronomi ve kültürel miras açısından dünya çapında bir merkez olan Gaziantep ilinde ziyaretçi deneyimini optimize etmek amacıyla hazırlanan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı rota planlama modelini sunmaktadır. Araştırmanın temel amacı, havalimanı varışlı turistler için zaman ve mesafe verimliliğini maksimize eden iki günlük tematik turizm rotaları geliştirmektir. Gaziantep şehrine özgü belirlenmiş kahvaltı yerleri sonrasında kültürel miras, müze, arkeolojik alanlar ve hayvanat bahçesi lokasyonları ile yol ağı verileri üzerinde yazılımının ağ analizleri gerçekleştirilerek turizm rota senaryoları oluşturulmuştur. Analiz sürecinde turistlerin en çok etkileşimde bulunduğu 40 turistik lokasyon değerlendirmeye alınmıştır.

Hafta sonu odaklı ziyaretçiler için kurgulanan 10 farklı senaryo kapsamında toplam 14 alternatif rota planı üretilmiştir. Analiz bulguları, en verimli (en kısa ve hızlı) iki günlük planın 73,94 km mesafe ve 129,60 dakikalık bir seyahat süresi ile şehir merkezi odaklı rota senaryosunu göstermiştir. Buna karşın, şehir merkezinden uzak mesafedeki arkeolojik alanları da kapsayan en uzun rota planı 368,38 km uzunluk ve 276,60 dakikalık süre ile hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda; başlangıç noktasındaki kahvaltı yeri seçiminin seyahat süresini 7 dakikaya kadar iyileştirebildiği ve arkeolojik alan ziyaretlerinde kuzeyden başlayarak güneye doğru ilerleyen rota güzergâhının 30 km daha kısa olduğu saptanmıştır. Elde edilen veriler, CBS tabanlı ağ analizlerinin sürdürülebilir destinasyon yönetimi ve akıllı turizm ekosistemleri inşa etmedeki stratejik önemini kanıtlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Gaziantep, Turizm Rotası, CBS, Ağ Analizi

ABSTRACT

GIS-BASED OPTIMIZATION OF TWO-DAY CULTURAL AND GASTRONOMY-ORIENTED TOURISM ROUTES IN GAZIANTEP

This study presents a Geographic Information Systems (GIS)-based route planning model designed to optimize visitor experiences in Gaziantep, a globally recognized center for gastronomy and cultural heritage. The primary objective of the research is to develop two-day thematic tourism itineraries that maximize time and distance efficiency for tourists arriving at the airport. By integrating designated local breakfast spots unique to Gaziantep with cultural heritage sites, museums, archaeological areas, and zoo locations, various tourism route scenarios were generated through network analyses performed on road network data. During the analytical process, 40 of the most frequently visited tourist locations were evaluated.

A total of 14 alternative route plans were produced within the framework of 10 different scenarios specifically designed for weekend travelers. Analysis findings indicated that the most efficient (shortest and fastest) two-day plan covers 73,94 km with a travel time of 129,60 minutes, focusing primarily on city center-oriented route scenarios. Conversely, the longest route plan, which incorporates distant archaeological sites, was calculated to be 368,38 km in length with a duration of 276,60 minutes. The results of the study determined that the initial selection of a breakfast venue can improve total travel time by up to 7 minutes. Furthermore, for archaeological site visits, a route starting from the north and proceeding southward was found to be approximately 30 km shorter than alternative directions. The obtained data prove the strategic importance of GIS-based network analysis in fostering sustainable destination management and constructing smart tourism ecosystems.

Keywords: Gaziantep, Tourism Route, GIS, Network Analysis

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojik yenilikler, ziyaretçi deneyimini artırarak destinasyon yönetiminde önemli dönüşümler sağlamıştır (Shen vd., 2020). Bu süreçte Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS); mekânsal planlama, rota optimizasyonu ve sürdürülebilir turizm gelişimi için güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Singh, 2015). CBS tabanlı yaklaşımlar, karmaşık verileri entegre ederek ziyaretçi tercihlerine göre uyarlanmış, tematik olarak tutarlı ve verimli rotalar oluşturulmasına imkân tanır. Bu optimizasyonlar sadece zaman yönetimini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri azaltarak yerel halkın yaşam kalitesine de katkı sağlar (Albu, 2005; Pitakaso vd., 2024).

Ağ analizi, duraklı seyahat planlarının optimizasyonu ve erişilebilirlik değerlendirmeleri için kritik bir yöntemdir (Qin vd., 2023). CBS araçları, turistlerin en uygun güzergâhları belirlemesine ve farklı senaryolar (zaman, mesafe, maliyet) üzerinden değerlendirme yapmasına yardımcı olur (ESRI, 2023). Özellikle büyük şehirlerde bu çözümler, kaynak

tasarrufu sağlayan stratejik rehberler sunar. Güncel çalışmalar, gerçek zamanlı trafik verileri ve makine öğrenmesi tekniklerini de sürece dahil ederek rota planlamasını daha dinamik hale getirmektedir (Zhang vd., 2023).

Gaziantep, UNESCO tescilli gastronomisi, Zeugma Mozaik Müzesi ve tarihi dokusuyla Türkiye'nin önde gelen destinasyonlarından biridir (UNESCO, 2025). Şehirdeki zengin kültürel miras ve gastronomi duraklarının (Bakırcılar Çarşısı, Kale vb.) etkin yönetimi için CBS tabanlı analizler büyük bir fırsat sunmaktadır. Ancak bölgede kapsamlı ve tematik bir CBS rota çerçevesine duyulan ihtiyaç devam etmektedir. Gaziantep gibi zengin kültürel miras ve gastronomi potansiyeline sahip destinasyonlarda, ziyaretçilerin kısıtlı zaman diliminde en yüksek verimi alabilmesi için tek günlük rota planlaması stratejik bir öneme sahiptir. Turizm rotalarının optimizasyonu; ulaşım maliyetlerinin düşürülmesi, zaman yönetiminin iyileştirilmesi ve ziyaretçi memnuniyetinin artırılması bağlamında ele alınmakta, özellikle kısa süreli seyahatlerde CBS tabanlı ağ analizlerinin karar destek mekanizması olarak rolü vurgulanmaktadır (Akay, 2026; Qin vd., 2023). Tek günlük planlamalar, turistlerin genellikle sabah saatlerinde havalimanı varışıyla başlayıp gün sonunda şehir merkezi veya ulaşım noktalarında tamamlanan yoğun bir akış içerisinde; kahvaltı noktaları, müzeler ve tarihi çarşılar gibi birbiriyle mekânsal etkileşimi yüksek olan odak noktalarının en kısa yol ve en hızlı erişim algoritmalarıyla birbirine bağlanmasını gerektirmektedir (Akay, 2026).

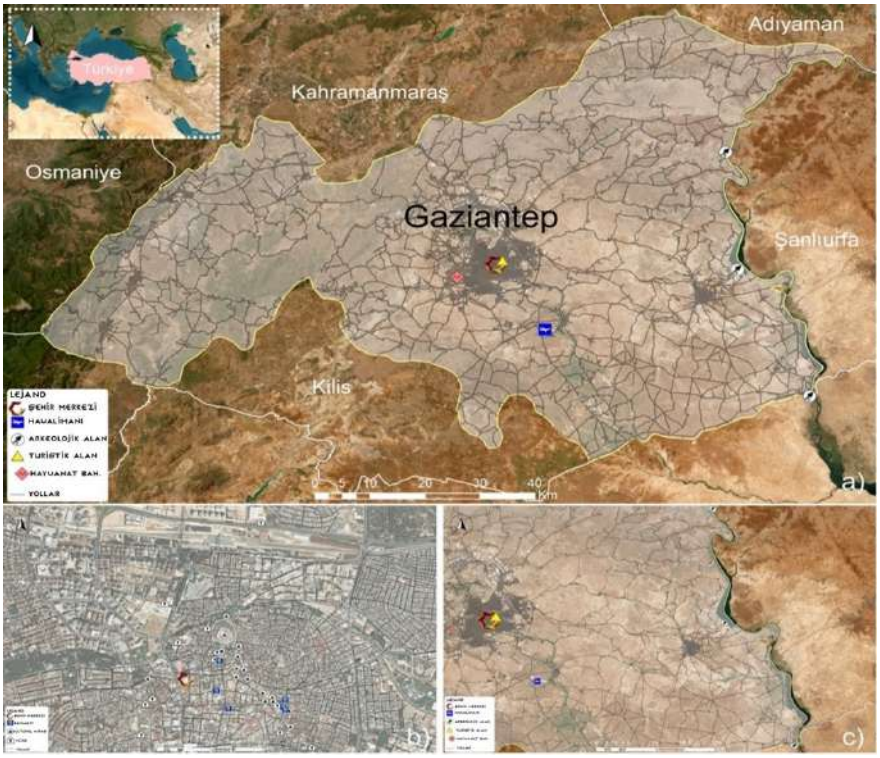
Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla Gaziantep'teki kültürel ve gastronomik değerleri optimize edilmiş mekânsal dizilerle birleştiren iki günlük yapılandırılmış rotalar geliştirmeyi hedeflemektedir. Mesafe ve süre bazlı oluşturulan senaryolar; konaklama, araç kiralama ve gün ışığı süreleri gibi faktörleri dikkate alarak hem ziyaretçi memnuniyetini hem de sürdürülebilir turizm stratejilerini güçlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM

2.1 Çalışma Alanı

Gaziantep; gastronomisi, kültürel mirası ve müzeleriyle hem ulusal hem de uluslararası düzeyde dikkat çeken bir destinasyondur. 2015 yılında UNESCO "Yaratıcı Şehirler Ağı"na gastronomi dalında dahil olan şehir, zengin mutfak kültürüyle dünya çapında bir ün kazanmıştır (UNESCO, 2025). Şehir, mutfak kültürünün yanı sıra dünyanın en büyük mozaik müzelerinden biri olan Zeugma Mozaik Müzesi, tarihi kalesi, hanları ve çarşılarıyla ziyaretçilerine kapsamlı bir kültürel deneyim sunmaktadır (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Portalı, 2025). Coğrafi olarak Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin kesişim noktasında yer alan Gaziantep, 6.222 km² yüzölçümüne sahiptir (Şekil 1). Dokuz ilçeden oluşan şehrin merkezini Şahinbey ve Şehitkamil ilçeleri oluşturmaktadır (Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, 2025). 2024 verilerine göre yaklaşık 1,5 milyon turisti ağırlayan ve müze ziyaretçi sayısı 1 milyona yaklaşan şehir, özellikle hafta sonu odaklı kısa süreli (1-2 günlük) kültür ve gastronomi turları için tercih edilmektedir (Gaziantep İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2025).

Ziyaretçilerin kısıtlı sürede maksimum verim alabilmesi için en hızlı ve uygun rotaların belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, havalimanı varışlı turistler için kahvaltı noktalarından başlayarak şehir merkezindeki müzeleri, hayvanat bahçesini ve çevredeki arkeolojik alanları kapsayan iki günlük alternatif rota senaryoları kurgulanmıştır. Bu senaryolar, merkeze yakın kültürel miras alanları ile merkeze uzak arkeolojik noktalar arasında optimize edilmiş bir mekânsal akış sunmaktadır.



Şekil 1. a) Gaziantep konumunun gösterimi; b) şehir merkezindeki turistik noktaların gösterimi, c) arkeolojik alanlar, hayvanat bahçesi ve havalimanı gösterimi

2.2 Turizm Yerleri ve Yol Ağı

Turizm rotalarının oluşturulması amacıyla turistik noktalar; GoTürkiye, Gaziantep Büyükşehir Belediyesi ve Türkiye Kültür Portalı gibi doğrulanmış resmi kaynaklardan derlenmiştir (GoTürkiye, 2025, Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, 2025, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Portalı, 2025). Kahvaltı mekanları (K), müzeler (M), kültürel miras alanları (KM), arkeolojik alanlar (A) ve parkların (H) seçiminde; popülerlik, ziyaretçi yoğunluğu, tematik uygunluk ve mekânsal erişilebilirlik kriterleri esas alınmıştır. Araştırma sonucunda belirlenen turistik noktalar; 5 kahvaltı noktası, 14 müze, 16 kültürel miras alanı, 3 arkeolojik saha ve 1 park olarak hayvanat bahçesi ile beş ana kategori altında toplanmıştır (Çizelge 1). Belirlenen bu lokasyonların koordinatları, resmi kurum verileri ve Google Earth uydu görüntüleri aracılığıyla doğrulanarak analiz sürecine dahil edilmiştir.

Çizelge 1. Gaziantep turistik gezi yerleri

Turistik Yer – Yer Kodu	Turistik Yer – Yer Kodu	Turistik Yer – Yer Kodu	Turistik Yer – Yer Kodu
Metanet Beyran Restoran – K1	Metanet Katmer Restoran – K2	Omaç Gaziantep Restoran – K3	Dürümcü Recep Usta - K4
Udma Peynir Müzesi & Restoran - K5	Ali İhsan Göğüş Müzesi ve Gaziantep Araştırma Merkezi- M1	Gaziantep Arkeoloji Müzesi - M2	Atatürk Anı Müzesi - M3
Emine Göğüş Mutfak Müzesi - M4	Hamam Müzesi- M5	Hasan Süzer Etnografya Müzesi - M6	Medusa Cam Müzesi - M7
Gaziantep Mevlevi Kültürü ve Vakıf Eserleri Müzesi - M8	Gaziantep Savaş Müzesi - M9	Ömer Ersoy Kültür Merkezi - M10	Gaziantep Oyun ve Oyuncak Müzesi - M11
Panorama 25 Aralık Gaziantep Savunması Kahramanlık Panoraması ve Müzesi - M12	Şahinbey Milli Mücadele Müzesi - M13	Zeugma Müzesi - M14	Almacı Pazarı - KM1
Anadolu Han- KM2	Bey Mahallesi - KM3	Büdeyri Han - KM4	Bakırcılar Çarşısı - KM5
Gaziantep Kalesi - KM6	Gümrük Han - KM7	Hışva Han - KM8	Kozluca Kasteli - KM9
Kürkçü Han - KM10	Millet Han - KM11	Naib Hamamı - KM12	Pişirici Kasteli - KM13
Tahmis Kahvesi - KM14	Yeni Han - KM15	Zincirli Bedesten - KM16	Karkamış Arkeolojik Alanı - A1
Rumkale Arkeolojik Alanı - A2	Zeugma Arkeolojik Alanı - A3	Gaziantep Hayvanat Bahçesi - H1	

Çalışmada, Gaziantep'teki kültürel ve gastronomik rotaların optimizasyonu için CBS tabanlı bir ağ analizi yaklaşımı benimsenmiştir. Yol ağı verisi OpenStreetMap (OSM) (OpenStreetMap, 2025) üzerinden temin edilmiş; otoyol, ana yol ve yerleşim yolları gibi farklı yol tipleri Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2025) hız limitlerine göre güncellenmiştir. KGM tarafından belirlenmiş yol türlerine göre yol hızları 30 ile 120m km/sa arasında değişmektedir. Yürüyüş rotaları için ortalama insan yürüme hızı literatürle uyumlu şekilde 4,8 km/sa olarak sisteme entegre edilmiştir. Gerçek zamanlı trafik verisi eksikliği nedeniyle analizler standart trafik koşullarına göre hesaplanmış; hafta sonu trafik akışının daha akıcı olduğu varsayılmıştır (Jenelius vd., 2013). Gaziantep ili için kamuya açık dinamik trafik verisi eksikliği nedeniyle, bu çalışmada gerçek zamanlı trafik verileri analize dahil edilememiştir. Bu doğrultuda, rota süreleri standart trafik koşulları varsayılarak hesaplanmış olup, gerçek zamanlı uygulama sonuçlarında trafik yoğunluğuna bağlı sapmalar görülebilir.

2.3 Veri Rota Senaryolarının Oluşturulması

İki günlük seyahat planları için geliştirilen senaryolarda; toplam seyahat süresi ve mesafesinin minimize edilmesi ile tematik bütünlüğün korunması hedeflenmiştir. Havalimanı varışlı olarak kurgulanan rotalar; kahvaltı deneyimiyle başlayıp müze, kültürel miras ve arkeolojik alan ziyaretleriyle devam edecek şekilde tasarlanmıştır. Senaryolar, turistlerin ulaşım tercihlerine (araçlı veya yaya) ve zaman kısıtlarına göre farklı kullanıcı profillerine hitap edecek şekilde optimize edilmiştir. Şehir merkezinde bulunan kahvaltı alanları ve kültürel miras alanları yaya olarak, havalimanı, arkeolojik alanlar, hayvanat bahçesi ve Zeugma Mozaik Müzesi konumları için araçlı rotalar optimize edilmiştir.

CBS, mekânsal bağlantıları anlamak ve optimize etmek için ağ analizini güçlü bir araç olarak kullanır. Bu analizler; ulaşım ağlarının modellenmesi, en kısa yolun bulunması ve kaynak tahsisi gibi karmaşık süreçlerin yönetiminde temel teşkil eder (Fischer, 2003). Bu çalışmada, kentsel turizm rotalarının optimizasyonunda etkinliği kanıtlanmış olan ArcGIS yazılımı bünyesindeki "Find Closest Facilities" (En Yakın Tesisi Bul) ve "Find Route" (Rota Bul) araçları kullanılmıştır (Curtin, 2007).

3. ROTA SENARYOLARI

Hafta sonu odaklı ziyaretler dikkate alınarak, iki günlük seyahat planları her gün için turizm rotaları ayrı ayrı senaryolaştırılmıştır. Birinci gün rota senaryosu (1GRS), havalimanı varışlı olarak kurgulanmıştır. Rotalar, Gaziantep'e özgü kahvaltı seçenekleri düşünülerek havalimanına en yakın konumdaki beş popüler kahvaltı noktasından biriyle başlayacak şekilde planlanmıştır. Kahvaltı sonrasında; kültürel miras alanları, müzeler, arkeolojik sahalar ve hayvanat bahçesini kapsayan optimize edilmiş güzergâhlar takip edilerek şehir merkezinde son bulmaktadır. Turistlerin merkezdeki akşam yemeği veya otel konaklamasına geçeceği varsayılarak, merkezden sonraki hareketler kapsam dışı bırakılmıştır. İkinci gün rota senaryosu (2GRS), şehir merkezinden başlayıp

havalimanında sona erecek şekilde tasarlanmıştır. Bu senaryoda rotalar da şehir merkezine en yakın beş kahvaltı noktasından biriyle başlamaktadır. Ardından, ilk güne benzer şekilde tematik noktalar ziyaret edilerek dönüş ulaşımı için havalimanına varış ile rota tamamlanmaktadır. Her iki gün için hazırlanan bu planlamalar, kısıtlı zaman diliminde Gaziantep'in temel turistik çekim merkezlerini en verimli ve optimize şekilde keşfetmeyi amaçlayan 50 farklı alt senaryodan oluşmaktadır. Şekil 2'de 1GRS ve 2GRS kapsamında oluşturulmuş iki günlük turizm rota senaryosuna ait görsel tasarım görülmektedir.



Şekil 2. 1GRS1 ve 2GRS2 rotaları ile oluşturulmuş örnek iki günlük turizm rotasının gösterimi

Çizelge 2'de iki günlük turizm rotaları için hazırlanmış 1GRS ve 2GRS için analizler sonucundaki rota güzergahı, uzunluğu ve süreleri görülmektedir. Her turizm rota senaryosu için haritalar oluşturulmuştur.

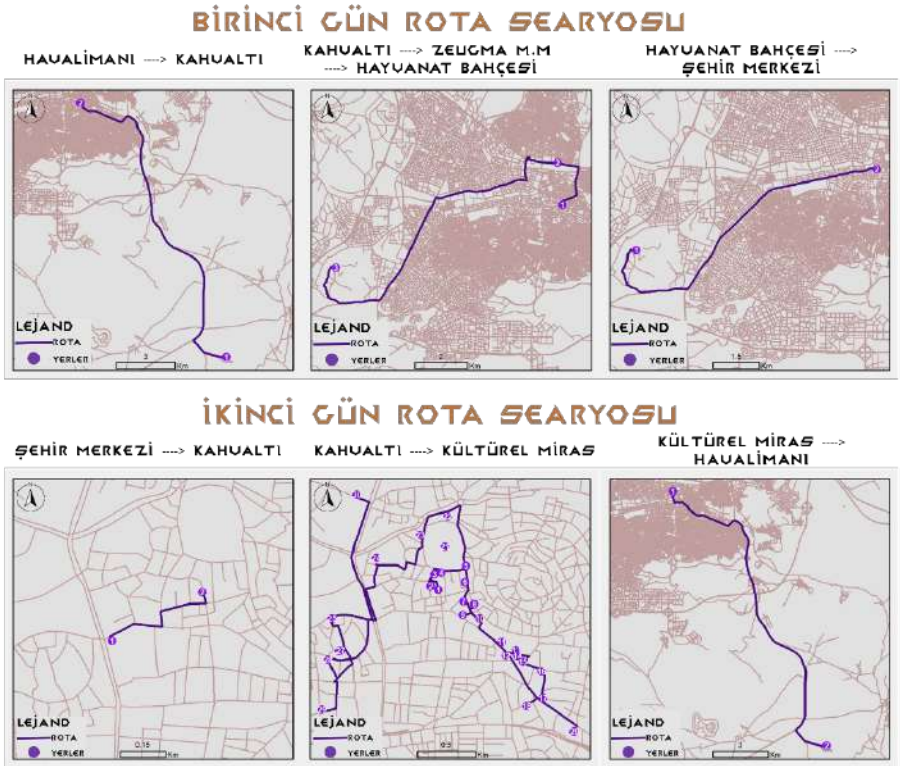
Birinci gün senaryolarında, kahvaltı noktasının ardından hayvanat bahçesi ve mozaik müzesini kapsayan ve şehir merkezinde sonlanan 1GRS4 ve 1GRS5 güzergâhlarının en hızlı rotalar olduğu tespit edilmiştir. Bu iki rota arasındaki süre farkı yalnızca 1 dakikadır. 1GRS1 senaryosu, 31,56 km mesafe ve 102,20 dakikalık ortalama süresiyle mesafe olarak en kısa rota olarak belirlenmiştir. Ayrıca, havalimanından doğrudan kahvaltı noktasına geçilmesinin yaklaşık 5 dakikalık bir zaman avantajı sağladığı ve K3 noktasıyla başlayan senaryoların diğerlerine göre daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Arkeolojik alan odaklı rotalarda (1GRS2 ve 1GRS3) ise mesafe ve süre açısından anlamlı bir fark saptanmamıştır.

İkinci gün için hazırlanan senaryolarda, şehir merkezindeki kültürel miras alanlarını, müzeleri ve hayvanat bahçesini içeren 2GRS1 ve 2GRS4 en hızlı rotalar olmuştur. En kısa güzergâh 27,80 km ile 2GRS5 görülmüştür. Arkeolojik rotalar arasında ise kuzey-güney yönlü 2GRS2 rotasının, güneyden kuzeye göre olan 2GRS3 rotasına göre en daha verimliliğe sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 2. Rota senaryolarının kod, güzergâh, uzunluk ve süre bilgileri

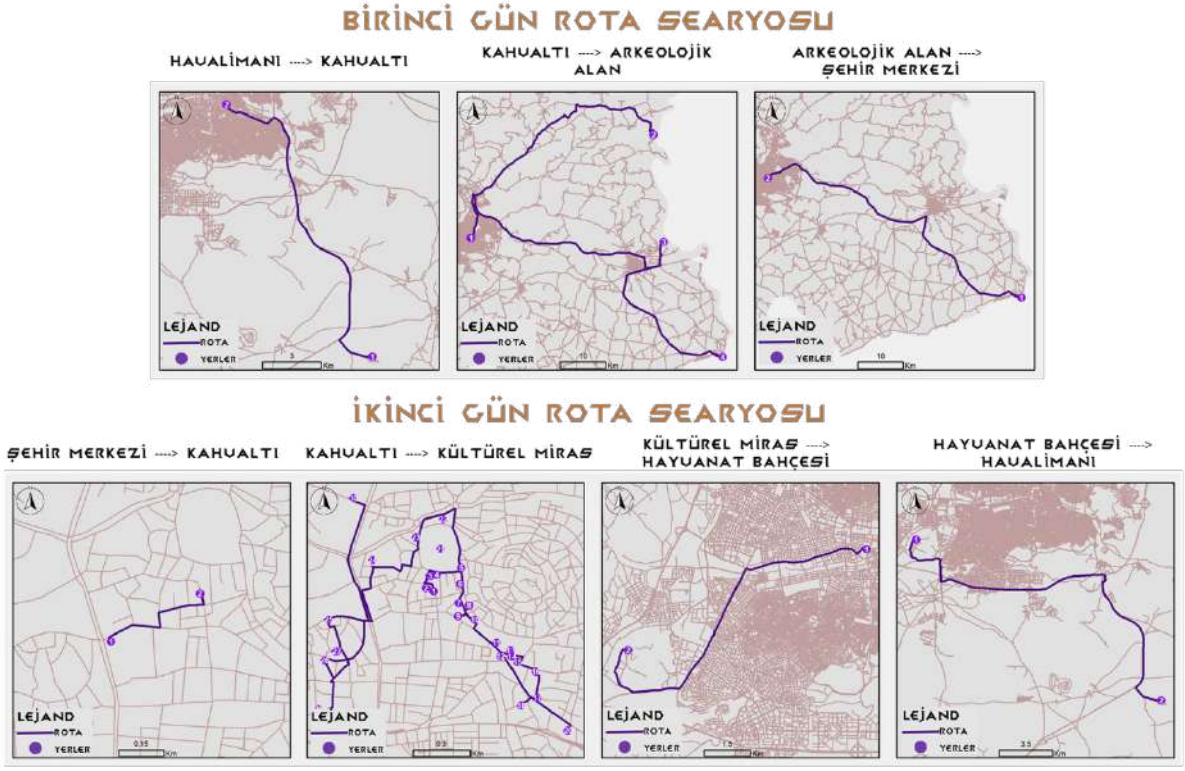
1. Gün Rota Senaryoları				2. Gün Rota Senaryoları			
Rota Kodu	**Güzergâh**	**Uzunluk (km)**	**Süre (dk)**	**Rota Kodu**	**Güzergâh**	**Uzunluk (km)**	**Süre (dk)**
1GRS1	Havalimanı → Kahvaltı → Kültürel Miras → Zeugma Müzesi→ Şehir Merkezi	31,56	102,20	2GRS1	Şehir Merkezi → Kahvaltı → Kültürel Miras Rotası→ Zeugma Mozaik Müzesi → Havalimanı	31,72	109,60
1GRS2	Havalimanı → Kahvaltı → Arkeoloji Alanları (Kuzey-Güney) → Şehir Merkezi	321,06	158,00	2GRS2	Şehir Merkezi → Kahvaltı → Arkeoloji Alanları (Kuzey-Güney)→ Havalimanı	289,66	156,00
1GRS3	Havalimanı → Kahvaltı → Arkeoloji Alanları (Güney -Kuzey) → Şehir Merkezi	320,26	157,00	2GRS3	Şehir Merkezi → Kahvaltı → Arkeolojik Alanları (Güney - Kuzey) → Havalimanı	318,66	164,00
1GRS4	Havalimanı → Kahvaltı → Hayvanat Bahçesi → Zeugma Mozaik Müzesi → Şehir Merkezi	47,46	22,00	2GRS4	Şehir Merkezi → Kahvaltı → Kültürel Miras → Hayvanat Bahçesi → Havalimanı	47,32	118,60
1GRS5	Havalimanı → Kahvaltı → Mozaik Müzesi → Hayvanat Bahçesi → Şehir Merkezi	46,14	21,00	2GRS5	Şehir Merkezi → Kahvaltı → Kültürel Miras Rotası→ Havalimanı	27,80	108,60

Şekil 3'te ise CBS ortamındaki ağ analizler sonucunda oluşturulmuş şehir merkezindeki kültürel miras noktalarını, hayvanat bahçesini ve Zeugma Mozaik Müzesi'ni içeren 73,94 km uzunluk ve 129,60 dakika süre ile en kısa ve hızlı "1GRS5 + 2GRS5" rota senaryosu görülmektedir.



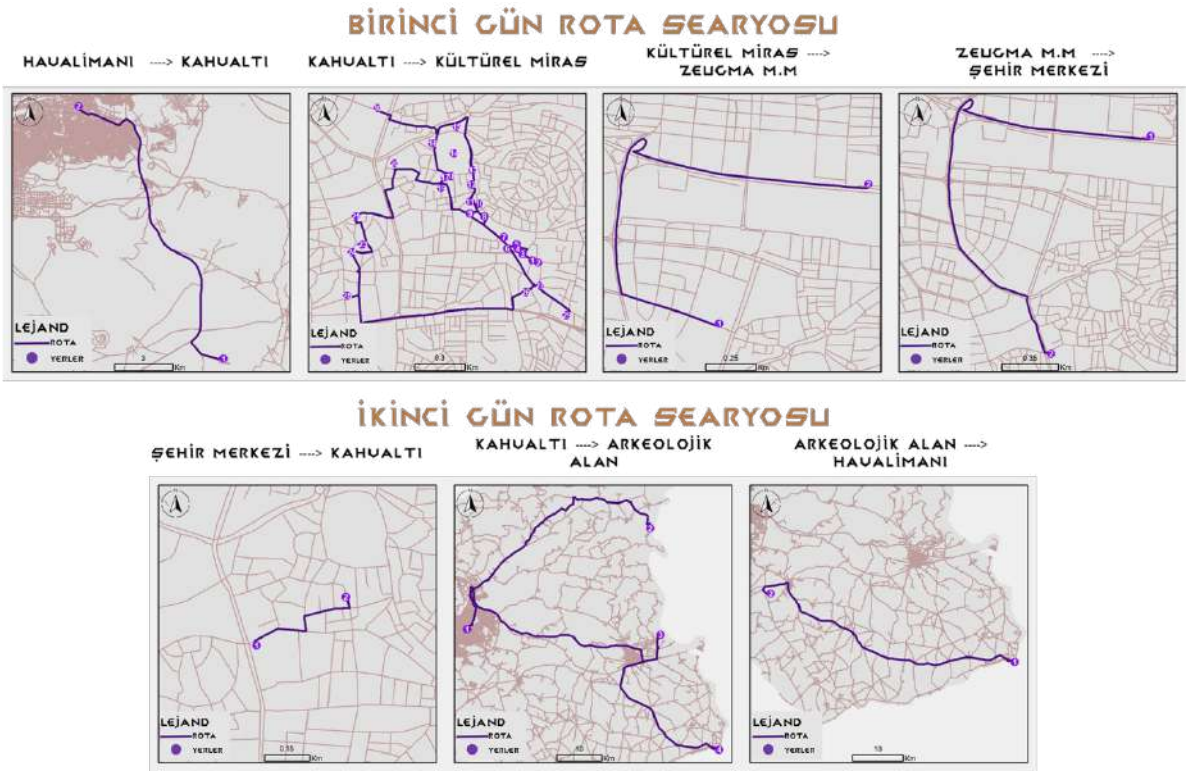
Şekil 3. 1GRS5 ve 2GRS5 rota haritaları ile oluşturulmuş örnek iki günlük turizm rotasının gösterimi

Şekil 4'te ise birinci gün şehir merkezden uzak mesafedeki arkeolojik alanları, ikinci gün ise şehir merkezindeki kültürel miras alanları ve hayvanat bahçesi ziyaret noktalarını içeren "1GRS2 + 2GRS4" rota senaryosu, 368,38 km ile en uzun ve 276,60 dakika ile en yavaş rota görülmektedir.



Şekil 4. 1GRS5 ve 2GRS5 rota haritaları ile oluşturulmuş örnek iki günlük turizm rotasının gösterimi

Şehre ait kültür turizmi kapsamında ilk gün şehir merkezindeki kültürel miras ve müzeler ikinci gün arkeolojik alanları içeren "1GRS1+2GRS2" en kültürel rota olarak değerlendirilmektedir. Bu rota 32122 km uzunluk ve 258,20 dakika süreye rota senaryosu Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. 1GRS1 ve 2GRS2 rota haritaları oluşturulmuş kültürel iki günlük turizm rotasının gösterimi

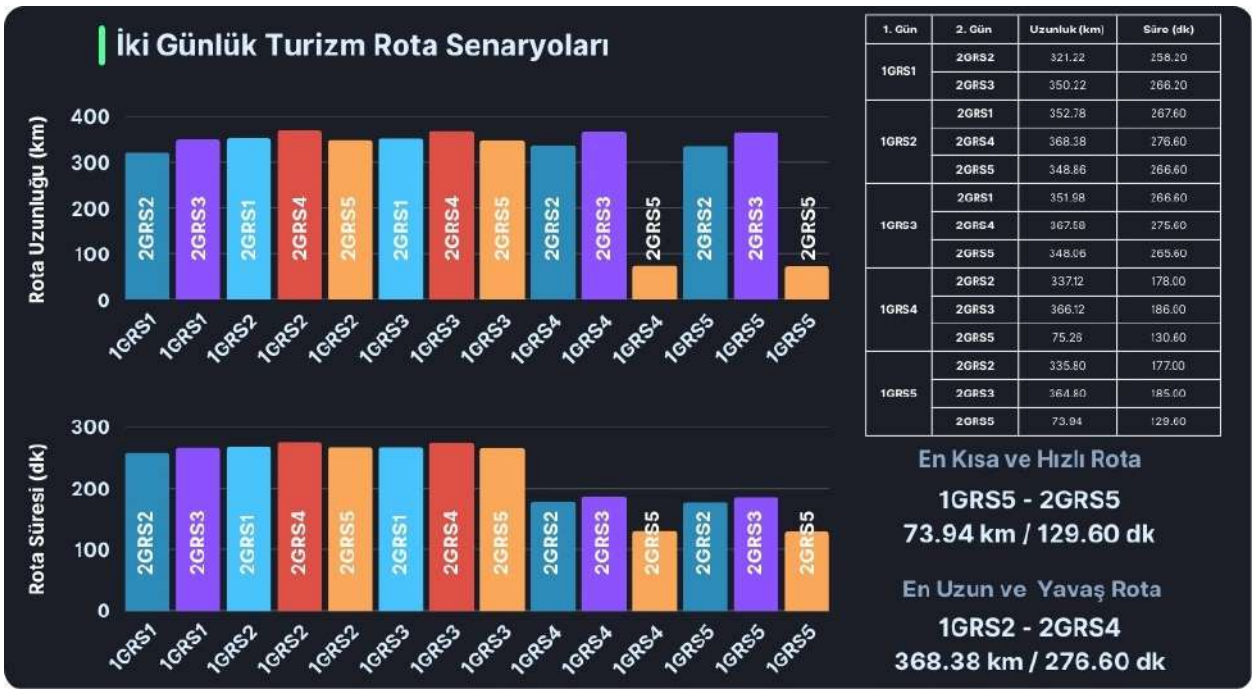
Birinci ve ikinci gün rota senaryoları, birbirini tekrar etmeyecek şekilde eşleştirilerek toplam 14 iki günlük rota senaryoları oluşturulmuştur (Şekil 6). Toplamda 14 rota senaryosu altında birleştirilen iki günlük senaryolarda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- **Mesafe ve Süre Aralığı:** Toplam rota uzunlukları 73,94 km ile 368,38 km; toplam seyahat süreleri ise 129 dk ile 276,60 dk arasında değişmektedir.
- **En Verimli ve Hızlı Rota:** Şehir merkezindeki kültürel miras noktalarını, hayvanat bahçesini ve Zeugma Mozaik Müzesi'ni içeren "1GRS5 + 2GRS5" rota senaryosu, 129 dakikalık süresiyle en hızlı seçenek olarak belirlenmiştir.
- **En Kapsamlı ve Yavaş Rota:** Merkezin yanı sıra uzak mesafedeki arkeolojik alanları da içeren "1GRS2 + 2GRS4" rota senaryosu, 368,38 km ile en uzun ve 276,60 dakika ile en yavaş rota olmuştur.
- **Kültürel Miras ve Arkeolojik Alan Rotası**: Şehre ait kültür turizmi kapsamında ilk gün şehir merkezindeki kültürel miras ve müzeler ikinci gün arkeolojik alanları içeren "1GRS1+2GRS2" en kültürel rota olarak değerlendirilmektedir. Bu rota 321,22 km uzunluk ve 258,20 dakika süreye sahiptir.

Bu planların toplam uzunlukları 73,94 km ile 368,38 km; toplam süreleri ise 129,60 ile 276,60 dakika arasında değişkenlik göstermektedir. Şehir merkezi odaklı planlar (1GRS5 + 2GRS5) hız ve kısalık açısından avantaj sağlarken; arkeolojik alanları içeren rota senaryoları, mesafenin artması nedeniyle en yüksek süre ve uzunluk değerlerine ulaşmıştır. Bulgular, ziyaret noktalarının sıralamasının ve başlangıç noktası seçiminin seyahat verimliliği üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu kanıtlamaktadır.

İki günlük turizm rotaları bütüncül olarak incelendiğinde, seyahat süresi ve mesafe açısından en verimli güzergâhın 1GRS5 ve 2GRS5 kombinasyonu olduğu saptanmıştır. Toplam 73,94 km mesafe ve 129 dakikalık süreye sahip olan bu rota senaryosu; şehir merkezindeki kültürel miras alanları, hayvanat bahçesi ve mozaik müzesini kapsamaktadır. En uzun ve en fazla zaman alan güzergâh ise 368,38 km mesafe ve 276,60 dakikalık seyahat süresi ile 1GRS2 ve 2GRS4 planıdır. Bu rotanın uzunluğu, şehir merkezine uzak konumdaki arkeolojik alanların plana dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Analiz sonuçları, benzer turistik noktaları içeren rotalar arasındaki temel farkın, ziyaret sırasından (durak dizilimi) kaynaklandığını göstermektedir. Örneğin, ikinci en hızlı rota ile en hızlı rota arasındaki temel fark, hayvanat bahçesi ve mozaik müzesi ziyaretlerinin sıralamasıdır. Benzer şekilde, arkeolojik alan odaklı yavaş rotalar arasındaki zaman farkı da bu alanlara gidiş sırasının optimizasyonu ile ilişkilidir. Bu bulgular, CBS tabanlı ağ analizinin sadece durak seçimi değil, aynı zamanda operasyonel verimlilik için doğru sıralamanın belirlenmesinde de kritik bir rol oynadığını kanıtlamaktadır.



1. Gün	2. Gün	Uzunluk (km)	Süre (dk)
1GRS1	2GRS2	321.22	258.20
	2GRS3	350.22	266.20
1GRS2	2GRS1	352.78	267.60
	2GRS4	368.38	276.60
	2GRS5	348.86	266.60
1GRS3	2GRS1	351.98	266.60
	2GRS4	367.58	275.60
	2GRS5	348.06	265.60
1GRS4	2GRS2	337.12	178.00
	2GRS3	366.12	186.00
	2GRS5	75.28	130.60
1GRS5	2GRS2	335.80	177.00
	2GRS3	364.80	185.00
	2GRS5	73.94	129.60

Şekil 6. Birinci gün ve ikinci gün rota senaryoları ile oluşturulmuş iki günlük turizm rota senaryoları

2. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gastronomi ve kültürel miras açısından zengin olan Gaziantep ilinde ziyaretçi deneyimini optimize etmek amacıyla CBS tabanlı iki günlük turizm rotaları kurgulanmıştır. Rotalar, şehrin mutfak kültürünü yansıtan kahvaltı noktalarıyla başlamakta; ziyaretçi tercihlerine göre müze, kültürel miras, arkeolojik alan ve hayvanat bahçesi odaklı farklı senaryolarla devam etmektedir. Analiz sonuçlarından elde edilen temel bulgular öneriler aşağıda gibidir:

- **Rota Çeşitliliği ve Verimlilik:** İki günlük süreç için hazırlanan 10 farklı rota senaryosu kapsamında toplam 14 alternatif rota senaryosu oluşturulmuştur. En verimli hızlı ve kısa rota 73,94 km mesafe ve 129,60 dakika sürerken; en kapsamlı uzun ve yavaş rota 368,38 km mesafe ve 276,60 dakika olarak hesaplanmıştır.
- **Mekânsal Stratejiler:** Şehir merkezindeki kahvaltı noktalarına erişim süreleri 5 ile 12 dakika arasında değişmektedir. İkinci günde şehir merkezinden başlayan rotalarda K1 ve K2 noktasının seçilmesi, rotada 7 dakikalık ek bir zaman avantajı sağlamaktadır.
    - Birinci gün, uçuş yorgunluğu dikkate alınarak şehir merkezi veya mozaik müzesi/hayvanat bahçesi odaklı kısa rotaların tercih edilmesi önerilmektedir.
    - İkinci gün, arkeolojik alan ziyaretlerinde kuzeyden başlayan güzergâhın yaklaşık 30 km daha kısa olduğu ve havalimanına yani güneye daha yakın sonlandığı tespit edilmiştir.
- **Yaya ve Araçlı Ulaşım:** Şehir merkezindeki kültürel miras alanlarını kapsayan yaya rotalarının uzunluğu 6,80 km ile 8 km arasında değişmektedir.
- **Stratejik Katkı:** Gaziantep gibi yoğun turizm destinasyonlarında CBS ve ağ analizi; ulaşım altyapısının iyileştirilmesi, turist memnuniyetinin artırılması ve sürdürülebilir destinasyon yönetimi için kritik bir karar destek mekanizması sunmaktadır.
- **Gerçek Zamanlı Entegrasyon:** Gelecek çalışmalarda, gerçek zamanlı trafik verileri ve anlık turist hareketliliğinin analize dahil edilmesiyle rota tahminlerinin doğruluğu artırılabilir.
- **Akıllı Çözümler:** Geliştirilen rota senaryolarının mobil uygulama tabanlı navigasyon çözümlerine entegre edilmesi, ziyaretçi deneyimini dijitalleştirecektir.
- **Karşılaştırmalı Analizler:** Benzer kültürel mirasa sahip farklı şehirlerle yapılacak karşılaştırmalı çalışmalar, bölgesel turizm stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.
- **Katılımcı Planlama:** Rota tasarım süreçlerine turistlerin ve yerel halkın dahil edildiği katılımcı planlama çerçevelerinin oluşturulması, toplumsal faydayı maksimize edecektir.

Gaziantep gibi dinamik ve zengin bir turizm potansiyeline sahip şehirlerde CBS ve ağ analizi, turizm yönetiminin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik araçlardır. Bu tür teknolojik ilerlemeler, Gaziantep'in dayanıklı, sürdürülebilir ve akıllı bir turizm ekosistemi inşa etme hedefine önemli katkılar sunacaktır.

Bu çalışma, mekânsal verilerin optimizasyonu yoluyla hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir turizm yapısı oluşturulabileceğini kanıtlamıştır. Yerel yönetimler, turizm işletmeleri ve akademik kurumlar arasındaki iş birliğinin artırılması, bu teknolojilerin etkinliğini daha da pekiştirecektir.

3. TEŞEKKÜR

Yayın çalışmalarına destekleri için İTÜ Earth3Bee-LAB'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Akay, S.S. 2026. Cultural-Gastronomic GIS-Based Routes for Planning Efficient Urban Tourism. *Geojournal of Tourism and Geosites*. 64(1): 29–39.

Albu, R. G. 2005. Sustainable Tourism Management at Regional Level. *Theory and Applications*, Infomarket Publishing House, Braşov, Romania. 179 sayfa.

Curtin, K. M. 2007. Network Analysis in Geographic Information Science: Review, Assessment, and Projections. *Cartography and Geographic Information Science.* 34(2): 103–111.

ESRI. (2023). Find closest facilities—ArcGIS ArcMap Document. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/network-analyst-toolbox/find-closest-facilities.htm [Erişim tarihi: 12.01.2025].

Fischer, M. M. 2003. GIS and Network Analysis. *43rd congress of the european regional science association: Peripheries, Centres, and Spatial Development in the New Europe,* 27th - 30th August 2003, Jyväskylä, Finland, ERSA, Louvain-la-Neuve.

Gaziantep İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, Turizm, Kültür, 2025 https://gaziantep.ktb.gov.tr/ [Erişim tarihi: 12.01.2025].

Gaziantep Büyükşehir Belediyesi 2025. Gaziantep Hakkında. https://www.gaziantep.bel.tr/tr [Erişim tarihi: 12.01.2025].

GoTürkiye 2025. Gaziantep GoTurkiye. https://gaziantep.goturkiye.com [Erişim tarihi: 12.01.2025].

Jenelius, E., Koutsopoulos, H. N. 2013. Travel Time Estimation for Urban Road Networks Using Low Frequency Probe Vehicle Data. *Transportation Research Part B: Methodological*. 53: 64-81.

Karayolları Genel Müdürlüğü, 2025. Türkiye'de Araçlarin Uymasi Gereken Yasal Hiz Sinirlar https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/HizSinirlari.aspx [Erişim tarihi: 12.01.2025].

OpenStreetMap, 2025. OpenStreetMap Tutorial. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/File:Osm-tutorial.pdf. [Erişim tarihi: 12.01.2025].

Pitakaso, R., Srichok, T., Khonjun, S., Gonwirat, S., Nanthasamroeng, N., Boonmee, C. 2024. Multi-Objective Sustainability Tourist Trip Design: An Innovative Approach for Balancing Tourists' Preferences with Key Sustainability Considerations. *Journal of Cleaner Production*. 449: 141486.

Qin, Y., Cao, L., Li, W., Darvishi Boloorani, A., Li, Y., Ke, X., Soleimani, M., Yu, Q., Zhou, C. 2023. Suitability Assessment Method of Red Tourism Development Using Geospatial and Social Humanity Data: A Case Study of Ruijin City, East China. *Sustainability*. 15(11): 8582.

Shen, S., Sotiriadis, M., Zhang, Y. 2020. The Influence of Smart Technologies on Customer Journey in Tourist Attractions within the Smart Tourism Management Framework. *Sustainability*. 12(10): 4157.

Singh, P. 2015. Role of geographical information systems in tourism decision making process: a review. *Inf Technol Tourism.* 15: 131–179.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Portalı, 2025. Gaziantep Broşürü. https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/gaziantep/genelbilgiler [Erişim tarihi: 12.01.2025].

UNESCO, 2025. Yaratıcı Şehirler Ağı Programı https://www.unesco.org.tr/Pages/3001/2401/UNESCO-Yarat%C4%B1c%C4%B1-%C5%9Eehirler-A%C4%9F%C4%B1-Program%C4%B1 [Erişim tarihi: 12.01.2025].

Zhang, X., Pang, X., Wen, X. Wang, F., Li, C., Zhu, M. 2023. TriPlan: an interactive visual analytics approach for better tourism route planning. *Journal of Vissualization*, 26: 231–248.

KASTAMONU MERKEZ YERLEŞİME UYGUNLUK ANALİZİ (CBS TABANLI ÇOK KRİTERLİ DEĞERLENDİRME)

SETTLEMENT SUITABILITY ANALYSIS OF KASTAMONU CENTER DISTRICT (GIS-BASED MULTI-CRITERIA EVALUATION)

Emel YEŞİL • Dr. Öğr. Üyesi Bekir TAŞTAN

Kastamonu Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kastamonu, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada Kastamonu Merkez ilçesinin yerleşime uygunluk durumu, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKDV) yaklaşımı kullanılarak mekânsal düzeyde analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı; sürdürülebilir kentleşme ilkeleri doğrultusunda doğal ve beşeri afet risklerinin azaltılması, çevresel kaynakların korunması ve doğru kentsel gelişim alanlarının belirlenmesidir. Analiz sürecinde ArcGIS Pro yazılımı ortamında Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), arazi kullanımı/örtüsü ve hidrolojik veri setleri kullanılmıştır. Yerleşime uygunluğu doğrudan etkileyen eğim, bakı, yükselti, arazi kullanımı ve akarsu tampon (buffer) alanları olmak üzere beş ana kriter belirlenmiş; bu kriterler yeniden sınıflandırma (Reclassify) işlemine tabi tutulduktan sonra Ağırlıklı Çakıştırma (Weighted Overlay) yöntemi ile entegre edilmiştir. Analiz sonuçları, Kastamonu merkez ilçesinde yerleşime en uygun alanların düşük eğimli (%0-10), orta yükseltili, güney ve güneydoğu bakılı, taşkın riskinden uzak (Karaçomak Deresi tampon sınırı haricinde) ve mevcut arazi kullanım yapısına uygun bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Yüksek eğimli yamaçlar, vadi tabanları ve akarsu yakın çevresi ise yüksek risk ve fiziki kısıtlar içermektedir. Üretilen uygunluk haritası, yerel yönetimler, şehir planlamacıları ve karar vericiler için sürdürülebilir arazi kullanımı ve kentsel risk yönetimi süreçlerinde rehber bir altlık niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Yerleşime Uygunlık Analizi, Çok Kriterli Değerlendirme (ÇKDV), Weighted Overlay, ArcGIS Pro, Kastamonu.

ABSTRACT

In this study, the settlement suitability of Kastamonu Center district was analyzed spatially using a Geographic Information Systems (GIS)-based Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) approach. The main objective is to reduce natural and human-induced disaster risks, protect environmental resources, and identify appropriate urban growth zones in line with sustainable urbanization principles. Digital Elevation Model (DEM), land use/cover, and hydrological datasets were integrated using ArcGIS Pro software. Five core spatial criteria—slope, aspect, elevation, land use, and stream buffer zones—were evaluated. Following the reclassification of each factor, a spatial weighted overlay analysis was conducted. The results indicate that areas most suitable for settlement in Kastamonu Central district are concentrated in low-slope (0-10%), moderate-elevation, south/southeast-facing regions away from flood risk zones. Conversely, steep slopes and valley floors near stream beds present significant spatial constraints. The suitability map generated serves as a strategic spatial decision support framework for local governments and urban planners.

Keywords: Geographic Information Systems (GIS), Settlement Suitability Analysis, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), Weighted Overlay, ArcGIS Pro, Kastamonu.

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı, kontrolsüz kentleşme ve sanayileşme süreçleri, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de arazi kullanımı üzerinde yoğun bir baskı oluşturmaktadır. Kentsel alanların plansız bir şekilde genişlemesi; doğal afet risklerinin artmasına, ekolojik dengenin bozulmasına ve altyapı maliyetlerinin yükselmesine yol açmaktadır. Sürdürülebilir bir kentsel gelişim vizyonunun hayata geçirilebilmesi, yerleşim alanlarının doğru konumlandırılması ve mekanın fiziki ile beşeri kapasitesine uygun şekilde planlanmasıyla mümkündür.

Yerleşime uygunluk analizleri; topoğrafik yapının (eğim, bakı, yükselti), hidrolojik koşulların, zemin özelliklerinin ve mevcut arazi kullanım deseninin bütüncül bir değerlendirmeye tabi tutulmasını gerektirmektedir. Geleneksel planlama yaklaşımları çok sayıda mekânsal verinin eş zamanlı analiz edilmesinde yetersiz kalırken, günümüzde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKDV) teknikleri bu süreçte güçlü ve analitik bir karar destek mekanizması sunmaktadır.

Kastamonu Merkez ilçesi, engebeli topoğrafik yapısı ve kentin tam ortasından geçen Karaçomak Deresi vadisi boyunca dar bir hatta sıkışmış morfolojik özellikleri nedeniyle kentsel mekânsal genişleme açısından belirgin kısıtlara sahiptir. Kentin tarihsel süreç içinde dere yatağına ve yüksek eğimli yamaçlara doğru yayılmış olması, taşkın riskleri ve kütle hareketleri gibi doğal tehlikeleri gündeme getirmektedir. Bu çalışmanın amacı, ArcGIS Pro yazılımı imkânlarından faydalanarak Kastamonu Merkez ilçesinde fiziki ve beşeri coğrafya faktörlerini çok kriterli bir analize tabi tutmak, riskli alanları tespit etmek ve sürdürülebilir kentleşme açısından yerleşime en uygun alanları belirleyerek mekânsal planlama çalışmalarına bilimsel bir katkı sağlamaktır.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Çalışmanın temel amacı, Kastamonu Merkez ilçesi sınırları dâhilinde yerleşim gelişimine en uygun ve en kısıtlayıcı alanları mekânsal modelleme yöntemleriyle tespit etmektir. Bu ana hedef doğrultusunda şu alt amaçlar gerçekleştirilmiştir:

• Fiziki coğrafya faktörlerinin (eğim, yükselti, bakı, hidroloji) mekan üzerindeki kısıtlayıcı ve yönlendirici etkilerini analiz etmek,

• Mevcut arazi kullanımı ve akarsu taşkın risk alanlarını belirleyerek koruma-kullanma dengesini kurmak,

• ArcGIS Pro yazılımında Çok Kriterli Değerlendirme (Weighted Overlay) yöntemiyle duyarlı bir yerleşime uygunluk haritası ve karar destek modeli üretmektir.

3. VERİ SETİ VE YÖNTEM

Bu çalışmada Kastamonu Merkez ilçesinin mekânsal verileri ArcGIS Pro ortamında işlenmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı Çok Kriterli Karar Verme (CBS-ÇKDV) yaklaşımı uygulanmıştır. Analiz sürecinde Sayısal Yükseklik Modeli (DEM/SRTM), arazi kullanımı/örtüsü verileri ile akarsu ve yol ağları temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır.

3.1. Kriterlerin Belirlenmesi ve Analiz Adımları

Yerleşime uygunluk analizinde beş temel mekânsal parametre dikkate alınmıştır. Her bir parametre ArcGIS Pro yazılımının Spatial Analyst araç kutusu kullanılarak işlenmiştir:

Eğim Analizi (Slope): Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verisinden türetilmiş, yapılaşma maliyetini ve heyelan/kütle hareketi riskini doğrudan etkileyen faktördür. Düşük eğimli alanlar (%0-10) yüksek uygunluğa sahipken, yüksek eğimli alanlar riskli kabul edilmiştir.

Bakı Analizi (Aspect): Güneşlenme süresi, enerji verimliliği ve mikroklimatik koşullar açısından değerlendirilmiştir. Güneşe bakan güney, güneydoğu ve güneybatı yamaçlar daha yüksek uygunluk puanı almıştır.

Yükselti Analizi (Elevation): İklim koşulları, ulaşım erişilebilirliği ve sıcaklık değişimleri üzerindeki etkisi nedeniyle incelenmiş; orta yükselti kuşağı yerleşim için avantajlı kabul edilmiştir.

Arazi Kullanımı (Land Use): Mevcut yerleşim alanları, tarım arazileri, ormanlık alanlar ve boş araziler sınıflandırılmıştır. Tarım ve orman arazilerinin korunması esas alınmış, mevcut yerleşim çevresi ve boş alanlar yerleşime uygun sınıf olarak belirlenmiştir.

Hidroloji Analizi (Akarsu Tampon): Karaçomak Deresi ve kolları çevresinde Buffer (Tampon Bölge) analizi uygulanarak dere yatağına 10 metre yakınlıktaki alanlar taşkın riski taşıması nedeniyle kısıtlayıcı bölge olarak modelde yer almıştır.

3.2. ModelBuilder İş Akışı ve Yeniden Sınıflandırma (Reclassify)

Çalışmada kullanılan tüm vektör ve raster veriler aynı koordinat sistemine (WGS 1984 UTM Zone 36N) projekte edilmiş ve standart hücre boyutuna (raster resolution) getirilmiştir. Hazırlanan veriler ArcGIS Pro ModelBuilder modülünde otomatik bir iş akışına dönüştürülmüştür. Model kurgusunda şu adımlar izlenmiştir:

1. Tampon Analizi: Vektör akarsu verilerine Buffer uygulanarak 10m koruma bandı üretilmiş ve raster formata dönüştürülmüştür.

2. Yüzey Analizleri: DEM verisinden Eğim (Slope) ve Bakı (Aspect) haritaları türetilmiştir.

3. Reclassify (Yeniden Sınıflandırma): Farklı ölçek ve birimlerdeki veriler (derece, metre, arazi sınıfı vb.), yerleşime uygunluk derecesine göre 1 ile 5 arasında ortak bir puanlama ölçeğine yeniden sınıflandırılmıştır (1: Çok Düşük / Uygun Değil, 5: Çok Yüksek / Çok Uygun).

4. Weighted Overlay: Yeniden sınıflandırılan raster katmanları belirlenen ağırlık katsayıları ile çarpılarak Weighted Overlay aracı üzerinden çakıştırılmıştır.

3.3. Kriter Ağırlıklandırması (Weighted Overlay Model Parameters)

Kriter ağırlıkları; topoğrafik kısıtlar, yerleşilebilirlik maliyetleri ve afet riski faktörleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Eğim ve arazi kullanımı kentsel gelişimi en sert kısıtlayan ana etkenler olduğu için en yüksek ağırlığa sahip olmuş, hidroloji faktörü risk unsuru olarak modele dahil edilmiştir. Çakıştırma analizinde kullanılan kriter ağırlıkları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Kastamonu Merkez Yerleşime Uygunlık Analizi Kriter Ağırlık Değerleri

Kriter	Etki Ağırlığı (%)	Değerlendirme Gerekçesi ve Kapsamı
Eğim (Slope)	%35	Yapılaşma uygunluğu, temel maliyeti ve heyelan riski üzerindeki birincil etki.
Arazi Kullanımı (Land Use)	%20	Tarım ve orman alanlarının korunması, mevcut yerleşime yakınlık.
Hidroloji (Akarsu Buffer)	%15	Karaçomak Deresi ve kollarındaki taşkın/su baskını risk kısıtı.
Yükselti (Elevation)	%15	Mikroklima, iklim koşulları ve ulaşım erişilebilirliği kısıtları.
Bakı (Aspect)	%15	Güneşlenme süresi, ısıtma ve enerji verimliliği destekleyici faktörü.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

ArcGIS Pro yazılımında gerçekleştirilen mekânsal analizler ve Weighted Overlay çakıştırması sonucunda Kastamonu Merkez ilçesine ait kriter bazlı katmanlar ve nihai Yerleşime Uygunluk Haritası elde edilmiştir.

4.1. Kriter Bazlı Analiz Bulguları

Eğim Analizi Bulguları: Kastamonu Merkez ilçesi engebeli ve değişken bir topoğrafyaya sahiptir. Analiz sonuçları, mevcut yerleşim alanlarının çevresi ve bulunduğu konum itibariyle yüksek ve dengesiz eğim değerlerine sahip yamaçlarda yayıldığını doğrulamaktadır. Düşük eğimli tatlı yamaçlar kentsel yapılaşma için en uygun alanlar iken, yüksek eğimli yamaçlar hem heyelan riski hem de yüksek altyapı inşaat maliyetleri sebebiyle yerleşime uygun olmayan alanlar olarak teyit edilmiştir.

Arazi Kullanımı Bulguları: Arazi kullanımı haritası incelendiğinde; kentsel yerleşim alanlarının vadi boyunca eşlik ettiği ve akarsu yatağına paralel olarak geliştiği görülmektedir. Birincil etken olarak Kastamonu şehir merkezinden geçen Karaçomak Deresi, çevresindeki tarım arazilerini beslemekte ve kentsel dokuyu şekillendirmektedir. Ancak kentsel alanların yoğunlaşması sebebiyle dere yatağında daralma ve kuruma riski ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilirlik açısından verimli tarım ve korunan orman arazilerinin yerleşime kapatılması gerekliliği tespit edilmiştir.

Yükselti Analizi Bulguları: Orta yükselti kuşağı yerleşim için son derece avantajlı koşullar sunmaktadır. Buna karşılık kentin çevresinde yükselti değerleri kısa mesafelerde hızla artıp azalmakta ve düzensiz aralıklar sergilemektedir. Yükselti farklarının kısa mesafelerde yüksek olması, sıcaklık terselmesi ve yerel hava durumu değişikliklerine (mikroklima) yol açmakta, kentsel ulaşım ve altyapı ağlarını olumsuz etkilemektedir.

Hidroloji Analizi Bulguları: Akarsu çevresindeki tampon bölgeler doğrudan taşkın riski barındırmaktadır. Kastamonu Merkez yerleşkesi tarihsel olarak dere yatağına kurulmuş bir şehirdir. ArcGIS Pro'da yapılan 10 metrelik akarsu tampon (Buffer) analizi sonucunda, dere yatağının birinci derecede taşkın riski taşıdığı ve mevcut yerleşim dokusunun akarsu koruma bandını ihlal ettiği, dolayısıyla yerleşime uygun olmadığı tespit edilmiştir.

4.2. Yerleşime Uygunluk Sentezi ve Mekânsal Dağılım

Tüm kriterlerin ağırlıklandırılmasıyla üretilen nihai Yerleşime Uygunluk Haritası incelediğinde; yerleşime en uygun alanların (%0-10 düşük eğimli, orta yükseltili, güney bakılı, mevcut yapılaşmaya komşu ve taşkın riskinden uzak) belirli akslarda toplandığı görülmüştür. Bulgular şu ana hususları ortaya koymaktadır:

1. Topoğrafik ve Hidrolojik Bağımlılık: Kastamonu merkezde yerleşim alanlarının uygunluk dağılımı büyük ölçüde topoğrafik (eğim/yükselti) ve hidrolojik kısıtlara bağlı olarak biçimlenmektedir.

2. Dominant Kriterler: Eğim (%35) ve arazi kullanımı (%20) kriterleri uygunluk haritasının temel karakterini belirleyen en baskın unsurlar olmuştur.

3. Riskli Genişleme Eğilimleri: Mevcut kentsel büyümenin bir kısmının yüksek riskli eğimli yamaçlara ve akarsu taşkın koruma bantlarına doğru kaydığı görülmüş, bu durum plansız kentleşmenin oluşturduğu afet risklerini teyit etmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kastamonu Merkez ilçesinin yerleşime uygunluk durumu CBS ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKDV) teknikleri kullanılarak mekânsal olarak modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda Kastamonu merkezde yerleşime en uygun alanların;

• Düşük eğimli (%0-10),

• Orta yükselti değerlerine sahip,

• Güneşlenme avantajı sunan güney ve güneydoğu bakılı,

• Karaçomak Deresi taşkın ve tampon risk alanlarından uzak,

• Tarım ve orman niteliği taşımayan, kentsel gelişime açık boş alanlarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, yerel yönetimler (Kastamonu Belediyesi, İl Özel İdaresi) ve şehir planlamacıları için kentsel dönüşüm, yeni imar alanlarının açılması ve kentsel risk yönetimi süreçlerinde doğrudan uygulanabilir bir Mekânsal Karar Destek Sistemi niteliğindedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda; modelin hassasiyetini ve geçerliliğini artırmak amacıyla ulaşım ağına erişilebilirlik, jeolojik-jeoteknik zemin verileri (zemin taşıma kapasitesi, fay hatları), arazi maliyetleri ve nüfus yoğunluğu gibi ek beşeri ile jeolojik kriterlerin analize dahil edilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKÇA

Akbulut, G., & Yılmaz, C. (2019). Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Yerleşime Uygunluk Analizi: Amaç ve Yöntem Üzerine Bir Değerlendirme. Türk Coğrafya Dergisi, (73), 45-58.

Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva Manual: Multi-Criteria Evaluation Techniques in GIS. Clark University, Worcester.

Esri. (2024). ArcGIS Pro Documentation: Weighted Overlay and Spatial Decision Support Workflows. Esri Press, Redlands, CA.

Harita Genel Müdürlüğü (HGM). (2023). Türkiye Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) Veri Seti. Ankara.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the Analytic Hierarchy Process. International Journal of Services Sciences, 1(1), 83-98.

Taştan, B., & Yeşil, E. (2026). CBS Tabanlı Kastamonu Merkez Yerleşime Uygunluk Analizi. X. Ulusal Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2026), Poster Sunumu Bildiri Kitabı, Trabzon.

KARBON YUTAK ALANLARIN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

Murat NAS[1], Fatih DÖNER[2]

[1]Harita Müh., Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü, Gümüşhane, 29100, Gümüşhane, nasmurat55@gmail.com
[2]Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, fatihdoner@gumushane.edu.tr

ÖZET

İklim değişikliği günümüzde çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla küresel ölçekte etkilerini gösteren önemli sorunlardan biridir. Atmosferde sera gazı konsantrasyonlarının artması, küresel sıcaklıkların yükselmesine neden olmakta ve bu durum karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Karbon yutak alanları (KYA), atmosferde bulunan karbondioksiti (CO_2) fotosentez yoluyla bünyelerine alarak depolayan doğal sistemler olup iklim değişikliğiyle mücadelede kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, KYA'ın belirlenmesinde Türkiye'deki mevcut hukuki ve kurumsal altyapı incelendikten sonra Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojilerinin KYA'ın belirlenmesi için kullanım olanakları değerlendirilmiştir. 12 Aralık 2015'te 195 ülke tarafından kabul edilen Paris İklim Anlaşması, Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde 2021 yılında onaylanarak resmen yürürlüğe girmiştir. 29 Ekim 2021 tarihli ve 31643 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 85 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın ismi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı olarak değiştirilmiştir. Anılan kararname ile daha önce Tarım ve Orman Bakanlığı altında yer alan Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü (ÇEMGM) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlanarak ÇEMGM bünyesinde Yutak Alanlar Daire Başkanlığı oluşturulmuştur. 31.10.2023 tarihinde onaylanan On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028) 276 ve 872 numaralı hedeflerde sırasıyla "karbon yutak alanların artırılacağı" ve "karbon yutak alanların genişletileceği" ifadeleri yer almıştır. 2025 yılında yürürlüğe giren 7552 sayılı İklim Kanunu ve Orman Kanunu'nda yapılan değişikliklerle "yutak alan", "gömülü emisyon", "karbon fiyatlandırma" ve "karbon yutak orman" kavramları mevzuata girmiş ve bu alanların yönetimine dair düzenlemeler yapılmıştır.

CBS tabanlı analizler sayesinde geniş alanlarda karbon yutak kapasitesinin belirlenmesi, zamansal değişimlerin izlenmesi ve sürdürülebilir arazi yönetimine yönelik karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Arazi kullanım/arazi örtüsü verileri, uydu görüntüleri ve vejetasyon indeksleri kullanılarak karbon depolama potansiyeline sahip alanların mekânsal olarak tespit edilmesine yönelik yöntemler mevcuttur. Özellikle uydu görüntülerinden elde edilen Normalleştirilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI) değerleri karbon stoklarının tahmin edilmesinde önemli bir göstergedir. Çalışma, Türkiye'de 2021 yılından sonra karbon yutak alanların belirlenmesine yönelik hukuki ve kurumsal altyapının oluşturulmaya başlandığını, ormanlar başta olmak üzere sulak alanlar, çayır-mera alanları ve belirli tarım alanlarının önemli karbon yutakları olduğunu, CBS ve uzaktan algılama teknolojilerinin bu alanların izlenmesi ve korunmasında etkin araçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: CBS, iklim değişikliği, karbon yutak alanlar, sürdürülebilir arazi yönetimi, uzaktan algılama

ABSTRACT

DETERMINATION OF CARBON SINK AREAS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

Climate change is one of the most significant global challenges of our time, with environmental, economic, and social impacts being observed worldwide. The increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere leads to rising global temperatures, making the development of strategies aimed at reducing carbon emissions imperative. Carbon sink areas (CSAs) are natural systems that absorb and store atmospheric carbon dioxide (CO_2) through photosynthesis and play a critical role in combating climate change.

In this study, after examining the existing legal and institutional framework related to carbon sink areas in Türkiye, the potential use of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing technologies for the identification of CSAs was evaluated. The Paris Agreement, adopted by 195 countries on 12 December 2015, was approved by the Grand National Assembly of Türkiye in 2021 and officially entered into force. With Presidential Decree No. 85, published in the Official Gazette dated 29 October 2021 and numbered 31643, the name of the Ministry of Environment and Urbanization was changed to the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. Through this decree, the General Directorate of Combating Desertification and Erosion (ÇEMGM), which had previously operated under the Ministry of Agriculture and Forestry, was transferred to the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. Subsequently, the Department of Sink Areas was established within ÇEMGM. Furthermore, the Twelfth Development Plan (2024–2028), approved on 31 October 2023, explicitly stated in Objectives 276 and 872 that carbon sink areas would be increased and expanded. With the enactment of Climate Law No. 7552 in 2025 and amendments made to the Forest Law, concepts such as "sink area," "embedded emissions," "carbon pricing," and "carbon sink

forest" were incorporated into the national legislation, and regulations concerning the management of these areas were introduced.

GIS-based analyses make it possible to determine carbon sink capacities over large areas, monitor temporal changes, and develop decision-support mechanisms for sustainable land management. Various methods exist for the spatial identification of areas with carbon storage potential using land use/land cover data, satellite imagery, and vegetation indices. In particular, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from satellite imagery is considered an important indicator for estimating carbon stocks.

The findings of this study indicate that the legal and institutional framework for the identification and management of carbon sink areas in Türkiye has begun to take shape since 2021. The study also highlights that forests, as well as wetlands, grassland–pasture ecosystems, and certain agricultural areas, constitute significant carbon sinks. Moreover, GIS and remote sensing technologies provide effective tools for the monitoring, conservation, and sustainable management of these areas.

Keywords: carbon sink areas, climate change, GIS, remote sensing, sustainable land management

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi'nden itibaren fosil yakıt kullanımının artması ve arazi kullanımındaki değişimler atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının yükselmesine neden olmuştur. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre, küresel sıcaklık artışının sınırlandırılabilmesi için karbon emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra doğal karbon yutaklarının korunması ve artırılması gerekmektedir (IPCC, 2023).

Karbon yutak alanları; atmosferden karbondioksiti uzaklaştırarak biyokütle ve toprakta depolayan ekosistemlerdir. Ormanlar, sulak alanlar, çayır-mera alanları ve tarım toprakları başlıca karbon yutakları arasında yer almaktadır. Bu alanların belirlenmesi ve izlenmesi, sürdürülebilir çevre yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır (IPCC, 2023).

Geleneksel arazi çalışmaları geniş alanlarda zaman ve maliyet açısından çeşitli kısıtlar içermektedir. Buna karşın Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojileri, karbon yutak alanlarının hızlı ve etkin biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Garge vd., 2026).

Türkiye'de karbon yutak alanı kavramı, iklim değişikliği politikalarının gelişmesiyle birlikte 2000'li yıllarda önem kazanmış; özellikle Kyoto Protokolü (2009) ve Paris İklim Anlaşması (2015) sonrasında ormancılık ve CBS tabanlı çevre çalışmalarının temel konularından biri haline gelmiştir.

2. TÜRKİYE'NİN TARAF OLDUĞU ULUSLARARASI KARBON POLİTİKALARI

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi: amacı ekosistemlerin iklim değişikliğine doğal olarak uyum sağlamasına olanak tanımak, gıda üretimini güvence altına almak ve sürdürülebilir ekonomik kalkınmayı desteklemek olan sözleşme, 1992 Rio Dünya Zirvesi'nde imzaya açılmış ve 1994 yılında yürürlüğe girmiştir (UN, 1992). Türkiye ise sözleşmeye 2004 yılında taraf olmuştur.

Sözleşmenin yürürlüğe girdiği 1994 yılından sonra her yıl taraflar konferansı düzenlenmektedir. Bu toplantılar kısaca "COP" olarak da adlandırılır. (*Conferences of the Parties*). Bu konferanslar arasında en önemlisi 1997 yılında düzenlenen üçüncü taraflar konferansıdır. Konferansta Kyoto Protokolü imzalanmıştır.

Kyoto Protokolü: amacı sanayileşmiş ülkelerin sera gazı salınımlarını 1990 seviyelerinin en az %5 altına çekmesini taahhüt ettirmek olan protokol 1997 yılında Japonya'da kabul edilerek 2005'te yürürlüğe girmiştir. Kyoto Protokolü 2020 yılında yerini Paris İklim Anlaşması'na bırakmıştır. Türkiye, bu protokole 2009 yılında taraf olmuştur (Resmî Gazete, 2009).

Paris İklim Anlaşması: amacı küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre 1.5°C seviyesinde sınırlamak olan anlaşma 12 Aralık 2015'te Paris'de düzenlenen BM İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP21) 195 ülke tarafından kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir. Türkiye, anlaşmayı 2016 yılında imzalamış ancak "gelişmekte olan ülke" kategorisinde yer alma talebi ve finansman mekanizmalarına erişim beklentileri nedeniyle onay sürecini bir süre bekletmiştir. Paris Anlaşması, 2021 yılında Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde (TBMM) onaylanarak resmen yürürlüğe girmiştir (URL-1, 2026).

COP (Taraflar Konferansı - Conference of the Parties): amacı iklim değişikliğiyle mücadelede küresel ilerlemeyi değerlendirmek, yasal bağlayıcılığı olan hedefler (örneğin Paris Anlaşması) koymak ve uluslararası politikaları müzakere etmek olan, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi uyarınca her yıl düzenlenen en üst düzey küresel iklim zirvesidir. Zirveler, küresel iklim krizini ele almak ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik stratejiler belirlemek için dünya liderlerini bir araya getirir. 2026 yılında 9-20 Kasım tarihleri arasında 31'incisi düzenlenecek olan Taraflar Konferansı'na (COP31) Türkiye (Antalya) ev sahipliği yapacaktır.

3. TEMEL MEVZUAT VE KURUMSAL YAPI

09.07.2025 tarihinde yürürlüğe giren 7552 sayılı İklim Kanunu ile yutak alan, gömülü emisyon ve karbon fiyatlandırma araçları gibi kritik terimler mevzuata dahil edilmiştir. Kanun kapsamında; karbon dengeleme mekanizmaları ile yutak alanların korunması ve geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, Orman Kanunu'nda yapılan

değişikliklerle, karbon yutak ormanları kavramı mevzuata girmiş ve bu alanların yönetimine dair düzenlemeler yapılmıştır. Yapılan değişiklikler, iklim finansmanı kapsamında yutak alanların iyileştirilmesini ve bu alanlardan elde edilen karbon kredilerinin değerlendirilmesini amaçlar.

Ülkemizde Karbon Yutak Alanlarının belirlenmesi ve yönetilmesi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülmektedir. Karbon yutak alanlarının oluşturulması ve ulusal hedefler doğrultusunda geliştirilmesi, Bakanlığa bağlı Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü bünyesindeki Yutak Alanlar Daire Başkanlığı tarafından planlanır ve koordine edilir. Yutak alanların envanterinin çıkarılması, korunması ve ulusal emisyon azaltım çalışmaları ise Bakanlık çatısı altında İklim Değişikliği Başkanlığı marifetiyle yönetilir.

31.10.2023 tarihinde onaylanan On İkinci Kalkınma Planı'nda karbon yutak alanlarının artırılması ve genişletilmesine yönelik hedeflere yer verilmiştir (Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023).

4. KARBON YUTAK ALANLARIN TESPİTİNDE CBS VE UZAKTAN ALGILAMA

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), karbon yutak alanlarının belirlenmesi, izlenmesi ve yönetilmesinde önemli bir karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Geleneksel arazi çalışmalarının geniş alanlarda zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle, CBS teknolojileri karbon depolama potansiyeline sahip alanların hızlı ve etkin bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

CBS uzaktan algılamanın karbon yutak alanların belirlenmesindeki başlıca rolleri şunlardır:

Mekânsal Verilerin Yönetimi: CBS; uydu görüntüleri, arazi kullanım/arazi örtüsü verileri, orman envanteri, sayısal yükseklik modelleri (DEM), toprak ve iklim verileri gibi farklı kaynaklardan elde edilen verilerin tek bir ortamda depolanmasını ve yönetilmesini sağlar (Jensen, 2015).

Karbon Yutak Alanlarının Haritalanması: ormanlar, sulak alanlar, çayır-mera alanları ve belirli tarım alanları gibi karbon depolama kapasitesine sahip ekosistemler CBS ortamında haritalanarak mekânsal dağılımları ortaya konulabilir.

Uzaktan Algılama Verilerinin Analizi: Sentinel-2 ve Landsat gibi uydu görüntülerinden elde edilen veriler CBS ortamına aktarılarak analiz edilebilir. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi vejetasyon indeksleri kullanılarak bitki yoğunluğu ve buna bağlı karbon depolama potansiyeli tahmin edilebilir (Tucker, 1979; ESA, 2024; USGS, 2024).

Arazi Kullanım Değişimlerinin İzlenmesi: CBS sayesinde farklı yıllara ait veriler karşılaştırılarak ormansızlaşma, kentleşme veya tarımsal genişleme gibi arazi kullanım değişikliklerinin karbon yutak alanları üzerindeki etkileri değerlendirilebilir (Liu vd., 2024).

Karbon Stoklarının Tahmini: biyokütle verileri ile mekânsal analizlerin birleştirilmesi sonucunda karbon stok haritaları üretilebilir. Bu haritalar, yüksek karbon depolama kapasitesine sahip alanların belirlenmesine yardımcı olur.

Karar Destek Süreçlerine Katkı Sağlaması: koruma önceliği taşıyan alanların belirlenmesi, ağaçlandırma çalışmalarının planlanması, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir arazi yönetimi politikalarının oluşturulması gibi süreçlerde karar vericilere bilimsel destek sunulur (Lin vd., 2026).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye'de 2021 yılından sonra karbon yutak alanların belirlenmesine yönelik hukuki ve kurumsal altyapının oluşturulmaya başlandığı, ormanlar başta olmak üzere sulak alanlar, çayır-mera alanları ve belirli tarım alanlarının önemli karbon yutak alanları olduğu, CBS ve uzaktan algılama teknolojilerinin bu alanların izlenmesi ve korunmasında etkin araçlar sunduğunu görülmektedir. Bu kapsamda temel öneriler aşağıdaki başlıklar halinde verilebilir:

- Orman alanlarının korunması ve artırılması gerekmektedir.
- Sulak alan kayıpları önlenmelidir.
- Kentsel yeşil alan planlamaları yaygınlaştırılmalıdır.
- Arazi kullanım değişimleri sürekli izlenmelidir.
- CBS tabanlı karbon izleme sistemleri geliştirilmelidir.
- Sentinel ve Landsat gibi uydu verileri düzenli kullanılmalıdır.
- Yapay zekâ destekli arazi örtüsü sınıflandırmaları yaygınlaştırılabilir.

- Drone ve LiDAR teknolojileri ile daha hassas karbon hesaplamaları yapılabilir.
- Yerel ölçekte karbon stok haritaları oluşturulmalıdır.
- Üniversite–kamu iş birlikleri artırılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. 2023. On İkinci Kalkınma Planı (2024–2028). Ankara: T.C. Cumhurbaşkanlığı.

European Space Agency (ESA), 2024. Sentinel-2 User Handbook. European Space Agency. Erişim adresi: https://sentinels.copernicus.eu

Garge S. K., Mohanta A., Nandkeolyar N., Malhi R. K., Rajput S., Oza K., Pandya U., Prajapati P. C., 2026. Advanced Geospatial Techniques and Remote Sensing Methods for Evaluating Carbon Capture and Storage. CRC Press.

IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jensen, J.R., 2015. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective (4th Edition). Pearson Education, New York.

Lin J., Gao X., Song X., Chang S., Li Q., 2026. Research progress on the interaction between forest carbon sequestration and climate change. Carbon Balance and Management 21, 83.

Liu L., Qu J., Gao F., Maraseni T. N., Wang S., Aryal S., Zhang Z., Wu R., 2024. Land Use Carbon Emissions or Sink: Research Characteristics, Hotspots and Future Perspectives. Land 13(3), 279.

Resmî Gazete, 2009. 5836 Sayılı Kyoto Protokolü'ne Katılmamızın Uygun Bulunduğuna Dair Kanun. Resmî Gazete, Sayı: 27144, 17 Şubat 2009, Ankara.

United Nations (UN), 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). New York, USA.

URL-1: Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, (2026). https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa

USGS, 2024. Landsat Missions. United States Geological Survey. Erişim adresi: https://www.usgs.gov/landsat-missions

SINIRLARI ZORLAYAN KENT: BODRUM ORMAN KAYIPLARI VE KENTSEL YAYILIMIN 24 YILLIK DİJİTAL KARNESİ

Anıl Yusuf AYTEKİN[1], Bekir TAŞTAN[2],

[1]Kastamonu Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 37150, Merkez, Kastamonu, anillayt09@gmail.com
[2]Dr. Ögr. Üyesi, Kastamonu Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, 37150, Merkez, Kastamonu, bekirtastan@kastamonu.edu.tr

ÖZET

Bodrum Yarımadası, son çeyrek asırda ikincil konut, turizm altyapısı ve kentsel alanların hızlı genişlemesi nedeniyle ciddi bir ekolojik baskı altına girmiştir. Bu çalışmanın temel amacı; 2001–2024 yılları arasında Bodrum Yarımadası'nda meydana gelen orman kayıplarını, kayıpların zamansal trendlerini ve kentsel saçılma (urban sprawl) ile olan mekânsal ilişkisini Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleriyle bütüncül olarak ortaya koymaktır.

Çalışmanın iş akışı ve teknik metodolojisi ArcGIS Pro yazılımı üzerinde yürütülmüştür. Veri seti olarak 30 m mekânsal çözünürlüklü Hansen Global Forest Change (v1.12) zaman serisi, Esri Living Atlas 10 m çözünürlüklü Sentinel-2 LULC (Arazi Kullanımı/Örtüsü) katmanları ve OpenStreetMap (OSM) vektör ulaşım ağları kullanılmıştır. İş akışı kapsamında sırasıyla; Hansen verisinden orman kayıp yılları özet istatistik tablosuna dönüştürülmüş (Summary Statistics), OSM yol ağlarına 200 m sabit tampon (Buffer) uygulanarak clip ve raster calculator araçlarıyla kesilmiş, son aşamada ise Hansen kayıp pikselleri ile Sentinel-2 LULC katmanı Tabulate Area (Alan Tablolama) matrisi üzerinden çakıştırılmıştır.

24 yıllık analiz dönemi sonucunda Bodrum Yarımadası genelinde toplam 14.288,52 ha orman alanının kaybedildiği tespit edilmiştir. Zamansal analizler, kayıpların tekdüze olmadığını; büyük yangınlar ve kentsel müdahalelerle 2006 (%23,2 – 3.315 ha) ve 2021 (15,8 – 2.257 ha) yıllarında tepe noktasına ulaştığını kanıtlamıştır. Ulaşım koridorlarının ekolojik parçalanma üzerindeki etkisini ölçen 200 m yol tampon analizi, toplam kayıpların %24,31'lık kısmının (3.473,49 ha) doğrudan ana yol ağlarının çeperinde meydana geldiğini göstermiştir. Tabulate Area matris sonuçları ise orman vasfını yitiren bu alanların Esri Living Atlas LULC katmanındaki kentsel/yapılı çevre (Built-up) ve tahrip edilmiş çalı/açık alan sınıflarıyla doğrudan örtüştüğünü doğrulamıştır. Elde edilen bulgular, ulaşım ağlarının kentsel sızmayı tetikleyen ana mekânsal sürücü olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: ArcGIS Pro, bodrum yarımadası, esri living atlas, hansen gfc, orman kaybı

ABSTRACT

BOUNDARIES OF URBAN SPRAWL: A 24-YEAR DIGITAL REPORT CARD OF FOREST LOSS AND URBANIZATION IN BODRUM

The Bodrum Peninsula has been subjected to severe ecological pressure over the last quarter-century due to the rapid expansion of secondary housing, tourism infrastructure, and urban areas. The primary objective of this study is to comprehensively analyze the spatial and temporal dynamics of forest loss on the Bodrum Peninsula between 2001 and 2024, evaluating its relationship with topographic slope and urban sprawl fragmentation using GIS and Remote Sensing techniques. The technical workflow was executed in ArcGIS Pro. The dataset integrated Hansen Global Forest Change (v1.12) time-series data at 30 m spatial resolution, 10 m Esri Living Atlas Sentinel-2 LULC layers, and OpenStreetMap (OSM) road networks. Digital Elevation Models (DEM) were utilized in ArcGIS Pro 3D Local Scenes to evaluate topographic constraints. The analytical process involved generating loss summary statistics, applying 200 m fixed road buffers, and executing Tabulate Area cross-tabulation matrices between Hansen loss pixels and Sentinel-2 LULC classes. Over the 24-year period, a total forest loss of 14,288.52 ha was detected. Temporal analysis revealed major loss peaks in 2006 (23.2% – 3,315 ha) and 2021 (15.8% – 2,257 ha). 3D DEM modeling proved that urban encroachment dominated low-slope (0-15°) forest zones, while road construction degraded high-slope hillside forest integrity. The 200 m buffer analysis revealed that 24.31% (3,473.49 ha) of forest loss occurred within immediate road corridors, amplifying edge effects and ecosystem fragmentation.

Keywords: ArcGIS Pro, Bodrum peninsula, esri living atlas, forest loss, hansen gfc

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kıyı alanları ve turizm destinasyonları, dünyada ve Türkiye'de kentsel saçılma (urban sprawl) baskısının en belirgin hissedildiği hassas ekosistemlerdir. Akdeniz havzasında yer alan Bodrum Yarımadası, 2000'li yılların başından itibaren ikincil konut talebi, turizm tesislerinin yaygınlaşması ve ulaşım ağlarının genişlemesiyle dramatik bir arazi kullanımı değişimi yaşamaktadır. Kentin doğal sınırlarını zorlayan bu hızlı kentsel yayılım; biyolojik çeşitlilik kaybı, habitat parçalanması (fragmentation) ve orman alanlarının kalıcı olarak yapılı çevreye dönüşmesi gibi ciddi ekolojik sorunları beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı; Bodrum Yarımadası'nda 2001–2024 yılları arasında gerçekleşen orman kayıplarını nicel ve zamansal boyutta belirlemek, kentsel saçılmanın orman dokusu üzerindeki baskısını 3D topoğrafik ve mekânsal tampon analizleriyle ortaya koymaktır. Çalışma, uydu verilerinin ve mekan istatistiklerinin entegrasyonuyla 24 yıllık bir ekolojik bilanço çıkarma niteliğindedir.

2. VERİ SETİ VE YÖNTEM

Çalışmanın teknik metodolojisi ve veri işleme mimarisi ArcGIS Pro platformunda gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde dört temel veri seti entegre edilmiştir:

- ***Hansen Global Forest Change (v1.12):*** 2001–2024 yıllarını kapsayan 30 m mekânsal çözünürlüklü yıllık orman örtüsü kayıp verileri (Landsat tabanlı).
- ***Esri Living Atlas Sentinel-2 LULC:*** 2024 yılına ait 10 m yüksek çözünürlüklü Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü katmanı (Built Area, Crops, Trees, Bare Ground vb.).
- ***OpenStreetMap (OSM) Vektör Ağları:*** Ulaşım hatları, koridorlar ve aks analizi için kullanılan yol veri seti.
- ***Sayısal Yükseklik Modeli (DEM):*** Yarımadanın 3D Local Scene modellerini oluşturmak.

2.1. İş Akışı ve CBS Analiz Teknikleri

Özet İstatistikler ve Zaman Serisi: Hansen orman kayıp piksel verileri çalışma alanı sınırına göre maskelenmiş ve Summary Statistics aracı kullanılarak 2001–2024 yılları arasındaki yıllık kayıp miktarları (hektar) çıkarılmıştır.

Mekânsal Tampon ve Çakıştırma: Ulaşım ağlarının sızma etkisini ölçmek amacıyla OSM yol verilerine 200 m sabit mesafeli tampon (Buffer) uygulanmış; Clip ve Raster Calculator araçlarıyla 200 m yol koridorunda kalan kayıp miktarı nicelleştirilmiştir.

Tabulate Area Matrisi: Hansen 30 m kayıp katmanı ile Esri Living Atlas 10 m LULC katmanı Tabulate Area (Alan Tablolama) matrisinde çakıştırılarak kaybolan ormanların günümüzde hangi arazi kullanım sınıfına (yapılı çevre / açık alan) dönüştüğü belirlenmiştir.

3D DEM Modelleme ve Eğim Analizleri: Topoğrafik engellerin ve eğim sınıflarının kentsel yayılmaya olan direncini analiz etmek için Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) üzerinden eğim (Slope) haritaları üretilmiş ve ArcGIS Pro Local Scenes ortamında 3D görselleştirmeler yapılmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Bodrum Yarımadası'nda 2001–2024 yılları arasında yaşanan orman kayıplarını ve kentsel saçılmanın mekânsal dinamiklerini Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) entegrasyonuyla 24 yıllık bir zaman serisi üzerinden incelemiştir.

Elde edilen analitik bulgular ve ekolojik değerlendirmeler şu temel sonuçları ortaya koymaktadır:

- ***Ekolojik Tahribatın Boyutu:*** 24 yıllık dönemde yarımada genelinde toplam **14.288,52 ha** orman alanı kaybedilmiştir. Kayıpların zamansal dağılımı tekdüze olmayıp, özellikle **2006 (%23,2 – 3.315 ha)** ve **2021 (%15,8 – 2.257 ha)** yıllarında büyük orman yangınları ve kentsel müdahalelerle ekstrem seviyelere ulaşmıştır.
- ***Ulaşım Koridorlarının Katalizör Etkisi:*** Yol ağlarına uygulanan 200 m tampon (buffer) analizi, net kayıpların **%24,31'lik kısmının (3.473,49 ha)** doğrudan ana ulaşım aksları ve ikincil yolların çeperinde gerçekleştiğini kanıtlamıştır. Ulaşım hatları orman bütünlüğünü parçalayarak "kenar etkisini" (edge effect) artırmış ve insan kaynaklı sızma riskini orman içlerine taşımıştır.
- ***Arazi Örtüsü Dönüşümü ve İmar Baskısı:*** Esri Living Atlas Sentinel-2 LULC ve Hansen verilerinin matris çakıştırması (Tabulate Area), orman vasfını yitiren alanların doğal yenilenme sürecine giremeden ağırlıklı olarak kentsel/yapılı çevre (Built-up) ve tahrip edilmiş açık alan sınıflarına dönüştüğünü doğrulamıştır. 3D DEM analizleri ise kentsel saçılmanın özellikle 0−15◦ eğim aralığındaki düşük topoğrafyayı tamamen domine ettiğini göstermiştir.

Uygulamaya Yönelik Öneriler

Yasal "Yeşil Kuşak" Koruma Sınırları: Kıyı şeridinde ve orman çeperlerinde devam eden lineer kentsel yayılımı durdurmak amacıyla yarımada ölçeğinde bağlayıcı yeşil kuşak sınırları tanımlanmalıdır.

***Ekolojik Koridor ve Ulaşım Planlaması*:** Yeni ulaşım aksı planlamalarında orman bloklarının parçalanmasını önleyecek ekolojik etki değerlendirmeleri yapılmalı, koridor bütünlüğü korunmalıdır.

Yüksek Çözünürlüklü Dijital Takip: Orman kayıplarının ve yangın sonrası alanların kentsel kullanıma dönüşmesini engellemek adına CBS ve uydu zaman serisi tabanlı izleme sistemleri yerel yönetimlerin karar destek süreçlerine entegre edilmelidir.

Ekolojik Yol Çeperi ve Kenar Etkisi Yönetimi: 200 m yol tampon analizinde ortaya çıkan %24,3'lük tahribatı önlemek amacıyla, ana ulaşım akslarının çeperindeki 200 m 'lik hat "Tampon Koruma Bölgesi" ilan edilmeli; yol kenarı ikincil yapılaşmalar ve ticari sızmalar yasal yaptırımlarla kısıtlanmalıdır.

Biyolojik Yenilenme (Rejenerasyon) Koridorları: Tabulate Area matrisinde "Açık Alan / Tahrip Alan" olarak kalan ve henüz tamamen betonlaşmamış alanlarda, parçalanmış orman bloklarını birbirine bağlayan "Ekolojik Bağlantı Koridorları" tasarlanmalı ve yerel türlerle aktif ağaçlandırma çalışmaları yürütülmelidir.

Yerel Karar Destek ve Uydu İzleme Sistemleri (Karar Vericiler İçin): Bodrum Belediyesi ve Muğla Büyükşehir Belediyesi bünyesinde, uydu zaman serileriyle (Sentinel-2, Planet vb.) kaçak yapılaşma ve orman tahribatını aylık periyotlarla otomatik tespit eden CBS tabanlı erken uyarı sistemleri kurulmalıdır.

KAYNAKÇA

Esri (2024). *Sentinel-2 Land Use/Land Cover (LULC) 10m Time Series*. Esri Living Atlas of the World. https://livingatlas.arcgis.com

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., & Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853. (Data updated to v1.12, 2024).

ALOS PALSAR High Resolution Radiometrically Terrain Corrected (RTC) DEM 12.5m [Data set]. Japan Aerospace Exploration Agency / Alaska Satellite Facility.

OpenStreetMap Contributors (2024). *Planet dump [Data file of road networks for Bodrum/Turkey]*. OpenStreetMap Foundation. https://www.openstreetmap.org

GNSS VADASE YÖNTEMİ İLE İVMEÖLÇERLERDEN ELDE EDİLEN YER DEĞİŞTİRMELERİN KO-SİSMİK ENERJİ KARŞILAŞTIRMASI

Muhammed Ali AYTEMÜR[1], Mualla YALÇINKAYA [2],

[1]Öğr. Gör., Bayburt Üniversitesi, Aydıntepe Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 69000 Aydıntepe, Bayburt, muhammedaliaytemur@bayburt.edu.tr
[2]Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Ortahisar, Trabzon, mualla@ktu.edu.tr

ÖZET

Kuvvetli yer hareketlerinin belirlenmesinde ivmeölçerler yüksek örnekleme aralıkları sayesinde dinamik hareketleri yakalamada önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte tek alıcılı varyometrik GNSS yaklaşımı (VADASE), tam sayı faz belirsizliği çözümüne ve harici ağ düzeltmelerine ihtiyaç duymadan ivmeölçerler gibi yer kabuğu hareketlerini, hız ve yer değiştirme kestirimi sağlayan belirleyebilen bir yöntemdir. Son yıllarda Türkiye'de meydana gelen Mw≥5.9 büyüklüğündeki altı deprem anında kaydedilen 1 Hz'lik GNSS verileri kullanılarak VADASE çözümüyle yer değiştirme sinyalleri elde edilmiştir. GNSS istasyonlarıyla eş-konumlu veya yakın konumda bulunan yüksek örnekleme hızına sahip (≥ 100) ivmeölçerlerden 1 Hz örnekleme aralığına sahip yer değiştirme sinyalleri elde edilmiştir. VADASE yöntemiyle elde edilen yer değiştirme yer değiştirme sinyallerinin içerdiği spektral enerji ve sinyal kalitesi ivmeölçer sinyalleri referans alınarak karşılaştırılmıştır.

Analizler kapsamında her bir istasyonun üç bileşeni (E, N, U) için Sinyal-Gürültü Oranı (SNR), Welch tabanlı Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) ve sismolojik önem taşıyan 0-0.5 Nyquist frekans bandındaki toplam enerji dağılımları ile bağıl enerji oranları belirlenmiştir. İncelenen GNSS istasyonlarında SNR değerlerinin yatay bileşenlere kıyasla düşey bileşende daha düşük kalması GNSS gözlem geometrisinin düşey eksendeki gürültü hassasiyetini VADASE yönteminde de doğrulamaktadır. Ayrıca orta büyüklükteki depremlerde SNR oranının düşük olması VADASE'nin ivmeölçere göre ko-sismik andaki enerji oranını oldukça yüksek olduğu görülmüştür. VADASE yönteminin yeterli sismik sinyal gücü (yüksek SNR) sağlandığında 0-0.5 frekans bandındaki yer değiştirme enerjisini güvenilir şekilde temsil edebildiğini, düşük sinyal seviyelerinde ise gürültü etkisinin spektral enerji dengesini bozduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: GNSS-VA, ivmeölçer, PSD Enerji, SNR, yer değiştirme

ABSTRACT

CO-SEİSMİC ENERGY COMPARİSON OF DİSPLACEMENTS DERİVED FROM GNSS VADASE AND ACCELEROMETERS

Accelerometers are particularly suited to capturing dynamic ground motions due to their high sampling rates and therefore play an important role in strong ground motion characterization. In contrast, the single-receiver Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine (VADASE) is a method capable of estimating ground motions, velocities, and displacements without requiring integer ambiguity resolution or external network corrections. In this study, displacement signals were obtained using the VADASE solution from 1 Hz GNSS data recorded during six earthquakes of Mw ≥ 5.9 that occurred in Türkiye in recent years. Displacement signals with a sampling interval of 1 Hz were also derived from high-sampling-rate accelerometers located at collocated or nearby positions with respect to the GNSS stations. The spectral energy and signal quality of the displacement signals derived using VADASE were compared with those of the accelerometer-derived signals taken as the reference.

Within the scope of the analysis, for each of the three components (E, N, and U) at each station, the Signal-to-Noise Ratio (SNR), Welch-based Power Spectral Density (PSD), total energy distribution within the seismologically relevant 0–0.5 Hz Nyquist frequency band, and relative energy ratios were determined. The lower SNR values observed in the vertical component compared with the horizontal components indicate that the greater sensitivity of GNSS observations to noise in the vertical direction is also reflected in the VADASE results. Furthermore, the relatively low SNR observed for moderate-magnitude earthquakes was associated with substantially higher relative energy contributions from the VADASE-derived signals during the co-seismic phase compared with the accelerometer-derived signals. The results indicate that VADASE can reliably represent displacement energy within the 0–0.5 Hz frequency band when sufficient seismic signal strength (high SNR) is available, whereas at low signal levels, noise effects can distort the spectral energy balance.

Keywords: GNSS-VA, accelerometer, PSD energy, SNR, displacements

1. GİRİŞ

Deprem yer hareketlerinin doğru bir şekilde izlenmesi, yalnızca sismik analiz için değil, aynı zamanda yapı mühendisliği, toprak dinamiği ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi için de kritik öneme sahiptir. Bu tür hareketlerin belirlenmesinde, özellikle son yıllarda, uzay tabanlı jeodezik sistemler ön plana çıkmıştır. Depremlerin ko-sismik yer değiştirmeleri yaygın olarak ivmeölçerlerle belirlenir. Bu bağlamda, seçilen depremlerin neden olduğu ko-sismik yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla, GNSS istasyonlarına yakın konumda bulunan ve AFAD-TADAS kapsamında işletilen ivmeölçer istasyonlarında deprem sırasında kaydedilen ivme verileri kullanılmıştır. Bu veriler işlenerek ko-sismik yer değiştirme zaman serileri elde edilmiştir. AFAD-TADAS tarafından kullanılan ivmeölçer sistemleri, üç bileşenli ölçümler yapabilen yüksek hassasiyetli kuvvet dengeli sensörlere dayanmaktadır. Üç bileşenli ölçümler yapabilen Mikro-Elektro-Mekanik Sistem (MEMS) ivmeölçerler hem kullanım kolaylığı hem de cihazlara doğrudan monte edilebilmeleri nedeniyle günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Elektronik ve mikroelektronik devrelerden oldukça farklı olan MEMS cihazları, elektronik ve mekanik bileşenlerin birleşimidir (Fujita, 1997; Mishra vd., 2019; Peng vd., 2017)

Gerçek zamanlı sismik izlemede kullanılan geleneksel GNSS yöntemlerinden Hassas Nokta Konumlandırma (PPP), uzun yakınsama süresi ve hassas yörünge/saat ürünlerine bağımlılığı nedeniyle; GNSS gerçek zamanlı kinematik (RTK) ise deformasyon bölgesi dışında güvenilir bir referans istasyonu ve kısa baz hattı zorunluluğu sebebiyle kısıtlamalara sahiptir. Bu sınırlamalara yanıt olarak, Roma Sapienza Üniversitesi Jeodezi ve Jeomatik Bölümü, Yer Değiştirme Analizi için Varyometrik Yaklaşım Bağımsız Motorunu (VADASE) geliştirmiştir (VADASE) geliştirmiştir (Colosimo vd., 2011). VADASE yaklaşımı, yayınlanan (broadcast) efemeris verilerini ve taşıyıcı faz gözlemlerini kullanarak, ardışık ölçümler arasındaki faz farklarından GNSS alıcısının anlık hız vektörünü ve alıcı saat hatası değişimini doğrudan kestirebilir; böylece hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymadan çalışabilir. Bu bağlamda yöntem, ardışık faz gözlemleri farkını almadan önce iyonosfer etkisinden arındırılmış doğrusal kombinasyonlu faz gözlemlerini oluşturur (Colosimo vd., 2011; Branzanti vd., 2013).

Depremlerin ko-sismik yer değiştirmeleri yaygın olarak ivmeölçerlerle belirlenir. Bu bağlamda, seçilen depremlerin neden olduğu ko-sismik yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla, GNSS istasyonlarına yakın konumda bulunan ve AFAD-TADAS kapsamında işletilen ivmeölçer istasyonlarında deprem sırasında kaydedilen ivme verileri kullanılmıştır

Bu çalışma kapsamında analizler her bir istasyonun üç bileşeni (E, N, U) için Sinyal-Gürültü Oranı (SNR), Welch tabanlı Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) ve sismolojik önem taşıyan 0-0.5 Nyquist frekans bandındaki toplam enerji dağılımları ile bağıl enerji oranları belirlenmiştir. İncelenen GNSS istasyonlarında SNR değerlerinin yatay bileşenlere kıyasla düşey bileşende daha düşük kalması GNSS gözlem geometrisinin düşey eksendeki gürültü hassasiyetini VADASE yönteminde de doğrulamaktadır. Ayrıca çalışmada kullanılan orta büyüklükteki depremlerde SNR oranının düşük olması VADASE' nin ivmeölçere göre ko-sismik andaki enerji oranını oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİ VE VERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde meydana gelmiş, moment büyüklükleri $5.9 \leq Mw \leq 7.7$ arasında değişen altı deprem, VADASE yönteminin spektral alandaki performansını farklı sismotektonik koşullar altında değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Deprem kayıtları ve parametreleri, Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilen Türkiye Deprem Kayıt Sistemi/Türk Deprem Veri Merkezi kapsamında sunulan Türk Deprem İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (AFAD-TADAS) üzerinden elde edilmiştir. Deprem merkez üslerine farklı uzaklıklarda bulunan ve mümkün olduğunca yüksek hızlı GNSS istasyonlarıyla aynı veya yakın konumda olan ivmeölçer istasyonları seçilmiştir. Çalışmada kullanılan olaylar; Kahramanmaraş (Pazarcık, 06/02/2023, Mw=7.7; Elbistan, 06/02/2023, Mw=7.6), Gaziantep (Nurdağı, 06/02/2023, Mw=6.6), İzmir (Seferihisar, 30/10/2020, Mw=6.6), Balıkesir (Sındırgı, 27/10/2025, Mw=6.1) ve Malatya (Kale, 16/10/2024, Mw=5.9) depremleridir. Seçilen bu depremler, doğrultu atımlı ve normal faylanma başta olmak üzere farklı faylanma mekanizmaları ile değişken tektonik levha sınır etkileşimlerini içermeketedir (Çizelge 1, Şekil 1).

Çizelge 1. Deprem bilgileri ve faylanma mekanizması.

Depremler	Tarih	Saat (UTC)	Enlem (°)	Boylam (°)	Mw	Derinlik (km)
Kahramanmaraş, Pazarcık	06/02/2023	01:17:35	37.2186	37.0726	7.7	8.6
Kahramanmaraş, Elbistan	06/02/2023	10:24:48	38.0134	37.1833	7.6	7.0
Gaziantep, Nurdağı	06/02/2023	01:28:15	37.3054	36.9201	6.6	6.2
İzmir, Seferihisar	30/10/2020	11:51:27	37.9051	26.7559	6.6	14.9
Balıkesir, Sındırgı	27/10/2025	19:48:28	39.19694	28.20056	6.1	6.07
Malatya, Kale	16/10/2024	07:46:32	38.36583	38.80861	5.9	10.48

Çizelge 1'de, seçilen depremlerin konumları, büyüklükleri, derinlikleri ve tektonik ortamları da dahil olmak üzere temel özelliklerini özetlemektedir. Tektonik ortamların çeşitliliği, VADASE yönteminin performansının farklı sismik koşullar altında değerlendirilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Seçilen depremlerin merkez üslerinin konumları ve büyüklükleri.

Her bir deprem için için, sürekli gözlem yapan en yakın GNSS istasyonu ve karşılaştırılabilir bir mesafe aralığındaki karşılık gelen bir ivmeölçer istasyonu belirlemiştir. Yer değiştirme genliklerinin güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamak için GNSS ve ivmeölçer istasyonları birbirine oldukça yakın olan istasyonlar seçilmiştir. Bu istasyonların GNSS verileri TUSAGA-Aktif ağından temin edilirken, ivmeölçer kayıtları AFAD-TADAS (AFAD 2023) ile Avrupa Kuvvetli Yer Hareketi Veritabanı (ESM) üzerinden erişilen Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü ağından elde edilmiştir (Çizelge 2) (KOERI 2023; Luzi vd., 2016).

Çizelge 2. GNSS ve ivmeölçer istasyonları ve bu istasyonların merkez üssü ile olan ilişkileri.

Depremler	GNSS İstasyonu	GNSS-Deprem Merkez Üssü Mesafesi (km)	Deprem Merkez Üssü-GNSS Azimut (°)	İvmeölçer İstasyonu	İvmeölçer-Deprem Merkez Üssü Mesafesi (km)	Deprem Merkez Üssü-İvmeölçer Azimut (°)	GNSS-İvmeölçer Mesafesi (km)
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	302	45	6201	298	45	4
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	145	182	7901	145	182	0.03
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	48	118	2703	47	126	6.4
İzmir, Seferihisar	CESM	60.6	320	CESE	62	320	1.3
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	43	115	4504	43	115	0.03
Malatya, Kale	ELAZ	50	51	2311	43	44	9

Deprem merkez üssünden, GNSS ve ivmeölçer istasyonları arasındaki azimut farkı (ΔBAZ) yalnızca 0°- 8° arasında değişmektedir. Böylece bu düşük açısal sapma, her iki sensörün de odak mekanizması radyasyon paternini ve sismik

dalga yayılımını neredeyse aynı yayılma doğrultusu boyunca örneklediğini, dolayısıyla yer değiştirme dalga formlarının yön bağımlı etkilerden arındırılarak doğrudan karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir.

3. YÖNTEM

3.1 GNSS VADASE Yöntemi

GNSS varyometrik yaklaşımı, tam sayı faz belirsizliği çözümüne ihtiyaç duymadan ham taşıyıcı faz ölçümlerini işleyerek alıcının anlık hızlarını kestiren bir algoritmaya dayanır. Yeryüzü sabit koordinat sisteminde (ECEF) GNSS alıcı hızlarını belirleyebilen VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yöntemi, Colosimo vd. (2011) tarafından geliştirilmiş olup hız serilerinin zamana göre integraliyle yer değiştirmeleri türetir. Bu yaklaşımda, ardışık epoklar arasındaki iyonosferden arındırılmış (ionosphere-free) taşıyıcı faz farkları temel gözlem büyüklüğü olarak tanımlanır. Kestirilen hızların zaman boyunca integre edilmesiyle yüksek zamansal çözünürlüklü dinamik yer değiştirme zaman serileri oluşturulur. Ayrıca VADASE, faz belirsizliğinin zaman farkıyla elenmesi, sıfır yakınsama (convergence) süresi, tek alıcıyla bağımsız çalışabilme ve gerçek zamanlı harici hassas yörünge/saat düzeltmelerine bağımlı olmama gibi belirgin operasyonel avantajlar sunar. İntegrasyon aşamasında doğrusal olmayan taban çizgisi kaymalarından (baseline drift) etkilenen klasik ivmeölçerlerin aksine VADASE, taban çizgisi bozulması yaşamadan uzun periyotlu ko-sismik yer değiştirme trendlerini doğrudan belirleyebilir. Bu yüzden harici veri akışı ya da merkezi bir veri işleme altyapısına gereksinim duymadan yerel olarak çalışabilmesi sayesinde VADASE, doğrudan GNSS alıcı yazılımlarına gömülü olarak entegre edilme potansiyeline sahiptir. Bu durum; deprem erken uyarı sistemleri, yerel sismik izleme ağları ve yapı sağlığı izleme uygulamaları için güçlü bir operasyonel çözüm sunmaktadır. VADASE' nin zaman farkı alınmış faz gözlemleri ve kurulan matematiksel modelleme, standart GNSS taşıyıcı faz gözlem denklemine dayanmaktadır.

VADASE yönteminde birinci dereceden iyonosferik gecikme hataları, iyonosfersiz (ionosphere-free) doğrusal kombinasyon uygulanarak elenir. Bu yaklaşım, tek frekanslı ve birleştirilmemiş zaman farkı gözlemlerine kıyasla modellenemeyen zamana bağlı iyonosferik değişimlerin neden olduğu uzun periyotlu (sıfır frekansa yakın) yer değiştirme sapmalarını ortadan kaldırır. Ardışık epoklar arasındaki iyonosfersiz faz gözlem farklarının türetilmesiyle elde edilen bu fonksiyonel model, Colosimo (2012) tarafından varyometrik denklem olarak tanımlanmış olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\alpha\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L1}+\beta\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L2}=e_r^s\bullet\Delta\xi_r+c\,\Delta\delta t_r-c\,\Delta\delta t^s+\left[\Delta\rho_r^s\right]_{\mathrm{OR}}+\left[\Delta\rho_r^s\right]_{EtOl}+\Delta T_r^s+\Delta p_r^s+\Delta m_r^s+ \quad (1)$$

Burada λ taşıyıcı faz dalga boyu; r alıcıyı; s uyduyu; ϕ_r^suydu ile alıcı arasındaki faz ölçümünü; c ışık hızını; cδtr alıcı saat hatasını; cδts uydu saat hatasını; Δp_r^s uydu ve alıcı ile ilgili ek etkilerin toplamını, yani; alıcı ve uydu donanım faz sapmalarını, alıcı ve uydu faz merkezi kaymalarını, taşıyıcı faz kaymasını, ayrıca geometrik mesafe ve uydu saati üzerindeki göreceli etkileri; Δm_r^s çoklu yol hatasını ve $\Delta\varepsilon_r^s$ölçüm gürültüsünü ifade eder. ϕ_r^s, Uydu ile alıcı faz ölçümünü, α ve β katsayıları, iyonosfer-free kombinasyonunda L1 ve L2 taşıyıcı faz gözlemlerine uygulanan ağırlık katsayılarını ifade eder. Δ, ardışık ölçüm dönemleri arasındaki gözlem ve model parametrelerinin değişimini ifade eden fark operatörüdür. Katsayılar, yani $\alpha=f_{L1}^2/\left(f_{L1}^2-f_{L2}^2\right)$ve $\beta=-f_{L2}^2/\left(f_{L1}^2-f_{L2}^2\right)$, $\alpha\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L1}+\beta\left[\lambda\,\Delta\phi_r^s\right]_{L2}$iyonosferden arındırılmış faz gözlemlerinin zaman farklarını temsil eder. Δ, ardışık ölçüm dönemleri $(t,t+1)$ arasındaki gözlemleri ve model parametrelerini ayıran fark operatörünü ifade eder. $\left[\Delta\rho_r^s\right]_{\mathrm{OR}}$, alıcı ve uydu arasındaki geometrik mesafenin zaman içindeki değişimini ((ρ_r^suydunun yörünge hareketi ve Dünya'nın Dünya merkezli bir çerçevedeki dönüşü nedeniyle) ifade eder. Benzer şekilde, ardışık dönemlerdeki geometrik mesafedeki zaman içindeki değişim, Dünya gelgitleri ve okyanus yüklemesi nedeniyle de meydana gelir ve $\left[\Delta\rho_r^s\right]_{EtOl}$ ile gösterilir. (McCarthy ve Petit, 2004; Fratarcangeli vd., 2018a; Fratarcangeli vd., 2018b). Ek olarak, ECEF'deki alıcının Dünya merkezli konum yer değiştirmesi, 3 boyutlu hız vektörü $\Delta\xi r$, geometrik mesafenin boyutunda değişmesine neden olur; $e_r^s\bullet\Delta\xi_r$burada e_r^s, alıcı yer değiştirme vektörünü gözlem görüş hattına eşlemek için kullanılan alıcıdan uyduya birim vektördür. Zamandaki küçük bir değişikliği dikkate alarak, troposferik gecikmedeki fark basitçe ΔT_r^s, ardışık ölçüm dönemleri arasındaki troposferik gecikme değişimini ifade eder. Küçük zamansal değişimler için troposferik gecikmedeki bu fark formüle edilebilir. $ZTD\left[1/cos\left(Z_r^s(t+1)\right)-1/cos\left(Z_r^s(t)\right)\right]$ Saastamoinen (1972) modelinden elde edilen hidrostatik ve ıslak bileşenlerin toplamından türetilmiştir. Zenit hidrostatik kısmının hesaplanması için yüzey toplam basınç değerleri, örneğin küresel basınç sıcaklık modeli GPT3'ten (Landskron ve Böhm, 2018) türetilebilir. Z_r^s , alıcıdan uyduya olan zenit açısıdır.

3.2 İvmeölçer Verilerinin Değerlendirilmesi

Yerin dinamik hareketini tespit etmede, yer ve yapılardaki sismik dalgaların genliğini tespit etmek için kullanılan en geçerli yöntemlerden biri, ivmeölçerlerden elde edilen ivme kayıtlarıdır. Bir deprem sırasında ölçülen ivme, depremin yer veya yapılara uyguladığı kuvveti anlamak için önemlidir (Ateş vd., 2019; Kramer 1996; Ates ve Uyanik, 2023; Trifunac 2016). İvmeölçerler, birim zamandaki hız değişimini ölçen, referans noktası gerektirmeyen ve tipik olarak dinamik ölçümler için kullanılan sensörlerdir (Tu vd., 2013).

AFAD-TADAS ve ESM veri merkezinden elde edilen ivmeölçer verilerinin baseline düzeltmesi ve filtreleme işlemleri tamamlanarak sunulmaktadır. İstasyonların filtrelenmiş ivme kayıtları üzerinde her hangi bir filtreleme işlemine gerek kalmamıştır. Bu sinyaller MEMS ivmeölçer kayıtlarından çıktığı için HNE, HNN ve HNZ şeklinde otogonal yönler kullanırlar. Böylece ivme kayıtları ile GNSS sinyalleri aynı yönelimde kullanılabilmektedir. İstasyonlardan elde edilen her bir ivmeölçerin trendden arındırılmış ivme sinyaline "çift entegrasyon" uygulanarak bir yer değiştirme zaman serisi elde edilmelidir. Bu bağlamda, ivme verilerinin çift integrasyonu ile dinamik yer değiştirmeler Denklem(2) ve Denklem(3) kullanılarak elde edilebilir.

$$v(t) = \int_0^t a(t)\,dt + v_0 \tag{2}$$

$$d(t) = \int_0^t v(t)\,dt + d_0 \tag{3}$$

Burada , a , $v_0$ve d_0sırasıyla ilk ivmeyi, ilk hızı ve ilk yer değiştirmeyi temsil eder; t ise zamanı (Chopra 2012; Paziewski vd., 2020) gösterir.

4. GNSS VADASE VE İVMEÖLÇER VERİLERİNİN KO-SİSMİK SPEKTRAL KARŞILAŞTIRILMASI

4.1. GNSS VA İle İvmeölçer Yer Değiştirmelerinin Karşılaştırılması

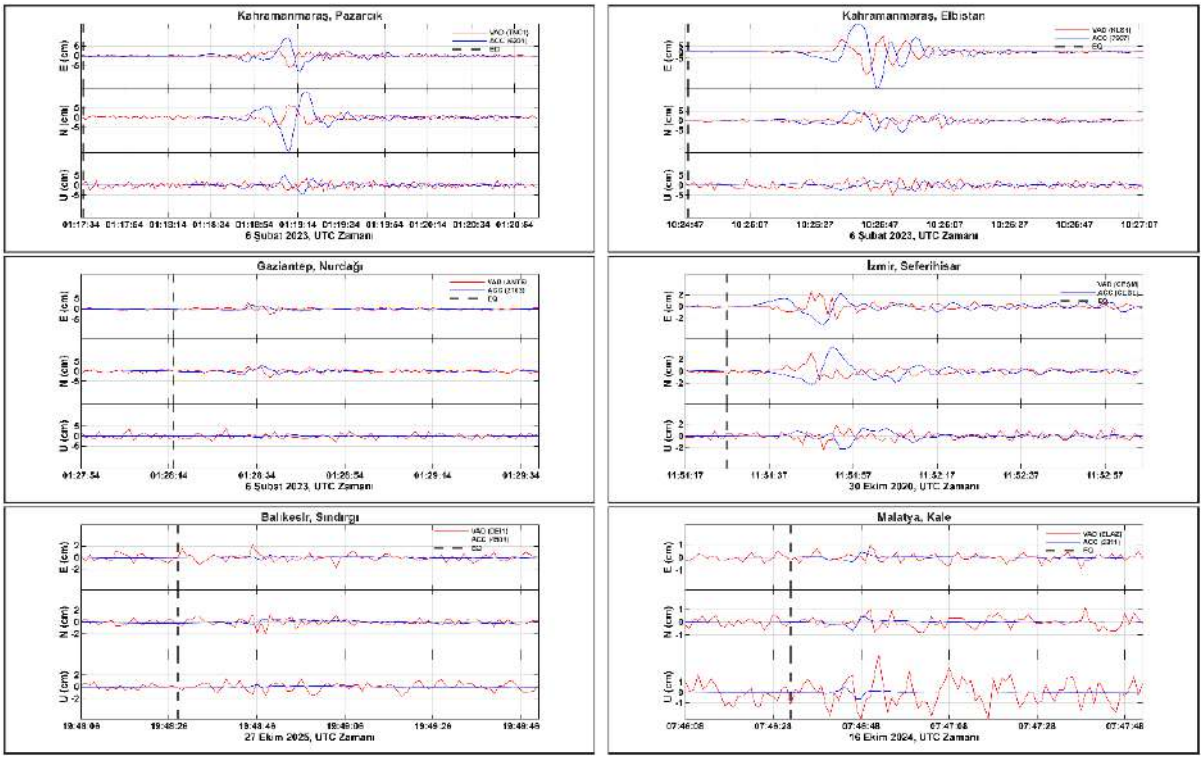
GNSS istasyonlarına ait ölçüm verilerinden ko-sismik hareketler, MATLAB ortamında geliştirilmiş açık kaynaklı PPPH-VA yazılımı ile varyometrik yaklaşım (VA) kullanılarak belirlenmiştir (Bahadur vd., 2023). Böylece Denklem (1)'de sunulan matematiksel model doğrultusunda, GNSS istasyonlarının deprem anındaki üç boyutlu (Doğu-E, Kuzey-N, Düşey-U) dinamik yer değiştirmeleri elde edilmiştir.

AFAD tarafından işletilen ivmeölçer istasyonları, zaman senkronizasyonunu dahili GPS alıcıları vasıtasıyla yüksek duyarlıkla sağlayarak verilerini Evrensel Zaman Koordinatı (UTC) sistemine göre kaydetmektedir. Buna karşılık ham GNSS gözlemleri doğal olarak GPS Zamanı (GPST) ölçeğinde tutulduğundan, GNSS ve ivmeölçer zaman serilerinin başlangıç epokları arasında artık saniye (leap second) kaynaklı bir zaman farkı bulunmaktadır. Zaman serilerini tam olarak senkronize edebilmek amacıyla, GPST'nin UTC'den ileride olduğu süre (artık saniye ofseti), GNSS varyometrik hız ve yer değiştirme epoklarından çıkarılmıştır. Bu işlem sonucunda, VA yöntemiyle türetilen GNSS yer değiştirmeleri ile ivmeölçer kayıtlarından çift integrasyonla elde edilen 1 Hz örnekleme frekanslı yer değiştirme serileri ortak bir zaman ölçeğinde çakıştırılmış ve birbirleriyle doğrudan karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. İstasyonların örnekleme frekans bilgileri.

Depremler	GNSS İstasyonu	GNSS Örnekleme Frekansı (Hz)	İvmeölçer İstasyonu	İvmeölçer Örnekleme Frekansı (Hz)
Kahramanmaraş, Pazarcık	TNC1	1	6201	200
Kahramanmaraş, Elbistan	KLS1	1	7901	200
Gaziantep, Nurdağı	ANTE	1	2703	200
İzmir, Seferihisar	CESM	1	CESE	200
Balıkesir, Sındırgı	DEI1	1	4504	100
Malatya, Kale	ELAZ	1	2311	100

Çalışmada kullanılan depremlere ait ko-sismik andaki yer değiştirmeler, TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarında VA yöntemiyle, ivmeölçer istasyonunda ise ivme kayıtları kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. İstasyonların ko-sismik yer değiştirmeleri.

4.2. GNSS Sinyallerinin SNR ve MSC Karşılaştırması

VADASE yönteminde, sismik dalgaların istasyona ulaşmasından önceki arka plan gürültüsünün ko-sismik evredeki yer değiştirme kestirimlerini ne ölçüde etkilediğini sayısal olarak değerlendirmek önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanan ve sismik sinyal seviyesini ortam gürültüsüyle kıyaslayan Sinyal-Gürültü Oranı (SNR_{dB}), aşağıdaki Denklem (4) ile hesaplanmaktadır:

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10}\left(\frac{RMS_{signal}}{RMS_{noise}}\right) \tag{4}$$

Burada, RMS_{signal} ko-sismik pencere içindeki VADASE yer değiştirmelerini; RMS_{noise}, ko-sismik anından önceki yer değiştirme değerlerini temsil eder. SNR genellikle desibel cinsinden ifade edilir. Genel olarak, yüksek bir SNR, iyi sinyal netliği ve güvenilirliğini gösterir. Bu çalışmada, zemin ve gözlem gürültüsünün yer değiştirme zaman serileri üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, incelenen tüm GNSS istasyonlarının üç bileşeni (E, N, U) için SNR_{dB} değerleri Denklem (4) kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4).

VADASE yönteminin doğasında var olan gürültünün ko-sismik evrede veri yapısını ne ölçüde bozduğunu daha iyi değerlendirebilmek için her bir deprem özelinde Güç Spektral Yoğunluğu belirlenerek İvme zaman serilerinden hesaplanan yer değiştirmelerde, P-dalgasının varışından önceki zaman aralığı "deprem öncesi" (pre-event), sonraki 60 saniyelik zaman aralığı ise «ko-sismik" zaman olarak tanımlanmıştır..Ayrıca, ko-sismik anda 0-0.5 Hz frekans bandı aralığında PSD integrali alınarak elde edilen spektral enerji değerleri karşılaştırılmış ve ivmeölçere kıyasla GNSS sinyalinin enerji oranı, ko-sismik evre için Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4).

$$\text{Energy: } \int_0^{0.5} PSD_{\text{co-seismic}}(f)\,df \tag{5}$$

Ko-sismik anda Varyometrik yöntemiyle elde edilen PSD enerji değerlerinin ivmeölçerden elde edilen enerji değerleri arasındaki oran Çizelge 4' te verilmiştir. Yatay SNR değerlerinin 11–26 dB seviyesine ulaştığı TNC1, KLS1 ve CESM istasyonlarında, yatay PSD enerji oranları %15.1–%59.2 aralığında kalmış ve düşük SNR koşullarındaki istasyonlara kıyasla ivmeölçer enerjisinden daha sınırlı sapma göstermiştir. Buna karşılık, SNR değerlerinin 5 dB'in altında kaldığı DEI1 ve ELAZ istasyonlarında yatay enerji oranları %268.1 – %891.3'e ulaşarak VADASE spektral enerjisinin

ivmeölçer enerjisinin yaklaşık 2.7 – 8.9 katına çıktığını göstermiştir. Yatay SNR değerlerinin yaklaşık 9 dB olduğu ANTE istasyonunda ise enerji oranlarının %138.8 – %176.1 arasında olması, VADASE spektral enerjisinin ivmeölçer enerjisinden yaklaşık 1.4 – 1.8 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Düşey bileşenlerde genel olarak daha düşük SNR değerleriyle birlikte enerji oranlarının belirgin şekilde yükselmesi, özellikle düşük sinyal seviyelerinde gürültü katkısının spektral enerji hesaplarını önemli ölçüde etkileyebileceğine işaret etmektedir.

Çizelge 4. GNSS VA yöntemiyle belirlenen ko-sismik sinyalin SNR değerleri ve ivmeölçer sinyaliyle 0-0.5 Hz aralığındaki PSD enerji karşılaştırması.

Depremler	GNSS İstasyonu	SNR (dB)			PSD Enerji Oranı (%)		
		Doğu	Kuzey	Düşey	Doğu	Kuzey	Düşey
Kahramanmaraş, Pazarcık	**TNC1**	13.06	13.70	1.81	28.7	15.1	67
Kahramanmaraş, Elbistan	**KLS1**	26.13	11.69	4.70	32.4	44.8	217.1
Gaziantep, Nurdağı	**ANTE**	9.02	8.75	0.72	176.1	138.8	1521.3
İzmir, Seferihisar	**CESM**	15.07	13.8	4.46	59.2	30.4	69.3
Balıkesir, Sındırgı	**DEI1**	0.06	4.57	5.47	767.5	891.3	2053.6
Malatya, Kale	**ELAZ**	3.94	3.25	4.98	268.1	285.4	3060.3

Çizelge 4'te sunulan SNR ve PSD enerji oranı sonuçları, VADASE yöntemiyle elde edilen eş-sismik yer değiştirme kayıtlarının sinyal kalitesini ve frekans ortamındaki spektral enerji tutarlılığını birlikte ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında en belirgin sismik sinyal netliği Kahramanmaraş Elbistan depreminde KLS1 istasyonunun Doğu bileşeninde (26.13 dB) elde edilmiş olup, bu durum %32.4 (Doğu) ve %44.8 (Kuzey) seviyesindeki yatay PSD enerji oranlarıyla ivmeölçer spektrumuyla yüksek uyum sergilendiğini doğrulamıştır. Benzer biçimde, Kahramanmaraş Pazarcık (TNC1) ve İzmir Seferihisar (CESM) depremlerinde yüksek yatay SNR seviyeleri sayesinde sismik yer hareketi arka plan gürültüsünden yüksek doğrulukla ayrıştırılmış; 0–0.5 Hz bandındaki PSD enerji oranları (%15.1 – %59.2) düşük frekanslı gürültü birikimi yaşanmaksızın dengeli bir seviyede kalmıştır. Gaziantep Nurdağı (ANTE) istasyonunda yatay bileşenlerde elde edilen orta düzeydeki sinyal kalitesine (~9 dB SNR) karşın, PSD enerji oranlarında (Doğu %176.1, Kuzey %138.8) ivmeölçer enerjisine kıyasla hafif bir spektral genlik artışı gözlenmiştir. Buna karşılık, Balıkesir Sındırgı (DEI1) ve Malatya Kale (ELAZ) depremlerinde hesaplanan düşük yatay SNR seviyeleri (<5 dB), sismik hareket genliğinin ortam gürültüsü mertebesine yakın kaldığını ve sinyal çözünürlüğünün sınırlandığını göstermektedir. Sinyal kalitesindeki bu yetersizlik, 0–0.5 Hz aralığında VADASE sinyalinde düşük frekanslı gürültü bileşenlerinin baskın hale gelmesine yol açmış; buna bağlı olarak PSD enerji oranları yatay bileşenlerde %268.1 ile %891.3, düşey bileşenlerde ise %2053.6 ile %3060.3 gibi yüksek değerlere ulaşmıştır.

Bileşen bazlı karşılaştırma yapıldığında; tüm olaylarda düşey bileşene ait SNR değerlerinin yatay bileşenlere kıyasla belirgin şekilde düşük kalması, düşey eksendeki yönsel gürültü hassasiyetini yansıtmaktadır. Düşey SNR'daki bu düşüşe paralel olarak düşey PSD enerji oranlarının aşırı yükselmesi, düşük frekans bantlarında düşey eksen genliklerinin gürültü birikiminden doğrudan etkilendiğini göstermiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelen altı farklı deprem kapsamında tek alıcılı GNSS VA yöntemiyle elde edilen ko-sismik yer değiştirmeler, eş-konumlu veya yakın konumdaki ivmeölçer kayıtlarıyla bileşen bazında SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) ve 0–0.5 Hz frekans bandındaki PSD (Güç Spektral Yoğunluğu) enerji oranları üzerinden karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, sismik sinyal genliği ile SNR seviyeleri ve PSD spektral enerji uyumu arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Büyük magnitüdlü depremlerde yüksek SNR değerleriyle birlikte 0–0.5 Hz frekans bandında ivmeölçer spektrumuyla daha tutarlı PSD enerji oranları elde edilmiştir.

Özellikle Kahramanmaraş Elbistan (KLS1), Kahramanmaraş Pazarcık (TNC1) ve İzmir Seferihisar (CESM) depremlerinde GNSS yatay bileşenlerinde yüksek SNR seviyeleri (Doğu ve Kuzey bileşenlerinde 11.69 dB ile 26.13 dB arasında) hesaplanmıştır. Bu yüksek sinyal kalitesine paralel olarak 0–0.5 Hz bandındaki PSD enerji oranları yatay bileşenlerde TNC1 için %15.1–%28.7, KLS1 için %32.4–%44.8 ve CESM için %30.4–%59.2 seviyelerinde gerçekleşmiş; düşük frekanslı gürültü birikimi yaşanmaksızın VADASE yönteminin sismik sinyali yüksek doğrulukla yansıtabildiği görülmüştür. Gaziantep Nurdağı depreminde ise ANTE istasyonu yatay bileşenlerde orta düzeyde bir sinyal kalitesi (8.75–9.02 dB SNR) sergilerken, PSD enerji oranlarında (Doğu %176.1, Kuzey %138.8) ivmeölçer enerjisine kıyasla hafif bir spektral genlik artışı gözlenmiştir. Buna karşılık, orta büyüklükteki Balıkesir Sındırgı (DEI1) ve Malatya Kale (ELAZ) depremlerinde özellikle yatay bileşenlerde belirgin şekilde düşük SNR değerleri (DEI1 Doğu bileşeninde 0.06 dB, ELAZ yatay bileşenlerinde 3.25–3.94 dB) elde edilmiştir. Düşük genlikli ko-sismik sinyallerin ortam gürültüsünden yeterince ayrışamaması, 0–0.5 Hz frekans aralığında gürültü bileşenlerinin baskın

hale gelmesine yol açmış; buna bağlı olarak yatay PSD enerji oranları DEI1 için %767.5–%891.3, ELAZ için ise %268.1–%285.4 seviyelerine ulaşmıştır.

Bileşen bazında yapılan değerlendirmede, tüm deprem olaylarında düşey bileşene ait SNR değerlerinin (0.72 dB ile 5.47 dB arasında) yatay bileşenlere kıyasla genel olarak düşük kaldığı ve bu durumun GNSS çözümlerindeki klasik düşey eksen gürültü hassasiyetini yansıttığı görülmüştür. Düşey SNR seviyelerindeki bu düşüşe paralel olarak, düşük frekans bantlarındaki gürültü baskınlığı nedeniyle düşey PSD enerji oranlarında belirgin yükselmeler (ANTE için %1521.3, DEI1 için %2053.6, ELAZ için %3060.3) kaydedilmiştir. Sonuç olarak, VA yaklaşımının yeterli SNR sağlanan yüksek genlikli olaylarda ve özellikle yatay bileşenlerde ko-sismik hareketlerin belirlenmesinde oldukça etkili ve güvenilir bir yöntem olduğu; ancak düşük genlikli sismik sinyallerde ve düşey bileşen analizlerinde gürültü tabanının ve spektral enerji sapmalarının dikkatle değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

AFAD, 2023. Türkiye Deprem Veri Merkezi ve İvme Veritabanı Analiz Sistemi (TADAS). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. https://tadas.afad.gov.tr [Erişim tarihi: 15.08.2026].

Ateş, E., Kuru, T. ve Aydın, R. K., 2019. Deprem Kayıtları Kullanılarak Muğla-Milas Derince Barajının Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(2): 319–338.

Ateş, E. ve Uyanık, O., 2023. Comparison of Acceleration Records Measured at Different Depths. Turk Deprem Arastirma Dergisi, 5(2): 215–232.

Bahadur, B., Bezcioglu, M. ve Yigit, C. O., 2023. PPPH VA: an open source software for real time multi GNSS variometric approach using single and dual frequency observations. GPS Solutions, 28(31): 1-15.

Branzanti, M., Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A., 2013. GPS near-real-time coseismic displacements for the Great Tohoku-oki earthquake. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(2): 372–376.

Chopra, A. K., 2012. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering. 4. basım, Pearson Education.

Colosimo, G., 2012. Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine. Doktora tezi, Sapienza University, Roma.

Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A., 2011. Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B11).

Fratarcangeli, F., Savastano, G., D'Achille, M.C., Mazzoni, A., Crespi, M., Riguzzi, F., Devoti, R. ve Pietrantonio, G., 2018a. VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the central Italy 2016 earthquakes. Remote Sensing, 10(8): 1201.

Fratarcangeli, F., Ravanelli, M., Mazzoni, A., Colosimo, G., Benedettin, E., Branzanti, M., Savastano, G., Verkhoglyadova, O., Komjathy, A. ve Crespi, M., 2018b. The variometric approach to real-time high-frequency geodesy. Satellite Positioning for Geoscience, 29: 95-108.

Fujita, H., 1997. A decade of MEMS and its future. Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, syf: 1–7.

KRDAE, 2023. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM), İstanbul. http://www.koeri.boun.edu.tr [Erişim tarihi: 15.08.2026].

Kramer, S. L., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.

Landskron, D. ve Böhm, J., 2018. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. Journal of Geodesy, 92(4): 349–360.

Luzi, L., Puglia, R., Russo, E., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., Lanzano, G., Çeken, U., Clinton, J., Costa, G., Duni, L., Farzanegan, E., Gueguen, P., Ionescu, C., Kalogeras, I., Özener, H., Pesaresi, D., Sleeman, R., Strollo, A. ve Zare, M., 2016. Engineering Strong Motion Database: A Platform to Access Pan-European Accelerometric Data. Seismological Research Letters, 87(4): 987–997.

McCarthy, D. D. ve Petit, G., 2004. IERS Conventions (2003). International Earth Rotation and Reference Systems Services (IERS).

Mishra, M. K., Dubey, V., Mishra, P. ve Khan, I., 2019. MEMS technology: a review. Journal of Engineering Research Reports, 4(1): 1–24.

Paziewski, J., Kurpinski, G., Wielgosz, P., Stolecki, L., Sieradzki, R., Seta, M., Oszczak, S., Castillo, M. ve Martin-Porqueras, F., 2020. Towards Galileo + GPS seismology: Validation of high-rate GNSS-based system for seismic events characterisation. Measurement, 166: 108236.

Peng, C., Chen, Y., Chen, Q, Yang, J., Wang, H., Zhu, X., Xu, Z. ve Zheng, Y., 2017. A new type of tri-axial accelerometers with high dynamic range MEMS for earthquake early warning. Computer and Geosciences, 100: 179-187.

Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. AGU Book Series: Geophysical Monograph Series, syf: 247–251.

Trifunac, M. D., 2016. Site conditions and earthquake ground motion – A review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90: 88–100.

Tu, R., Wang, R., Ge, M., Walter, T. R., Ramatschi, M., Milkereit, C., Bindi, D. ve Dahm, T., 2013. Cost-effective monitoring of ground motion related to earthquakes, landslides, or volcanic activity by joint use of a single-frequency GPS and a MEMS accelerometer. Geophysical Research Letters, 40(15): 3825–3829.

AĞAÇ TABANLI MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE EGE BÖLGESİ ORMAN YANGINI DUYARLILIK MODELLEMESİ VE SHAP TABANLI AÇIKLANABİLİRLİK ANALİZİ

İbrahim ÇETİN[1], Süleyman Sefa BİLGİLİOĞLU[2], Ozan ÖZTÜRK[3], Burhan Baha BİLGİLİOĞLU[4], Dursun Zafer ŞEKER[5]

[1]Lisansüstü Öğrencisi, Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Merkez, Aksaray, ibrahim.cetin@asu.edu.tr
[2]Doç. Dr., Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Merkez, Aksaray, sbilgilioglu@aksaray.edu.tr
[3]Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 53100, Merkez, Rize, ozan.ozturk@erdogan.edu.tr
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 29100, Merkez, Gümüşhane, bahabilgilioglu@gumushane.edu.tr
[5]Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, seker@itu.edu.tr

ÖZET

Orman yangınları, ekosistemlerin yapısal ve işlevsel bütünlüğü, biyolojik çeşitlilik, doğal kaynaklar, yerleşim alanları ve sosyoekonomik sistemler üzerinde önemli etkiler oluşturan başlıca çevresel afetler arasında yer almaktadır. Yangınların oluşumu ve mekansal dağılımı, topoğrafik koşullar, meteorolojik değişkenler, bitki örtüsü özellikleri ve antropojenik etkiler arasındaki karmaşık ve çoğunlukla doğrusal olmayan etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Akdeniz iklim kuşağında yer alan bölgelerde yüksek sıcaklıklar, yağış rejimindeki mevsimsel düzensizlikler, uzun süreli kurak dönemler ve yanıcı bitki materyalinin varlığı, orman yangınlarının oluşumunu destekleyen temel çevresel koşullar arasında bulunmaktadır. Türkiye'nin batısında yer alan Ege Bölgesi, iklimsel özellikleri, geniş orman varlığı, arazi kullanım yapısı ve yoğun insan faaliyetleri nedeniyle orman yangınlarının mekansal olarak değerlendirilmesi gereken öncelikli bölgelerden biridir. Bu kapsamda, yangına duyarlı alanların belirlenmesi ve yangın duyarlılığını etkileyen temel faktörlerin ortaya konulması, önleyici faaliyetlerin mekansal olarak önceliklendirilmesi ve yangın yönetimine yönelik karar süreçlerinin desteklenmesi açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde orman yangını duyarlılığının mekansal olarak modellenmesi amacıyla farklı ağaç tabanlı makine öğrenmesi algoritmaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, model tahminlerinin açıklanabilirliğinin artırılması ve yangın duyarlılığı üzerinde belirleyici olan değişkenlerin ortaya konulması amacıyla SHAP tabanlı açıklanabilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışma kapsamında yalnızca modellerin tahmin performanslarının karşılaştırılması değil, aynı zamanda açıklayıcı değişkenler ile model tahminleri arasındaki ilişkilerin yorumlanması hedeflenmiştir. Yangın envanterinin oluşturulmasında MODIS uydu sensöründen elde edilen 2010–2025 dönemine ait yangın gözlem verilerinden yararlanılmıştır. Yangın meydana geldiği belirlenen konumlar "yangın varlığı", çalışma alanı içerisinde yangın gözlenmeyen alanlardan rastgele ve dengeli örnekleme yöntemiyle seçilen konumlar ise "yangın yokluğu" olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım doğrultusunda modelleme sürecinde kullanılmak üzere dengeli bir ikili sınıflandırma veri seti oluşturulmuştur. Orman yangını oluşumunu etkileyen fiziksel, çevresel ve insan kaynaklı koşulların mekansal olarak temsil edilmesi amacıyla topoğrafik, meteorolojik, vejetasyona ilişkin, hidrografik ve antropojenik değişkenlerden yararlanılmıştır. Topoğrafik parametreler yükselti, eğim, bakı ve topoğrafik nemlilik indeksinden oluşmaktadır. Meteorolojik parametreler ortalama sıcaklık, yıllık yağış, güneş radyasyonu ve ortalama rüzgar hızını kapsamaktadır. Vejetasyon ve arazi örtüsüne ilişkin parametreler arazi kullanımı ve arazi örtüsü, orman tipi, ağaç örtüsü yoğunluğu ve normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksinden oluşmaktadır. Hidrografik koşulların temsil edilmesinde akarsulara uzaklık, antropojenik etkilerin temsil edilmesinde ise yollara ve yerleşim alanlarına uzaklık değişkenleri kullanılmıştır. Farklı veri kaynaklarından elde edilen söz konusu mekansal değişkenler, modelleme öncesinde koordinat sistemi, mekansal kapsam, çözünürlük ve hücre hizalaması bakımından standardize edilerek ortak bir analiz veri tabanında bütünleştirilmiştir.

Modelleme aşaması öncesinde, açıklayıcı değişkenler arasındaki doğrusal ilişkilerin ve çoklu bağlantı sorunlarının değerlendirilmesi amacıyla Pearson korelasyon katsayısı, varyans şişirme faktörü ve tolerans istatistiklerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda değişkenler arasındaki yüksek düzeyli ilişkiler değerlendirilmiş ve modelleme sürecinde kullanılacak değişken setinin istatistiksel uygunluğu incelenmiştir. Orman yangını duyarlılığının modellenmesinde Random Forest, Rotation Forest, XGBoost, LightGBM ve Hist Gradient Boosting algoritmaları kullanılmıştır. Her bir algoritmaya ait hiperparametrelerin uygun değerlerinin belirlenmesinde Grid Search yaklaşımından yararlanılmıştır. Model performanslarının değerlendirilmesinde mekansal verilerin doğasında bulunan mekansal otokorelasyonun doğrulama sonuçları üzerindeki olası etkileri dikkate alınmıştır. Bu nedenle, geleneksel rastgele çapraz doğrulama yerine mekansal blok çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Böylelikle mekansal olarak birbirine yakın örneklerin eğitim ve doğrulama kümeleri arasında paylaşılmasından kaynaklanabilecek bilgi sızıntısının ve buna bağlı iyimser performans tahminlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu doğrulama yapısı, modellerin yalnızca mevcut örnekler üzerindeki sınıflandırma başarılarının değil, mekansal olarak bağımsız alanlara genellenebilme yeteneklerinin de daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.Modellerin sınıflandırma performansları AUC, Accuracy, Precision, Recall ve F1-score metrikleri kullanılarak değerlendirilmiş ve aynı doğrulama koşulları altında karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmeleri sonucunda belirlenen en başarılı model, Ege Bölgesi'nin tamamına uygulanarak sürekli orman yangını duyarlılık değerleri üretilmiştir. Elde edilen sürekli duyarlılık değerleri, Jenks doğal kırılmalar yöntemi kullanılarak çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beş duyarlılık sınıfına ayrılmış ve bölgesel ölçekte orman yangını duyarlılık haritası oluşturulmuştur.

Model tahminlerinin yalnızca performans metrikleri üzerinden değerlendirilmesinin ötesine geçebilmek amacıyla, en başarılı modelin tahmin yapısının yorumlanmasında SHAP yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz kapsamında açıklayıcı değişkenlerin model

çıktısına olan göreli katkıları belirlenmiş, değişkenlerin yangın duyarlılığı üzerindeki artırıcı veya azaltıcı etkileri değerlendirilmiş ve değişken değerleri ile model çıktıları arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler incelenmiştir. Böylece yalnızca değişkenlerin önem sıralamasının ortaya konulması değil, aynı zamanda farklı değişken değerlerinin model tahminlerini hangi yönde ve ne ölçüde etkilediğinin açıklanması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, model performansının yanı sıra elde edilen tahminlerin çevresel süreçler bağlamında yorumlanabilirliğinin de değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Çalışmada benimsenen metodolojik yaklaşım, uzun dönemli uydu tabanlı yangın gözlemlerinin çok kaynaklı mekansal açıklayıcı değişkenler, değişkenler arası ilişki analizleri, hiperparametre optimizasyonu ve mekansal bağımlılığı dikkate alan doğrulama stratejisi ile bütünleştirilmesine dayanmaktadır. Farklı ağaç tabanlı makine öğrenmesi algoritmalarının ortak veri ve doğrulama yapısı altında karşılaştırılması, modellerin göreli tahmin performanslarının daha nesnel biçimde değerlendirilmesine olanak sağlarken, SHAP tabanlı açıklanabilirlik analizi model tahminlerinde etkili olan değişkenlerin katkılarının, etki yönlerinin ve ilişkilerinin ortaya konulmasını sağlamaktadır. Elde edilen duyarlılık haritası ve açıklanabilirlik çıktılarının birlikte değerlendirilmesinin, yangına duyarlı alanların belirlenmesi, önleyici faaliyetlerin mekansal olarak önceliklendirilmesi, müdahale kaynaklarının planlanması ve bölgesel orman yangını risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir altlık sunması beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler: açıklanabilir yapay zeka, ağaç tabanlı makine öğrenmesi, mekansal blok çapraz doğrulama, orman yangını duyarlılığı, SHAP

ABSTRACT

SPATIAL MODELLING OF FOREST FIRE SUSCEPTIBILITY IN THE AEGEAN REGION USING TREE-BASED MACHINE LEARNING MODELS AND SHAP-BASED EXPLAINABILITY ANALYSIS

Forest fires are among the major environmental hazards that exert substantial impacts on ecosystem structure and functioning, biodiversity, natural resources, human settlements, and socioeconomic systems. Their occurrence and spatial distribution are governed by complex and often nonlinear interactions among topographic conditions, meteorological variables, vegetation characteristics, and anthropogenic influences. In regions characterized by a Mediterranean climate, high temperatures, seasonal variability in precipitation, prolonged dry periods, and the presence of combustible vegetation constitute some of the principal environmental conditions that promote forest fire occurrence. Located in western Türkiye, the Aegean Region is particularly susceptible to forest fires due to its climatic characteristics, extensive forest cover, land-use patterns, and intensive human activities. In this context, identifying fire-susceptible areas and determining the principal factors associated with fire susceptibility are essential for spatially prioritizing preventive measures and supporting decision-making processes in forest fire management.

In this study, different tree-based machine learning algorithms were comparatively evaluated for the spatial modelling of forest fire susceptibility across the Aegean Region of Türkiye. In addition, a SHAP-based explainability analysis was conducted to improve the interpretability of model predictions and to identify the variables that exert the greatest influence on fire susceptibility. Accordingly, the study was designed not only to compare the predictive performance of the models but also to interpret the relationships between the explanatory variables and model outputs. The forest fire inventory was derived from fire observation data acquired by the MODIS satellite sensor for the 2010–2025 period. Locations where fire events were detected were labelled as "fire presence", whereas locations randomly selected from areas with no observed fire occurrence were labelled as "fire absence". The fire-absence samples were generated using a balanced sampling strategy, resulting in a balanced binary classification dataset for model implementation. Topographic, meteorological, vegetation-related, hydrological, and anthropogenic variables were used to represent the physical, environmental, and human-related conditions associated with forest fire occurrence. The topographic parameters comprised elevation, slope, aspect, and the topographic wetness index. Meteorological parameters included mean temperature, annual precipitation, solar radiation, and mean wind speed. Vegetation and land-cover-related parameters consisted of land use/land cover, forest type, tree cover density, and the normalized difference vegetation index. Distance to streams was used to represent hydrological conditions, whereas distances to roads and settlements were incorporated as indicators of anthropogenic influence. Spatial variables obtained from different data sources were standardized in terms of coordinate system, spatial extent, resolution, and grid alignment prior to their integration into a common analysis database.

Before the modelling stage, Pearson's correlation coefficient, variance inflation factor, and tolerance statistics were used to assess linear relationships and potential multicollinearity among the explanatory variables. Based on these assessments, highly correlated variables were examined and the statistical suitability of the predictor set used in the modelling process was evaluated. Forest fire susceptibility was modelled using Random Forest, Rotation Forest, XGBoost, LightGBM, and Hist Gradient Boosting algorithms. The hyperparameters of each algorithm were optimized using a Grid Search procedure. Because spatial autocorrelation inherent in geospatial data may lead to overly optimistic validation results, spatial block cross-validation was employed instead of conventional random cross-validation. This strategy was used to reduce information leakage arising from the allocation of spatially proximate observations to both training and validation subsets. Consequently, model performance was assessed not only in terms of classification capability for the available samples but also with respect to generalizability to spatially independent areas. The classification performance of the models was evaluated and compared under identical validation conditions using AUC, Accuracy, Precision, Recall, and F1-score. The best-performing model was subsequently applied across the entire Aegean Region to generate continuous forest fire susceptibility values. These values were classified into five susceptibility levels, namely very low, low, moderate, high, and very high, using the Jenks natural breaks classification method, thereby producing a regional forest fire susceptibility map.

To move beyond an evaluation based solely on predictive performance metrics, the internal prediction structure of the best-performing model was interpreted using the SHAP method. The relative contributions of the explanatory variables to model outputs were quantified, their positive and negative effects on fire susceptibility were examined, and nonlinear relationships between predictor values and model predictions were investigated. This approach enabled not only the ranking of variable importance but also the interpretation of the direction and magnitude of individual variable effects on fire susceptibility predictions.

The methodological framework adopted in this study integrates long-term satellite-based fire observations with multi-source spatial explanatory variables, predictor relationship analyses, hyperparameter optimization, and a validation strategy that explicitly accounts for spatial dependence. The comparison of multiple tree-based machine learning algorithms under a common data and validation framework enables a more objective assessment of their relative predictive capabilities, while SHAP-based explainability analysis provides insight into the contributions, directions, and relationships of the variables influencing model predictions. The combined evaluation of the resulting susceptibility map and explainability outputs is expected to provide a scientific basis for identifying fire-prone areas, spatially prioritizing preventive measures, planning response resources, and supporting regional forest fire risk-reduction strategies.

Keywords: explainable artificial intelligence, forest fire susceptibility, SHAP, spatial block cross-validation, tree-based machine learning

KARADENİZ BÖLGESİ İKLİM PARAMETRELERİNİN TEK DEĞİŞKENLİ LSTM MODELLERİ İLE TAHMİNİ

Nursena PASLI [1], Çiğdem ŞERİFOĞLU YILMAZ [2],

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye, nursenapasli551@gmail.com
[2]Doç. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, cigdemserifoglu@ktu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Karadeniz Bölgesi'ndeki iklim parametrelerinin tek değişkenli Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) modelleriyle tahmin edilebilirliği ve gelecekteki olası değişimleri incelenmiştir. Analizlerde 1984-2024 dönemine ait aylık yağış, kara yüzey sıcaklığı (Land Surface Temperature, LST), potansiyel buharlaşma (Potential Evapotranspiration, PET), bağıl nem (Relative Humidity, RH), rüzgâr hızı ve normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) zaman serileri kullanılmıştır. Yağış verisi Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) yer gözlem istasyonlarından, diğer parametreler ise uydu ve yeniden analiz kaynaklarından elde edilmiştir. Her parametre için ağırlıklı olarak ilgili değişkenin geçmiş gözlemlerini girdi olarak kullanan ayrı bir LSTM modeli oluşturulmuş; modeller kronolojik eğitim, doğrulama ve test dönemleri üzerinden değerlendirilmiştir. Model başarımları kök ortalama kare hata (RMSE), belirlilik katsayısı (R^2) ve Kling-Gupta Efficiency (KGE) ölçütleriyle belirlenmiştir. PET, LST, NDVI, yağış, rüzgâr hızı ve RH için test döneminde sırasıyla 0.96, 0.93, 0.91, 0.56, 0.56 ve 0.34 R^2 ile 0.95, 0.93, 0.93, 0.51, 0.58 ve 0.40 KGE değerleri elde edilmiştir. RMSE'nin gözlenen serinin standart sapmasına oranı PET, LST ve NDVI'de 0.30'un altında kalırken yağış, rüzgâr hızı ve RH'de 0.65-0.81 aralığında hesaplanmıştır. Bu farklılık, belirgin mevsimsel döngüye sahip parametrelerin model tarafından daha kolay öğrenilmesiyle; yağış, rüzgâr hızı ve RH'nin ise kısa süreli ve yerel atmosferik süreçlere daha duyarlı olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Oluşturulan modellerle 2025-2030 dönemine yönelik projeksiyonlar üretilmiş; parametrelerin mevsimsel döngülerini büyük ölçüde koruduğu, NDVI'de ise artış eğiliminin sürdüğü görülmüştür. Bulgular, Karadeniz Bölgesi'nde iklim parametrelerinin tahmin edilebilirliğinin değişkenin zamansal düzenliliğine ve gözlenen serinin değişkenlik düzeyine göre farklılaştığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Karadeniz Bölgesi, iklim parametreleri, derin öğrenme, LSTM, tahmin.

ABSTRACT

FORECASTING CLIMATE PARAMETERS IN THE BLACK SEA REGION USING UNIVARIATE LSTM MODELS

This study investigates the predictability of climate parameters in the Black Sea Region using univariate Long Short-Term Memory (LSTM) models and examines their possible future changes. Monthly time series of precipitation, land surface temperature (LST), potential evapotranspiration (PET), relative humidity (RH), wind speed, and normalized difference vegetation index (NDVI) covering the period 1984-2024 were used in the analyses. Precipitation data were obtained from ground-based stations of the Turkish State Meteorological Service (MGM), while the other parameters were derived from satellite and reanalysis sources. A separate LSTM model was developed for each parameter, using mainly the historical observations of the corresponding variable as input, and the models were evaluated over chronological training, validation, and test periods. Model performance was assessed using the root mean square error (RMSE), the coefficient of determination (R^2), and Kling-Gupta Efficiency (KGE). For PET, LST, NDVI, precipitation, wind speed, and RH, the test-period R^2 values were 0.96, 0.93, 0.91, 0.56, 0.56, and 0.34, and the KGE values were 0.95, 0.93, 0.93, 0.51, 0.58, and 0.40, respectively. The ratio of RMSE to the standard deviation of the observed series remained below 0.30 for PET, LST, and NDVI, whereas it ranged between 0.65 and 0.81 for precipitation, wind speed, and RH. This difference was attributed to the pronounced seasonal cycles of the former parameters, which are more readily learned by the model, and to the greater sensitivity of precipitation, wind speed, and RH to short-term and local atmospheric processes. Projections for the 2025-2030 period generated with the developed models largely preserved the seasonal cycles of the parameters, while the increasing trend in NDVI persisted. The findings indicate that the predictability of climate parameters in the Black Sea Region varies according to the temporal regularity of each variable and the variability of the observed series.

Keywords: Black Sea Region, climate parameters, deep learning, LSTM, prediction.

1. GİRİŞ

İklim parametrelerinin zamansal değişiminin izlenmesi ve gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi, bölgesel çevre yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Bojinski vd., 2014). Karadeniz Bölgesi, kıyı ve iç kesimler arasındaki topoğrafik farklılıklar, yüksek nemlilik ve değişken yağış rejimi nedeniyle iklim parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi için uygun bir çalışma alanı sunmaktadır (Öztürk vd.,

2017). Bununla birlikte, iklim verileri; doğrusal olmayan yapıları, yüksek zamansal ve mekânsal değişkenlikleri ile parametreler arasındaki karmaşık etkileşimler nedeniyle modellenmesi güç zaman serileri oluşturmaktadır (Guo vd., 2024; Karabulut & Topçu, 2022). Mevsimsel döngüsü belirgin olan sıcaklık ve buharlaşma gibi değişkenler daha öngörülebilir bir yapı sergileyebilirken, yağış ve rüzgâr gibi kısa süreli dalgalanmalara duyarlı parametrelerde tahmin güçlüğü artabilmektedir.

Son yıllarda uzaktan algılama ve yeniden analiz veri kaynaklarının yaygınlaşması, iklim ve çevre parametrelerine ait uzun süreli ve düzenli zaman serilerinin oluşturulmasını mümkün kılmış; bu durum derin öğrenme tabanlı zaman serisi modellerinin iklim tahmini alanında kullanımını hızlandırmıştır. LSTM ağları, geçmiş gözlemler arasındaki uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilmesi ve geleneksel istatistiksel yöntemlerin aksine doğrusal olmayan ilişkileri doğrudan veriden çıkarabilmesi nedeniyle iklim ve çevre zaman serilerinin tahmininde sıkça tercih edilen derin öğrenme yöntemlerinden biridir (Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Ouma vd., 2022). Nitekim yakın tarihli bir çalışmada LSTM modellerinin, Karadeniz Bölgesi'yle benzer kıyısal ve topografik özellikler taşıyan bir Akdeniz adasında bitki örtüsü dinamiklerini yansıtan NDVI zaman serilerini yüksek doğrulukla tahmin edebildiği gösterilmiştir (Vasilakos vd., 2022); bu bulgu, tek değişkenli LSTM yaklaşımının farklı iklim bölgelerinde de denenebileceğine işaret etmektedir.

Bu çalışmada, Karadeniz Bölgesi'ndeki altı iklim parametresi aynı yöntemsel çerçevede ele alınarak tek değişkenli LSTM modellerinin parametre bazındaki başarımı karşılaştırılmıştır. Böylece hangi parametrelerin daha yüksek öngörü performansı gösterdiği ve başarımın ölçütler bakımından nasıl farklılaştığı ortaya konulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, Karadeniz Bölgesi'nde iklim tahmini için iki farklı soruya yanıt aramaktır: (i) NDVI, LST, RH, PET, yağış ve rüzgâr hızının LSTM ile öngörü performansı nedir ve bu performans parametrelere göre nasıl değişmektedir? (ii) Altı iklim parametresinin 2025-2030 dönemindeki öngörülen değerleri ve zamansal eğilimleri nasıldır?

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Setleri

Google Earth Engine (GEE) ve Python programlama dili kullanılarak Karadeniz Bölgesi'ne ait 1984-2024 dönemini kapsayan aylık iklim verileri elde edilmiş ve analizlere uygun hale getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda iklim parametrelerinin bölgesel öngörülebilirlikleri değerlendirilmiş ve 2025-2030 dönemine yönelik öngörüler üretilmiştir. Çalışmada RH ve rüzgâr hızı ERA5-Land, LST ve NDVI için Landsat, PET için ERA5-Land ve MODIS tabanlı veri kaynaklarından elde edilmiştir. Yağış için veri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) yer gözlem istasyonlarından elde edilmiştir. Bölgedeki 163 istasyondan, veri sürekliliği ve kayıt uzunluğu bakımından yapılan filtreleme sonucunda 75 istasyon analizlere dahil edilmiştir.

2.2. Veri Ön İşleme ve Modelleme

Veriler aylık bilgisiyle etiketlenmiş bir şekilde istasyon verisinden ve GEE platformundan elde edilerek Python programına aktarılmıştır. Her parametre için ay bazlı min-max normalizasyon uygulanmıştır. Veri seti kronolojik olarak eğitim, doğrulama ve test dönemlerine ayrılmış; her parametre için ayrı bir LSTM modeli oluşturulmuştur. Uzaktan algılama ve yeniden analiz tabanlı parametrelerde 1984-2013 dönemi eğitim, 2014-2018 dönemi doğrulama ve 2019-2024 dönemi test için; istasyon tabanlı yağış verisinde ise sırasıyla 1984-2015, 2016-2021 ve 2022-2024 dönemleri kullanılmıştır. Parametreler için hedef değişkenin geçmiş değerlerine dayanan, bazı modellerde yardımcı zamansal ve mekânsal özniteliklerle desteklenen LSTM modelleri eğitilmiştir. Rüzgâr hızı modelinde buna ek olarak ay bilgisinin sinüs-kosinüs kodlaması; istasyon tabanlı yağış modelinde ise gecikmeli değerler ve hareketli istatistiklerin yanı sıra ay kodlaması, yükseklik, enlem-boylam, kıyıya uzaklık ve istasyon kümesi bilgisi yardımcı girdi olarak kullanılmıştır. Modeller LSTM katmanları, aşırı öğrenmeyi sınırlamak amacıyla eklenen dropout katmanı (Srivastava vd., 2014) ve tek nöronlu tam bağlı çıkış katmanından oluşmaktadır. Eğitimde Adam optimizasyon algoritması ile ortalama kare hata (MSE) kayıp fonksiyonu (yağış modelinde Huber kaybı, δ=1.0) kullanılmış; zaman serisinin kronolojik yapısının bozulmaması için eğitim sırasında veri karıştırma işlemi uygulanmamıştır. Model yapılandırmaları, her parametrenin zamansal davranışı dikkate alınarak deneme yoluyla belirlenmiştir. Bu kapsamda nöron sayısı, öğrenme oranı, yığın büyüklüğü ve dropout oranı için farklı değer kombinasyonları sınanmış; her yapılandırmanın doğrulama dönemi başarımı karşılaştırılarak en düşük doğrulama kaybını veren yapılandırma seçilmiştir. Modellere ilişkin kullanılan parametreler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Karadeniz Bölgesi LSTM modellerinin yapılandırılması.

Yapılandırma	RH	LST	NDVI	PET	Rüzgâr Hızı	Yağış
Girdi dizisi uzunluğu	12 ay	12 ay	12 ay	12 ay	12 ay	24 ay
LSTM katman sayısı	1	1	1	1	3	3
Nöron sayısı	100	150	200	100	96+48+32	64+32+16
Dropout	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2+0.1	0.2
Aktivasyon	ReLU	ReLU	ReLU	Tanh	Tanh/ReLU	Tanh
Optimizasyon	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam
Kayıp fonksiyonu	MSE	MSE	MSE	MSE	MSE	Huber
Öğrenme Oranı	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-5}	3×10^{-4}
Epoch	100	100	100	100	200	200
Batch size	4	4	4	16	32	128

2.3. Başarım Ölçütleri

Modellerin test dönemi başarımı kök ortalama kare hata (RMSE), belirlilik katsayısı (R^2) ve Kling-Gupta Efficiency (KGE; Gupta vd., 2009) ölçütleriyle değerlendirilmiştir. RMSE, hata büyüklüğünü hedef değişkenle aynı birimde verdiğinden parametreye özgü fiziksel bir gösterge olarak raporlanmıştır. Buna göre RMSE yağış ve PET için mm, LST için °C, RH için %, rüzgâr hızı için m/s ve NDVI için 10^{-2} ölçeğinde sunulmuştur. R^2 ve KGE ise modelin gözlenen değişkenliği ve dağılım özelliklerini ne ölçüde temsil ettiğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Karadeniz Bölgesi İklim Parametrelerinin Tek Değişkenli LSTM Başarımı

Karadeniz Bölgesi'ndeki altı iklim parametresine ait tek değişkenli LSTM modellerinin test dönemi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Parametreler arasında en yüksek R^2 değeri PET modelinde elde edilmiş; bunu sırasıyla LST ve NDVI modelleri izlemiştir. Aynı parametreler için elde edilen yüksek KGE değerleri, yalnızca modelin gözlenen değişkenliği açıklama gücünü değil, aynı zamanda tahmin edilen ve gözlenen serilerin dağılım, varyans ve ortalama açısından da yüksek düzeyde örtüştüğünü göstermektedir. PET, LST ve NDVI parametrelerinin belirgin ve düzenli bir mevsimsel döngüye sahip olması, LSTM ağının geçmiş gözlemlerdeki uzun süreli bağımlılıkları öğrenmesini kolaylaştırmış ve bu parametrelerde daha kararlı bir tahmin performansı sağlamıştır. Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulan eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon grafikleri incelendiğinde, model çıktılarının gözlenen serinin mevsimsel tepe ve dip noktalarını büyük ölçüde takip ettiği görülmektedir.

Tablo 2. Karadeniz Bölgesi tek değişkenli LSTM modellerinin test dönemi başarımı.

Parametre	σ	RMSE	R^2	KGE
PET	79.54 mm	16.61 mm	0.96	0.95
LST	11.01°C	2.97 °C	0.93	0.93
NDVI	14.09×10^{-2}	4.13×10^{-2}	0.91	0.93
Rüzgâr Hızı	0.34 m/s	0.22 m/s	0.56	0.58
Yağış	72.62 mm	48.27 mm	0.56	0.51
RH	4.23 %	3.43 %	0.34	0.40

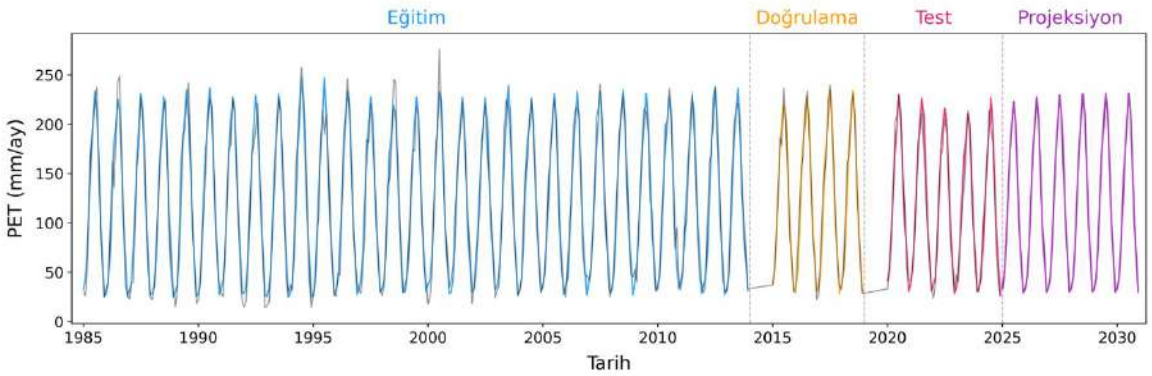
Buna karşılık, rüzgâr hızı, yağış ve RH parametrelerinde model başarımı belirgin biçimde daha düşük kalmıştır. RMSE değerleri, tahmin hatasının her parametrenin kendi fiziksel birimindeki büyüklüğünü göstermektedir. Tablo 2'de RMSE değeri PET için 16.61 mm, LST için 2.97 °C, NDVI için 4.13×10^{-2}, rüzgâr hızı için 0.22 m/s, yağış için

48.27 mm ve RH için %3.43 olarak verilmiştir. Bu değerler, model tahminlerinin gözlenen değerlerden ne ölçüde saptığını göstermektedir.

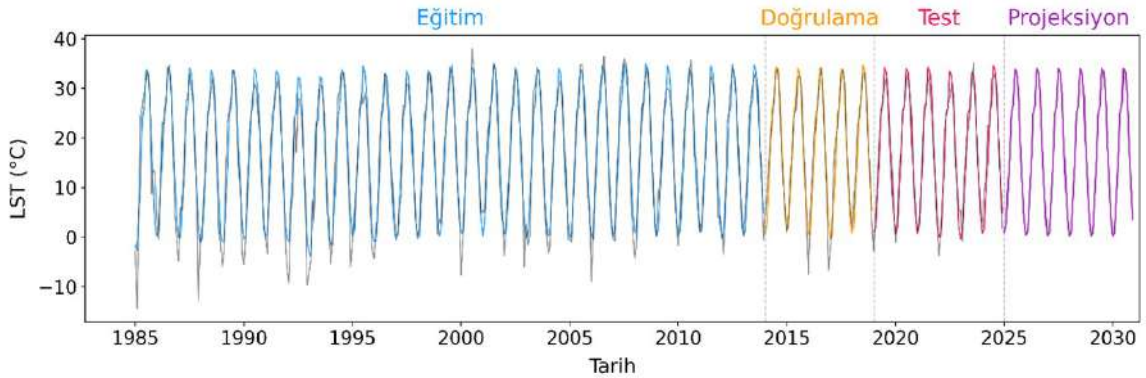
Parametrelerin farklı değişkenlik düzeylerine sahip olması nedeniyle RMSE değerleri, gözlenen serinin standart sapmasına (σ) oranlanarak da değerlendirilmiştir. RMSE'nin σ'ya oranı PET için yaklaşık 0.21, LST için 0.27, NDVI için 0.29, rüzgâr hızı için 0.65, yağış için 0.66 ve RH için 0.81 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, model hatasının ilgili serinin doğal değişkenliğine göre göreli büyüklüğünü göstermektedir. Buna göre PET, LST ve NDVI modellerinde hata, serilerin standart sapmasına kıyasla daha düşük düzeyde kalırken; rüzgâr hızı, yağış ve RH modellerinde hata oranı daha yüksek olmuştur. Bu sonuç, ilk üç parametrede model tahminlerinin gözlenen serinin değişkenliğini daha iyi temsil ettiğini, diğer üç parametrede ise tahmin hatasının serinin doğal dalgalanma düzeyine daha fazla yaklaştığını göstermektedir.

Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü üzere, bu üç parametreye ait gözlenen seriler ay bazında daha düzensiz dalgalanmalar sergilemekte; model çıktıları genel eğilimi yakalayabilse de ani artış ve azalışları aynı hassasiyetle temsil edememektedir. Özellikle yağış serisinin kısa süreli, yerel ve stokastik atmosferik olaylara (konvektif yağışlar, ani sağanaklar vb.) duyarlı olması, ağırlıklı olarak geçmiş yağış değerlerine dayanan bir modelin açıklama gücünü sınırlamaktadır. Benzer şekilde RH modelindeki düşük R^2 değeri, bağıl nemin sıcaklık, basınç ve rüzgâr gibi diğer meteorolojik değişkenlerle güçlü bir etkileşim içinde olmasına karşın, modelin yalnızca kendi geçmiş gözlemlerini girdi olarak kullanmasıyla ilişkilendirilebilir.

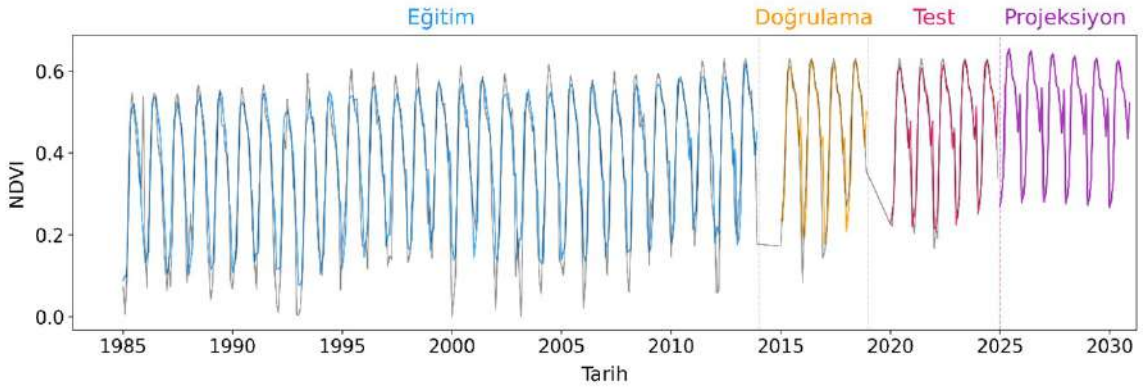
Genel olarak bu bölümdeki bulgular, model başarımının parametreden parametreye önemli ölçüde değiştiğini ve bu farkın parametrenin mevsimsel düzenliliği, zamansal sürekliliği ile kısa süreli değişkenliğe olan duyarlılığıyla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Yağış parametresi için elde edilen test R^2 değeri 0.56, RMSE/σ oranı ise 0.66 olarak belirlenmiştir; bu sonuç, kısa süreli ve düzensiz dalgalanmalara sahip bir parametre için tek değişkenli bir yaklaşımla ulaşılan makul bir tahmin başarımını yansıtmaktadır.



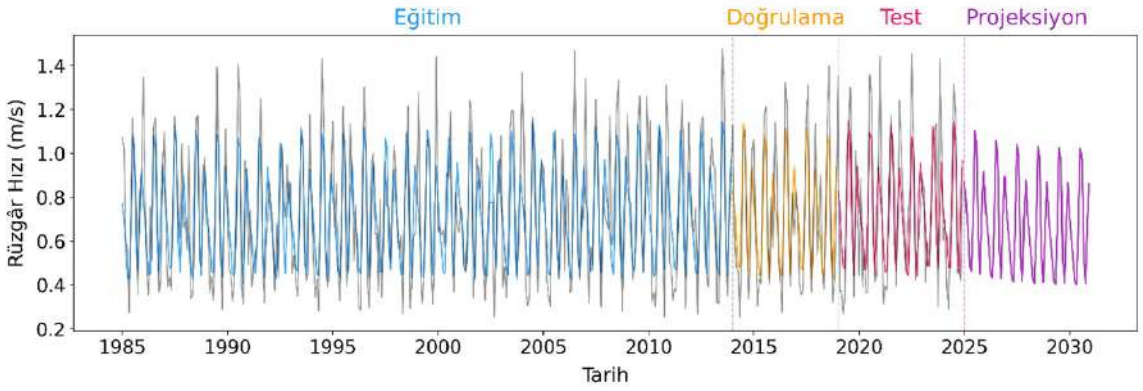
Şekil 1. Karadeniz Bölgesi PET parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı



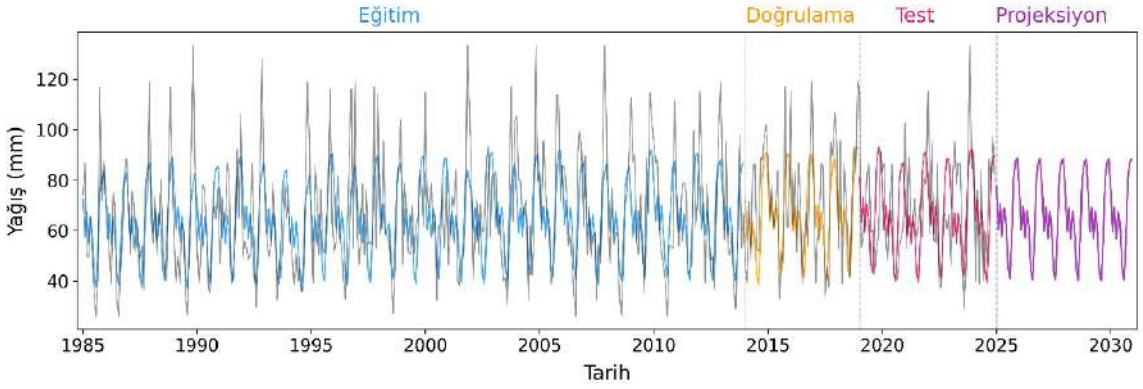
Şekil 2. Karadeniz Bölgesi LST parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı



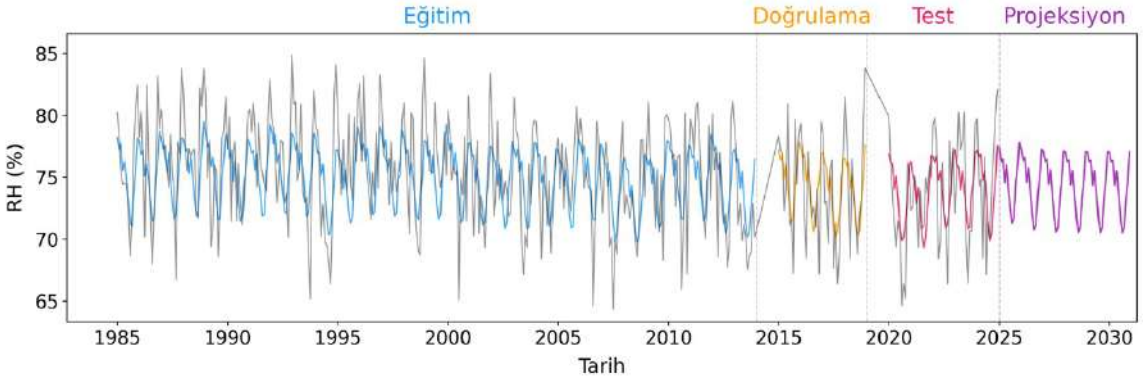
Şekil 3. Karadeniz Bölgesi NDVI parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı



Şekil 4. Karadeniz Bölgesi rüzgâr hızı parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı



Şekil 5. Karadeniz Bölgesi yağış parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı



Şekil 6. Karadeniz Bölgesi RH parametresi için eğitim, doğrulama, test ve projeksiyon performansı

3.2. Parametreler Arası Karşılaştırma

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, Karadeniz Bölgesi'nde tek değişkenli LSTM modellerinin başarımı parametreye göre belirgin biçimde değişmektedir. PET, LST ve NDVI yüksek R^2 ve KGE değerleriyle öne çıkarken; rüzgâr hızı, yağış ve RH daha düşük ancak farklı düzeylerde tahmin edilebilirlik göstermiştir. Bu sıralama, model başarısının yalnızca LSTM mimarisine değil, hedef parametrenin zamansal sürekliliğine, mevsimsel düzenine ve bölgesel değişkenliğine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. RMSE değerleri farklı fiziksel birimlerde verildiği için doğrudan birbirleriyle karşılaştırılmamalı; her parametre kendi birimi ve gözlenen değişkenlik düzeyi içinde değerlendirilmelidir.

3.3. 2025-2030 Dönemi Projeksiyonları

Şekil 1-6'da sunulan 2025-2030 projeksiyonları incelendiğinde, PET ve LST modellerinin gözlenen mevsimsel genliği ve ortalama düzeyi koruyarak test dönemine benzer seviyelerde seyrettiği görülmektedir. NDVI projeksiyonunda artış eğilimi sürmekte ve yaz aylarındaki tepe değerler yaklaşık 0.60 düzeyine ulaşmaktadır. RH projeksiyonu durağan bir seyir izlemekle birlikte gözlenen seriye kıyasla daha dar bir aralıkta değişmektedir. Rüzgâr hızı ve yağış projeksiyonlarında mevsimsel döngü korunmakla birlikte, gözlenen serilerdeki yüksek değerler projeksiyonlarda temsil edilememektedir. Bu nedenle projeksiyonlar, özellikle yağış ve rüzgâr hızı için uç değerlerden çok mevsimsel düzeyin olası seyrini yansıtacak biçimde yorumlanmalıdır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Karadeniz Bölgesi'ndeki yağış, LST, PET, RH, rüzgâr hızı ve NDVI parametrelerinin tek değişkenli LSTM modelleriyle tahmin edilebilirliği karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı model yaklaşımının farklı iklim parametrelerinde farklı başarım düzeyleri ürettiğini göstermiştir. PET, LST ve NDVI modelleri yüksek uyum sergileyerek düzenli mevsimsel örüntülerin LSTM tarafından başarılı biçimde öğrenilebildiğini ortaya koymuştur. Parametreler arasında özellikle PET, LST ve NDVI'nin dikkat çekici düzeyde yüksek tahmin başarımı sergilemesi, bu çalışmanın en güçlü bulgularından biridir. 0.90'ın üzerindeki R^2 ve KGE değerleri, modelin yalnızca genel eğilimi değil, gözlenen serilerin mevsimsel tepe ve dip noktalarını, genlik ve dağılım özelliklerini de yüksek doğrulukla yeniden üretebildiğini göstermektedir. Bu sonuç, düzenli mevsimsel döngüye sahip iklim değişkenlerinin LSTM mimarisiyle etkili biçimde modellenebileceğini göstermekte; PET ve LST gibi parametrelerin bölgesel izleme çalışmalarında tek değişkenli yaklaşımla da yüksek doğrulukla öngörülebileceğine işaret etmektedir.

Yağış, rüzgâr hızı ve RH parametrelerinde elde edilen başarımın diğer parametrelere kıyasla daha sınırlı olduğu görülmüştür. Bu durum, söz konusu değişkenlerin kısa süreli ve yerel atmosferik süreçlerden daha fazla etkilenmesi ve yalnızca geçmiş değerlerinin kullanıldığı tek değişkenli modellerle tüm değişkenliğin açıklanmasının güç olmasıyla ilişkilendirilebilir. Yağış parametresi için elde edilen 0.56 düzeyindeki test R^2 değeri, serideki değişimin belirli bir bölümünün model tarafından yakalanabildiğini, ancak önemli bir kısmının açıklanamadığını göstermektedir. Bu sonuç, Karadeniz Bölgesi'nin değişken yağış rejimi ve kullanılan tek değişkenli model yapısı dikkate alınarak orta düzeyde bir tahmin başarımı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, yağış tahmininde başarımın artırılabilmesi için atmosferik yardımcı değişkenlerin, daha yüksek zamansal çözünürlüklü verilerin ve mekânsal farklılıkları dikkate alan modelleme yaklaşımlarının araştırılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen 2025-2030 dönemine ait projeksiyonlar, altı parametrenin de mevsimsel örüntülerini ve ortalama düzeylerini büyük ölçüde koruyarak ileriye taşıdığını göstermiştir. Bununla birlikte bu projeksiyonların iklim modeli senaryolarına dayalı zorlamalı öngörüler değil, gözlenen serilerin öğrenilen zamansal yapısının istatistiksel olarak ileriye taşınmasına dayandığı göz önünde bulundurulmalıdır. PET, LST ve NDVI modellerinin test döneminde yüksek tahmin başarımı göstermesi, kısa vadeli istatistiksel öngörüler açısından potansiyel taşıdıklarına işaret etmektedir. Bununla birlikte, projeksiyonların belirsizliği ayrıca değerlendirilmelidir.

Genel olarak bu çalışma, Karadeniz Bölgesi'nde iklim parametrelerinin tahmin edilebilirliğinin yalnızca kullanılan algoritmaya değil, her bir parametrenin kendine özgü zamansal düzenliliğine, mevsimsel yapısına ve bölgesel değişkenlik düzeyine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Altı farklı parametrenin aynı yöntemsel çerçeve içinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, bölgenin iklim sistemine dair bütüncül bir bakış açısı sunmakta ve hangi değişkenlerin hangi düzeyde güvenle izlenebileceğine ilişkin somut bir referans oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, özellikle yağış ve RH gibi daha değişken parametreler için mekânsal bilgiyi, atmosferik yardımcı değişkenleri ve daha yüksek zamansal çözünürlüğü dikkate alan çok değişkenli modellerin değerlendirilmesi, mevcut başarımın daha da artırılması açısından umut verici bir yön olarak görülmektedir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans öğrencisi Nursena PASLI'nın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., & Zemp, M. (2014). The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(9), 1431-1443.

Guo, Q., He, Z., & Wang, Z. (2024). Monthly climate prediction using deep convolutional neural network and long short-term memory. *Scientific Reports*, *14*(1), 17748.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *377*(1-2), 80-91.

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, *9*(8), 1735-1780.

Karabulut, M. A., & Topçu, E. (2022). Derin öğrenme tekniği kullanilarak kars ilinin hava sicaklik tahmini. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *10*(4), 1174-1181.

Ouma, Y. O., Cheruyot, R., & Wachera, A. N. (2022). Rainfall and runoff time-series trend analysis using LSTM recurrent neural network and wavelet neural network with satellite-based meteorological data: case study of Nzoia hydrologic basin. *Complex & Intelligent Systems*, *8*(1), 213-236.

Öztürk, M. Z., Çetinkaya, G., & Aydın, S. (2017). Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'nin iklim tipleri. *Journal of Geography*, (35), 17-27.

Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, *15*(1), 1929-1958.

Vasilakos, C., Tsekouras, G. E., & Kavroudakis, D. (2022). LSTM-based prediction of mediterranean vegetation dynamics using NDVI time-series data. *Land*, *11*(6), 923.

BİLDİRİ BAŞLANGIÇ SAYFALARI

Yazar Dizini

Abdikan, Saygın 7, 130, 164, 526
Abujayyab, Sohaib K M 302
Acar, Hayrettin 51, 72
Açmalı, Şüheda Semih 302, 505
Adıyaman Varul, Hilal 269
Akay, Semih Sami 730
Akça, Şeyma 318, 643
Akçal, Mustafa Emre 269
Akçay, Özgün 545
Akın, Alper Tunga 107, 116
Aktar, Yunus 414
Akyüz, Dilek Eren 643
Alkan, Mehmet 585
Alpan, Korcan 220, 464
Altay, Melih 7, 130, 401
Altuntaş, Osman Yavuz 18, 619
Aslan, Ayşen 589
Atasever, Ümit Haluk 145, 337
Atasoy, Bura Adem 107, 372
Ateşoğlu, Ayhan 486, 632
Avdan, Uğur 451
Aydın, İlyas 172
Aydın, Sima 597
Aytaç, Buse 388
Aytaç, Gizem 358
Aytekin, Anıl Yusuf 748
Aytemür, Muhammed Ali 531, 751
Bahadır, Murat 192
Bakırman, Tolga 1, 269
Balık Şanlı, Füsun 164, 526, 545, 643
Battal Şamiloğlu, Fulya 683
Bayhan, Merve 414
Bayık, Çağlar 164, 526
Bayrak, Onur Can 547
Bayram, Bülent 1, 269
Becek, Kazimierz 155
Bektaş Balçık, Filiz 629
Beşdok, Erkan 145, 337
Bilal, Cumhur Eren 486, 632
Bilgili, Ertuğrul 358
Bilgilioğlu, Burhan Baha 760
Bilgilioğlu, Süleyman Sefa 760
Bilir, Nebi 309
Bulut, Fidan Şevval 486, 632
Bursalı, Fatih 541
Büyüksalih, Gürcan 62
Canaz Sevgen, Sibel 176
Canbolat, Yeter 695
Candan, Hüseyin 556
Canözü, Ömer 51
Coşkun, Erhan 192
Coşkun, Suat 526
Coşkuner, Kadir Alperen 358
Cömert, Çetin 87, 116
Çakar, Rabia 448
Çakır, Leyla 589
Çakmak, Gökçe Betül 142
Çallı, Rüştü 28
Çelen, Meltem 18
Çelikkaya, Kayra 556
Çeliktepe, Berat 295
Çetin, İbrahim 760

BİLDİRİ BAŞLANGIÇ SAYFALARI

Yazar Dizini

Çetin, Zehra 122
Çolak, Hüsniye Ebru 523
Çolak, Savaş 556
Çölkesen, İsmail 18, 42, 295, 619
Çömert, Resul 309
Çubukçu, Nurhayat 513
Çukurlu, Göktuğ Yaşar 441
Dalgıç, Özge Tuştaş 556
Daş, Fevzi 28, 192
Daştan, Berna 269
Demir, Nusret 441
Demirhan, Deniz 698
Derelioğlu, Zeynep Nur 388
Dihkan, Mustafa 192
Dinçer, Fatih Tunahan 192
Doğan, İnan 206
Dolunay, Rümeysa 240
Döner, Fatih 513, 744
Duman, Osman 520, 705
Durmuşçelebi, Fatih Mehmet 714
Ercan, Merve 714
Erdoğan, Cengiz 62
Erdoğan, Talha 62
Erdur Harman, Sena 451
Erenoğlu, Oya 541
Erenoğlu, R. Cüneyt 541
Ertaş, Büşra 142
Esgün, İsmail Sefa 698
Evcin, Elif 448
Gayretoğlu, İlktan 122
Gazioğlu, Cem 62
Genç, Nihal 523
Gökalp, Ertan 589
Gökduman, Deniz 231
Gökgöz, İsmail Hakkı 655
Görmüş, Kurtuluş Sedar 155
Gündüz, Halil İbrahim 455
Güner, Hasan 269
Güneş, Betül 113
Güngör, Selver 145, 337
Gürbulak, Mine Nur 721
Gürbüz, Murat Tuna 556
Hatay, Taha Yasin 259
Horoz, Melek 574
İnan, Halil İbrahim 206, 380
Kaba, Kazım 597, 655
Kadı, Fatih 419
Kalfa, Tuğçe 608
Kalkan, Kaan 401
Kandırmaz, H. Mustafa 597
Kantekin, Sertaç 574
Kaplan, Gordana 309, 416
Kapusuz, Çağrı 455
Kara, Gülten 608
Kara, Seda 475, 685
Karadaş, Emre 714
Karakaya, Zeynep Ceyda 240
Karaman, Himmet 698
Karaş, İsmail Rakıp 78, 302
Karataş, Sema 695
Karslı, Fevzi 192
Kavzoğlu, Taşkın 285

BİLDİRİ BAŞLANGIÇ SAYFALARI

Yazar Dizini

Kaya, Hüseyin 358
Kaya, Yunus 595
Kaymaz, Çağlar Kıvanç 326
Kazaz, Pınar 87
Kefauver, Shawn C. 414
Kılıç, Batuhan 547
Kılıç, Gülşah 629
Kılıç, Yasemin 646
Kırımlıoğlu, Betül 298
Koca, Cemile 326
Kurt, Gökhan 401
Kurt, Orhan 565, 664
Memduhoğlu, Abdulkadir 361
Mete, Muhammed Oğuzhan 240
Musaoğlu, Nebiye 269, 358
Narin, Ömer Gökberk 164, 526
Nas, Murat 744
Nasıroğlu, İlham 597
Okurlar, Hande 309
Onay, Ersin 172
Orhan, Osman 455
Oruç, Halil Nurullah 18
Örcün, Ahmet 683
Özbey, Alper Ahmet 309, 416
Özdağ, Mesut 302
Özdemir, Emirhan 28, 39, 192
Özdemir, Eren Gürsoy 526
Özkan, Remzi 414
Özmen, Hasan Burak 309
Öztürk, Muhammed Yusuf 285, 295
Öztürk, Ozan 760
Öztürk, Rıdvan 565
Paslı, Nursena 763
Pehlivan, Hüseyin 220
Peker, Yarensu 388
Polat, Ahmet Batuhan 541, 545
Polat, Fethullah 597, 655
Sahak, Ahmad Shakib 192
Sakallı, Serdar 97
Sal, Selman 714
Saygı, Mustafacan 18
Sefercik, Umut Güneş 42, 172
Semiz, Esra 671
Sevgen, Eray 184
Sevinç, Hacer Kübra 78
Sevinç, Mevlüt 505
Seyrek, Eren Can 299
Sönmez, Namık Kemal 441
Sunar, Filiz 274, 475
Susetyo, Danang Budi 1
Şeker, Dursun Zafer 760
Şekertekin, Aliihsan 28, 164
Şener, Erhan 448
Şerifoğlu Yılmaz, Çiğdem 763
Şimşek, Fatih Fehmi 7, 130, 401
Talas, Samed Furkan 172
Tanır Kayıkçı, Emine 431
Tanış, Abbas Han 274
Taşkın, Gülşen 358
Taştan, Bekir 500, 740, 748
Tatar, Orhan 348
Tek, Hüseyin 380

BİLDİRİ BAŞLANGIÇ SAYFALARI

Yazar Dizini

Teke, Alihan 285
Terzi, Fatih (İTÜ) 348
Terzi, Fatih (KTÜ) 107, 372
Terzi Türk, Seda 431
Topan, Hüseyin 155
Torun, Ahmet Tarık 113, 695
Tunç, Berra Nur 145, 337
Tunç Görmüş, Esra 298, 431, 716
Türkel, Beyza 632
Türkmen, Engin 585
Türkmen, Rabia Beyza 597
Tütüncü, İsa 372
Uçum, Gülsüm 448
Ulukavak, Mustafa 529
Usta, Ziya 110
Uysal, Murat 299
Uzun, Bayram 372
Uzunalioğlu, Emine 72
Ünlü, Doğukan 556
Üstüner, Mustafa 309, 401
Varul, Yunus Emre 269
Veziro, Furkan 441
Vuran, Zeynep 240
Yalçınkaya, Mualla 531, 751
Yastıklı, Naci 671
Yavuzyılmaz, Osman 520, 705
Yel, Sude Gül 716
Yergün, Uzay 671
Yeşil, Emel 740
Yeşilnacar, Tuğba 683
Yeşilyaprak, Cahit 597, 655
Yıldırım, Esra 42
Yıldırım, Feride Seçil 192
Yıldırım, Sidal 122
Yıldırım, Volkan 372
Yıldız Aydoğan, Reyhan 683
Yıldız, Can Ekin 556
Yıldız, Mitat Can 28
Yılmaz, Elif Özlem 285
Yılmaz, Osman Salih 326, 448
Yılmaz, Taner 685
Yomralıoğlu, Tahsin 97, 249, 348
Yüksel, Nihal 249
Yüzlükoğlu, Funda 597

UZAL-CBS 2026

X. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu

15–17 EKİM 2026 · TRABZON



KTÜ 1955 Karadeniz Teknik Üniversitesi

UZAL-CBS2026 TRABZON

İTÜ İstanbul Teknik Üniversitesi 1773