

20.

TÜRKİYE HARİTA BİLİMSEL VE TEKNİK KURULTAYI

Bildiriler Kitabı



VERİDEN BİLGİYE, BİLGİDEN DEĞERE  
**YAŞANABİLİR GELECEĞİN HARİTASI**

1-3 Ekim 2025

Ankara

TBB Av. Özdemir Özok Kongre Merkezi



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# TÜRKİYE HARİTA BİLİMSEL VE TEKNİK KURULTAYI

## Bildiriler Kitabı

### E Kitap

Yayın Tarihi: Ocak 2026

Dağıtım: HKMO İnternet Sitesi, Kurultay İnternet Sitesi, Ulusal Kütüphaneler

**HKMO Adına Sahibi:** Ali İpek

**Yayına Hazırlayan:** Sevgi Kerkez

**Mizanpaj:** Önder Olgun Bökü

**ISSBN:** 978-605-01-1728-8

©

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, bu yayını mesleğimizin gelişimine öncülük etmek, bilimsel çalışmalara katkıda bulunmak, toplumun doğru bilgiye erişimini sağlamak ve mesleki birikimin kamu yararı doğrultusunda kullanılmasını amaçlamak üzere e-kitap formunda ücretsiz olarak yayımlamıştır.

Kitabın tüm hakları saklıdır. Kitapta yer alan sunumlar ve/veya sunumlardan yapılacak alıntılar ancak sunum sahiplerine atıf yapılmak kaydıyla kullanılabilir.

HKMO 2026

## İçindekiler

Ön Söz.....	1
Kurullar .....	2
Kurultay Programı .....	6
<b>Teknik Oturumlar</b>	
<b>Teknik Oturum 1: Afet Yönetimi ve İklim Değişikliği</b>	
1.1. Toplum Tabanlı Afet Yönetiminde Uzamsal Verinin Paylaşımı: Antiquake Risk Avcısı Topluluk Modeli (Bildiri Özet).....	14
1.2. Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangın Riskinin ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi: 2025 Yılı İzmir, Çeşme Örneği (Bildiri Özet).....	17
1.3. Türkiye'nin Sıcaklık Verilerinin Yapay Zekâ Tabanlı Haritalanması (Bildiri Özet).....	22
1.4. Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin Maxent ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile Karşılaştırılması (Tam Metin).....	24
1.5. 1999 Gölcük Depremi Sonrası Tsunaminin Neden Olduğu Kıyı Değişikliklerinin Uydu Tabanlı Değerlendirmesi (Bildiri Özet).....	30
<b>Teknik Oturum 2: İmar Uygulamaları ve Kentleşme</b>	
2.1. Yapay Zekâ ile İmar Verilerinden Anlamlı Bilgiye: Vatandaş Odaklı Bir Yaklaşım (Bildiri Özet) .....	34
2.2. Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi(Tam Metin).....	36
2.3. Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Kamulaştırma Amaçlı Tahsis Yaklaşımı: Tarihsel Süreç, Uygulama Sorunları ve 2025 Düzenlemeleri (Bildiri Özet).....	44
2.4. Kentsel Dönüşümde Etkin Strateji Geliştirme ve Uygulama: Mekânsal Karar Destek Sistemleri ile Kayseri Talas İlçesi Örneği (Bildiri Özet) .....	46
2.5. Yapı Yoğunluğu Arazi Kullanımı İlişkisinde Zamansal Nitelikli Bir Analiz Çalışması (Bildiri Özet).....	48
<b>Teknik Oturum 3: Hızlı Sunular</b>	
3.1. YBM-CBS Entegrasyonunda IFC-Citygml Dönüşümü: Açık Kaynak Araçların İncelenmesi ve Denenmesi (Bildiri Özet)....	52
3.2. Akıllı Şehir Büyükçekmece: E-Belge Ekosistemi ile Sürdürülebilirlik ve Dijital Dönüşüm (Bildiri Özet).....	57
3.3. NETCAD Veterinerlik Bilgi Sistemi (VETBİS) (Bildiri Özet).....	60
3.4. Kuzey Anadolu Fay Zonu Yedisu Segmenti Depremselliğinin Araştırılmasına Jeodezik Katkıları (Bildiri Özet) .....	62
3.5. GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler (Tam Metin).....	65
3.6. GNSS ve SBAS Sistemlerinin Güncel Durumu ve Türkiye Perspektifi: 2025 Değerlendirmesi (Tam Metin).....	71
3.7. Statik GNSS, Ağ-RTK, PPP-RTK ve SBAS Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması (Tam Metin) .....	79
3.8. Farklı Yer Potansiyeli Modelleri ile TG-20 Jeoidinin Karşılaştırılması-ICGEM Parametrelerinin İncelenmesi (Tam Metin)...	88
3.9. İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi (Tam Metin) .....	94
3.10. Fotoğraftan Bilgiye, Harita Mühendisinin Gücü (Bildiri Özet) .....	101
3.11. Maden İşletmelerinde İşçi Güvenliği İçin İOT Tabanlı Maden İzleme Sistemi (Tam Metin).....	103
<b>Teknik Oturum 4: Jeodezi ve Ölçme Uygulamaları</b>	
4.1. Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yüğü (Bildiri Özet).....	112
4.2. Elektronik Harp Koşullarında İHA GNSS Navigasyon Performansının Otonom Kalkış Analizi (Bildiri Özet).....	114
4.3. Mobil Haritalama Sistemleri İçin Çok-Antenli GNSS Sisteminden Konum ve Dönüklük Bilgisi Elde Edilmesi (Bildiri Özet) .....	116
4.4. Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi (Tam Metin) .....	118
4.5. Büyük Ölçekli Harita Üretiminde Yer Kontrol Noktası Koordinatlarının Türkiye Ulusal Referans Ağı Çerçevesi (TUREF)'ne Dayalı Olarak Belirlenmesinde Türkiye Yatay Hız Alanının Etkisinin Araştırılması (Bildiri Özet).....	128
4.6. GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelenmesi (Tam Metin).....	130
<b>Teknik Oturum 5: Coğrafi Bilgi Teknolojileri</b>	
5.1. Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve Cesiumjs ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği (Tam Metin).....	142
5.2. Vektör Hücreli Otomat Temelli Kentsel Büyüme Modellemesinde Gamma Dağılımı ile Yerel Etki Mesafesinin Belirlenmesi: İstanbul, Berlin ve Madrid (Tam Metin).....	151

5.3. Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler (Tam Metin).....	156
5.4. Gönüllüler Haritası (Tam Metin).....	163
5.5. Kitle Kaynaklı Doğrulama ve Yapay Öğrenme Araçları ile Uzamsal Veri İyileştirme (Bildiri Özet) .....	165
5.6. CBS Tabanlı Doğalgaz Altyapı Yatırım Yönetimi: Gasnet Uygulaması ile Vatandaş Taleplerinin Yatırıma Dönüşme Süreci (Tam Metin) .....	167
<b>Teknik Oturum 6: Uzaktan Algılama ve Fotogrametri</b>	
6.1. İstanbul Havzalarındaki Baraj Yüzeylerinin Su Çıkarma İndeksleri Kullanılarak Belirlenmesi (Tam Metin).....	176
6.2. Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve Deeplabv3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması (Tam Metin) .....	186
6.3. Eskişehir Kaymaz Kasabası'nda Süper Çözünürlüklü Sentinel-2 Görüntüleri ile 8 Yıllık Tarımsal Faaliyetlerin İncelenmesi (Bildiri Özet) .....	197
6.4. Segment Anything Modeli (SAM) ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenolojik Uyumlu Otomatik Tarım Parseli Çıkarımı (Tam Metin) .....	200
6.5. Fotogrametri Uygulamalarında Eğik (Oblique) Verilerin Kullanılması (Bildiri Özet) .....	211
6.6. Mobil Lidar ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti (Tam Metin).....	213
<b>Teknik Oturum 7: Arazi Yönetimi</b>	
7.1. Gıda Güvenliği ve Güvencesinin Sağlanmasında Arazi Yönetimi: Harita Mühendisliği Perspektifi (Bildiri Özet).....	222
7.2. Kuruluşlarının 100'üncü Yılında, Sistem Teorisi Yaklaşımıyla, Türkiye Harita ve Kadastro Kurumlarının ve Faaliyetlerinin Gelişiminin İncelenmesi ve Benzer Ülkelerle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi (Bildiri Özet) .....	225
7.3. Arazi Yönetiminde Tüze Çalışmalarına Öneriler (Tam Metin) .....	227
7.4. Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi (Bildiri Özet) .....	233
7.5. Gayrimenkul Sektöründe Yeni Bir Dönem: Gayrimenkul Tokenizasyonu ve Uygulamaları (Tam Metin).....	235
7.6. Toprak Gaspından Veri Gaspına: Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. Yılında Dijital Sömürgecilik Karşısında Ulusal Veri Egemenliği Modeli (Bildiri Özet) .....	245
<b>Teknik Oturum 8: Yapay Zekâ ve Yenilikçi Meslek Uygulamaları</b>	
8.1. Otonom Sürüş ve İnsansı Robotlar (Tam Metin) .....	250
8.2. Tarım-Enerji Kesişimi İçin Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Agrivoltaik Uygunluk Analizi (Tam Metin).....	257
8.3. Çok Kaynaklı Yer Gözlem Verileri Kullanılarak Açıklanabilir Mısır Rekoltesi Tahmini (Bildiri Özet) .....	264
8.4. Atmosferik ve Meteorolojik Faktörlere Dayalı Güneş Paneli Performans Tahmini (Bildiri Özet) .....	266
8.5. Uzayda Navigasyon (Tam Metin) .....	268
8.6. Güzergâh Optimizasyonunda ÇKKV ve Bir Grafik Sinir Ağı Yaklaşımının Karşılaştırmalı Analizi (Tam Metin).....	279



## Ön Söz

Harita mühendisliği alanının ülkemizdeki en köklü ve kapsamlı etkinliği olan **Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı'nın yir-mincisini** düzenlemenin gururunu yaşıyoruz. Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası olarak; mesleğimizin gelişimine öncülük eden, bilimsel doğruları esas alan, toplumun doğru bilgiye erişimini amaçlayan ve mesleki birikimini kamu yararı doğrultusunda kullanan bir kamu tüzel kişiliği olmanın bilinciyle, bu büyük bilimsel buluşmayı değerli paydaşlarımızla buluşturmaya devam ediyoruz.

Odamız tarafından ilk kez 1987 yılında gerçekleştirilen ve o tarihten bu yana iki yılda bir düzenlenmekte olan **Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı**, ülkemizde harita mühendisliğinin gelişimine yön veren temel ve kurumsal bir platform olmuştur. Bugüne kadar düzenlenen 19 kurultayda; bilim, teknoloji ve toplumsal yaşamın farklı alanlarında yaşanan gelişmeler, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri başta meslektaşlarımız olmak üzere ilgili meslek disiplinleri ve kamuoyu ile paylaşılmış, bu hedef her kurultayda daha da güçlendirilerek sürdürülmüştür. Jeodezi, fotogrametri, uzaktan algılama, kartografya, coğrafi bilgi sistemleri, kadastro, gayrimenkul yönetimi ve ülke gündemine ilişkin pek çok başlıkta yürütülen ön açıcı tartışmalar ve alt etkinlikler aracılığıyla, harita mühendisliği sektörünün geçmişten bugüne uzanan bilgi birikimi ve deneyimi ortak bir zeminde buluşturulmuştur. Bu yönüyle Kurultay, yalnızca bir bilimsel etkinlik olmanın ötesinde, Anayasa'dan, örgütlü mücadeleden ve sürekli gelişen bilimsel bilgiden güç alan mesleki kimliğimizin ve geleneğimizin ayrılmaz bir parçasıdır.

Son çeyrek yüzyılda yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler ve dijitalleşme süreçleri, harita mühendisliği disiplinini hem kuramsal hem de uygulama boyutunda köklü bir dönüşüme zorlamıştır. Büyük veri, bulut bilişim, yapay zekâ ve yapay öğrenme, dijital ikizler, sanal ve artırılmış gerçeklik, üç boyutlu modelleme, akıllı şehir uygulamaları, otonom sistemler, gelişen sensör teknolojileri, konum tabanlı hizmetler ile uzay ve uydu çalışmaları, mesleğimizin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş olup ürün ve hizmet çeşitliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Günümüzde harita mühendisliği, uzamsal verinin üretilmesiyle sınırlı kalmayıp bu verilerin analiz edilmesi, yönetilmesi, görselleştirilmesi ve karar verme süreçlerine entegre edilmesiyle stratejik bir rol üstlenen, teknoloji yoğun bir mühendislik alanı olarak konumlanmaktadır.

Bu hızlı dönüşümle eş zamanlı olarak küresel iklim krizi, doğal kaynakların aşırı ve doğa karşıtı tüketimi, plansız kentleşme ve arazi kullanımı, sosyoekonomik eşitsizlikler, göç baskısı ve doğal afetler gibi yerel ve küresel sorunlar, yaşanabilir bir geleceğin inşasını tehdit etmektedir. Bu sorunların azaltılması, önlenmesi ve yönetilmesinde harita mühendisliği disiplini; uzamsal veriyi yalnızca bir çıktı değil, toplumsal fayda, sürdürülebilir kalkınma ve kamu yararı doğrultusunda anlamlı bilgiye dönüştüren kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte bilimsel bilginin ve örgütlü mesleki duruşun önemi her geçen gün daha da artmaktadır.

Bu çerçevede **20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı**, “Veriden Bilgiye, Bilgiden Değere: Yaşanabilir Geleceğin Haritası” ana temasıyla, 1–3 Ekim 2025 tarihleri arasında Ankara’da, Türkiye Barolar Birliği Av. Özdemir Özok Kültür ve Kongre Merkezi’nde gerçekleştirilmiştir. Kurultayda kamu kurumları, üniversiteler, özel sektör temsilcileri ve öğrencilerden oluşmak üzere mesleğimizin tüm bileşenleri bir araya gelmiş; bilimsel ve teknik oturumların yanı sıra sosyal ve kültürel içerikli oturumlar ile kapsamlı tartışmalar yürütülmüştür.

Kurultay kapsamında çağrılı sunumların yanı sıra **Afet Yönetimi ve İklim Değişikliği, İmar Uygulamaları ve Kentleşme, Jeodezi ve Ölçme Uygulamaları, Coğrafi Bilgi Teknolojileri, Uzaktan Algılama ve Fotogrametri, Arazi Yönetimi, Yapay Zekâ ve Yenilikçi Meslek Uygulamaları** başlıkları altında toplam 40 hakemli bildiri sunulmuştur. Bu bildiriler, mesleğimizin güncel sorunlarına bilimsel yaklaşımlar sunmanın yanı sıra, uygulamaya dönük çözüm önerileriyle de literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu yıl ilk kez gerçekleştirilen **Hızlı Sunum Oturumu**, 11 araştırmacının kısa süreli ve yoğun içerikli sunumlarıyla kurultaya ayrı bir dinamizm kazandırmıştır. Poster alanlarında devam eden tartışmalar ise katılımcılar arasında etkileşimi güçlendirmiş, bilgi paylaşımını artırmış ve yeni iş birlikleri için verimli bir ortam yaratmıştır.

Elinizdeki **Bildiriler Kitabı**, Kurultay süresince sunulan çalışmaların kalıcı bir bilimsel kaynak olarak literatüre kazandırılmasını amaçlamaktadır. Kitapçıkta yer alan çalışmaların; harita mühendisliğinin gelişen rolünü anlamaya, güncel uygulamaları izlemeye ve yaşanabilir bir geleceğin inşasına yönelik yeni araştırma ve uygulamalara katkı sağlayacağına inanıyoruz.

Bu sürecin gerçekleşmesinde emeği geçen tüm yazarlara, hakemlere, bilim ve düzenleme kurulu üyelerine teşekkür eder; Kurultayımızın bilim dünyasına, mesleğimize ve topluma değerli katkılar sunmasını dileriz.

TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 49. Dönem Yönetim Kurulu Adına  
Kurultay Yürütme Kurulu



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

## Genel Merkez Yönetim Kurulu

Ali İpek	<i>Genel Başkan</i>
Eray Yıldız	<i>II. Başkan</i>
Murat Türüdü	<i>Genel Sekreter</i>
Gizem Gürlek Cangür	<i>Genel Sayman</i>
Ufuk Aydın	<i>Örgütlenme Sekreteri</i>
Mehmet Ali Sergen	<i>Eğitim Sekreteri</i>
Ozan Özer	<i>Üye</i>

## 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Yürütme Kurulu

Mustafa Nevzat Düzağaç	<i>Kurultay Başkanı</i>
Doç. Dr. Berkay Bahadur	<i>Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Gizem Gürlek Cangür	<i>Kurultay Saymanı</i>
Sevgi Kerkez	<i>Kurultay Sekreteri</i>
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Kara	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ali Hasan Doğan	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Dr. Kaan Kalkan	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Dr. Ümit Yıldız	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Meryem Aydın	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Özge Acar	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>
Serap Dağdelen	<i>Yürütme Kurulu Üyesi</i>

## 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Danışma Kurulu

Ali İpek	<i>Genel Başkan</i>
Eray Yıldız	<i>İkinci Başkan</i>
Murat Türüdü	<i>Genel Sekreter</i>
Gizem Gürlek Cangür	<i>Genel Sayman / Kurultay Saymanı</i>
Ufuk Aydın	<i>Örgütlenme Sekreteri</i>
Mehmet Ali Sergen	<i>Eğitim Sekreteri</i>
Ozan Özer	<i>Yönetim Kurulu Üyesi</i>
Orhan Kasap	<i>46. Dönem HKMO Genel Başkanı</i>
Hüseyin Ülkü	<i>39., 40., 41. Dönem HKMO Genel Başkanı</i>
Ayhan Erdoğan	<i>TMMOB Denetleme Kurulu Üyesi</i>
Doç. Dr. Berkay Bahadır	<i>Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Namık Gazioğlu	<i>Mesleki Standartlar Uygulamalar ve Yasal Temeller Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Nesibe Necla Uluğtekin	<i>Kartografya ve Mekânsal Bilişim Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Ahmet Özgür Doğru	<i>Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Teknolojileri Komisyonu Başkanı</i>
Mustafa Nevzat Düzağaç	<i>Ulaştırma ve Altyapı Komisyonu Başkanı / Kurultay Başkanı</i>
Prof. Dr. Volkan Çağdaş	<i>Kadastro ve Arazi Yönetimi Komisyonu Başkanı</i>
Doç. Dr. Murat Selim Çepni	<i>Mekânsal Planlama ve İmar Komisyonu Başkanı</i>
Mustafa Kubilay Yıldırım	<i>Taşınmaz Değerlemesi ve Yönetimi Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Cemal Özer Yiğit	<i>Mühendislik Ölçmeleri Komisyonu Başkanı</i>
İsmail Mutaf	<i>Kentsel Dönüşüm Komisyonu Başkanı</i>
Emin Özmen	<i>Arazi Topplulaştırma ve Akıllı Kırsal Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Rahmi Nurhan Çelik	<i>19. THBTK Başkanı</i>
Doç. Dr. Nusret Demir	<i>19. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı / Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Aydın Üstün	<i>18. THBTK Başkanı / Jeodezi Ve Konum Belirleme Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Halil Akıncı	<i>17. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. Rasim Deniz	<i>16. THBTK Başkanı</i>
Prof. Dr. Taylan Öcalan	<i>16. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı / Mühendislik Ölçmeleri Komisyonu Başkanı</i>
Prof. Dr. Haluk Özener	<i>15. THBTK Başkanı / 12. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. İ. Öztuğ Bildirici	<i>15. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. Haluk Konak	<i>14. THBTK Başkanı</i>
Prof. Dr. Çetin Cömert	<i>14. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. Muhammed Şahin	<i>13. THBTK Başkanı</i>
Prof. Dr. Fatmagül Kılıç Gül	<i>13. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. Dursun Zafer Şeker	<i>12. THBTK Başkanı</i>
Prof. Dr. Halil Erkaya	<i>11. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Doç. Dr. M. Tefik Özlüdemir	<i>10. THBTK Yürütme Kurulu Başkanı</i>
Prof. Dr. Bahattin Erdoğan	<i>HKMO Jeodezi Ve Jeoinformasyon Dergisi Editörü</i>



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

## 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bilim Kurulu

Prof. Dr. Ahmet Özgür Doğru	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Mustafa Türker	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Ali Melih Başaraner	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Naci Yastıklı	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Arif Çağdaş Aydınoglu	<i>Gebze Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Nebiye Musaoğlu	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Arzu Erener	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Nesibe Necla Uluğtekin	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Aydın Üstün	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Niyazi Arslan	<i>Çukurova Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Ayşe Yavuz Özalp	<i>Artvin Çoruh Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Nursu Tunalioglu Öcalan	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Aziz Şişman	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Ozan Arslan	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Bahadır Aktuğ	<i>Ankara Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Özgün Akçay	<i>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Bahattin Erdoğan	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Rahmi Nurhan Çelik	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Bayram Uzun	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Ramazan Alpay Abbak	<i>Konya Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Burak Akpınar	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Saygın Abdikan	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Bülent Bayram	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Süleyman Savaş Durduran	<i>Necmettin Erbakan Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Cemal Özer Yiğit	<i>Gebze Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Şenol Hakan Kutoğlu	<i>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Cüneyt Aydın	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Tarık Türk	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Çetin Cömert	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Taşkın Kavzoğlu	<i>Gebze Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Derya Öztürk	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Taylan Öcalan	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Doğan Uğur Şanlı	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Türkay Gökğöz	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Dursun Zafer Şeker	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Uğur Doğan	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Sercan Bülbül	<i>Konya Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Umut Güneş Sefercik	<i>Gebze Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Elif Sertel	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Volkan Çağdaş	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Emine Tanır Kayıkçı	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Prof. Dr. Yasemin Şişman	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Erol Köktürk	<i>Emekli</i>	Prof. Dr. Zaide Duran	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Esra Erten	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Alihsan Şekertekin	<i>İğdır Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Fatih Güngen	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Alper Şen	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Fevzi Karşlı	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Berk Anbaroğlu	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Filiz Bektaş Balçık	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Berkay Bahadır	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Fusun Balık Şanlı	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Caner Güney	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Halil Akıncı	<i>Artvin Çoruh Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Erman Şentürk	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Halil Erkaya	<i>Okan Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Esra Tunç Görmüş	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Haluk Konak	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Hakan Akçın	<i>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Haluk Özener	<i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Hatice Çatal Reis	<i>Gümüşhane Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hande Demirel	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. İsmail Ercüment Ayazlı	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hasan Hakan Yavaşoğlu	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Kamil Teke	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hediye Erdoğan	<i>Aksaray Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Murat Selim Çepni	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hülya Demir	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Mustafa Tevfik Özlüdemir	<i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Hüsnüye Ebru Çolak	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Muzaffer Can İban	<i>Mersin Üniversitesi</i>
Prof. Dr. İbrahim Öztuğ Bildirici	<i>Konya Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Nedim Onur Aykut	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. İbrahim Tiryakioğlu	<i>Afyon Kocatepe Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Nusret Demir	<i>Akdeniz Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Kutalmış Gümüş	<i>Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Seda Özarpacı	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Mehmet Ali Yücel	<i>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Sercan Bülbül	<i>Konya Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Mualla Yalçınkaya	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Süleyman Sefa Bilgilioğlu	<i>Aksaray Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Murat Yakar	<i>Mersin Üniversitesi</i>	Doç. Dr. Uğur Acar	<i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>

Doç. Dr. Utkan Mustafa Durdağ	<i>Artvin Çoruh Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Veli İlçi	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Zeynel Abidin Polat	<i>İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Kara	<i>Gebze Teknik Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ali Hasan Doğan	<i>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Emin Özgür Avşar	<i>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Fatih Taktak	<i>Uşak Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Murat Ozulu	<i>Hitit Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin Acar	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Üstüner	<i>Samsun Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Osman Sami Kırtıoğlu	<i>İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ziya Usta	<i>Artvin Çoruh Üniversitesi</i>
Dr. Azer İlgar Kara	<i>Hacettepe Üniversitesi</i>
Dr. Kaan Kalkan	<i>TUBİTAK Uzay</i>
Dr. Sevda Olgun	<i>Kocaeli Üniversitesi</i>
Dr. Ümit Yıldız	<i>Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü</i>

VERİDEN BİLGİYE, BİLGİDEN DEĞERE  
YAŞANABİLİR GELECEĞİN HARİTASI





TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# 1. Gün

1 Ekim 2025 Çarşamba

08.00 - 09.00 Kayıt ve Trio Dinletisi

09.00 - 11.00 Açış Konuşmaları ve HKMO 70. Yıl Kısa Film Gösterimi

11.00 - 11.30 Kurultay Tema Sunumu

11.30 - 12.00 Uzamsal Bilgi Teknolojileri Fuarı Açılışı

12.00 - 13.00 Öğle Arası

13.00 - 13.30 Haritaların Ötesinde: CBS ile Yaşanabilir Geleceğe - ESRI Türkiye

13.30 - 14.30 **OTURUM 1: Cemal İşleyici Salonu Yaşanabilir Geleceğin Haritası İçin Değer Yaratmak**

**Konuşmacı:**

Emin Çapa- *Gazeteci, Ekonomist*

14.30 - 14.45 Ara

14.45 - 16.15 **OTURUM 2: Cemal İşleyici Salonu**

**Cumhuriyetin İlk Kadastro Kanunu'nun 100. Yılında Türkiye Kadastro**

**Moderatör:** Prof. Dr. Volkan Çağdaş

*HKMO Kadastro ve Arazi Yönetimi Kom. Bşk., Yıldız Teknik Üniv.*

**Konuşmacılar:**

Prof. Dr. A. Lâle Sirmen- *Öğretim Üyesi, Ufuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi*

Nevzat İhsan Sarı- *Teftiş Kurulu Başkan Yardımcısı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü*

Özgen Sadu Çağlar- *Kadastro Dairesi Başkanı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü*

Dr. Abdullah Kara- *Öğretim Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi*

16.15 - 16.30 Ara

16.30 - 18.00 **OTURUM 3: Cemal İşleyici Salonu**

**Yeni Nesil Konum Belirleme Yöntemleri ve Mevzuatın Geliştirilmesi**

**Moderatör:** Prof. Dr. Aydın Üstün

*HKMO Jeodezi ve Konum Belirleme Kom. Başkanı, Kocaeli Üniversitesi*

**Konuşmacılar:**

Ekrem Ayyıldız- *Harita Dairesi Başkanı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü*

Doç. Dr. Berkay Bahadır- *Kurultay Yürütme Kurulu Başkanı, Hacettepe Üniversitesi*

Müh. Alb. Dr. Erdiñ Sezen- *Jeodezi Daire Başkanı, Harita Genel Müdürlüğü*

Prof. Dr. Cemal Özer Yiğit- *HKMO Mühendislik Ölçmeleri Kom. Başkanı, Gebze Teknik Üniversitesi*

19.30

**Kurultay Resepsiyonu**

## 2. Gün

2 Ekim 2025 Perşembe

09.00 - 10.30 **OTURUM 4:** Cemal İşleyici Salonu**Harita Mühendisliğinin Yapay Zekâ ile Dönüşümü****Moderatör:** Prof. Dr. Ahmet Özgür Doğru*HKMO Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Teknolojileri Kom. Başkanı, İstanbul Teknik Üniversitesi***Konuşmacılar:****Harita/Geomatik Mühendisliğinde Uzamsal Zekâ ve Ötesi**

Doç. Dr. Caner Güney- Öğretim Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

**Harita Mühendisliği Eğitim ve Öğretiminde Yapay Zekâ: Öğrenci Perspektifinden Geleceğe Bakış**

Emirhan Bulut- Yıldız Teknik Üniversitesi

**Harita Mühendisliği Eğitim-Öğretiminde Yapay Zekâ Farkındalığını Yaygınlaştırmak:****HKMO Çalıştay Çıktıları ve Dönüşüm Perspektifi**

Prof. Dr. Ahmet Özgür Doğru- HKMO Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Teknolojileri Kom. Başkanı, İstanbul Teknik Üniversitesi

10.30 - 10.45 Ara

10.45 - 11.15 **Genç Haritacılar Kurultayı Sonuç Bildirgesi Sunumu**11.15 - 12.45 **OTURUM 5:** Cemal İşleyici Salonu**Yapı Sağlığı İzlemede Harita Mühendisliği ve Ulusal Mevzuat Geliştirilmesi****Moderatör:** Prof. Dr. Cemal Özer Yiğit*HKMO Mühendislik Ölçmeleri Kom. Başkanı, Gebze Teknik Üniversitesi***Konuşmacılar:**

Prof. Dr. Taylan Öcalan- HKMO İstanbul Şubesi Başkanı, Yıldız Teknik Üniv.

Prof. Dr. Bahadır Aktuğ- Öğretim Üyesi, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Can Altunışık- Deprem ve Yapı Sağlığı Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, Karadeniz Teknik Üniversitesi

Emrah Süme- Afet Hasarları Tespiti Daire Başkanı, ÇŞİB Yapı İşleri Genel Müdürlüğü

Sarp Dinçer- Genel Müdür, Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Sistemleri Ltd.

12.45 - 13.45 Öğle Arası

13.45 - 15.15 **OTURUM 6:** Cemal İşleyici Salonu**Taşınmaz Değerleme ve Uzamsal Teknolojiler****Moderatör:** Dr. Ümit Yıldız*Taşınmaz Değerleme Dairesi Başkanı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü***Konuşmacılar:**

Dr. Tuğba Güneş- İstatistikçi, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü

Görkem Ögüt- CEO, ENDEKSA

Mustafa Kubilay Yıldırım- HKMO Taşınmaz Değerlemesi Kom. Başkanı, TMMOB Yönetim Kurulu Üyesi

Dr. Hale Şahin- Öğretim Üyesi, Ufuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi

15.15 - 15.30 Ara

15.30 - 17.00 **OTURUM 7:** Cemal İşleyici Salonu**Savunma Sanayi Çalışmalarında Harita Mühendislerinin Rolü****Moderatör:** Doç. Dr. Berkay Bahadır*Kurultay Yürütme Kurulu Başkanı, Hacettepe Üniversitesi***Konuşmacılar:**

Dr. Kaan Kalkan- Uzaktan Algılama Grup Lideri, TÜBİTAK UZAY

Mehmet Fikret Öcal- Lider Sistem Mühendisi, ASELSAN A.Ş.

Müh. Bnb. Abdullah Sinan Karaer- Veri Toplama ve Yapılandırma Şube Müdürü, Harita Genel Müdürlüğü

17.00 - 17.15 Ara

17.15 - 18.45 **TEKNİK OTURUM 1:** Cemal İşleyici Salonu**Afet Yönetimi ve İklim Değişikliği****Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Halil Akıncı*Artvin Çoruh Üniversitesi***Bildiri Sunumları:****Toplum Tabanlı Afet Yönetiminde Uzamsal Verinin Paylaşımı: Antiquake Risk Avcısı Topluluk Modeli**

Yelda Ademoğlu, Umut Koca, Rahmi Nurhan Çelik, Ezgi Tok, Pınar Demirci



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangın Riskinin ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi:  
2025 Yılı İzmir, Çeşme Örneği

Fulya Aydın Kandemir, Göktuğ Yaşar Çukurlu, Ecmel Erhat, Furkan Veziro, Nusret Demir

Türkiye'nin Sıcaklık Verilerinin Yapay Zekâ Tabanlı Haritalanması

Vahdettin Demir, Ahmet Bilal Çifcibaşı, Muhammed Can Şanlı

Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin Maxent ile Tahmini ve  
Mevcut Arazi Örtüsü İle Karşılaştırılması

Mehmet Özgür Çelik, Osman Orhan, Mehmet Ali Kurt

1999 Gölçük Depremi Sonrası Tsunaminin Neden Olduğu Kıyı Değişikliklerinin Uydu Tabanlı Değerlendirmesi  
Halil İbrahim Şenol

Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Afet Risk Analizi: Çatalca Ferhat Paşa Camii Örneği

Handenur Özdemir, İlke Ciritci

17.15 - 18.45 **TEKNİK OTURUM 2:** Atilla Aydın Salonu

**İmar Uygulamaları ve Kentleşme**

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Okan Yıldız  
Karadeniz Teknik Üniversitesi

**Bildiri Sunumları:**

Yapay Zekâ ile İmar Verilerinden Anlamlı Bilgiye: Vatandaş Odaklı Bir Yaklaşım

Tuğçe Nida Nur Özbek, Sedef Ruken Küçük

Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi

Şehadet Sevrâ Mintemur, Murat Selim Çepni

Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Kamulaştırma Amaçlı Tahsis Yaklaşımı: Tarihsel Süreç, Uygulama Sorunları ve  
2025 Düzenlemeleri

Oytun Yılmaz, Ahmet Yılmaz

Kentsel Dönüşümde Etkin Strateji Geliştirme ve Uygulama: Mekânsal Karar Destek Sistemleri ile

Kayseri Talas İlçesi Örneği

Mehmet Bak

Yapı Yoğunluğu Arazi Kullanımı İlişkisinde Zamansal Nitelikli Bir Analiz Çalışması

Abdurrahman Atmaca, Murat Selim Çepni

## 3. Gün

3 Ekim 2025 Cuma

09.00-10.30 OTURUM 8: Cemal İşleyici Salonu



İklim Krizine Karşı Harita Mühendisliği ile Yaşanabilir Gelecek Tasarımı

**Moderatör:** Özge Acar*Teknoloji Geliştirmeden Sorumlu Genel Müdür Yrd., İhtiyaç Haritası Sosyal Kooperatifi***Konuşmacılar:**

Güven Fidan- CEO, ALKAZAR

Dolunay Güçlüer Küpeli- Başkan Yardımcısı, Deniz Üstü Rüzgâr Enerji Derneği

Prof. Dr. Şenol Hakan Kutoğlu- Bülent Ecevit Ün. Rektör Yrd.

09.00-10.30 TEKNİK OTURUM 3: Atilla Aydın Salonu

**Hızlı Sunumlar****Oturum Başkanı:** Doç. Dr. Utkan Mustafa Durdağ*Artvin Çoruh Üniversitesi***Bildiri Sunumları:****YBM-CBS Entegrasyonunda IFC-Citygml Dönüşümü: Açık Kaynak Araçların İncelenmesi ve Denenmesi***Ebru Kaya, Güray Çetin, Yusuf Biçer, Bilal Erkek, Mustafa Yaman, Ekrem Ayyıldız***Akıllı Şehir Büyükçekmece: E-Belge Ekosistemi ile Sürdürülebilirlik ve Dijital Dönüşüm***Yasin Sezer Türk, Onur Işık***NETCAD Veterinerlik Bilgi Sistemi (VETBİS)***Cihan Çırak, Caner Ünsal***Kuzey Anadolu Fay Zonu Yedisu Segmenti Depremselliğinin Araştırılmasına Jeodezik Katkıları***Oğuzhan Tecel, Hüseyin Duman, Bekir Poyraz, Kemal Özgür Hastaoğlu, Fatih Poyraz, Fikret Koçbulut, Yavuz Gül, Abdullah Kapıcıoğlu***GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler***Şeyma Gökçe Çelik Kubat, Muzaffer Kahveci***GNSS ve SBAS Sistemlerinin Güncel Durumu ve Türkiye Perspektifi: 2025 Değerlendirmesi***İlknur Mutlu Çetin, Ekrem Ayyıldız***Statik GNSS, Ağ-RTK, PPP-RTK ve SBAS Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması****Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması***İbrahim Cihan Demirel, Muzaffer Kahveci***Farklı Yer Potansiyeli Modelleri ile TG-20 Jeoidinin Karşılaştırılması-ICGEM Parametrelerinin İncelenmesi***İbrahim Ağgöz, İrem Köz, Serkan Doğanalp***İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi***Abdurahman Yasin Yiğit, Halil İbrahim Şenol***Fotoğraftan Bilgiye, Harita Mühendisinin Gücü***Hazal Arslanoğlu***Maden İşletmelerinde İşçi Güvenliği İçin IOT Tabanlı Maden İzleme Sistemi***Nihan Çobancık, Burak Akpınar***Yapay Zekâ İçin Kaliteli Veri Sağlama: Mülkiyet Verileri Odaklı Veri Temizleme Yaklaşımı ile "Doğru-Tutarlı-Güncel-Dirençli Veri" Ekosistemi Tasarımı***Yasemin Kuleyin***Türkiye'de Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Uygulamaları ve DOP'un Alınmadığı Durumlarda Bedele Dönüştürme ve Uygulaması***Nisa Eyüpoğlu***Otonom Kadastro Hata Tespit Sistemi: OSM Tabanlı Bir Yaklaşım***Sümeyye Ebrahimi*

10.30 - 10.45 Ara



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

#### 10.45 - 12.15 **TEKNİK OTURUM 4:** Cemal İşleyici Salonu Jeodezi ve Ölçme Uygulamaları

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Bahadır Aktuğ  
Ankara Üniversitesi

##### **Bildiri Sunumları:**

**Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yükü**

Mehmet Fikret Öcal, Ali Özgür Taşoğlu

**Elektronik Harp Koşullarında İHA GNSS Navigasyon Performansının Otonom Kalkış Analizi**

Furkan Karlitepe

**Mobil Haritalama Sistemleri İçin Çok-Antenli GNSS Sisteminden Konum ve Dönüklük Bilgisi Elde Edilmesi**

Hasan Dilmaç, Veli İlçi, İbrahim Murat Ozulu

**Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi**

Bilal Mutlu, Serdar Erol, Reha Metin Alkan

**Büyük Ölçekli Harita Üretiminde Yer Kontrol Noktası Koordinatlarının Türkiye Ulusal Referans Ağı Çerçevesi (TÜREF)'ne Dayalı Olarak Belirlenmesinde Türkiye Yatay Hız Alanının Etkisinin Araştırılması**

Ali Kılıçoğlu, Mert Can Günendi

**GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelenmesi**

Ali Utku Akar, Cevat İnal

#### 10.45 - 12.15 **TEKNİK OTURUM 5:** Atilla Aydın Salonu

##### **Coğrafi Bilgi Teknolojileri**

**Oturum Başkanı:** Doç. Dr. Süleyman Sefa Bilgilioglu  
Aksaray Üniversitesi

##### **Bildiri Sunumları:**

**Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve Cesiumjs ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği**

Serdar Sakallı, Damla Su Beytekin, Nihal Yüksel, Berin Yomralıoğlu, Talha Ruscuk

**Vektör Hücresel Otomat Temelli Kentsel Büyüme Modellemesinde Gamma Dağılımı ile Yerel Etki Mesafesinin Belirlenmesi: İstanbul, Berlin ve Madrid**

Ahmet Emir Yakup, İsmail Ercüment Ayazlı

**Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler**

Halil İbrahim Şenol, Seçil Çokoğullu

**Gönüllüler Haritası**

Fatih Sönmez, Özge Acar, Uğurcan Gül

**Kitle Kaynaklı Doğrulama ve Yapay Öğrenme Araçları ile Uzamsal Veri İyileştirme**

Orkut Murat Yılmaz

**CBS Tabanlı Doğalgaz Altyapı Yatırım Yönetimi: Gasnet Uygulaması ile Vatandaş Taleplerinin Yatırıma Dönüşme Süreci**

Emre Tunca, Fırat Kılıç

#### 12.15 - 13.15 **Öğle Arası**

#### 13.15 - 14.45 **TEKNİK OTURUM 6:** Cemal İşleyici Salonu

##### **Uzaktan Algılama ve Fotogrametri**

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Saygın Abdikan  
Hacettepe Üniversitesi

##### **Bildiri Sunumları:**

**İstanbul Havzalarındaki Baraj Yüzeylerinin Su Çıkarma İndeksleri Kullanılarak Belirlenmesi**

Gamze Kara, Osman Salih Yılmaz, Fatih Gülgen

**Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve Deeplabv3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması**

Melih Altay, Fatih Fehmi Şimşek, Kaan Kalkan

**Eskişehir Kaymaz Kasabası'nda Süper Çözünürlüklü Sentinel-2 Görüntüleri ile 8 Yıllık Tarımsal Faaliyetlerin İncelenmesi**

Altan Yılmaz, Hürcan Atay

**Segment Anything Modeli (SAM) ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenolojik Uyumlu Otomatik Tarım Parseli Çıkarımı**

Fatih Fehmi Şimşek, Melih Altay

**Fotogrametri Uygulamalarında Eğik (Oblique) Verilerin Kullanılması**

Fuat Volkan Pasinli, Sedat Bakıcı

**Mobil Lidar ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti**  
Ayşe Buşra Yaniç, Burak Yıldırım

**13.15 - 14.45 TEKNİK OTURUM 7: Atilla Aydın Salonu**

**Arazi Yönetimi**

**Oturum Başkanı:** Dr. Azer İlgar Kara  
Hacettepe Üniversitesi

**Bildiri Sunumları:**

**Gıda Güvenliği ve Güvencesinin Sağlanmasında Arazi Yönetimi: Harita Mühendisliği Perspektifi**  
Nihal Genç, Hüsnüye Ebru Çolak, Volkan Başer

**Kuruluşlarının 100'üncü Yılında, Sistem Teorisi Yaklaşımıyla, Türkiye Harita ve Kadastro Kurumlarının ve Faaliyetlerinin Gelişiminin İncelenmesi ve Benzer Ülkelerle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi**  
Abdulvahit Torun

**Arazi Yönetiminde Tüze Çalışmalarına Öneriler**  
Mehmet Ertaş

**Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi**  
Cihat Erda Gümüş, Özgen Sadu Çağlar, Fatih Çağatay Kaplan

**Gayrimenkul Sektöründe Yeni Bir Dönem: Gayrimenkul Tokenizasyonu ve Uygulamaları**  
Orhan Mataracı, Tolgahan Özden

**Toprak Gaspından Veri Gaspına: Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. Yılında Dijital Sömürgecilik Karşısında Ulusal Veri Egemenliği Modeli**  
Yasemin Kuleyin

**14.45 - 15.00 Ara**

**15.00-16.30 TEKNİK OTURUM 8: Cemal İşleyici Salonu**

**Yapay Zekâ ve Yenilikçi Meslek Uygulamaları**

**Oturum Başkanı:** Dr. Kaan Kalkan  
Uzaktan Algılama Grup Lideri, TÜBİTAK UZAY

**Bildiri Sunumları:**

**Otonom Sürüş ve İnsansı Robotlar**  
Caner Güney

**Tarım-Enerji Kesişimi İçin Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Agrivoltaik Uygunluk Analizi**  
Batuhan Kılıç

**Çok Kaynaklı Yer Gözlem Verileri Kullanılarak Açıklanabilir Mısır Rekoltesi Tahmini**  
Mustafa Serkan Işık, Ozan Öztürk, Mehmet Furkan Çelik

**Atmosferik ve Meteorolojik Faktörlere Dayalı Güneş Paneli Performans Tahmini**  
Remzi Zaman, Müslüm Hacı

**Uzayda Navigasyon**  
Caner Güney

**Güzergâh Optimizasyonunda ÇKKV ve Bir Grafik Sinir Ağı Yaklaşımının Karşılaştırmalı Analizi**  
Korcan Alpan, Firdevs Turan, Hüseyin Pehlivan

**16.30 - 16.45 Ara**

**16.45 - 18:00 Kurultay Sonuç Bildirgesi ve Kapanış Oturumu**

**Oturum Başkanı:** Doç. Dr. Berkay Bahadır  
Kurultay Yürütme Kurulu Başkanı, Hacettepe Üniversitesi



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# Bildiriler Teknik Oturum 1

## Afet Yönetimi ve İklim Değişikliği

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Halil Akıncı, *Artoin Çoruh Üniversitesi*

1.1. Toplum Tabanlı Afet Yönetiminde Uzamsal Verinin Paylaşımı: Antiquake Risk Avcısı Topluluk Modeli

(Bildiri Özet)

(*Yelda Ademoğlu, Umut Koca, Rahmi Nurhan Çelik, Ezgi Tok, Pınar Demirci*)

1.2. Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangın Riskinin ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi: 2025 Yılı

İzmir, Çeşme Örneği (Bildiri Özet)

(*Fulya Aydın Kandemir, Göktuğ Yaşar Çukurlu, Ecmel Erhat, Furkan Veziro, Nusret Demir*)

1.3. Türkiye'nin Sıcaklık Verilerinin Yapay Zekâ Tabanlı Haritalanması (Bildiri Özet)

(*Vahdettin Demir, Ahmet Bilal Çiçcibaşı, Muhammed Can Şanlı*)

1.4. Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin Maxent ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile

Karşılaştırılması (Tam Metin)

(*Mehmet Özgür Çelik, Osman Orhan, Mehmet Ali Kurt*)

1.5. 1999 Gölcük Depremi Sonrası Tsunaminin Neden Olduğu Kıyı Değişikliklerinin Uydu Tabanlı Değerlendirmesi

(Bildiri Özet)

(*Halil İbrahim Şenol*)

# Toplum Tabanlı Afet Yönetiminde Uzamsal Verinin Paylaşımı: Antiquake Risk Avcısı Topluluk Modeli

Yelda ADEMOĞLU GÜLKILIK<sup>1,\*</sup>, Umut KOCA<sup>2</sup>, Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK<sup>3</sup>, Ezgi TOK<sup>4</sup>,  
Pınar DEMİRCİ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>TCDD 1 Bölge Müdürlüğü, Modernizasyon Servisi, İstanbul.

<sup>2</sup>Üsküdar Belediyesi Kent A.Ş., İstanbul

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

<sup>4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

<sup>5</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

## Genişletilmiş Özet

### Amaç

Afet yönetimi; risk azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirme süreçlerinden oluşan bütünlük bir disiplindir. Bu süreçlerde harita mühendisliği, uzamsal veri üreticisi olarak ve üretilen uzamsal verilerin analizi ve karar vericilere aktarılması yoluyla stratejik katkı sağlar. Türkiye’de geliştirilen Afet Risk Azaltma Sistemi (ARAS) ve Afet Yönetim ve Karar Destek Sistemi (AYDES), afetlerin yönetiminde coğrafi bilgi sistemi tabanlı çözümlerin önemini göstermektedir (AFAD, 2017; AFAD, erişim: 31 Ağustos 2025). İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin deprem ve zemin inceleme çalışmaları da uzamsal verinin afet yönetimindeki değerini ortaya koymaktadır (İBB Deprem ve Zemin, erişim: 31 Ağustos 2025).

Ancak bu gelişmiş sistemlerin çıktıları çoğunlukla kurum içi veya kurumlar arası kullanım odaklıdır. Vatandaşların erişebildiği bilgi genellikle yalnızca toplanma alanlarının konumları ile sınırlıdır (Üsküdar Belediyesi, erişim: 31 Ağustos 2025; AFAD İstanbul, erişim: 31 Ağustos 2025). Bu durum, toplumun mahalle ölçeğinde afet riskleri ve afet hazırlıkları hakkında yeterli bilgiye erişememesine ve afet hazırlık çalışmalarına yeterli oranda katılmamasına yol açmaktadır. Oysa afet yönetiminde toplum katılımı, literatürde de vurgulandığı gibi, yalnızca kurumların değil bireylerin ve toplulukların da sorumluluk alması gereken bir süreçtir (Bonney et al., 2009).

Dolayısıyla, afet yönetiminde harita mühendisliğinin rolü yalnızca teknik veri üretimiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda bu verilerin anlaşılır biçimde topluma aktarılması ve toplumsal faydaya dönüştürülmesi açısından da kritik hale gelmektedir.

### Antiquake Risk Avcısı Topluluk Projesi Modeli

Bu bildiride, toplumla kısıtlı veri paylaşımına ve yerel düzeyde katılım eksikliğine çözüm üretmek amacıyla geliştirilen Antiquake Risk Avcısı Topluluk Projesi bir vaka analizi olarak sunulmaktadır. Antiquake, 2024 yılında Avrupa Birliği Horizon Europe – IMPETUS programı desteğiyle mahalle sakinlerinden oluşan bir topluluk tarafından ilk kez Kuzguncuk’ta uygulanmış ve aynı yıl Avrupa Yurttaş Bilimi Ödülü’nü kazanmıştır (Ars Electronica, 2025). 2025 yılında ise yine IMPETUS desteğiyle üç farklı ilçede, üç farklı mahallede, yerel aktörlerin liderliğinde ve daha geniş katılımı uygulanmaya devam etmektedir. Projenin ilk bulguları, 2024 yılında gerçekleştirilen 8. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi’nde paylaşılmıştır (Ademoğlu Gülkılık, Koca, Yılmaz, Demirci, & Öztürk, 2024).

Model, afet farkındalığını artırmak ve yurttaş biliminin toplum tabanlı afet yönetiminde nasıl kullanılabileceğini göstermek amacıyla tasarlanmıştır. Bu uygulamaya, özellikle Coğrafi Bilgi Sistemi uzmanlarından oluşan gönüllü bir çekirdek ekip liderlik etmiş; verilerin toplanması, işlenmesi ve harita uygulamalarının geliştirilmesi bu mesleki katkı temelinde yürütülmüştür. Bu kapsamda Kuzguncuk Mahallesi için afet riskleri ve güvenlik haritası üretilmiş, basılı ve dijital formatta halka açık hale getirilmiştir.

Ayrıca MapLibre GL JS, React, Django ve PostGIS gibi açık kaynak teknolojiler ve verilerin hazırlanması ve analizi için OpenStreetMap ve QGIS’ten yararlanılarak geliştirilen Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı platform (www.antiquake.org), vatandaşların risk ve iyi uygulama bildirimlerini doğrudan paylaşabilecekleri bir araç olarak tasarlanmıştır. Bu platform, vatandaşların sadece veri alıcısı değil, aynı zamanda veri sağlayıcısı olmasını sağlamıştır (See et al., 2016; Goodchild, 2007).

Bu yönüyle Antiquake, mevcut resmi afet yönetimi sistemlerini tamamlayıcı ve onları toplum ölçeğinde daha erişilebilir hale getiren bir rol üstlenmektedir.

### Yöntem ve Uygulama

Veri Toplama ve Haritalama: Kamu kurumlarından elde edilen afet risk etki alanlarını gösteren (taşkın, kaya düşmesi ve tsunami) ve güvenlik ile ilişkili ve açık olarak paylaşılan (toplanma alanları, yangın hidrantları) mevcut veriler kullanılmış, bina verileri Openstreetmap haritasından; eksik veriler ise Openstreetmap HOT Tasking Manager aracılığıyla katılımcı harita bilgisi elde etme yöntemiyle tamamlanarak kullanılmıştır. Böylece kurumsal veriler ile gönüllü katkıları aynı harita üzerinde bütünlüştürülmüştür. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, hem kurumsal hem de gönüllü kaynakların eşzamanlı değerlendirilmesine imkân tanımış ve daha güvenilir bir veri bütünlüğü ortaya çıkarmıştır.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0539) 655 79 30

E-posta: yelda.ademoglu@gmail.com (Yelda ADEMOĞLU GÜLKILIK)

*Toplum Tabanlı Afet Yönetiminde Uzamsal Verinin Paylaşımı: Antiquake Risk Avcısı Topluluk Modeli*

Coğrafi Bilgi Sistemi Tabanlı Web Platformu: Vatandaşların katılımını kolaylaştırmak için geliştirilen platform risk veya iyi uygulama bildirimine olanak tanımaktadır. Kullanıcılar sisteme fotoğraf ve açıklama ekleyebilmekte, bildirimler anlık konum üzerinden ya da daha önce çekilmiş fotoğrafların konumlandırılması yoluyla sisteme işlenebilmektedir. Böylece platform, afet risklerinin yalnızca kayıt altına alınmasını değil, aynı zamanda mahalle sakinleri arasında ortak bir farkındalık süreci doğurmasını da sağlamıştır.

Town-Watching (Risk Avı Yürüyüşü): Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi (UNDRR) tarafından afet farkındalığı için önerilen, katılımcıların mahallelerini adım adım gezerek riskleri doğrudan gözlemlediği town-watching yöntemi (kent gözlemi), mahallede afet uzmanlarının eşliğinde uygulanmıştır (UNDRR, 2015). Riskler yerinde gözlemlenmiş, vatandaşlar tarafından belgelenmiş ve dijital ortamda kayıt altına alınmıştır. Çalışma, hem klasik yöntemin hem de dijitalleştirilmiş sürecin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Bu uygulama, katılımcıların çevrelerini afet riskleri açısından yeniden değerlendirmelerine imkân tanımış ve yerel bilgi ile bilimsel yaklaşım arasında köprü kurulmasına katkı sağlamıştır.

**Bulgular**

Kuzguncuk'ta yürütülen pilot uygulamada çeşitli risk noktaları ve iyi uygulama örnekleri belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Verilerin türlerine göre ayrıştırılması ve kataloglanması çalışmanın ilerleyen aşamalarında tamamlanacaktır. Pilot çalışmadan elde edilen ilk çıktılar, metodolojinin hem uygulanabilirliğini hem de farklı mahallelere uyarlanabilirliğini göstermektedir.

**Tartışma**

Antiquake modeli iki temel katkı sunmaktadır:

**Mesleki Katkı:** Harita mühendisliği disiplini, afet yönetiminde farklı kaynaklardan elde edilen verilerin entegrasyonu, koordinat dönüşümleri, veri tabanı yönetimi ve görselleştirme konularındaki uzmanlığıyla topluma doğrudan fayda sağlayabilecek bir araç geliştirmiştir.

**Toplumsal Katkı:** Vatandaşlar yalnızca bilgi tüketicisi değil, aktif veri üreticisi haline gelmiştir. Bu yaklaşım, yurttaş biliminin afet yönetimine entegrasyonu konusunda önemli bir örnek teşkil etmektedir (See et al., 2016).

Antiquake modeli, literatürde yurttaş bilimi ve afet dayanıklılığı bağlamında önerilen toplum tabanlı afet yönetimi yaklaşımlarının pratik bir uygulamasını ortaya koymuştur (Bonney et al., 2009; Cutter, Burton, & Emrich, 2010). Bu katkılar birlikte değerlendirildiğinde, modelin yalnızca bir mahalle ölçeğinde kalmadığı, aynı zamanda farklı kentsel bağlamlarda da uygulanabilecek bir çerçeve sunduğu görülmektedir.

**Sonuç ve Öneriler**

Antiquake deneyimi, afet yönetiminde uzamsal verinin yalnızca profesyoneller arasında değil, toplumla birlikte üretilip paylaşıldığında daha güçlü bir bilgi ve değer dönüşümüne imkân verdiğini göstermiştir. 2024 yılında Kuzguncuk'ta pilot uygulama ile başlatılan model, kısa sürede gönüllüler, akademi ve yerel yöneticiler açısından somut sonuçlar üretmiş; 2025 yılında üç mahallede yerel aktörlerin liderliğinde uygulanacak şekilde genişletilmiştir. Aynı zamanda üniversiteler ve afet yöneticisi kurumlarla protokol süreçleri başlatılmış, kurumsal düzeyde işbirlikleri için zemin oluşturulmuştur.

Bu sonuçlar, modelin yalnızca yerel düzeyde değil, aynı zamanda ulusal afet yönetimi politikalarının geliştirilmesinde de referans alınabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, mahalle ölçeğinde afet risk haritalarının eksikliğinin giderilmesi, vatandaşların doğrudan katkı sağlayabileceği CBS tabanlı katılımcı platformların yaygınlaştırılması ve açık veri politikalarının geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Antiquake modeli, bu açıdan yurttaş biliminin toplum tabanlı afet yönetimine entegrasyonu için ölçeklenebilir bir örnek sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu bildiri, uzamsal verinin veriden bilgiye ve bilgidan toplumsal değere dönüşüm sürecinde, harita mühendisliğinin rolünü ve yurttaş bilimi temelli modellerin sağlayabileceği katkıları ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, afet yönetimi bağlamında topluma açık uzamsal verilerin kapsamı ve sınırlılıkları ile toplum katılımında görülen eksiklikler tartışılmakta ve bu eksikliklerin araştırma sorusunu nasıl şekillendirdiği ortaya konmaktadır. Toplum tabanlı afet yönetimi için bir yurttaş bilimi modeli olarak geliştirilen Antiquake Risk Avcısı Topluluk Projesi, geliştirilme süreci, uygulama adımları, elde edilen çıktılar ve sonuç-öneriler bölümlerinde ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Çalışma, sonuç olarak, uzamsal verinin yalnızca teknik bir unsur değil, aynı zamanda toplumsal ve politik bir değer üretim aracı olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler**

Uzamsal Veri, CBS, Katılımcı Yöntemle Harita Bilgilerinin Üretilmesi, Yurttaş Bilimi, Vatandaş bilimi, Afet Yönetimi, Afet Risklerinin Azaltılması, Afet Risk Yönetimi, Açık Veri, Toplum Tabanlı Afet Yönetimi, Afet Farkındalığı, Vatandaş Katılımı, Town-watching, Kent Gözlemi

**Kaynaklar**

AFAD İstanbul. (erişim: 31 Ağustos 2025). Toplanma Alanına Erişim. İstanbul İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü.

<https://istanbul.afad.gov.tr/toplanma-alanina-erisim>

AFAD. (2017). Afet Risk Azaltma Sistemi (ARAS). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/afet-risk-azaltma-sistemi-aras>

AFAD. (2018, 28 Şubat). Depremler önlenemez, ancak depremlerin afetlere dönüşmesi önlenebilir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/depremler-onlenemez-ancak-depremlerin-afetlere-donusmesi-onlenebilir>

- AFAD. (erişim: 31 Ağustos 2025). Afet Analiz ve Haritalama. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/afet-analiz-haritalama>
- AFAD. (erişim: 31 Ağustos 2025). Afet Haritaları. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/afet-haritalari>
- AFAD. (erişim: 31 Ağustos 2025). Afete Hazır Türkiye. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/afete-hazir-turkiye>
- AFAD. (erişim: 31 Ağustos 2025). Bütünleşik Afet Yönetim Sistemi (AYDES). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/butunlesik-afet-yonetim-sistemi>
- Ademoğlu Güllük, Y., Koca, U., Yılmaz, O. M., Demirci, P., & Öztürk, D. Ö. (2024, Kasım). Antiquake Risk Avcısı Topluluk Projesi – Kuzguncuk Mahallesi Afet Risklerinin Azaltılması Projesi Veri İletişim Platformu. 8. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara.
- Antiquake. (erişim: 31 Ağustos 2025). Antiquake Risk Avcısı Topluluk Projesi. <https://www.antiquake.org>
- Ars Electronica. (2025). The Antiquake Risk Hunter Community. Prix Ars Electronica Winners 2025. <https://calls.ars.electronica.art/2025/prix/winners/18019/>
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/BIO.2009.59.11.9>
- Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211–221.
- See, L., Mooney, P., Foody, G., Bastin, L., Comber, A., Estima, J., ... Wiemann, S. (2016). Crowdsourcing, citizen science or volunteered geographic information? The current state of crowdsourced geographic information. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(5), 55. <https://doi.org/10.3390/ijgi5050055>
- UNDRR. (2015). Town watching handbook for disaster education: Enhancing experiential learning. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/publication/town-watching-handbook-disaster-education-enhancing-experiential-learning>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı CBS Genel Müdürlüğü. (2024, 9 Mayıs). AFAD Başkanlığı ile afet ve acil durum yönetim süreçlerinde ihtiyaç duyulan coğrafi verilerin üretimi ve paylaşımı hususları değerlendirildi. <https://cbs.csb.gov.tr/afad-baskanligi-ile-afet-ve-acil-durum-yonetim-sureclerinde-ihtiyac-duyulan-cograf-verilerin-uretimi-ve-paylasimi-hususlari-degerlendirildi-haber-287239>
- Üsküdar Belediyesi. (erişim: 31 Ağustos 2025). Üsküdar Afet Bilgi Sistemi (CBS Portalı). Üsküdar Belediyesi. <https://cbs.uskudar.bel.tr/afet/>
- İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü. (erişim: 31 Ağustos 2025). Deprem Zemin Çalışmaları. İstanbul Büyükşehir Belediyesi. <https://depremezmin.ibb.istanbul/tr>

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangın Riskinin ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi: 2025 Yılı İzmir, Çeşme Örneği

Fulya AYDIN-KANDEMİR<sup>1</sup>, Göktuğ Yaşar ÇUKURLU<sup>2</sup>, Ecmel ERLAT<sup>3</sup>, Furkan VEZİRO<sup>2</sup>, Nusret DEMİR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Antalya Büyükşehir Belediyesi, İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Dairesi, 07310, Antalya, Türkiye

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, 07258, Antalya, Türkiye

<sup>3</sup>Ege Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

### Genişletilmiş Özet

Doğal yollarla meydana gelen orman yangınları, küresel etkilerin artması ve iklim değişikliklerinin etkileriyle son yıllarda ciddi miktarda artış göstermektedir (Huang, K., vd., 2025). Bu artış sonucunda meydana gelen orman yangınlarını engellemek her ne kadar zor da olsa etkilerini minimuma indirmek veya risk analizleri ile potansiyel yangın bölgelerini belirleyerek güvenlik önlemlerinin alınması, günümüz teknolojisinde mümkün bir yöntem olarak kabul görmektedir. Meydana gelen her yangın belirli bir frekansta ve belirli şartlar altında meydana gelmektedir. Bunun en basit örneği yaz aylarında, artan sıcaklıklar ile meydana gelen orman yangınlarıdır. Periyodik olarak meydana gelen orman yangınlarına etki eden faktörlerin ve orman yangınlarının lokasyonlarının kullanımı ile risk haritalarının oluşumu literatürde yaygın kullanılan yöntemdir.

Uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak orman yangınlarının meydana geldiği lokasyonların belirlenmesi, vejetasyon indekslerinin çıkarılması, bölgenin yüksekliği, eğimi, bakısı gibi bilgilere ulaşılması, ERA-5 (Copernicus Climate Data Store) verileri sayesinde günlük-saatlik sıcaklık/rüzgar verilerinin temin edilmesi ve CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station Data) platformu kullanılarak bölgenin yağış verilerine ulaşılması gibi hususlar, Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımlarında (QGIS, ArcGIS) bir araya getirilerek Orman Yangını Risk Haritalarının Çıkarımına destek olmaktadır (Çukurlu, G. Y., vd., 2025).

Çalışma içerisinde bu yöntemlerden biri olan "Frekans Oranı (FO)" yöntemi ile 2024 Aralık ayında tamamlanmış olan "İzmir ili için orman yangını duyarlılık" haritasında çok yüksek risk gözlenen bölgelerde, 2025 Haziran/Temmuz ayında İzmir ilinde meydana gelen orman yangınlarının lokasyonu karşılaştırılmış ve yüksek risk altında gözlenen bölgelerde meydana gelen yangınlar gözlemlenerek, elde edilen risk haritasının tutarlılığı incelenmiştir, aynı zamanda İzmir/Çeşme orman yangınlarının analizleri yapılmıştır. Frekans oranı kullanılarak oluşturulan haritada, DEM (Dijital Yükseklik Modeli), Topografik Nemlilik İndeksi (TWI), Drenaj, Eğim ve Bakı verileri SRTM-1 DEM verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Rüzgâr ve Sıcaklık verileri ERA-5 veri setinden alınmıştır. Normalize edilmiş Nem İndeksi (NDMI) ve Normalize Edilmiş Vejetasyon İndeksi (NDVI) Sentinel-2 uydu görüntülerinden çıkarılmıştır. "Yol" verisi Open Street Map ve "yerleşim yeri" verisi CORINE veritabanından alınmıştır. İzmir ilinde son 5 yılda meydana gelen orman yangınları ise (FRP >50 eşik değeri uygulanarak) NASA FIRMS platformundan temin edilmiştir. Burada eşik değeri uygulanmasının sebebi orta-küçük ölçekten itibaren meydana gelen yangınları net olarak ayırt edebilmektir (Singh, M., vd., 2022). Toplanan bütün bu veriler (yol, yerleşim yeri ve NASA FIRMS orman yangını sayıları ve lokasyonu hariç) yeniden sınıflandırılmış ve 5 sınıfa "Natural Breaks" sınıflandırması ile sabitlenmiştir. Yol ve yerleşim yeri verilerine ise "tampon-buffer" uygulanarak ormanlara olan uzaklıkları çıkarılmıştır. Bu adımdan sonra, her bir verinin her bir sınıfına düşen orman yangını sayısı, sınıfın tamamına düşen orman yangını sayısı, sınıf içerisinde yangın olmayan alanlar ve toplam yanmayan alanlar hesaplanmıştır. Bu işlemlerin sebebi Frekans Oranı hesaplanırken;

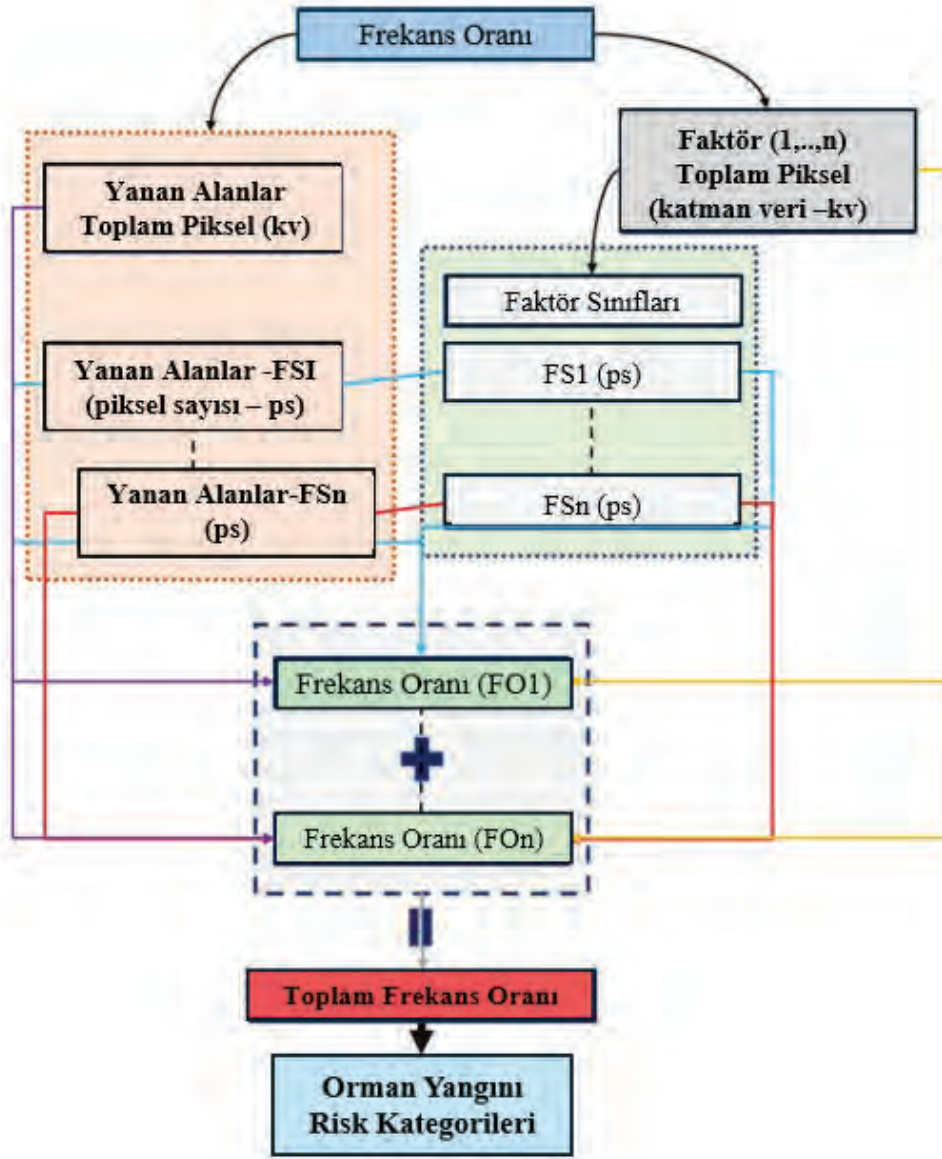
$$FO = \frac{A/B}{M/N} \quad (1)$$

Formülasyonunun uygulanmasından kaynaklıdır. Burada A, her bir nedensel faktörün her sınıfı için orman yangını piksellerinin sayısını tanımlar; B, orman yangını olaylarına sahip toplam piksel sayısını tanımlar; M, faktörün her sınıfı için piksel sayısını sembolize eder ve N, toplam piksel sayısını tanımlar (Tiwari vd., 2021). Burada değer yüksekse, orman yangını olasılığının o faktör değer aralığı için yüksek olduğu sonucuna ulaşılır. Her faktör değer aralığı için bulunan FO'ların toplamı ise yangın riskini verecektir. Şekil 1'de Frekans Oranı çalışmasına yönelik yöntem diyagramı verilmektedir.

\* Sorumlu Yazar: Nusret Demir Tel: (0242) 3103826

E-posta: nusretdemir@akdeniz.edu.tr

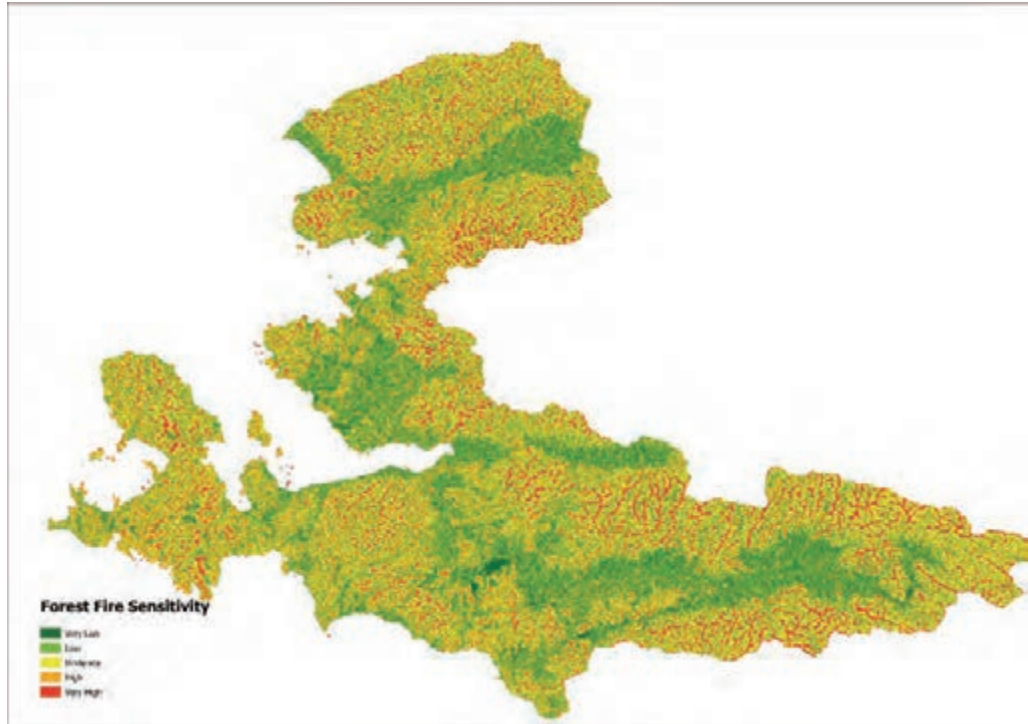
Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangın Riskinin Görüntülenmesi ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi; 2025 İzmir Örneği



Şekil 1. Frekans Oranı çıkarım diyagramı.

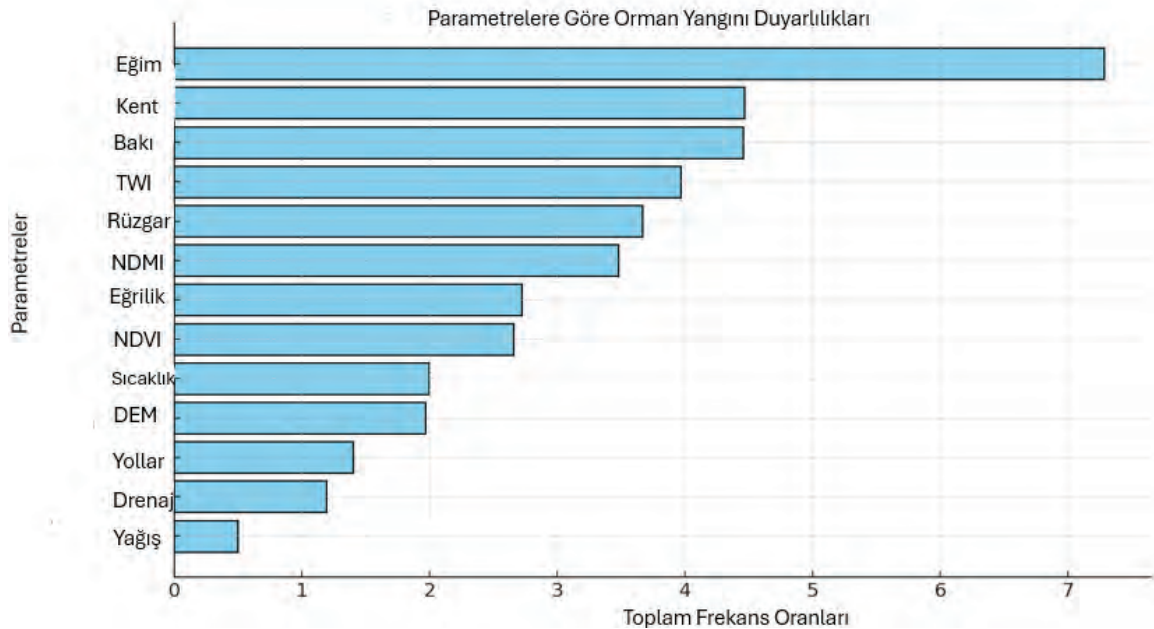
Şekil 1 içerisinde verilen diyagram takip edilerek İzmir için Frekans Oranı yöntemi ile Orman Yangını Risk Haritası oluşturulmuş ve her bir faktörün orman yangınlarına olan etkisi çıkartılmıştır. Çalışma içerisinde kullanılan faktörler literatür destekli seçilmiştir. Oluşturulan harita Şekil 2 içerisinde verilirken, her bir faktörün orman yangınlarına olan etkisi Şekil 3 içerisinde verilmiştir.

Göktuğ Yaşar Çukurlu, Fulya Aydın-Kandemir, Ecmel Erhat, Furkan Veziro, Nusret Demir



Şekil 2. İzmir ili için Orman Yangını Duyarlılık Haritası

2024 Aralık ayında yapılan bu çalışmada (Çukurlu, G. Y., vd., 2025) İzmir ili için yüksek yangın riski olan bölgelerin çıkarımı yapılmıştır. İzmir ilinin Çeşme ilçesinin yer aldığı bölgenin çoğunlukla çok yüksek risk sınıfına ait olduğu görülmüştür. Aynı zamanda Frekans Oranı oluşumu yapılırken, orman yangınlarını İzmir ili için en çok etkileyen parametrelerin de çıkarımı yapılmıştır (Şekil 3).

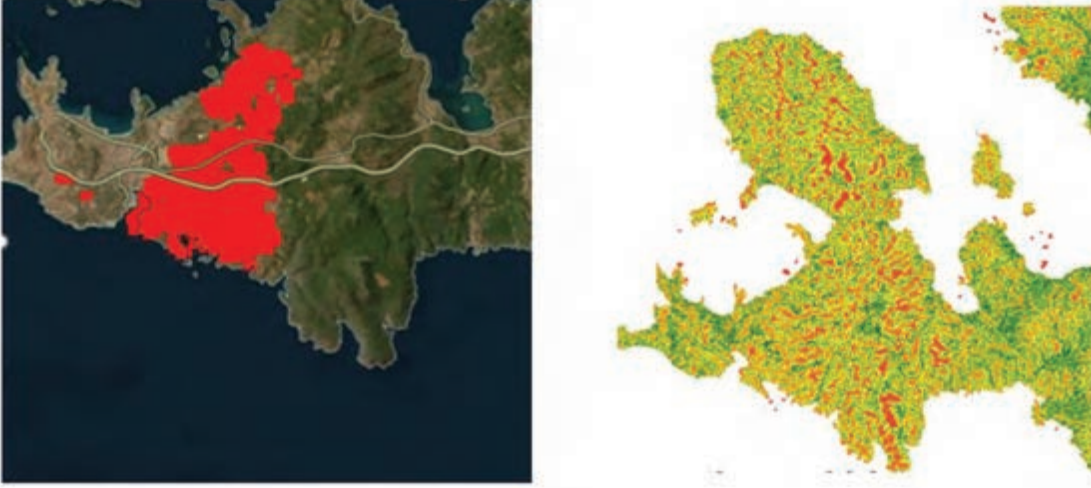


Şekil 3. Çok Yüksek, Yüksek ve Orta sınıflarının frekans oranı toplamı

Analiz sonuçlarına göre, yangın riskini en çok etkileyen faktör eğimdir. Özellikle dik yamaçlarda rüzgârın etkisi ve yanıcı maddelerin birikmesi, yangın riskini artırmaktadır. İkinci en etkili faktör kentsel alanlardır; yoğun nüfus ve insan faaliyetleri riski yükseltmektedir. Üçüncü sırada yer alan bakı, güneş ışınımını etkileyerek yangın olasılığını şekillendirir. TWI ve rüzgâr ise daha düşük etkili olup, bazı sınıflarda sınırlı rol oynamıştır. Bu sonuçlar, meteorolojik faktörlerin yanı sıra özellikle eğim, kentsel alanlar ve bakı faktörlerinin yangın yönetiminde öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bulgular doğrultusunda, 2025 Haziran ve Temmuz ayında İzmir ilinde çıkan orman yangınları incelendiğinde, yüksek risk gözlenen bölgelerde orman yangınlarının çıktığı

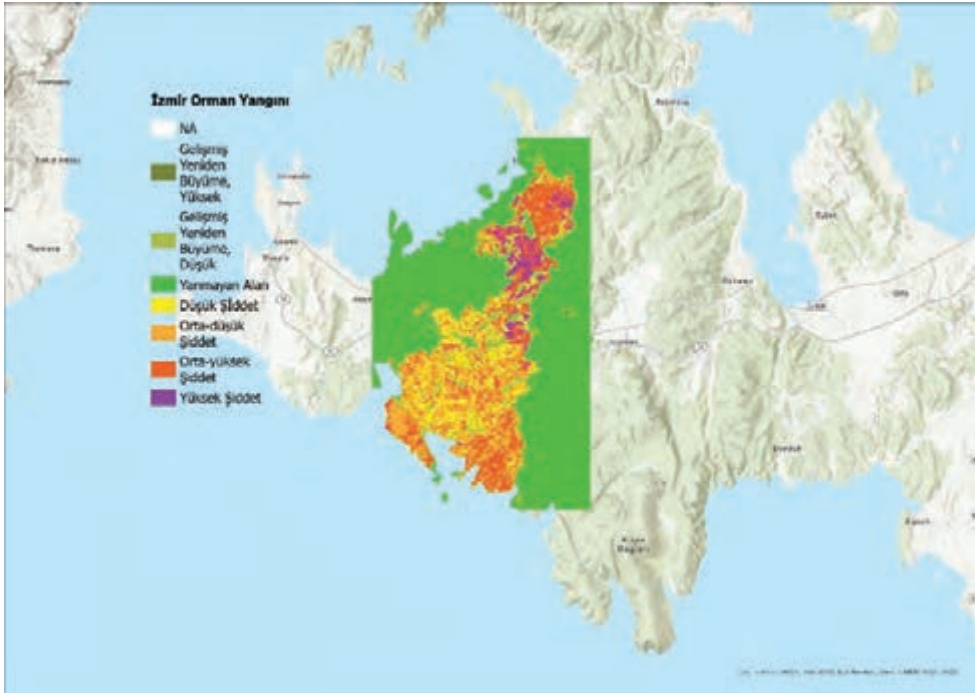
*Frekans Oranı Yöntemi ile Orman Yangını Riskinin Görüntülenmesi ve Meydana Gelen Orman Yangınlarının İncelenmesi; 2025 İzmir Örneği*

gözlemlenmiştir. Yangınlar öncelikli olarak NASA FIRMS platformundan incelenmiş ve konum/lokasyon bilgilerine ulaşılmıştır. Şekil 4 içerisinde orman yangınlarının lokasyonları ve risk haritasında gözlenen sınıflar incelenmiştir.



Şekil 4. Orman yangınları ve Risk haritası

Orman yangınlarının meydana geldiği bölge, orman yangını risk haritasında yüksek risk sınıfına ait piksellerin olduğu bölge ile neredeyse uyumludur. Bu bulgular doğrultusunda, potansiyel bir diğer orman yangının da yüksek risk sınıfında meydana geleceği öngörülmektedir. Yapılan analiz ve orman yangınlarının lokasyonları kapsamında, İzmir ili için gelecekte çıkabilecek potansiyel orman yangınları için, “Orman Yangını Risk” haritasında, yüksek-çok yüksek risk sınıfına ait olan bölgelere gerekli önlemlerin alınmasının gerektiği çıkarımı yapılmıştır. Aynı zamanda bölgede meydana gelen orman yangınının Normalize Yanma Oranı (dNBR) analizi yapılarak, yangın şiddet sınıflandırılması da yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. İzmir Orman Yangını Şiddet Sınıflandırması

Göktaş Yaşar Çukurlu, Fulya Aydın-Kandemir, Ecmel Erlat, Furkan Veziro, Nusret Demir

Yapılan analizler sonucunda İzmir’de meydana gelen orman yangınının şiddet dağılımı sayısal olarak da elde edilmiştir. Elde edilen alansal dağılım Tablo 1 içerisinde verilmiştir.

Tablo 1. Orman yangını şiddet dağılımı

FNYO Sınıfları	Alan (km <sup>2</sup> )
Gelişmiş yeniden büyüme, yüksek	1.12
Gelişmiş yeniden büyüme, düşük	2.16
Yanmayan alanlar	80.63
Düşük şiddet	33.8
Orta-düşük şiddet	59.85
Orta-yüksek şiddet	42.01
Yüksek şiddet	8.2
<b>Toplam Alan</b>	<b>227.77</b>

İzmir’in Urla ve Çeşme illerini kapsayan bölgede, 2025 yılının 25 Haziran tarihinde meydana gelen orman yangınında yaklaşık 110 km<sup>2</sup> alanın zarar gördüğü gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu orman yangını Şekil 2 içerisinde verilen orman yangını risk haritasında, çok yüksek risk kategorisi içinde gözlemlenmiştir ve gerekli tedbirlerin alınması doğrultusunda meydana gelen tahribatın ciddi derecede azaltılabileceği düşünülmektedir.

Uzaktan algılama yöntemleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak oluşturulan bu tarz risk haritalarında, yüksek risk barındıran bölgelerin kontrol altına alınarak aktif bir şekilde gözlemlenmesi veya belirli önlemlerin alınması, doğal afet kaynaklı tahribatların minimuma indirilmesi açısından oldukça değerlidir.

#### Anahtar Kelimeler

Frekans Oranı, Orman Yangınları, Risk Çıkarımı, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Uzaktan Algılama

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123Y274 numaralı proje ile Bilim ve Teknolojide Avrupa iş birliği (COST) kapsamında desteklenmiş ve finanse edilmiştir.

#### **Kaynaklar**

Çukurlu, G. Y., Demir, N., Kolokousis, P., Aydın-Kandemir, F., & Erlat, E. (2025). Investigation of InSAR Coherence Data and Frequency Ratio for Analyzing Forest Fires: A Case Study of Yamanlar, Izmir. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 109-115.

Huang, K., Wu, X., Zhang, L., Geng, H., & Qu, Y. (2025). Increasing risk of global forest loss from extreme wildfires under climate change. *International Journal of Digital Earth*, 18(1), 2483982.

Singh, M., Sharma, C., Agarwal, T., Pal, M.S., 2022. Forest fire prediction for nasa satellite dataset using machine learning. In 2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO), 1-5.

Tiwari, A., Shoab, M. Dixit, A, 2021. GIS-based forest fire susceptibility modeling in Pauri Garhwal, India: a comparative assessment of frequency ratio, analytic hierarchy process and fuzzy modeling techniques. *Nat Hazards*, 105, 1189–1230. doi.org/10.1007/s11069-020-04351-8

# Türkiye'nin Sıcaklık Verilerinin Yapay Zekâ Tabanlı Haritalanması

Vahdettin Demir<sup>1,\*</sup>, Ahmet Bilal Çifcibaşı<sup>2</sup>, Muhammed Can Şanlı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>2</sup>KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

## Genişletilmiş Özet

Küresel iklim değişikliği, yalnızca atmosfer sıcaklıklarının artmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ekosistem dengeleri, su kaynaklarının yönetimi, enerji tüketimi ve toplumsal yaşam üzerinde derin etkiler yaratmaktadır. Artan sıcaklık dalgalanmaları, gıda üretimini tehdit eden kuraklıklar, altyapı sistemlerini zorlayan aşırı hava olaylarını ve insan sağlığını etkileyen sıcak hava dalgalarını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, özellikle tarım, ulaşım, enerji üretimi, sağlık hizmetleri ve şehir planlama gibi yaşamsal sektörlerde sıcaklık verilerinin doğru tahmini hayati önem taşır. Türkiye gibi farklı iklim bölgelerini aynı anda barındıran ülkelerde ise bu tür tahminlerin hem zaman hem de mekân boyutunda ayrıntılı ve güvenilir şekilde modellenmesi kritik bir gerekliliktir (IPCC, 2021; Şensoy, Demirtaş & Özdemir, 2008). Bu çalışmada, Türkiye genelindeki 81 ilin meteoroloji istasyonlarına ait 1927–2023 yılları arasındaki uzun dönem sıcaklık verileri kullanılarak, çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA) ile sıcaklık tahmini yapılmış ve bu tahminler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla mekânsal olarak haritalanmıştır. Söz konusu veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü (TSMG, 2023) tarafından sağlanmış ve istasyon bazlı düzenlenmiştir. Verilerin %80'i model eğitimi, %20'si ise test süreci için ayrılmıştır.

Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sisteminden ilham alınarak geliştirilen, özellikle doğrusal olmayan ve karmaşık veri yapılarının modellenmesinde üstün başarı sağlayan bir yapay öğrenme yaklaşımıdır. İnsan beynindeki nöronların birbirine sinapslarla bağlanarak bilgi ilettiği prensibi temel alınarak tasarlanan bu sistemlerde, yapay nöronlar katmanlar hâlinde organize edilir. Giriş katmanına verilen veriler, gizli katmanlar aracılığıyla çeşitli ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları yardımıyla işlenir ve sonuç katmanında bir tahmin veya sınıflandırma çıktısı üretilir. Bu yapı, özellikle iklim verileri gibi çok değişkenli, zaman serili ve mekânsal bağımlılık içeren veri setlerinde üstün öğrenme ve genelleme kabiliyeti gösterir. YSA'lar bu nedenle sıcaklık tahmini, hava durumu modelleme ve çevresel analizler gibi uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (Hagan & Menhaj, 1994). Bu çalışmada kullanılan ÇKYSA mimarisi, giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmakta; eğitim sürecinde farklı algoritmalar aracılığıyla ağırlıklar güncellenerek öğrenme gerçekleşmektedir. Modelleme sürecinde dokuz farklı eğitim algoritması karşılaştırılmıştır: Reinforcement Learning (RP) – ödül-temelli öğrenmeye dayalıdır (Sutton & Barto, 2018); One Step Secant (OSS) – Quasi-Newton yaklaşımı ile konjugat gradyanı birleştiren bir hızlandırıcı algoritmadır (Gangwar, Date & Ramaswamy, 2015); Resilient Back Propagation (RBP) – türevin yönünü dikkate alarak yakınsama hızını artırır (Riedmiller & Braun, 1993); Scaled Conjugate Gradient (SCG) – çizgi araması yapmadan öğrenme sürecini hızlandırır (Möller, 1993); Levenberg-Marquardt (LM) – Newton ve gradyan inişi yöntemlerinin birleşimi olarak, küçük veri setlerinde yüksek performans sağlar (Marquardt, 1963); Variable Learning Rate Back Propagation (GDX) – sabit olmayan öğrenme oranları ile eğitimin uyarlanabilirliğini artırır (Gerkani et al., 2010); Polak-Ribiere Conjugate Gradient (CGP), Fletcher-Powell Conjugate Gradient (CGF) ve Conjugate Gradient with Powell (CGB) – klasik konjugat gradyan algoritmalarının varyasyonları olarak optimizasyon performansını artırmaya yöneliktir (Powell, 1977).

Model başarımı üç temel kriter ile değerlendirilmiştir: (1) Karekök Ortalama Hata (KOKH): Büyük hataları daha çok cezalandırarak modelin uç değerlerdeki başarısını ölçer (López et al., 2018). (2) Ortalama Mutlak Hata (OMH): Sapma yönünü dikkate almaz; yorumlanması kolaydır (Willmott & Matsuura, 2005). (3) Determinasyon Katsayısı (R<sup>2</sup>): Modelin açıklayıcılık düzeyini gösterir; 1'e yaklaştıkça tahmin doğruluğu artar (Field, 2013). Sıcaklık verilerinin yalnızca istatistiksel olarak değil, mekânsal olarak analiz edilmesi amacıyla, tahmin edilen değerler CBS ortamına aktarılmış ve Türkiye genelinde sıcaklık dağılım haritaları üretilmiştir. Bu haritalar, coğrafi düzeyde sıcaklık farklılıklarının izlenmesine olanak tanıyarak, bölgesel eğilimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Modelleme ve analiz sonuçları doğrultusunda Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, diğer sekiz algoritmaya kıyasla daha düşük ortalama hata oranlarına ve daha yüksek determinasyon katsayılarına ulaşmıştır. Bu algoritmanın kısa sürede yüksek doğrulukla sonuç vermesi, onu sıcaklık tahmini gibi zamana duyarlı uygulamalar için ideal hale getirmektedir (Hagan & Menhaj, 1994; Marquardt, 1963). Her ilin ayrı ayrı değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar, Levenberg-Marquardt algoritmasının istasyonlar arası kararlılık gösterdiğini de ortaya koymuştur. CBS destekli analizler, Türkiye'nin farklı bölgelerinde yaşanan sıcaklık değişimlerini mekânsal olarak ortaya koymuş; özellikle Güneydoğu Anadolu'da yaz aylarında gözlenen yüksek sıcaklık değerleri ile Doğu Anadolu'da kış aylarında kaydedilen düşük değerler, yapay sinir ağı tahminlerinin coğrafi doğruluğunu kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, yapılan analizler sonucunda Levenberg-Marquardt algoritması, düşük hata oranları ve yüksek doğruluk seviyesiyle diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı performans sergilemiştir. Elde edilen sıcaklık tahminlerinin CBS ortamında görselleştirilerek haritalanması, bölgesel farklılıkların anlaşılması açısından büyük katkı sağlamış; harita mühendisliği uygulamalarında sıcaklık tahmini ve iklim modellemesi açısından güçlü ve uygulanabilir bir çözüm sunmuştur. Yapay zekâ temelli bu yaklaşım, yalnızca akademik bir yöntem değil, aynı zamanda tarımsal üretim planlaması, şehircilik, çevre yönetimi ve afet risk analizi gibi pek çok uygulama alanında da karar destek sistemlerine entegre edilebilecek etkin bir modelleme aracı olarak değerlendirilmektedir.

## Anahtar Kelimeler

Yapay Sinir Ağları, Sıcaklık Tahmini, Levenberg-Marquardt Algoritması, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Harita Mühendisliği, İklim Değişikliği,

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0212) 285 34 14 Faks: (0212) 2856587

E-posta: muratabcde@jtu.edu.tr (Murat ABCDE)

## Bildirinin Türkçe Başlığı

**Kaynaklar**

- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). SAGE Publications.
- Gangwar, A., Date, P., & Ramaswamy, R. (2015). A hybrid quasi-Newton method with secant updates for optimization problems. *Applied Mathematical Modelling*, 39(10), 2840–2853. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.041>
- Gerhani, A. F., Hashemi, H., & Kamalabadi, I. (2010). Improved backpropagation algorithm with variable learning rate. *International Journal of Computer Applications*, 6(8), 32–37. <https://doi.org/10.5120/1131-1476>
- Hagan, M. T., & Menhaj, M. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), 989–993.
- López, M., Fernández, J., & García, C. (2018). Root mean square error in climate models: Limitations and alternatives. *Journal of Climate Analytics*, 45(2), 103–115.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 431–441.
- Møller, M. F. (1993). A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural Networks*, 6(4), 525–533.
- Powell, M. J. D. (1977). Restart procedures for the conjugate gradient method. *Mathematical Programming*, 12(1), 241–254. <https://doi.org/10.1007/BF01593790>
- Riedmiller, M., & Braun, H. (1993). A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks*, 586–591.
- Şensoy, S., Demirtaş, M., & Özdemir, E. (2008). *Türkiye'nin iklimi*. T.C. Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (2nd ed.). MIT Press.
- TSMS. (2023). *Türkiye uzun dönem iklim verileri*. <https://www.mgm.gov.tr>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.

# Mersin’de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin MaxEnt ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile Karşılaştırılması

Mehmet Özgür ÇELİK<sup>1\*</sup>, Osman ORHAN<sup>1</sup>, Mehmet Ali KURT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 33343, Mersin.

<sup>2</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 33343, Mersin

## Özet

Sub-tropikal iklim kuşağı altında bulunan Mersin’de çalışma gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, çalışma alanının mevcut ve gelecekteki muhtemel iklim özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında, çalışmada iklim değişikliğinin etkileri ile çalışma alanının toprak ve topoğrafik özellikleri göz önünde bulundurularak, mevcut ve gelecek dönemler için bölgede gelişmesi muhtemel avokado için potansiyel dağılım alanları MaxEnt modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Gelecek dönem (2050 ve 2090) için analizler SSP2-4.5 senaryosu altında HadGEM3-GC31-LL modeli ile gerçekleştirilmiştir. Bu türün potansiyel dağılımı belirlemek için iklim, toprak ve topoğrafik veriler olmak üzere toplamda 14 parametre kullanılmıştır. Nihai olarak ise 12 parametreyle analizler yürütülmüştür. 2050 döneminde “S1” sınıfında mevcut döneme nazaran %1.47’lik bir azalış, 2090 döneminde ise %3.59’luk bir artış beklenmektedir. Çalışmadan elde edilen bulgular, çalışma alanında iklim değişikliğiyle birlikte gelecekte sıcaklıkta artış, yağışta ise azalış trendi olacağını göstermektedir. Bununla birlikte, iklim değişikliğinin olumsuz etkisine rağmen bölgenin ifade edilen sub-tropikal meyvenin yetiştirilmesine imkân tanyacağı ve tarımın sürdürülebilir şekilde yapılabileceği görülmektedir.

## Anahtar Sözcükler

İklim Değişikliği, SSP, Tarımsal Uygunluk, Avokado, MaxEnt, Mersin

## Abstract

The study was conducted in Mersin, a province located in a sub-tropical climate zone. Initially, the current and potential climatic characteristics of the study area were ascertained. Following this, considering the effects of climate change in conjunction with the soil and topographic characteristics of the study area, potential distribution areas for avocado were identified as likely to develop in the region for both the current and future periods using the MaxEnt model. Analyses for the following periods (2050 and 2090) were conducted with the HadGEM3-GC31-LL model under the SSP2-4.5 scenario. A total of 14 parameters, incorporating data on climate, soil, and topography, were utilized to ascertain the potential distribution of the species in question. Finally, analyses were conducted with 12 parameters. Projections indicate a 1.47% decrease in the "S1" class by 2050 compared to the current period, with a 3.59% increase anticipated by 2090. The study's findings suggest that, in the study area, climate change is expected to result in a rise in temperature and a decrease in precipitation in the future. Notwithstanding the deleterious effects of climate change, the region has demonstrated a commitment to the sustainable cultivation of the aforementioned sub-tropical fruit, thereby ensuring the viability of agricultural practices in the face of environmental challenges.

## Keywords

Climate Change, SSP, Agricultural Suitability, Avocado, MaxEnt, Mersin

## 1. Giriş

Uzun süreli ve sürdürülebilir iyi tarım uygulamaları hedefi için tarımsal ürün seçimi son derece önemlidir (Grüter vd., 2022). Belirlenen ve ileri sürülen sürdürülebilir tarım vizyonu için ilk olarak bölgelerin iklim özellikleri ve küresel iklim değişikliği (küresel ısınma) sonucunda ortaya çıkabilecek olası etkileri tespit edilmelidir. Sıcaklıkta meydana gelen ya da gelecek değişimler tarım ürünlerini doğrudan etkileyecektir. Bunun neticesinde, yetiştirilen bölgelerde kaymaların olması, tarım ürünlerinin değişmesi, rekoltenin azalması gibi olumsuz etkiler meydana gelecektir (Avelino vd., 2015). Mevcut durumda değişimlerin olduğu bölgeler mevcuttur. Özellikle, Akdeniz havzasında bulunan yerler için küresel ısınmanın başlıca olumsuz etkileri arasında yer alan kuraklık yetiştirilen tarım ürünlerini negatif yönde etkilemektedir (Özdel vd., 2024; Zittis vd., 2022). Cárceles Rodríguez vd. (2023) tarafından yürütülen çalışmada Akdeniz havzasında avokado üretiminin iklim değişikliği neticesinde olumsuz etkilendiği saptanmıştır. Literatürde iklim değişikliğinin tarım ürünlerine etkilerini irdeleyen birçok araştırma bulunmakta olup bazıları sunulmuştur. Charre-Medellín vd. (2021)’ce Michoacán/Meksika’da gerçekleştirilen çalışmada avokado üzerinde iklim değişikliğinin muhtemel etkileri ve avokado için uygun yerler belirlenmiştir. Denvir (2023) tarafından yapılan çalışmada da yine aynı bölgede (Michoacán/Meksika) farklı iklim senaryoları kullanılarak avokadonun üretim boyutu ve üretimin ormansızlaşmaya olan etkileri incelenmiştir. Bunn vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise kahvenin iklim değişikliğine karşı hassas olduğu belirlenmiş, halihazırda en çok kahve üreten ülkelerden olan Brezilya ve Vietnam’ın değişimden olumsuz yönde etkileneceği tespit edilmiştir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (324) 1361 00 01/17359

E-posta: mozgurcelik@mersin.edu.tr (Çelik M. Ö.)

## Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin MaxEnt ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile Karşılaştırılması

Literatürde de belirttiği üzere iklim değişikliği tarım ürünlerini etkilemekte ve giderek bu etkinin artacağı kuvvetle muhtemeldir. Bundan dolayı bölgeler için uygun tarım ürünü ve politikaların belirlenmesi için ilk olarak bu bölgelerin iklim özellikleri ve de olası iklim özellikleri belirlenmelidir. Bunun için farklı iklim modelleri ve senaryoları kullanılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1: Literatürde iklim değişikliğiyle çalışmalarda kullanılan model ve senaryolar

Kaynak	Model	Senaryo
Liu vd. (2025)	CanESM2	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
Mahdavian vd. (2024)	EC-EARTH, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM	RCP4.5, RCP8.5
Özdel vd. (2024)	CCSM4	RCP4.5, RCP8.5
Koç vd. (2024)	CCSM4	RCP4.5, RCP8.5
Goodarzi vd. (2024)	ACCESS-ESM1, BCC-CSM-MR	SSP2-4.5, SSP5-8.5
Dagtekin vd. (2020)	MIROC-ESM, CCSM4	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
Dehghani vd. (2024)	Access-CM2, HadGEM, UKESM1	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5
Chou vd. (2014)	HadGEM2-ES, MIROC5	RCP4.5, RCP8.5

Çalışma alanının iklim özellikleri ve konumuna bağlı olarak tercih edilen küresel iklim modelleri (global climate models-GCMs) çeşitlilik gösterse de sosyo-ekonomik yollar (Shared socio-economic pathways -SSP) ve temsili konsantrasyon yolu senaryoları (representative concentration pathways-RCP) olmak üzere iki farklı iklim senaryosu kullanılmaktadır.

Sürdürülebilir tarım hedefi için bölgelerin mevcut ve gelecekteki muhtemel iklim özellikleri tespit edildikten sonra ikinci olarak tarım ürünleri yetiştirilecek uygun yerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaç için farklı model, yöntem ve parametreler tercih edilmektedir. Son dönemde maksimum entropi (maximum entropy-MaxEnt) (Aduvukha et al., 2024; Koç vd., 2024; Özdel vd., 2024), genelleştirilmiş lineer model (generalized linear model-GLM) (Chiaverini vd., 2023), genel katkı modeli (general additive model-GAM) (Arcangeli vd., 2024) genelleştirilmiş ve güçlendirilmiş model (generalized boosted model-GBM) (Ramirez-Reyes vd., 2021) gibi farklı tür dağılım modelleri (species distribution models-SDMs) sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, makine öğrenimi (machine learning-ML) yöntemleri ile uzaktan algılama (UA) (Whitney vd., 2018) ve Coğrafi Bilgi Sistemlerine (CBS) dayalı Analytical Hierarchy Process (AHP) yöntemi de çoğunlukla kullanılmaktadır (Orhan, 2021). Literatürde bu yöntem ve modelleri kullanan çalışmaların bir kısmı Tablo 2'de sunulmuştur.

Tarımsal uygunluk analizi için yöntemler farklı olsa da ağırlıklı olarak iklim verileri (sıcaklık ve yağış) tercih edilmektedir. Bununla birlikte, toprak yapısı ve özelliği de bu analizde önemlidir (Vetharianiam vd., 2022). Yalnızca iklim verileri bir bölgenin bir veya birden fazla tarım ürünü için uygun koşullar sunduğunu kesin bir şekilde ifade edememektedir (Gao vd., 2022).

Tablo 2: Literatürde tarım ürünleri için uygun yerleri tespit eden çalışmalar

Kaynak	Yöntem	Parametre												
		S	Y	T	TpH	TT	TD	AKK	Yü	E	B	AK/AÖ	J	
Özdel vd. (2024)	MaxEnt	●	●											
Koç vd. (2024)	MaxEnt, GLM, GBM, GAM, ANN, RF, FDA, CTA, SRE	●	●											
Ozalp & Akinci (2023)	RF	●	●	●			●	●	●		●	●		
Alhajj vd. (2023)	AHP	●	●	●	●	●								
Narouei-Khandan vd. (2022)	MaxEnt, CLIMEX, SVM	●	●											
Everest (2021)	AHP	●				●	●	●	●		●			
Kumar vd. (2021)	AHP, FR	●	●	●					●	●		●	●	
Taghizadeh-Mehrjardi vd. (2020)	RF, SVM	●	●	●	●									

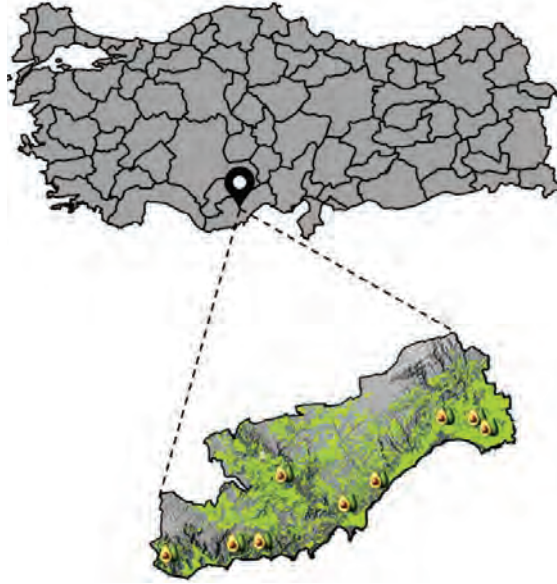
S=Sıcaklık; Y=Yağış; T=Toprak; TpH= Toprak pH'ı; TT=Toprak Tuzluluğu; TD=Toprak Derinliği; AKK=Arazi Kullanım Kabiliyeti; Yü=Yükseklik; E=Eğim; B=Baki; AK/AÖ=Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü; J=Jeoloji

Akdeniz havzasında yer alan ve konumu itibariyle sub-tropikal iklim kuşağı etkisi görülen Mersin sub-tropikal meyve olan avokado için uygun iklim özelliklerine sahiptir. Diğer taraftan, ifade edilen iklim kuşağı yarı kurak iklim özelliğine sahip olmasından dolayı küresel iklim değişikliği etkilerine karşı son derece savunmasızdır (Çelik & Gülersoy, 2018; Sevim vd., 2022; TOB, 2023). İklim değişikliğinin etkileriyle;

- sıcaklığın yükseleceği,
- yağışın azalacağı
- yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarında azalma olacağı tahmin edilmektedir (Çelik & Yakar, 2024; Soltekin vd., 2021). Tüm bunlardan ötürü Mersin çalışma alanı olarak tercih edilmiştir. Mersin'e ait sürdürülebilir tarım perspektifi çerçevesinde avokado için mevcut durumda ve gelecekte uygun yerler MaxEnt yöntemiyle tespit edilmesi bu çalışmada hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Mersin'in mevcut ve gelecekte iklim verileri (yıllık ortalama sıcaklık, kış ayında ortalama minimum sıcaklık, yaz ayında ortalama maksimum sıcaklık ve yıllık ortalama yağış), toprak (toprak dokusu, toprak derinliği, toprak pH'ı, toprak tuzluluğu, topraktaki organik karbon miktarı, arazi kullanım kabiliyeti, yeraltı suyu seviyesi) ve topoğrafik (arazi örtüsü, yükseklik ve eğim) özelliklerini içeren 14 parametre belirlenmiştir (Şekil 1). Daha yüksek doğruluk ve çoklu doğrusalığın elimine edilmesi için parametreler korelasyon analizine tabi tutulmuştur (Khan vd., 2022). Korelasyon matrisi oluşturulmuş ve korelasyon katsayı (correlation coefficient) değeri  $\geq \pm 0.85$  olan parametreler (kış ayında ortalama minimum sıcaklık ve yükseklik) analiz dışında tutulmuştur. Nihai olarak 12 parametreyle uygunluk analizi önce mevcut (referans dönemi 1971-2000) durum için (Şekil 2a), sonrasında ise gelecek dönem için gerçekleştirilmiştir (Şekil 2b, c). Gelecek zaman dilimi (1) yakın gelecek (2041-2060) ortalama 2050 ve (2) uzak gelecek (2081-2100) ortalama 2090 olarak ikiye ayrılmıştır. Bu dönemler için küresel ısınmayı yaklaşık olarak 3°C civarında sınırlayan SSP2-4.5 senaryosu altında HadGEM3-GC31-LL modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece, çalışma alanında mevcut dönem ve gelecek zaman dilimi için üç farklı kategorideki (iklim, toprak ve topoğrafik) parametrelerle avokadonun potansiyel olarak yetişebileceği yerler tespit edilmiştir. Uygunluk sınıflarının kategorize edilmesinde FAO arazi değerlendirme yaklaşımı (land evaluation approach) benimsenmiştir. "S1" (oldukça uygun), "S2" (orta derecede uygun), "S3" (marjinal olarak uygun), "N" (uygun değil) olmak üzere toplamda dört sınıf kullanılmıştır.

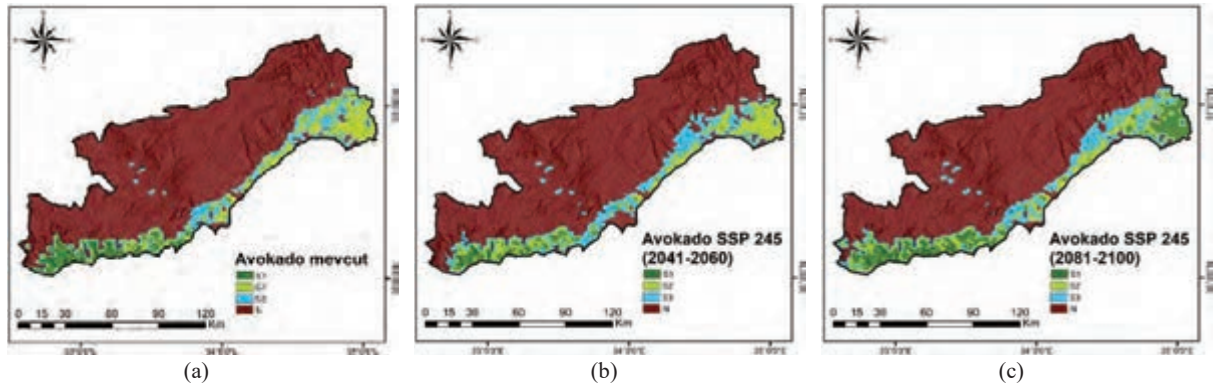


Şekil 2. Çalışma alanı

## 3. Bulgular

MaxEnt modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizlere göre avokadonun çalışma alanında farklı zaman dilimlerine ait potansiyel dağılım alanlarına erişmek mümkündür (Şekil 2).

Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin MaxEnt ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile Karşılaştırılması

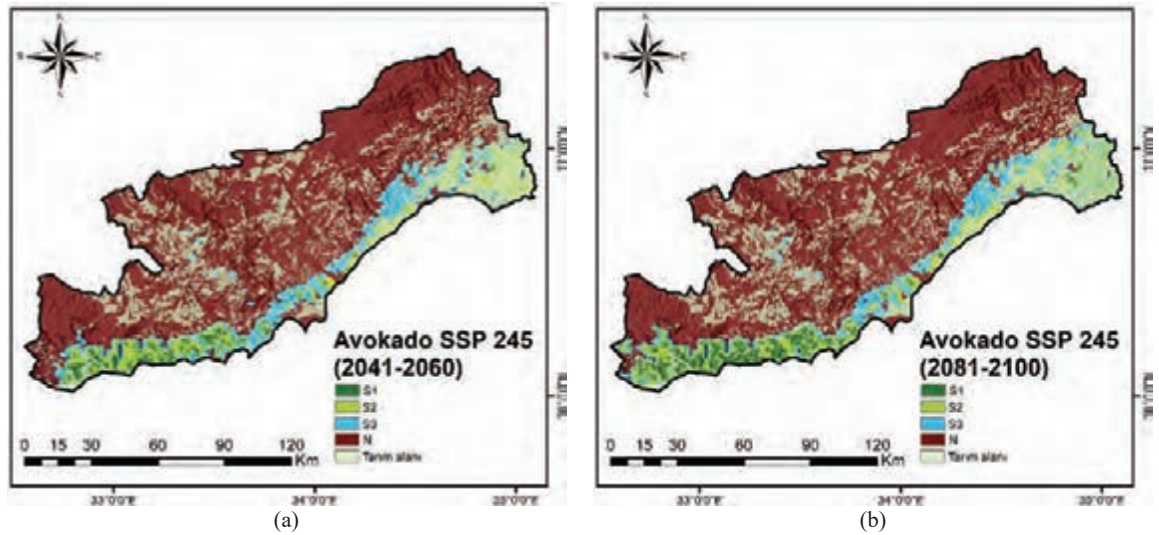


Şekil 2: Avokadonun (a) mevcut, (b) 2050 ve (c) 2090 dönemleri için potansiyel dağılım bölgeleri

Referans (mevcut) döneme ait avokadonun potansiyel dağılım haritası irdelendiğinde, çalışma alanın alçak ve güney bölümlerinin “S1” sınıfında (%4.16) bulunduğu saptanmıştır. Berdan Ovası bölgesinin (“S2” sınıfı, %9.83) ve az da olsa Göksu Nehri vadisinin (“S3” sınıfı, %7.73) bu tür için uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca, yüksekliğin fazla olduğu dağlık kuzey bölgeler ise ağırlıklı olarak “N” sınıfında (%78.27) yer almıştır.

Projeksiyon döneminde ise mevcut duruma göre “S1” sınıfında 2050 dönemi için %1.47 bir azalış söz konusudur. 2090 döneminde “S1” sınıfının 1229.35 km<sup>2</sup>’lik alana sahip olacağı ve mevcut duruma nazaran %3.59’luk bir artış meydana geleceği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, “N” sınıfında her iki dönem için de mevcut döneme göre değişimin çok fazla olmaması beklenmektedir. Avokadonun potansiyel dağılım alanlarının yakın ve uzak gelecekte çalışma alanın güney ekseninde olması beklenmektedir. Bu yönüyle mevcut dönemle benzer olacağını söylemek mümkündür. Bununla birlikte, 2090 zaman diliminde Berdan Ovası bölgesinin “S1” sınıfında yer alması beklenmektedir. Göksu Nehri vadisi de mevcut döneme nazaran avokado için daha uygun imkânlar sunacaktır.

Tarımsal uygunluk analizinden sonra gelecek dönemdeki potansiyel dağılım sınıfları ile mevcut tarım alanları arasındaki ilişki tespit edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Avokadonun (a) 2050 ve (b) 2090 potansiyel dağılım alanları ile tarım alanlarının örtüşmesi

Avokadonun potansiyel dağılım alanları (“S1”, “S2”, “S3” ve “N”) ile mevcut tarım alanları arasındaki ilişkiye göre ilk dönemde (2050) tarım alanların yaklaşık %1.88’siyle (88.54 km<sup>2</sup>) “S1” sınıfı kesişmektedir. İkinci dönemde (2090) %5.42’lik (254.67 km<sup>2</sup>) bir örtüşme olmaktadır. “N” sınıfı ise çalışma alanının büyük bir kesimini (neredeyse %70) meydana getirdiği için tarım alanlarının bu sınıfla yüksek miktarda kesiştiğini (yaklaşık %50) söylemek mümkündür.

#### 4. Sonuçlar

Avokado için yapılan tarımsal uygunluk analizlerine ait bulgulardan çıkarımlar yapmak mümkündür. Buna göre gelecekte çalışma alanın sıcaklığında artış (2050 için 3.3°C-4.2°C, 2090 için 3.8°C-4.8°C), yağışında (2050 döneminde %15, 2090

döneminde %11.7) azalış meydana gelecektir. Bu bakımdan, bu model sonuçlarına göre küresel ısınma çalışma alanını ağırlıklı olarak olumsuz etkileyecektir. Buna karşın, avokadonun mevcut ve gelecek dönemde potansiyel dağılım alanları irdelendiğinde, “S1” sınıfında dalgalanmaların olacağı ancak iklim değişikliğinin muhtemel etkileri neticesinde çalışma alanının yüzyıl sonuna gelindiğinde mevcut duruma göre daha uygun koşullar sunacağı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, çalışma alanında mevcut durum ve gelecek dönem için bir perspektif çizilmiştir. Böylelikle, avokadonun tarımsal faaliyetlerin iklim değişikliği etkilerine rağmen sürdürülebileceği saptanmıştır.

## Kaynaklar

- Aduvukha G. R., Abdel-Rahman E. M., Mudereri B. T., Sichangi A. W., Makokha G. O., Lattorff H. M. G., Mohamed S. A., Landmann, T., Tonnang H. E. Z., Dubois T. (2024). Co-occurrence and abundance of pollinators and pests in horticultural systems in Africa using an integrated Earth observation-based approach. *GIScience & Remote Sensing*, 6(11).
- Alhajj Ali S., Vivaldi G. A., Garofalo S. P., Costanza L., Camposeo S. (2023). Land suitability analysis of six fruit tree species immune/resistant to xylella fastidiosa as alternative crops in infected olive-growing areas. *Agronomy*, 13(2).
- Arcangeli A., Azzoli, M., Babey L., David L., Garcia-Garin O., Moulins A., Rosso, M., Scderi A., Tepsich P., Vighi M., Orasi A. (2024). Looking for reliable species distribution models for low-density cetacean species: Compared effectiveness of SDMs for *G. griseus*, *G. melas*, *Z. cavirostris* in the Mediterranean Sea based on long-term fixed-transect data. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 34(3).
- Avelino J., Cristancho M., Georgiou S., Imbach P., Aguilar L., Bornemann G., Läderach P., Anzueto F., Hruska A. J., Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food security*, 7(2), 303-321.
- Bunn C., Läderach P., Ovalle Rivera O., Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic change*, 129(1), 89-101.
- Cárceles Rodríguez B., Durán Zuazo V. H., Franco Tarifa D., Cuadros Tavera S., Sacristan P. C., García-Tejero I. F. (2023). Irrigation alternatives for avocado (*Persea americana* Mill.) in the Mediterranean subtropical region in the context of climate change: A review. *Agriculture*, 13(5), 1049.
- Charre-Medellín J. F., Mas, J. F., Chang-Martínez, L. A. (2021). Potential expansion of Hass avocado cultivation under climate change scenarios threatens Mexican mountain ecosystems. *Crop and Pasture Science*, 72(4), 291-301.
- Chiaverini L., Macdonald D. W., Hearn A. J., Kaszta Z., Ash, E., Bothwell H. M., Can Ö. E., Channa P., Clements R., Haidir I. A., Kyaw P. P., Moore, J. H., Rasphone A., Tan C. K. W., & Cushman S. A. (2023). Not seeing the forest for the trees: Generalised linear model out-performs random forest in species distribution modelling for Southeast Asian felids. *Ecological Informatics*, 75.
- Chou S. C., Lyra A., Mourão C., Dereczynski C., Pilotto I., Gomes J., Bustamante J., Tavares P., Silva A., Rodrigues D., Campos D., Hagas D., Sueiro G. S., Marengo J. (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(05). 512-527.
- Çelik, M. A., Gülersoy A. E. (2018). Climate classification and drought analysis of Mersin. *Manisa Celal Bayar University Journal of Social Sciences*, 16(1), 1-26.
- Çelik M. Ö., & Yakar M. (2024). Mersin'in farklı kuraklık indeksleri aracılığıyla kuraklık tehdidinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1). 71-84.
- Dagtekin D., Şahan E. A., Denk T., Köse N., Dalfes H. N. (2020). Past, present and future distributions of Oriental beech (*Fagus orientalis*) under climate change projections. *PLoS one*, 15(11).
- Dehghani A., Mortazavizadeh F., Dehghani A., Rahmat M. B., Galavi H., Bolonio D., Ng J. L., Rezaverdinejad V., Mirzaei, M. (2024). Multi-model assessment of climate change impacts on drought characteristics. *Natural Hazards*, 12(5), 6069-6084.
- Denvir A. (2023). Avocado expansion and the threat of forest loss in Michoacán, Mexico under climate change scenarios. *Applied Geography*, 151, 102856.
- Everest T. (2021). Suitable site selection for pistachio (*Pistacia vera*) by using GIS and multi-criteria decision analyses (a case study in Turkey). *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 7686-7705.
- Gao B., Yuan S., Guo Y., Zhao, Z. (2022). Potential geographical distribution of *Actinidia* spp. and its predominant indices under climate change. *Ecological Informatics*, 72.
- Goodarzi M. R., Abedi M. J., Niazkar M. (2024). Effects of climate change on streamflow in the Dez Basin of Iran using the IHACRES model based on the CMIP6 model. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), 2595–2611.
- Grüter R., Trachsel T., Laube P., Jaisli, I. (2022). Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change. *PLoS one*, 17(1),
- Khan A. M., Li Q., Saqib Z., Khan N., Habib T., Khalid N., Majeed M., Tariq, A. (2022). MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important Chilgoza Pine (*Pinus gerardiana* Wall.) in South Asia. *Forests*, 13(5).
- Koç D. E., Ustaoglu B., & Biltekin D. (2024). Effect of climate change on the habitat suitability of the relict species *Zelkova carpinifolia* Spach using ensemble species distribution modelling. *Sci Rep*. 14(1).
- Kumar A., Pramanik M., Chaudhary S., Negi, M. S. (2021). Land evaluation for sustainable development of Himalayan agriculture using RS-GIS in conjunction with analytic hierarchy process and frequency ratio. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(1). 1-17.
- Liu Y., Li Z., Zhang J., Guo H., Jiang X., Wang S., Zhang Y., Fu, Z. (2025). Nutrient release to Qinghai Lake from buffer zone evolution driven by climate change. *Journal of Hydrology*, 654.
- Mahdavian S., Zeynali B., Salahi, B. (2024). Evaluation of the hydrological response of the Kiwi Chai catchment area to future climate changes with the SWAT model. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(3), 8815-8800.

*Mersin'de İklim Değişikliğinin Avokado Yetiştiriciliğine Etkilerinin MaxEnt ile Tahmini ve Mevcut Arazi Örtüsü ile Karşılaştırılması*

- Narouei-Khandan H. A., Wornor S. P., Viljanen S. L., van Bruggen A. H., Balestra G. M., Jones, E. (2022). The potential global climate suitability of kiwifruit bacterial canker disease (*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa)) using three modelling approaches: CLIMEX, Maxent and Multimodel Framework. *Climate*, 10(2).
- Orhan O. (2021). Land suitability determination for citrus cultivation using a GIS-based multi-criteria analysis in Mersin, Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190.
- Ozalp A. Y., Akinci, H. (2023). Evaluation of land suitability for olive (*olea europaea* L.) cultivation using the random forest algorithm. *Agriculture*, 1(6).
- Özdel M. M., Ustaoglu B., Cürebal, İ. (2024). Modeling of the potential distribution areas suitable for olive (*Olea europaea* L.) in Türkiye from a climate change perspective. *Agriculture*, 14(9), 1629.
- Ramirez-Reyes C., Nazeri M., Street G., Jones-Farrand D. T., Vilella F. J., & Evans K. O. (2021). Embracing ensemble species distribution models to inform at-risk species status assessments. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 12(1), 98-111.
- Sevim D., Varol N., Köseoğlu O. (2022). Küresel iklim değişikliğinin zeytin yetiştiriciliği ve zeytinyağı üzerine etkileri. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(2), 415-432.
- Soltekin, O., Altındişli A., İşçi, B. (2021). İklim değişikliğinin Türkiye'de bağcılık üzerine etkileri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 58(3), 457-467.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi, K., Rasoli L., Kerry R., Scholten, T. (2020). Land suitability assessment and agricultural production sustainability using machine learning models. *Agronomy*, 10(4).
- TOB. (2023). Gıda güvenliği ve su yönetimi. <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Haber/1139/Gida-Guvenligi-Ve-Su-Yonetimi> [Erişim tarihi: 15 Mayıs 2023].
- Vetharaniam I., Timar L., Stanley C. J., Müller K., van den Dijssel C., Clothier, B. (2022). Modelling climate change impacts on location suitability and spatial footprint of apple and kiwifruit. *Land*, 11(10).
- Whitney K., Scudiero E., El-Askary H. M., Skaggs T. H., Allali M., Corwin, D. L. (2018). Validating the use of MODIS time series for salinity assessment over agricultural soils in California, USA. *Ecological indicators*, 93, 889-898.
- Zittis G., Almazroui M., Alpert P., Ciais P., Cramer W., Dahdal Y., Fnais M., Francis D., Haddjnicolaou P., Howari F., Jrrar A., Kaskaoutis D. G., Kulmala M., Lazoglou G., Mihalopoulos N., Lin X., Rudich Y., Sciare J., Stenchikov G., Xoplaki E., Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of geophysics*, 60(3).

# 1999 Gölcük Depremi Sonrası Tsunaminin Neden Olduğu Kıyı Değişikliklerinin Uydu Tabanlı Değerlendirmesi

Halil İbrahim ŞENOL<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63050, Şanlıurfa.

## Genişletilmiş Özet

17 Ağustos 1999 Gölcük Depremi (Mw 7,4), Marmara Denizi altındaki Kuzey Anadolu Fayı (NAF) sisteminin bir bölümünü kırarak, modern Türk tarihinin en yıkıcı doğal afetlerinden birine neden olmuştur. Bu olay, yaklaşık 45 saniye süren şiddetli yer hareketi ile binlerce binanın yıkılmasına, on binlerce kişinin hayatını kaybetmesine ve bölge ekonomisinin uzun süreli bir çöküş sürecine girmesine neden olmuştur. Kentsel altyapı, sanayi ve ulaşım ağlarında yıkıcı sarsıntılarının yol açtığı hasara ek olarak, deprem İzmit Körfezi'nde yerel bir tsunamiye neden oldu. Deprem literatürde kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir; bununla birlikte, tsunami olayının jeofiziksel oluş mekanizması, kıyı morfolojisine etkileri ve uzun vadeli çevresel sonuçları üzerine yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ölçeği nispeten sınırlı olmasına rağmen, ardından gelen tsunami, mekansal, çevresel etkisi ve kıyı jeomorfolojik sonuçları açısından yeterince incelenmemiştir. Bu çalışma, uydu uzaktan algılama, sayısal yükseklik modelleme, nesne tabanlı görüntü analizi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) destekli modellemeyi entegre eden çok disiplinli bir mekansal metodoloji uygulayarak önemli bir araştırma boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca olayın boyutunu nicel olarak ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda benzer tektonik ortamlarda meydana gelebilecek yerel tsunami tehlikelerinin değerlendirilmesi için bir yöntemsel çerçeve sunmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, depremin hemen ardından tsunami kaynaklı kıyı değişikliklerini tespit etmek, sınıflandırmak ve bu mekansal örüntüleri mevcut yükseklik verilerini kullanarak simüle edilmiş sel bölgeleriyle karşılaştırmaktır. Ek olarak, çalışmada gözlenen kıyı değişimlerinin, yerel topografya ve antropojenik yapılaşma ile ilişkisi de değerlendirilmiştir. Metodoloji, olaydan kısa bir süre sonra, özellikle 18 Ağustos 1999 ve 30 Ağustos 1999 tarihlerinde elde edilen, depremden bir gün ve yaklaşık iki hafta sonraki koşulları temsil eden çok zamanlı Landsat 4–5 Thematic Mapper (TM) görüntülerine dayanmaktadır. Bu tarihler, tsunami sonrası hemen ardından meydana gelen su baskını ve ardından suyun çekilmesi ve kıyı şeridinin stabilize olmasını gözlemlemek için ideal bir zaman aralığı sağlamaktadır. Uydu görüntülerinin ön işleme aşaması, tarihler arasında spektral tutarlılığı sağlamak için atmosferik düzeltme ve radyometrik normalleştirme işlemlerini içermektedir. Bulutsuz görüntüler seçilmiş ve görüntüler sınıflandırılarak İzmit Körfezi kıyı çizgileri ortaya çıkarılmıştır. Bu işlem sırasında, mekansal çözünürlük sınırlamalarının neden olabileceği hataları en aza indirmek amacıyla kıyı çizgileri vektör formatına dönüştürülmüş ve görsel doğrulama yapılmıştır.

Landsat verilerinden yüzey suyu çıkarmanın doğruluğunu artırmak için iki spektral indeksin bir kombinasyonu kullanılmıştır; bunlar Modifiye Normalize Edilmiş Su Farkı İndeksi (MNDWI) ve Normalize Edilmiş Su Farkı İndeksi (NDWI) indeksleridir. Çalışmada ayrıca, farklı indekslerin sonuçlarının karşılaştırmalı analizi yapılarak, su kütlesi sınırlarının belirlenmesindeki tutarlılık değerlendirilmiştir. Bu indeksler, kentsel kıyı ortamlarında sorun oluşturabilecek su, yapılı yüzeyler ve ıslak toprak arasındaki karışıklığı en aza indirmek için seçilmiştir. Sınıflandırma, görsel olarak yorumlanan referans örnekleri üzerinde eğitilmiş ve afet sonrası uydu fotoğraflarından çıkarılan bağımsız yer doğrulama noktaları kullanılarak doğrulanmış Destek Vektör Makinesi (SVM) algoritmaları ile Nesne Tabanlı Görüntü Analizi (OBIA) yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Zhou et al., 2023; Liu et al., 2020). İki görüntü tarihi arasındaki değişiklik tespit analizi, 18 Ağustos görüntüsünde yüzey suyu miktarında önemli bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu artış, 30 Ağustos görüntüsünde görülmemiştir. Geçici su baskını alanı, Gölcük, Değirmendere ve Başiskele bölgelerindeki alçak kıyı şeridi boyunca yoğunlaşarak yaklaşık 1,21 km<sup>2</sup> alanı kaplamıştır. Bunun yanında, bazı bölgelerde kıyı çizgisinin kalıcı olarak deniz yönüne doğru ilerlemesi gözlenmiş ve bu durumun, deprem sırasında meydana gelen yerel arazi çökmesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bulgular, olayın hemen ardından bildirilen tarihi tsunami gözlemleriyle, deniz çekilmesinin ardından dalga yükselmesi ve yapısal sel olaylarının yaşandığına dair görgü tanığı ifadeleriyle de örtüşmektedir. Saha raporları ve önceki çalışmalara (Rothaus vd., 2004; Altınok vd., 2001) dayalı olarak, bölgedeki tahmini maksimum dalga yüksekliği, konuma ve yerel batimetriye bağlı olarak 1,5 ila 3 metre arasında değişmektedir.

Suların yayılma alanını daha da doğrulamak için, Şubat 2000'de toplanan Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) verileri kullanılarak statik bir tsunami sel modeli geliştirilmiştir. SRTM veri seti olay sonrası koşulları temsil etmesine rağmen, bu dönem için mevcut tek SYM olduğundan, olay öncesi topografya bilgisi bulunmayan tehlike modellemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ArcGIS Pro'daki Raster Calculator kullanılarak, deniz seviyesinden 2,5 metreye eşit veya daha düşük rakımdaki tüm hücreleri seçilerek eşik tabanlı bir su baskını simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yalnızca mevcut kıyı şeridinde hidrolojik olarak bağlı alanların sel baskınına maruz kalmış olarak kabul edilmesini sağlamak için bir maske uygulanmış ve böylece izole iç kesimlerdeki çöküntüler hariç tutulmuştur. Model sonuçları, uydu verilerine dayalı olarak belirlenen taşkın alanlarının büyük ölçüde doğrulandığını göstermiş ve hem yöntemsel hem de sonuç açısından güçlü bir çapraz doğrulama sağlamıştır.

Tsunaminin çevresel sonuçlarını analiz etmek için, aynı uydu görüntülerinden denetimli sınıflandırma şeması kullanılarak arazi kullanımı ve arazi örtüsü (LULC) haritaları oluşturulmuştur. Etki değerlendirmesinde, kentsel, endüstriyel ve ulaşım altyapısı kategorilerindeki su baskın bölgelerin belirlenmesine odaklanılmıştır. Sonuçlar, liman altyapısının, tersanelerin, kıyıdaki yerleşim alanlarının ve endüstriyel tesislerin büyük bir kısmının geçici olarak su altında kaldığını göstermiştir. Bu durum, afet sonrası temizleme, onarım ve yeniden yapılanma süreçlerinde ek ekonomik maliyetlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bulgular, dalma-batma zonu olmayan bir bölgede fay hareketi ve denizaltı çökmesi sonucu oluşan yerel tsunamilerin bile, yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş kıyı şeridiyle kesiştiğinde ciddi çevresel ve sosyoekonomik etkilere yol açabileceğini vurgulamaktadır.

Kıyı şeridi çıkarma ve su basması haritalamasının mekansal doğruluğunu değerlendirmek için bir belirsizlik analizi yapılmıştır. 30 metrelik çözünürlüklü Landsat verileri için uygun olan yarım piksel kuralına göre  $\pm 15$  metrelik bir hata payı uygulanmıştır. Bu tampon, belirsizlik ayarlı sel alanı aralığını hesaplamak için kullanılmış ve  $1,21 \pm 0,05$  km<sup>2</sup> olarak tahmin edilmiştir. OBIA-SVM sınıflandırması, bir karışıklık matrisi kullanılarak daha da doğrulanmış ve sınıflandırma sonuçlarına yüksek güven düzeyini gösteren %89,6 genel doğruluk ve 0,86 Kappa katsayısı elde edilmiştir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (539) 379 91 49

E-posta: hsenol@harran.edu.tr

Bu çalışma, serbestçe erişilebilen uydu verileri ve açık erişimli SYM'leri kullanarak kıyı sel haritalaması için aktarılabilir ve maliyet etkin bir iş akışı sunarak tsunami tehlike değerlendirmesine ilişkin literatüre katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, yerinden kayma faylarının hâkim olduğu tektonik ortamlarda bile yerel tsunamilerin meydana gelebileceğini ve bunların kıyı etkilerinin dikey yer hareketleri ve altyapı kırılabilirliği ile birleştiğinde uzun süreli olabileceğini göstermektedir. Bu makalede özetlenen metodoloji, sadece Marmara Denizi bölgesine değil, aynı zamanda batimetrik karmaşıklık ve kıyı jeomorfolojisinin tsunami oluşumu ve yayılma dinamiklerini etkilediği benzer kapalı veya yarı kapalı havzalar için de uygulanabilir. Afet riskinin azaltılması açısından, bulgular tsunami risk bölgelerinin, özellikle sismik potansiyeli bilinen alanlarda, kentsel planlama ve kıyı arazi kullanım düzenlemelerine entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. İstanbul yakınlarındaki Marmara Denizi altındaki segmentler de dâhil olmak üzere, Kuzey Anadolu Fayı'nın batı kesiminde devam eden sismik tehlike göz önüne alındığında, deprem sonrası hızlı tsunami izleme ve müdahale çerçevelerinin geliştirilmesi öncelikli bir konu olmaya devam etmektedir. Bu tür bir izleme sistemi, uydu verileri ve CBS tabanlı analizlerle desteklendiğinde, yalnızca afet sonrası müdahale kapasitesini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda uzun vadeli kıyı yönetimi ve iklim değişikliği uyum stratejilerine de önemli katkılar sağlayacaktır.

#### Anahtar Kelimeler

1999 Gölcük Depremi, Kıyı Değişimi, Uzaktan Algılama, Doğal Afet Analizi, Çok Zamanlı Analiz

#### **Kaynakça**

- Zhou, X., Wang, J., Zheng, F., Wang, H., & Yang, H. (2023). An overview of coastline extraction from remote sensing data. *Remote Sensing*, 15(19), 4865.
- Liu, Q., Huang, C., Shi, Z., & Zhang, S. (2020). Probabilistic river water mapping from Landsat-8 using the support vector machine method. *Remote Sensing*, 12(9), 1374.
- Altınok, Y., Tinti, S., Alpar, B., Yalciner, A. C., Ersoy, Ş., Bortolucci, E., & Armigliato, A. (2001). The tsunami of August 17, 1999 in Izmit bay, Turkey. *Natural Hazards*, 24(2), 133-146.
- Rothaus, R. M., Reinhardt, E., & Noller, J. (2004). Regional considerations of coastline change, tsunami damage and recovery along the southern coast of the Bay of Izmit (the Kocaeli (Turkey) earthquake of 17 August 1999). *Natural Hazards*, 31(1), 233-252.



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# Bildiriler Teknik Oturum 2

## İmar Uygulamaları ve Kentleşme

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Okan Yıldız, *Karadeniz Teknik Üniversitesi*

2.1. Yapay Zekâ ile İmar Verilerinden Anlamlı Bilgiye: Vatandaş Odaklı Bir Yaklaşım (Bildiri Özet)  
(Tuğçe Nida Nur Özbek, Sedef Ruken Küçük)

2.2. Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi(Tam Metin)  
(Şehadet Sevra Mintemur, Murat Selim Çepni)

2.3. Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Kamulaştırma Amaçlı Tahsis Yaklaşımı: Tarihsel Süreç, Uygulama Sorunları ve  
2025 Düzenlemeleri (Bildiri Özet)  
(Oytun Yılmaz, Ahmet Yılmaz)

2.4. Kentsel Dönüşümde Etkin Strateji Geliştirme ve Uygulama: Mekânsal Karar Destek Sistemleri ile Kayseri Talas  
İlçesi Örneği (Bildiri Özet)  
(Mehmet Bak)

2.5. Yapı Yoğunluğu Arazi Kullanımı İlişkisinde Zamansal Nitelikli Bir Analiz Çalışması (Bildiri Özet)  
(Abdurrahman Atmaca, Murat Selim Çepni)

# Yapay Zekâ ile İmar Verilerinden Anlamlı Bilgiye: Vatandaş Odaklı Bir Yaklaşım

Tuğçe Nida Nur ÖZBEK<sup>1, \*</sup>, Sedef Ruken KÜÇÜK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı Doktora Öğrencisi, Netcad Yazılım A.Ş., Ürün Yöneticisi, Ankara.

<sup>2</sup> Mimarşinan Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Netcad Yazılım A.Ş. Pazarlama ve Strateji Direktörü, İstanbul.

## Genişletilmiş Özet

Kentleşmenin hızla arttığı günümüzde mekânsal veriler, şehirlerin geleceğini yönlendiren en kritik unsurlardan biri haline gelmiştir. Ancak halihazır harita, jeolojik-jeoteknik etüt raporu ve imar planları gibi yüksek teknik içeriğe sahip belgeler, kentsel gelişimi doğrudan etkilemesine rağmen vatandaşların anlamakta zorlandığı, çoğu zaman yalnızca uzmanların yorumlayabildiği içerikler olarak kalmaktadır. Bu durum, verinin günlük yaşamda toplumsal değere dönüşmesinin önünde önemli bir engel oluşturmaktadır. Çalışmanın çıkış noktası, vatandaşın taşınmazlara ilişkin plan kararlarına yalın, hızlı ve güvenilir biçimde erişememesinin yarattığı iletişim ve hizmet sunumu sorunlarını görünür kılmaktır. İmar verilerinin karmaşık terminolojisi; emsal, yükseklik, çekme mesafeleri, yapı nizamı, kullanım kararları ve kısıtlayıcı hükümler gibi pek çok bileşenin katmanlı bir dil içinde sunulmasına neden olur. Bu dil, konuzman uzmanı olmayan geniş bir kullanıcı kitlesi için yüksek bilişsel yük doğurur ve kurumlara tekrarlayan başvurular şeklinde geri dönen operasyonel maliyetleri artırır. Bu bağlamda, yapay zekâ destekli metin sadeleştirme yaklaşımının, teknik içeriği anlaşılır hale getirerek sosyo-teknik bir köprü kurabileceğine dair bulgular literatürde de geniş şekilde tartışılmaktadır; özellikle otomatik metin sadeleştirme çalışmalarının anlamı koruyup okuma güçlüğü azalttığı tekrarlı gösterilmiştir (Alva-Manchego, Scarton ve Specia, 2020; Saggion, 2022).

Bu çalışma, E-İMAR sistemi üzerinde geliştirilen yapay zekâ destekli çözüm ile imar verilerinin sadeleştirilerek vatandaşın doğrudan anlayabileceği bilgiye dönüştürülmesini ele almaktadır. Sistem, doğal dil işleme tekniklerini kullanarak her bir parsel için kişiselleştirilmiş, yalın açıklamalar üretir; teknik yapılaşma koşulları, mülkiyet hakları ve kısıtlamalar vatandaşın kolayca kavrayabileceği bir dille sunulur. Böylece bireyler kendi taşınmazlarına dair bilgilere hızla erişirken; yerel yönetimler de artan şeffaflık, azalan tekrar başvurular ve gelişen hizmet kalitesi ile önemli kazanımlar elde eder. Bu hedeflerin kamu yönetimi yazınındaki kavramsal karşılığı, şeffaflık ve açıklığın güven ve meşruiyet algılarıyla ilişkisidir; açıklık ilkelerinin vatandaş nezdinde algılanan güvenilirliği güçlendirdiğine dair bulgular, farklı bağlamlarda yürütülen çalışmalarla desteklenmektedir (Grimmelikhuijsen ve Meijer, 2014; Meijer, Curtin ve Hillebrandt, 2012).

Çalışmanın amacı, imar planlamasını yalnızca düzenleyici bir süreç olmaktan çıkararak, katılımcı, erişilebilir ve sürdürülebilir bir kamusal hizmet alanı olarak yeniden tanımlamaktır. Yaklaşımın özgün yönü, mekânsal veriyi yalnızca teknik bir envanter olarak değil, toplumsal faydaya dönüştürülecek bir değer kaynağı olarak ele almasıdır. Bu sayede veriler, vatandaş ile kurum arasında güven ve iletişimi güçlendiren bir köprü işlevi görmekte; dijital kanallar üzerinden sağlanan açıklamalar hem sosyal kapsayıcılığı artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Yapay zekânın kent yönetişimi ve kamu hizmetlerinin erişilebilirliğine etkisine dair güncel derlemeler, vatandaş odaklı tasarım ilkesinin ve anlaşılabilir anlatımın, teknoloji tabanlı hizmetlerden algılanan faydayı artırdığını vurgulamaktadır (Meijer ve Bolívar, 2016; Zieliński, Klobukowski, & Kontorska, 2024).

Çalışmada kullanılan materyaller, doğrudan E-İMAR sisteminde yüklü parseller ve parsellere esas temel yapılaşma koşullarıdır. Bu materyallerin ortak özelliği, her bir parsel için anlamı olan fakat vatandaş diline çevrilmediğinde parçalı ve zor erişilebilir kalabilen bir bilgi kümesi oluşturmalarıdır. E-İMAR üzerinde kurgulanan çözüm, bu kümeden anlam üretmek üzere doğal dil işleme temelli bir boru hattı kurgular. Boru hattının girişinde, teknik ve sembolik hükümlerin dilsel olarak parçalanması; orta katmanda, anahtar kavramların ve koşullu ilişkilerin belirlenmesi; çıkışta ise doğrulanabilir ve parsel-özel yalın açıklamaların üretilmesi yer alır. Uluslararası literatür, metin sadeleştirme görevlerinin genellikle iki tamamlayıcı stratejiyle çözüldüğünü; kural tabanlı dönüştürmeler ve veri güdümlü (öğrenmeli) yöntemlerin hedef kitleye uygunluk açısından birlikte kullanılabildiğini göstermektedir. Özellikle cümle düzeyinde yeniden yazım, sözcüksel basitleştirme ve bölme-birleştirme operasyonlarının anlamı korurken bilişsel yükü azalttığı; karar ve kısıtları daha anlaşılır kıldığı raporlanmaktadır (Alva-Manchego ve diğ., 2020; Saggion, 2022).

Araştırmada izlenen yöntem, veri hazırlığı, dilsel çözümleme ve çıktı doğrulamasını birbirini besleyen aşamalar halinde kurgulamıştır. Veri hazırlığında, plan koşulları içindeki temel terimler ve koşullu ifadeler işaretlenerek gerekli hesaplamalar yapılır. Dilsel çözümlemede, cümleler gerektiğinde iki ya da daha fazla basit yapıya bölünür ve soyut teknik ifadeler günlük dile çekilir. Çıktı ifade vatandaşların anlayabileceği düzeyde sunulur. Kamu metinlerinin sadeleştirilmesi üzerine yakın tarihli çalışmalar, özellikle kamu kurumlarının dijital metinlerinin anlaşılabilirliğini ölçmek üzere alan-özümlü veri kümeleri ve değerlendirme kuralları geliştirildiğini; teknik dil ve jargonla sadeleştirilmenin kamu hizmetlerine erişimi kolaylaştırdığını göstermektedir (Zoroa-Sánchez, González-Pardo, & Ser, 2024; Zhou, Huang, & Wang, 2023).

Elde edilen bulgular, sistemin hem vatandaş hem de yerel yönetimler açısından değer ürettiğini göstermektedir. Vatandaş, taşınmazına ilişkin temel hak ve yükümlülükleri açık bir dille ve tek ekranda görebildiğinde, belirsizlik azalır ve karar süreçleri öngörülebilir hale gelir. Bu durum özellikle başvuru öncesi bilgi edinme aşamasında, kurumlara yönelen tekrar eden soruların azalmasına ve çağrı/e-posta trafiğinin düşmesine katkı verebilir. Yerinde başvuru sayısının azalması ile hem kağıt tasarrufu hem de ulaşım maliyetlerinde düşüş sağlanmış olur. Kamu yazınında, açıklık ve şeffaflığın algılanan güvenilirlik üzerindeki olumlu etkisine ilişkin bulgular, dijital hizmetlerde de benzer eğilimlere işaret eder; dolayısıyla sade ve izlenebilir açıklamaların, vatandaşın hizmete ve kuruma yönelik güvenini desteklemesi beklenir (Grimmelikhuijsen ve Meijer, 2014; Meijer, Curtin ve Hillebrandt, 2012).

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0539) 864 77 10 Faks: (0312) 2650520

E-posta: nidozbek@netcad.com (Tuğçe Nida Nur ÖZBEK)

*Yapay Zekâ ile İmar Verilerinden Anlamlı Bilgiye: Vatandaş Odaklı Bir Yaklaşım*

Bulguların tartışılması, yöntemin sınırlarını da belirginleştirir. Metin sadeleştirme, teknik doğruluk ile anlaşılabilirlik arasında hassas bir denge gerektirir; aşırı sadeleştirme anlam kaybına, yetersiz sadeleştirme ise anlaşılabilirlik sorununa yol açabilir. Bu gerilim, kritik kavramların (örneğin “maksimum inşaat alanı”, “taban alanı”) sade, fakat teknik anlamı gözelemeden karşılıklarla sunulması tercih edilmiştir.

Çalışmanın disiplinlerarası niteliği ayrıca değerlidir. Harita-şehircilik bilgi alanı ile yapay zekâ-NLP yaklaşımlarının bir araya gelmesi, teknik doğruluğu bozmadan anlaşılabilirlik üretme hedefiyle birleştiğinde hem vatandaş deneyimini hem de kurumsal verimliliği güçlendirebilir. Güncel derlemeler, akıllı şehir ve yönetim bağlamında yapay zekâ uygulamalarının başarıya ulaşması için paydaş katılımının ve vatandaş odaklı tasarımın belirleyici olduğunu; teknoloji-merkezli çözümlerin, açık iletişim ve kapsayıcılık sunmadıkça beklenen etkiyi üretmekte zorlandığını işaret etmektedir. Bu bağlam, E-İMAR üzerinde kurgulanan açıklama üretimi yaklaşımının, bilgiye erişimi kolaylaştırarak katılımı besleme potansiyelini destekler niteliktedir (Meijer ve Bolívar, 2016; Zieliński, Kłobukowski, & Kontorska, 2024).

Sonuç olarak çalışma, imar planlamasını yalnızca düzenleyici bir süreç olmaktan çıkararak, katılımcı, erişilebilir ve sürdürülebilir bir kamusal hizmet alanı olarak yeniden tanımlamaktadır. Yapay zekâ destekli vatandaş odaklı bu yaklaşım, yaşanabilir kentlerin inşasında verinin stratejik rolünü ortaya koymakta ve daha demokratik bir şehircilik vizyonuna somut katkılar sunmaktadır. İmar verilerinin sade bir dille, daha anlaşılır ve anlamlı şekilde sunulması; bireyin kendi taşınmazına ilişkin hak ve yükümlülükleri hızlıca kavramasını, kurumların ise şeffaflık ve hizmet kalitesi hedeflerine daha hızlı yaklaşmasını mümkün kılar. Literatürün işaret ettiği üzere, sade dil ve metin sadeleştirme uygulamaları kamu alanında anlaşılabilirlik ve kapsayıcılık üretirken; açıklanabilirlik ilkeleri de otomatik çıktılara duyulan güveni destekler. Bu nedenle E-İMAR üzerinde geliştirilen yaklaşım, teknik doğruluğu gözetken fakat dili kullanıcı lehine basitleştiren bir arayüz olarak, kurum-vatandaş etkileşimini güçlendiren kalıcı bir kapasiteye işaret etmektedir (Alva-Manchego ve diğ., 2020; Saggion, 2022; Grimmelikhuijsen ve Meijer, 2014).

Anahtar Kelimeler

Veri değer zinciri, yapay zekâ, imar planlaması, vatandaş odaklı hizmet, sürdürülebilir şehircilik, dijital kamu hizmetleri.

Kaynaklar

Alva-Manchego, F., Scarton, C., & Specia, L. (2020). Data-Driven Sentence Simplification: Survey and Benchmark. *Computational Linguistics*, 46(1), 135–187. [https://doi.org/10.1162/coli\\_a\\_00370](https://doi.org/10.1162/coli_a_00370)

Grimmelikhuijsen, S. G., & Meijer, A. J. (2014). Effects of transparency on the perceived trustworthiness of a government organization: Evidence from an online experiment. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 24(1), 137–157. <https://doi.org/10.1093/jopart/mus048>

Meijer, A. J., Curtin, D., & Hillebrandt, M. (2012). Open government: Connecting vision and voice. *International Review of Administrative Sciences*, 78(1), 10–29. <https://doi.org/10.1177/0020852311429533>

Meijer, A., & Bolívar, M. P. R. (2016). Governing the smart city: A review of the literature on smart urban governance. *International Review of Administrative Sciences*, 82(2), 392–408. <https://doi.org/10.1177/0020852314564308>

Saggion, H. (2022). *Automatic Text Simplification*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02166-4>

Son, T. H., Weedon, Z., Yigitcanlar, T., Sánchez, T. W., Corchado, J. M., & Mehmood, R. (2023). Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, 94, Article 104562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562>

Zieliński, K., Kłobukowski, M., & Kontorska, A. (2024). Artificial Intelligence in Smart Cities—Applications, Barriers, and Future Directions: A Review. *Smart Cities*, 7(3), 115–145.

Zoroa-Sánchez, E., González-Pardo, A., & Ser, J. D. (2024). The Simplification of the Language of Public Administration: The Case of Spain’s Ministry of Inclusion, Social Security and Migration. In *Proceedings of DeTermIt 2024* (pp. 97–108). Association for Computational Linguistics.

Zhou, C., Huang, Y., & Wang, X. (2023). Text Simplification System for Legal Contract Review. In *Advances in Artificial Intelligence* (pp. 107–118). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-53960-2>

# Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi

## Şehadet Sevra MİNTEMUR<sup>1,\*</sup>, Murat Selim ÇEPNİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Harita Yüksek Mühendisi, Özel Sektör, 41001, Kocaeli.

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli.

### Özet

Arazi ve arsa düzenlemeleri (AAD) mülkiyete dokunan en cüretkâr idari işlemlerin başında gelir ve malikler için önemli sonuçlar doğurur. Dolayısıyla maliklerin itirazlarına konu olması da kaçınılmazdır. Türkiye’de bugüne kadar emsal yargı kararlarını ve AAD işlemlerinin iptal edilme gerekçelerini inceleyen çalışmalar olmakla birlikte, sektörel anketler dışında, dava süreçlerinde davacı maliklerin itirazlarına yönelmiş bir çalışmaya rastlanmamıştır. Taşınmazları AAD sürecine giren maliklerin memnuniyetsizliklerinin anlaşılabilmesi önemlidir. Bu çalışma da arazi ve arsa düzenlemesi işlemine yönelik davacı maliklerin itirazlarının tespitine dönük akademik bir araştırma amacı taşımaktadır. İtiraz konularının derlenmesi ve oransal bulguların AAD modeline ve AAD’ler için yeni yöntem arayışlarına katkı sağlayacağına inanılmaktadır. Çalışmanın ana eksenini AAD’nin iptal edilmesi istemi ile açılan davaların başlatıcısı olan malik itirazlarının derlenmesi ve itiraz konularının belirlenmesi oluşturmaktadır. Çalışma materyali olarak, Türkiye’de Marmara Bölgesinde bulunan çeşitli idare mahkemelerinde 2015-2023 yıllarında açılmış 435 dava dosyası ele alınmıştır. Etik kurallar çerçevesinde gizlilikler sağlanarak, maliklerin davacı dilekçelerindeki şikâyet ve memnuniyetsizlikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. İtiraz konuları önce gruplandırılmış, itirazların yönelimleri saptanmış ve olası ilişkili diğer parametreler ile birlikte değerlendirilmiştir. Bulgular, maliklerin taşınmazlarına konum, yüzölçümü, geometri, paydaşlık ve yapılar açısından yapılan her türlü müdahaleye karşı tepkili olduklarını göstermektedir. Ek olarak çalışma bulgularından, AAD sürecinde malik itirazları ile yargının iptal gerekçeleri arasında önemli bir ayrıklık olduğu sonucu çıkmaktadır.

### Anahtar Sözcükler

Arazi ve Arsa Düzenlemesine (AAD) İtirazlar, AAD İptal Kararları, Dağıtım ve Tahsis İşlemine İtirazlar, Malik Memnuniyetsizlikleri, Parselasyonda Paydaş Beklentileri.

### Abstract

Land and land regulations (LR) are among the most daring administrative actions that touch property and have significant consequences for owners. Therefore, it is inevitable that they are subject to objections by the owners. Although there have been some studies in Turkey examining precedent judicial decisions and the grounds for the annulment of LR procedures, apart from sectoral surveys, there is no study that has focused on the objections of plaintiff owners in litigation processes. It is important to understand the dissatisfaction of the owners whose immovable properties are subjected to the LR process. This study aims to conduct an academic research to identify the objections of claimant owners to the land and land arrangement process. It is believed that the compilation of objection issues and proportional findings will contribute to the LR model and the search for new methods for LRs. The main axis of the study is the compilation of owner objections, which are the initiators of the lawsuits filed for the annulment of the LR, and the determination of the objection issues. The study material consists of 435 case files filed between 2015 and 2023 in various administrative courts in the Marmara Region of Turkey. Confidentiality was ensured within the framework of ethical rules, and the complaints and dissatisfaction of the owners in the plaintiff petitions were tried to be identified. The subjects of objections were first grouped, the tendencies of the objections were determined and evaluated together with other potentially related parameters. The findings show that the owners react to all kinds of interventions to their immovable properties in terms of location, surface area, geometry, shareholding and structures. In addition, the findings of the study suggest that there is a significant discrepancy between the objections of the owners in the LR process and the grounds for annulment by the judiciary.

### Keywords

Land readjustment (LR), LR Cancellation Decisions, Objections to Distribution and Parceling, Owner Dissatisfaction, Shareholder Expectations in Parceling.

## 1. Giriş

Türkiye’de özellikle son yüzyılda hızla artan nüfus yoğunluğu ve kırsal alanlardan kent merkezlerine yönelen göç hareketleri, kentsel alanlarda arazi kullanımı talebini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu gelişmeler, artan kullanım

\* Sorumlu Yazar: Tel: 5530592155 Faks:

E-posta: mintemursevra1@gmail.com (Mintemur ŞEHADET SEVRA)

## Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi

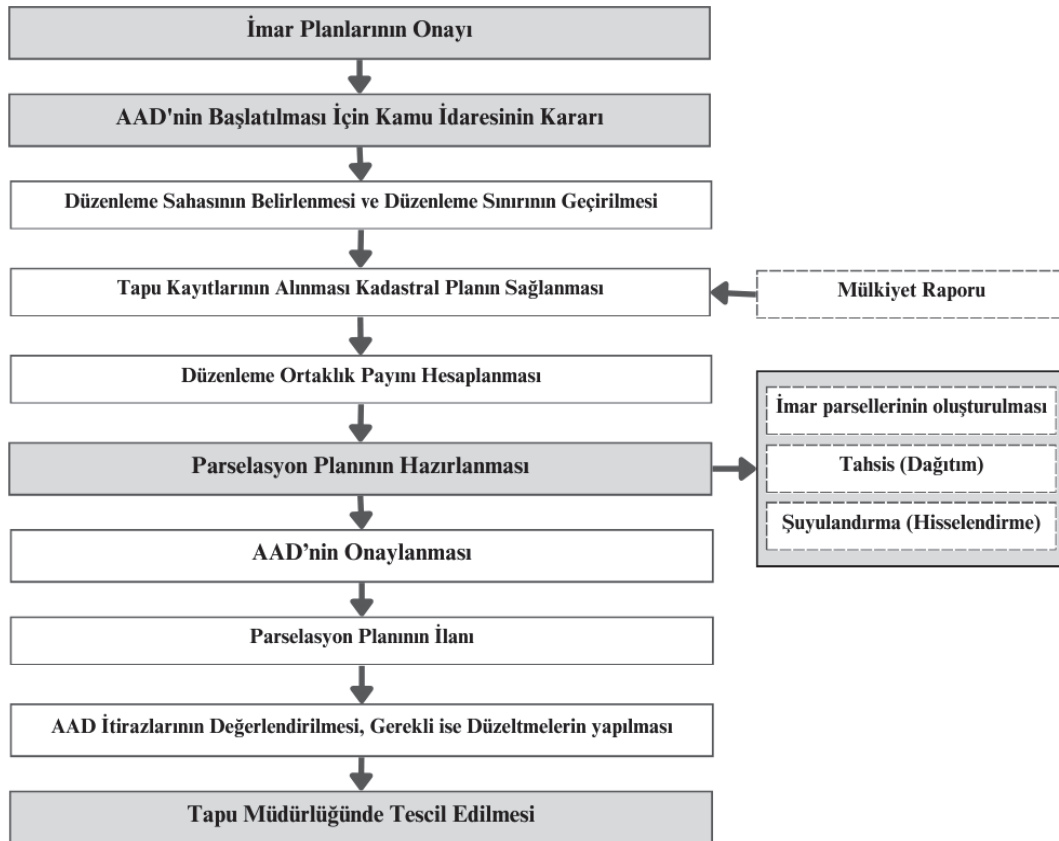
ihtiyacının kontrol altına alınması ve kentsel büyümenin düzenli biçimde yönlendirilmesi gereğini ortaya koymuş; dolayısıyla imar planlarının uygulanması ülkemizde temel bir zorunluluk haline gelmiştir.

İmar planları, kamu yararı ilkesine dayanan ve toplumun yaşam alanlarını düzenlemeyi amaçlayan arazi kullanım planlarıdır. Kentsel planlamanın ana çerçevesini oluşturan bu planlar, doğrudan uygulanabilir nitelikte olmayıp uygulama araçları ile somutlaştırılmaktadır. Bu araçlar, plan kararlarıyla mülkiyet ilişkileri arasındaki bağı kurarak, plan kararlarını mekansal ve hukuksal bir zemine taşımaktadır (Çepni, 2022).

Ülkemizde imar planı uygulama araçları isteğe bağlı ve zorunlu olmak üzere iki kategoride değerlendirilmektedir. Bu araçlar arasında yer alan Arazi ve Arsa Düzenlemeleri (AAD), resen uygulanabilen, yeterli miktarda kentsel arazi elde edilmesini sağlayan ve bu yönüyle etkili bir uygulama aracı olarak kabul edilmektedir (Archer, 1988).

AAD yoluyla, yerleşim alanları imar planı kararlarına uygun olarak yeniden düzenlenmektedir. Sürecin girdisi arazi, etkisi ise doğrudan mülkiyet yapısı üzerinde ortaya çıkmaktadır. Düzenleme kapsamında mevcut parseller, varsayımsal olarak tek bir bütün kabul edilerek; imar planında öngörülen ada, parsel, yol ve donatı kararları doğrultusunda yeniden şekillendirilir. Bu süreçte mülkiyet ilişkileri de yeni parselasyon yapısına uyumlu hale getirilir (Mintemur & Çepni, 2024a).

Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 35. maddesi, mülkiyet hakkının yalnızca kamu yararı amacıyla ve kanunla sınırlanabileceğini açıkça belirtmektedir. Bu doğrultuda AAD uygulamaları, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi ve ilgili Uygulama Yönetmeliği hükümleri kapsamında yürütülmektedir. Mülkiyet üzerinde doğrudan etki yaratan en güçlü plan uygulama araçlarından biri olan AAD sürecinde, kamu yararına uygunluk esastır. AAD'nin genel işleyişine ilişkin süreç Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1: AAD'nin genel işleyişine ilişkin süreç (Mintemur, 2025)

Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD) sürecinin nihai çıktısı olan parselasyon planı, yetkili idarelerin gerekli kontrolleri ve onayları sonrasında otuz günlük süreyle askıya çıkarılmaktadır. Askı süresi boyunca yapılan itirazlar, ilgili idare tarafından değerlendirilmekte ve karara bağlanmaktadır.

İtirazların reddi veya uyuşmazlığın giderilememesi durumunda, taşınmaz malikleri idari başvuru yollarını tükettikten sonra yargı sürecini başlatabilmektedir. Türkiye'de AAD'ye ilişkin davalar, düzenlemeyi gerçekleştiren idarenin bulunduğu yerin İdare Mahkemelerinde açılmaktadır. İlk derece mahkemesi kararına karşı itiraz süreci, Bölge İdare Mahkemeleri ve son aşamada Danıştay nezdinde devam etmektedir.

Yargı süreci sonunda, imar mevzuatına uygun olmayan düzenlemeler için iptal kararları verilebilmektedir. Bu iptal kararları, taşınmaz üzerindeki tüm ayni ve şahsi hakları doğrudan etkilemekte; malik, idare ve kentsel gelişim üzerinde önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle AAD'nin yargısal denetimi ve iptal kararlarının etkileri, literatürde sıklıkla incelenen konular arasında yer almaktadır.

Pamuk (2016), “Türkiye’de Arazi ve Arsa Düzenlemelerinin İptal Nedenleri” başlıklı çalışmada, Danıştay kararları ışığında AAD iptal nedenlerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, AAD’ye ilişkin 233 dava değerlendirilmiş; bunlardan 158’inde iptal kararı verildiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre iptal kararlarının temel gerekçeleri; düzenleme sınırının hatalı belirlenmesi, düzenleme ortaklık payı (DOP) oranının yanlış hesaplanması, dağıtım ve tahsis hataları, ayrıca müstakil mülkiyetin hisseli mülkiyete dönüşmesi olarak belirlenmiştir.

Şimşek ve Uzun (2018), “İptale Konu İmar Planı Uygulamalarında Geri Dönüş İşleminin İrdelenmesi” adlı çalışmada, Türkiye’deki örnek uygulamalardan hareketle AAD’de geri dönüş süreçlerini değerlendirmiştir. Çalışma, AAD’nin iptal edilmesinden yeni bir uygulama yapılıncaya kadarki geçiş dönemine odaklanmıştır. Yazar, bu süreçte müktesep hakların korunabilmesi için çeşitli çözüm önerileri sunmuştur.

Karaağaç (2019) tarafından hazırlanan “3194 Sayılı Kanun’un 18. Maddesi Uygulamasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri” adlı çalışmada, AAD sürecinde karşılaşılan sorunlar üç başlık altında sınıflandırılmıştır: uygulama öncesi, uygulama aşaması ve uygulama sonrası. Yazar, tapu, kadastro ve harita verilerinin güncelliğini yitirmiş olması, yeni imar parsellerinin tahsisinde planlama ilkelerine yeterince uyulmaması, teknik personel yetersizlikleri ve uygulama sonucunda mülkiyet sorunlarının ortaya çıkması gibi durumları, sürecin temel aksaklıkları arasında göstermiştir.

Literatürdeki bu çalışmalar, genel olarak Türkiye’deki AAD uygulamalarında yaşanan teknik ve hukuki sorunları belirlemeye, iptal nedenlerini açıklığa kavuşturmaya ve uygulama süreçlerinin geliştirilmesine yönelik katkılar sunmaktadır. Ancak bu araştırmaların ortak noktası, genellikle yargı kararları, bilirkişi raporları ve teknik belgeler üzerinden yürütülmesidir.

Bu çalışmada ise mevcut literatürden farklı olarak, AAD sürecine doğrudan taraf olan taşınmaz maliklerinin bakış açısına odaklanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, maliklerin AAD’ye ilişkin itiraz gerekçelerini, memnuniyetsizliklerini ve beklentilerini ortaya koymaktır. Çünkü Türkiye’de AAD’ye dair sorunların büyük bir kısmı, maliklerin açtığı davalar ve bu davalar sonucunda verilen yargı kararları üzerinden görünür hale gelmektedir. Araştırmanın ön aşamasında yapılan gözlemler, yargı kararlarındaki iptal gerekçeleri ile malik itiraz nedenleri arasında farklılıklar bulunduğu işaret etmektedir.

## 2. Yöntem

Arazi ve arsa düzenlemesi (AAD), planlama vizyonunda öngörülen kentsel dokunun oluşturulmasını, tahmini nüfusun gereksinim duyacağı kamusal alanların elde edilmesini ve kentsel fonksiyonların sürdürülebilmesi için gerekli arsa stokunun üretimini hedeflemektedir. Bu süreçte, idari işlem tesis edilmesinin ve mülkiyet üzerinde tasarrufta bulunulmasının ön koşulu kamu yararı ilkesidir. Kamu yararı, yalnızca idare açısından değil, malikler açısından da bir beklenti konusu halindedir. Ancak AAD süreçlerinde artan itiraz ve dava sayıları, uygulamada tartışılması gereken bazı yapısal sorunların varlığına işaret etmektedir (Mintemur & Çepni 2024b).

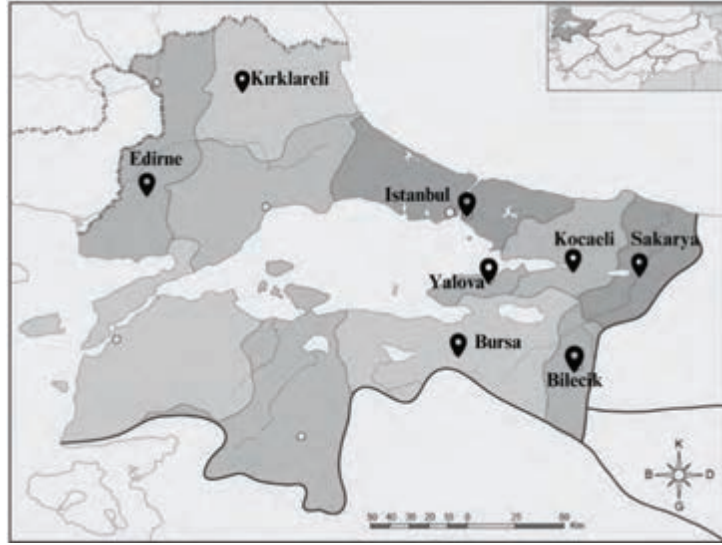
Bu çalışma, idari dava dosyalarının incelenmesine dayalı nitel bir araştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, taşınmaz maliklerinin açtığı davalarda yer alan dava dilekçeleri temel alınmış; bu dilekçelerdeki itiraz gerekçeleri sistematik biçimde belirlenmiş, sınıflandırılmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca, aynı dava dosyalarında bulunan bilirkişi raporları ve sonuçlanmış yargı kararları da incelenerek, maliklerin itiraz gerekçeleriyle teknik tespitler ve hukuki kararlar arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Çalışma materyali olarak, 2015–2023 yılları arasında birinci basamak idari yargıda açılmış 435 adet AAD iptal davası dosyasında yer alan malik dilekçeleri kullanılmıştır. Bu dava dosyaları, Türkiye’nin farklı bölgelerinde yer alan Kocaeli, İstanbul, Sakarya, Bursa ve Edirne illerindeki İdare Mahkemelerinden temin edilmiştir (Şekil 2). Dosya sayıları ve illere göre dağılımı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Çalışmaya dahil olan davaların illere göre sayısal dağılımı

İdare Mahkemesi	Davacı Dilekçesi Sayısı
Kocaeli	367
Sakarya	21
Bursa	27
İstanbul	7
Edirne	13
<b>Toplam</b>	<b>435</b>

## Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi



Şekil 2: Çalışmaya dahil olan davaların açıldığı idare mahkemelerinin bulunduğu iller (Mintemur, 2025)

Taşınmazın üzerindeki yapı durumu araştırmasında incelenen 435 dava dilekçesinin 215'i yapısız, 220'si yapılı olduğu belirlenmiştir. Bu dağılım, maliklerin taşınmazlarıyla olan fiziksel bağlarının itiraz davranışlarına etkisini değerlendirmek açısından önemlidir.

Türkiye'de AAD modeli, 1985 tarihli İmar Kanunu'nun 18. maddesi uyarınca oluşturulmuş ve 2020 yılında yürürlüğe giren yeni Yönetmelik ile kapsamlı biçimde değiştirilmiştir. Buna yönelik olarak, davaya konu AAD'lerin bağlı olduğu yönetmelik bilgisi araştırılmıştır. 1985 tarihli İmar Kanunu'nun 18. Maddesi Uyarınca Yapılacak Arazi ve Arsa Düzenlemesi ile İlgili Esaslar Hakkında Yönetmelik ile 2020 tarihli Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik arasında AAD itiraz konuları ve yargı kararı sonuçları karşılaştırması yapılmıştır.

Malik itirazlarına ek olarak, dava dosyalarında yer alan bilirkişi raporları da ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu incelemenin amacı, maliklerin dilekçelerinde yer alan itiraz gerekçelerinin bilirkişi tespitleriyle örtüşüp örtüşmediğini belirlemektir. Bilirkişi görüşleri, yargı kararlarını doğrudan temsil etmese de, maliklerin teknik itirazlarına ilişkin önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Araştırma bulguları, bilirkişi değerlendirmelerinin büyük oranda yargı kararlarıyla paralellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, dava dosyalarının çoğunun aynı bilirkişi kurulu tarafından incelenmiş olması, çalışmanın iç tutarlılığını güçlendiren bir unsurdur.

Araştırmaya konu olan 435 dava dosyasının 165'i Mart 2024 itibarıyla sonuçlanmış, bu dosyalardaki yargı kararları çalışmada tamamlayıcı analiz verisi olarak kullanılmıştır. Bu veriler, malik itirazlarının yargısal doğrulama düzeyini değerlendirmek açısından önemli bir dayanak sağlamıştır.

## 4. Bulgular

### 4.1. İtiraz Konuları

Çalışmada incelenen davacı dilekçelerinde maliklerin itirazları incelenerek başlıklar halinde gruplandırılmış, 13 başlık halinde itiraz konusu belirlenmiştir.

1. Tahsis işlemine yönelik itirazlar: AAD'den etkilenen maliklerin parsellerinin düzenleme sonrasında tahsis edilen yeni parselin konumundan memnuniyetsizliklerini içeren itirazlardır. Kendi yerinden veya eşdeğer tahsis yapılmadığına yönelik iddialar dile getirilmektedir. Bu kategorideki itirazlar iki başlık altında toplanmıştır: Birincisi imar planı kararlarına bağlı olarak kök parselin yeşil alan, otopark, resmi kurum alanları gibi kamusal alanlara denk gelmesi dolayısıyla gelen itirazlardır. Tahsis işlemi başlığı altındaki diğer itiraz gerekçesi parselasyon ilkelerine aykırı tahsis yapılmasına yöneliktir. Buna göre taşınmaz sahipleri teknik, fiili ve hukuki zorunluluk olmamasına rağmen kök parselin eşdeğer olmayan farklı konuma taşınmasına itiraz etmektedir.

2. Hisseli hale gelme durumuna itirazlar: Hisseli hale gelmenin gerekli veya hakkaniyetli olmadığı, 3. kişilerle hisseli hale gelindiği, müstakil durumdan hisseli hale gelindiği benzeri itirazlardır.

3. Düzenleme ortaklık payına (DOP) yönelik itirazlar: AAD'den etkilenen taşınmaz malikleri, DOP hesabının olduğu, yasal sınırın üstünde kesinti yapıldığı, her parsel için eşit DOP oranı uygulanmadığı görüşlerini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca eski terklerin dikkate alınmadığı, birden fazla kesinti yapıldığı vb. ifadeler de bu grupta toplanmıştır.

4. Fiili kullanımın bir kısmının mülkiyetten çıkmasına itirazlar: Düzenlemeye giren parsellerin önemli bir bölümünde yapı, müştemilat, sanayi veya tarımsal amaçlı tesisler, bahçe, peyzaj, ağaçlar gibi fiili kullanım bulunmaktadır. AAD sonrasında imar planı ve/veya DOP kesintisine bağlı olarak fiili kullanım alanı bütünlüğü etkilenmektedir.

5. AAD İşleminde İdarenin Usulsüzlük Yaptığına Yönelik İtirazlar: İmar Kanunu 18. maddesi, kamu yararı amacı ile kamu ve umumi hizmet alanlarının oluşturulmasının yanı sıra konut yapımına uygun parsellerin de oluşturulmasını hedeflemektedir. Buna göre düzenleme gören taşınmaz malikleri ve diğer hak sahipleri de uygulama sonrasında konut yapmaya hazır parsellerin oluşturulmasını istemektedir. İncelenen dava dilekçelerine göre AAD işleminde taşınmaz maliklerinin bir kısmının yetkili idareye yönelik güven duygusunun zedelendiği, AAD'den sorumlu idarenin yaptığı işlemlerin imar mevzuatının amacına aykırı olduğu düşüncesi bulunmaktadır.

6. Parselasyonun geometrik yapısına yönelik itirazlar: Bu memnuniyetsizlik düzenleme sonrası parselin şeklinin bozuk, yetersiz ve kullanışsız olmasından kaynaklıdır.

7. Düzenleme sınırının geçirilmesine yönelik itirazlar: Davacıların parsellerinin kısmen veya tamamen düzenleme dışı bırakılmasına yönelik itirazları başta olmak üzere sınırın Yönetmeliğe aykırılık içerdiğine ilişkin itirazlardır.

8. İmar uygulamasına ihtiyaç olmadığına yönelik itirazlar: İncelenen davalarda bir kısım davacı, uygulama yapılan bölgede "yapılaşmanın tamamlanması, imar uygulamalarının daha öncesinde yapılmış olması nedeniyle parselasyon planının yapılmasına gerek olmadığını" ileri sürmektedir.

9. İmar planı kararlarına yönelik itirazlar: Arazi ve arsa düzenlemesi, imar planlarını gerçekleştirmek için yapılar ve plan kararlarını uygulamakla yükümlüdür. Düzenlemeden etkilenen malikler, imar uygulamasına itiraz etse de bu itirazları esasında imar plan kararlarına dönmüştür.

10. Tahsisin parçalı yapılmasına yönelik itirazlar: Parselasyon planında tahsisin çok sayıda parselden hisse olarak verilmesi veya dağınık birden fazla parsel oluşturulması gibi itirazlardır.

11. Tebligat ve bilgilenmeye ilişkin itirazlar: Davacı dilekçeleri incelendiğinde taşınmaz maliklerinin bir kısmı davaya konu imar uygulamasından haberlerinin olmadığını ve sonradan öğrendiklerini ifade etmişlerdir. Bir kısım taşınmaz maliki ise sorumlu idarenin AAD tebligat yükümlülüklerini yerine getirmediğini ve böylece itiraz haklarının kısıtlandığını iddia etmişlerdir.

12. Yapılan düzenlemenin üst ölçekli planlara aykırı olduğuna ilişkin itirazlar: Yapılan uygulamada söz konusu parselasyon planının üst ölçekli planlarla uyumlu olmaması bir itiraz sebebidir.

13. Diğer İtirazlar: Toplamı %2 olan 5 ayrı itiraz konusu makalede diğer itirazlar olarak geçmektedir. Bu itirazlar onay ve kesinleşme sürelerinin dikkate alınmaması, bedele dönüştürme işlemlerindeki hatalar, hisse oranlarının düzenleme le birlikte değişimi ve güncel tapu kayıtlarının kullanılmaması konularını içermektedir.

## 4.2. İtirazların Dağılımı

Bölüm 4.1'de açıklanan sınıflandırma doğrultusunda, incelenen dava dilekçelerindeki itiraz konuları sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı olan itiraz konularının belirlenmesi ve bunların birliki görüşleriyle karşılaştırılması, toplam 435 dava dosyası üzerinden yürütülmüştür. İncelenen 435 dava dilekçesinde toplam 1072 adet malik itirazı kaydedilmiştir (Tablo 2). Dilekçe başına ortalama 2,46 itiraz düşmektedir.

Tablo 2: Malik itirazları ve itiraz konularının dağılımı

No	İtiraz konusu	Toplam itiraz sayısı
1	Tahsis İşlemlerine yönelik itirazlar	248
2	Hisseli hale gelme durumuna itirazlar	206
3	DOP hesabına yönelik itirazlar	184
4	Fiili kullanımın bir kısmının mülkiyetten çıkmasına itirazlar	117
5	AAD işleminde idarenin usulsüzlük yaptığına yönelik itirazlar	62
6	Düzenleme sınırının geçirilmesine yönelik itirazlar	59
7	Parselasyon geometrisine yönelik itirazlar	53
8	Tebligat ve bilgilenmeye ilişkin itirazlar	35
9	İmar Planı kararlarına yönelik itirazlar	28
10	Tahsisin parçalı yapılmasına yönelik itirazlar	26
11	Yapılan düzenlemenin üst ölçekli planlara aykırı olduğuna dair itirazlar	21
12	İmar uygulamasına ihtiyaç olmadığına yönelik itirazlar	12
13	Diğer itirazlar	21

## Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi

	Toplam	1072
--	--------	------

Tablodan görüldüğü üzere, tahsis işlemlerine ilişkin itirazlar (248), hisseli hale gelmeye yönelik itirazlar (206), DOP hesabına ilişkin itirazlar (184) ve fiili kullanım alanının mülkiyetten çıkmasına ilişkin itirazlar (117) en yüksek paya sahiptir. Bu dört kategori, toplam 1072 itirazın yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır.

En yaygın itiraz konusu tahsis işlemlerine yöneliktir. Kök parselin konumu veya geometrik yapısında yapılan değişiklikler, malikler açısından genellikle mülkiyetin bütünlüğünü bozan ve hak kaybı yaratan uygulamalar olarak algılanmaktadır. Kök parseli kamusal alanlara denk gelen maliklerin büyük çoğunluğu, eşdeğer tahsis yapılmadığı düşüncesiyle “tahsisin adaletsiz olduğu” kanaatine sahiptir.

Bununla birlikte, mülkiyet yapısındaki değişim de güçlü bir memnuniyetsizlik kaynağıdır. Malikler, AAD sonucunda müstakil mülkiyetten hisseli mülkiyete geçilmesine veya önceden paydaş olmadıkları kişilerle ortak hale gelmelerine karşı çıkmaktadır. Bu durum, maliklerin adalet duygusunu zedelemekte ve “hakkaniyetsiz paylaşım” algısı yaratmaktadır.

DOP işlemine yönelik itirazlar, yoğunlukla teknik hata şüphesi veya mevzuata aykırılık gerekçelerine dayanmaktadır. Bu itirazların önemli bir kısmının, geçmişteki AAD iptal davalarına ilişkin emsal yargı kararlarından öğrenilmiş kalıplar olduğu gözlenmiştir.

Diğer önemli bir bulgu, fiili kullanım alanlarının mülkiyetten çıkması yönündeki itirazlardır. İmar parseli çoğu durumda, malikin fiilen kullandığı alanı tam olarak kapsamamakta; bu nedenle maliklerin yapı, müstemilat, bahçe veya tarımsal alanlarının bir kısmı mülkiyet dışına çıkmaktadır. Bu durum, maliklerin gözünde AAD'nin mülkiyet hakkına müdahale eden veya gereksiz bir uygulama olduğu algısını güçlendirmektedir.

İtirazların genel dağılımı, maliklerin esasen mevcut durumun değiştirilmesine yönelik bir direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Maliklerin taşınmazlarına konum, yüzölçümü, geometrik yapı, paydaşlık durumu, mevcut yapılar ve muhdesatlar açısından yapılan her türlü müdahale, yüksek bir duyarlılıkla karşılanmaktadır. Bu duyarlılık, AAD işlemlerine yönelik yargı sürecinin temel itici gücü haline gelmiştir.

Dava dilekçelerinde ayrıca, bazı maliklerin AAD uygulamalarının kamu yararı ilkesine uygun yürütülmediğine, idarelerin kendi menfaatleri doğrultusunda hareket ettiğine inandıkları görülmüştür. Bu durum, idareye duyulan güvenin zedelenmesi biçiminde yorumlanabilir.

Dava dilekçelerinin çoğunda, maliklerin tek bir itirazla sınırlı kalmadığı, aksine birbiriyle ilişkili itirazların kümelendiği gözlenmiştir. Bu kümelene, özellikle dört ana itiraz alanında (tahsis, hissencilik, DOP ve fiili kullanım) belirginleşmiştir. Kök parselin konumu değişen veya hisseli hale gelen malikler, çoğu durumda DOP kesintisi veya fiili kullanım kaybı gibi diğer sorunlarla da karşı karşıya kalmaktadır. Dolayısıyla, toplam itirazların %70'inin bu dört konu üzerinde yoğunlaşmasının temel nedeni, itiraz konularının doğası gereği birbiriyle bağlantılı olmasıdır. Bu kümelene; parsel konumu değişen, hisseli hale gelen ve fiili kullanım bütünlüğü bozulan malikler açısından ikili, üçlü veya dörtlü itiraz grupları şeklinde dile getirilmektedir.

### 4.3. Ek Bulgular ve Karşılaştırmalar

Bu bölümde, malik itirazlarının farklı değişkenlere göre dağılımı ve birlikteliği görüşleri ile yargı kararları arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

İtirazların, parselde yapı bulunup bulunmamasına göre farklılaşıp farklılaşmadığı araştırılmıştır. Yapılı taşınmazları konu edinen 220 malik dilekçesinde toplam 579 itiraz kaydedilmiştir. Bu itirazların 324'ü konut yapılı, 13'ü konut + ticari, 67'si ticari, 175'i sanayi yapılı parsellerle ilgilidir. Yapısız taşınmazları konu edinen 215 dilekçede ise toplam 493 itiraz tespit edilmiştir. Böylece dilekçe başına ortalama 2,63 itiraz yapılı parseller için, 2,29 itiraz ise yapısız parseller için belirlenmiştir. Sonuçlar, fiili kullanım durumu olan taşınmaz maliklerinin daha fazla sayıda itirazda bulunduğunu göstermektedir.

Yapı türüne göre itiraz konularının yoğunluğu değerlendirildiğinde; Konut yapılı parsellerde itirazlar yoğunlukla tahsis işlemine, konut + ticari ve ticari parsellerde hisseli hale gelme durumuna, sanayi yapılı parsellerde ise DOP kesintisine yönelmiştir. Bu bulgu, fiilen kullanılan taşınmazlarda mülkiyetin korunması ve eşdeğer tahsisin sağlanmasına yönelik hassasiyetin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Toplam 435 davanın 22'si (%5,1) kamu tüzel kişiliklerine, 413'ü (%94,9) ise özel kişilere aittir. Kamu tüzel kişiliklerinin toplam 1072 itiraz içindeki payı 28 olup, bu itirazların sınırlı ve teknik konular etrafında şekillendiği görülmektedir. Özel mülkiyete konu taşınmazlarda ise itirazlar daha çok mülkiyet hakkı, tahsis konumu, geometrik yapı ve hissencilik gibi sınırlı ve noktasal konuları içermektedir.

Çalışmada mevzuat güncellemelerinin malik memnuniyetine etkisi ortaya koyulmuştur. Buna göre, 1985 tarihli yönetmeliğe göre yürütülen 266 davada toplam 656 itiraz, 2020 tarihli yönetmeliğe göre yürütülen 169 davada toplam 416 itiraz kaydedilmiştir. Her iki yönetmelik için dilekçe başına düşen ortalama itiraz sayısı 2-3 arasında olup, itiraz yoğunluğu yönetmelik değişimlerinden belirgin biçimde etkilenmemiştir.

Yönetmelik değişikliklerinin dava sonuçları üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Kesinleşmiş 165 dava dosyasının 125'i 1985 tarihli, 40'ı 2020 tarihli yönetmeliğe tabidir. 1985 tarihli yönetmelik için: 125 davanın 62'sinde

(%49,6) iptal kararı verilmiştir. 2020 Yönetmeliği: 40 davanın 10'unda (%25) iptal kararı verilmiştir. Bu oranlar, yeni yönetmeliğin yürürlüğe girmesiyle birlikte AAD işlemlerine ilişkin iptal oranlarının yaklaşık yarı yarıya azaldığını göstermektedir.

Çalışmada, malik itirazları 435 dava dosyasındaki bilirkişi raporları ile karşılaştırılmıştır. Bilirkişiler, 181 dosyada AAD'nin iptali yönünde, kalan dosyalarda ise uygunluğu yönünde görüş bildirmiştir. Bazı dosyalarda birden fazla iptal gerekçesi tespit edilmiş olup, bilirkişiler toplamda 241 iptal gerekçesi ortaya koymuştur. Bu tespitlerin sadece 52'si malik itirazlarıyla birebir örtüşmektedir. Yani toplam 1072 itirazın %4,8'i, bilirkişi görüşleriyle doğrudan eşleşmiştir. Dosya bazında değerlendirildiğinde, 435 dava arasında 50 dosyada eşleşme gözlenmiş, bu da %11,5 oranına karşılık gelmektedir.

Mart 2024 itibarıyla kesinleşmiş 165 dava dosyası, malik itirazları ve bilirkişi görüşleriyle birlikte analiz edilmiştir. Bu davaların 73'ünde AAD iptali, 92'sinde ise uygulamanın uygunluğu yönünde karar verilmiştir. İptal yönündeki 73 kararın 14'ü malik itiraz gerekçesiyle örtüşmektedir. Bu oran, toplam dava sayısına göre %8,5 (14/165) düzeyindedir. Ayrıca bilirkişi görüşleri ile yargı kararları arasındaki uyum oranı oldukça yüksektir. İncelenen 165 dosya özelinde %91 düzeyinde bir paralellik dipnot olarak belirtilmelidir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışma, arazi ve arsa düzenlemelerinde (AAD) taşınmaz maliklerinin memnuniyetsizliklerini ve itiraz konularını belirlemeye yönelik özgün bir akademik araştırmadır. Literatürde AAD sürecinde karşılaşılan sorunları veya iptal nedenlerini ele alan, çoğunlukla Danıştay kararlarını veri olarak kullanan çalışmalar mevcuttur. Ancak bu araştırma, doğrudan taşınmaz maliklerinin beyanlarını esas alması bakımından Türkiye'de yapılmış ilk akademik çalışma olma niteliğindedir.

Kapsam dahilinde, 435 dava dosyasında yer alan davacı dilekçeleri, bilirkişi raporları ve yargı kararları incelenmiştir. Çalışmada 13 başlık altında toplam 1072 itiraz tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, malik itirazlarının yaklaşık %70'i dört ana başlıkta yoğunlaşmaktadır:

1. Tahsis işlemine yönelik itirazlar (%23)
2. Hisseli hale gelmeye yönelik itirazlar (%19)
3. Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) hesabına ilişkin itirazlar (%17)
4. Fiili kullanımın bir kısmının mülkiyetten çıkmasına yönelik itirazlar (%11)

Bu bulgu, maliklerin memnuniyetsizliklerinin büyük ölçüde mülkiyetin konumu ve paydaşlık yapısındaki değişimlerden kaynaklandığını göstermektedir. Özellikle fiili kullanım bulunan (yapı, müştemilat, bahçe, tarımsal alan vb.) taşınmazlarda memnuniyetsizlik oranı daha yüksektir. Bu durum, AAD'nin bazı maliklerde "irade dışı mülkiyet müdahalesi" algısı oluşturduğunu göstermektedir.

DOP hesabına ilişkin itirazlarda genellikle kesinti oranı ve alan kaybı üzerinde durulmuştur. Bu da maliklerin esasen kullanım alanındaki değişime odaklı bir memnuniyetsizlik yaşadıklarını ortaya koymaktadır.

Bilirkişi görüşleri incelendiğinde, maliklerin itirazlarının haklı görülme oranının oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. İncelenen 1072 itirazın yalnızca 52'si (%4,8) bilirkişi raporlarıyla örtüşmektedir. Haklı bulunan itirazların çoğu teknik hatalardan kaynaklanmıştır. Bu durum, maliklerin duyduğu rahatsızlıkların çoğunun algısal ve mülkiyet psikolojisine dayalı olduğunu, ancak teknik açıdan sınırlı sayıda itirazın haklı bulunduğunu göstermektedir.

Yargı makamının AAD iptal gerekçesi ile maliklerin AAD'ye yönelik itirazlarının yalnızca %8,5'i yargı kararlarında haklı bulunmuştur. Bu durum, malik algısı ile hukuki değerlendirme arasındaki farkı açıkça ortaya koymaktadır.

Mevzuat değişikliklerine bakıldığında, 1985 ve 2020 tarihli yönetmelikler arasında dava başına düşen ortalama itiraz sayısı açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ancak 2020 tarihli Yönetmeliğe tabi uygulamalarda iptal oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Bu fark, yeni yönetmeliğin teknik standartları güçlendirmesi, idarelerin önceki iptal kararlarından "öğrenme etkisi" kazanması ve uygulama süreçlerinin daha kontrollü hale gelmesiyle açıklanabilir.

AAD, mülkiyet hakkına doğrudan müdahale eden en güçlü idari araçlardan biridir. Dolayısıyla maliklerin memnuniyetsizlik göstermesi olağandır. Türkiye'deki çoğu AAD uygulamasının fiili kullanımlar sonrasında yapılması, maliklerin bu işlemleri "mevcut durumlarına müdahale" olarak algılamalarına neden olmaktadır.

Malik dilekçeleri incelendiğinde bazı itirazların, önceki yargı kararlarından öğrenilmiş ifadeler şeklinde dile getirildiği gözlenmiştir. Özellikle DOP hesabının hatalı olduğu, kapanan yolların uygun şekilde kullanılmadığı şeklindeki ifadeler, yani maliklerin normal koşullarda hakim olamayacakları teknik bir detay, itiraz olarak yazılmıştır. Öğrenilmiş bir iddia olarak sunulan DOP itirazlarının gerek yargı kararınca gerek bilirkişi görüşünce karşılık bulması da bu bağlamda son derece olağandır. Bu durum, vatandaşların hukuki argümanları zamanla benimseyerek dilekçelerine yansıtıldığını göstermektedir.

*Arazi ve Arsa Düzenlemelerinde Malik İtirazlarının Analizi*

Sonuç olarak, AAD'ye yönelik malik itirazlarının doğru ve kapsamlı biçimde incelenmesi, hem mevcut uygulamaların iyileştirilmesi hem de yeni AAD modellerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yalnızca emsal yargı kararlarına dayalı değerlendirmeler AAD'nin başarısını ölçmek için yeterli değildir. Sürecin asli tarafı olan maliklerin beklentileri, memnuniyetsizlikleri ve algıları dikkate alınmadan AAD süreçlerinde kalıcı iyileşme sağlanamaz. Bu çalışma, maliklerin doğrudan dile getirdiği itirazları sistematik biçimde analiz ederek, AAD modeline dair yeni bir bakış açısı kazandırmakta ve AAD metodolojisinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

**Kaynaklar**

- Archer R.W. (1988) Land pooling for resubdivision and new subdivision in Western Australia. *American Journal of Economics and Sociology* 47(2), 207–221.
- Çepni M.S. (2022) Tescil dışı alanların arsa düzenlemelerinde değerlendirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi* 9(2), 127–136.
- Karaağaç M.F. (2019) 3194 Sayılı Kanun'un 18. Maddesi Uygulamasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.
- Mintemur Ş.S. (2025) Arazi ve arsa düzenlemelerinde malik itirazlarının analizi / Analysis of owner objections in land regulations. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- Mintemur Ş.S., Çepni M.S. (2024a) Analysis of owner objections to statutory land readjustments (LR) in Turkey. *Survey Review* 57 (402), 284–291.
- Mintemur Ş.S., Çepni M.S. (2024b) Arazi ve arsa düzenlemesine yapılan itirazların davacı dilekçeleri esas alınarak incelenmesi. *Geomatik Dergisi* 9(2), 164–174.
- Mugisha J., Uwayezu E., Babere N.J., Kombe W.J. (2024) Enabling planned urban settlements through land readjustment: A case study from Kigali, Rwanda. *Habitat International* 145.
- Şimşek N.Ç., Uzun B. (2018) Analysis of recovery process in zoning plan implementations subjected to annulment. *Journal of the Turkish Justice Academy* 33, 709–720.

## Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Kamulaştırma Amaçlı Tahsis Yaklaşımı: Tarihsel Süreç, Uygulama Sorunları ve 2025 Düzenlemeleri

Ahmet YILMAZ<sup>1,\*</sup>, Oytun YILMAZ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye.

### Genişletilmiş Özet

Arazi ve arsa düzenlemesi (AAD), şehirleşmenin temel araçlarından biridir. Nüfus artışı, ekonomik gelişme ve planlama kararları yeni alanların imara açılmasını ve mevcut alanların yeniden düzenlenmesini zorunlu kılar. Bu süreçte özel mülkiyet hakkı ile kamu yararı arasındaki denge önem kazanır. Kamu altyapısı ve sosyal donatıların sağlanabilmesi için parsellerden kesintiler yapılmakta, bu da çeşitli hukuki ve sosyal sorunlara yol açmaktadır (Yılmaz & Yılmaz, 2024). Türkiye’de 3194 sayılı İmar Kanunu çerçevesinde uygulanan düzenlemeler uzun yıllar boyunca Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) mekanizmasına dayanmıştır. Düzenlemeye tabi parsellerden kamu hizmet alanları için kesinti yapılmış; park, yol, yeşil alan, eğitim ve sağlık gibi işlevlere tahsis edilmiştir. 1985’te %35 olan DOP oranı zamanla %40’a, 2019’da ise %45’e çıkarılmıştır. Ancak DOP, kamusal alanlar için kaynak sağlasa da mülkiyet hakkına doğrudan müdahale niteliği taşımış; oran artışları, değer kaybı ve yükün paylaşımı sürekli tartışma konusu olmuştur. 2019–2020’de Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği’nde yapılan düzenlemelerle DOP %45’e çıkarılmış, bu sınırı aşan kısımlar için “kamulaştırma amaçlı tahsis” yöntemi getirilmiştir. Ancak yöntem kısa sürede belirsizlikler yaratmış ve 2021’de Danıştay 6. Dairesi’nin yürütmeyi durdurma kararıyla fiilen uygulanamaz hale gelmiştir. Bu çalışmanın amacı, düzenleme ortaklık payı ile karşılanamayan kamusal alanların ediniminde kullanılan yöntemlerin tarihsel gelişimini ve mülkiyet hakkı–kamu yararı dengesinin günümüzde ulaştığı noktayı, 2025 değişiklikleri ışığında değerlendirmektir.

#### 2019 Öncesi Dönem:

Türkiye’de imar uygulamalarında DOP, 3194 sayılı İmar Kanunu’nun 18. maddesi çerçevesinde uygulanmaktaydı. Bu maddeye göre, düzenlemeye tabi tutulan taşınmazlardan, kamu hizmet alanları için belirli bir oranı aşmamak kaydıyla kesinti yapılabilmekteydi. Bu oran, uzun yıllar boyunca %35 olarak uygulanmış, 2000’li yıllarda yapılan düzenlemelerle %40’a çıkarılmıştır. Klasik DOP’ta, düzenleme alanındaki tüm parsellerden eşit oranda kesinti yapılarak kamu hizmeti için alan ayrılır, kalan kısımlar maliklere dağıtılır. Böylece hem kamusal ihtiyaçlar karşılanır hem de taşınmazlar imar hakkı kazanır. Bu sistemin en büyük sorunu, kamusal ihtiyaçları karşılamada yetersiz kalmasıydı. Yoğun bölgelerde artan okul, park, yol ve sağlık tesisi gereksinimleri %35–40 kesintiyle karşılanamıyor, idareler ek kamulaştırmaya başlamak zorunda kalıyordu. Bir diğer sorun, mülkiyet hakkına yapılan müdahalenin ölçülülüğünün sürekli tartışılmasıydı. Her ne kadar Anayasa Mahkemesi ve Danıştay içtihatlarında DOP uygulaması “kamu yararı” gerekçesiyle meşru kabul edilse de yüksek oranlı kesintiler mülkiyet sahipleri tarafından sıkça dava konusu edilmekteydi. Özellikle küçük yüzölçümlü parsellerde kesinti sonrası geriye kalan alanların ekonomik değerini yitirmesi, mülkiyet hakkı ihlali iddialarını artırmaktaydı (Yılmaz, 2020). Bu dönemde ayrıca Kamu Ortaklık Payı (KOP) kesintisi uygulanmış, elde edilen alanlar maliklere kamulaştırılmak üzere tahsis edilmiştir. Ancak yöntem, hukuki ve pratik sorunlar nedeniyle terk edilerek DOP odaklı uygulamalara bırakılmıştır (Çepni & Akıncı, 2020; Çay & Kandemir, 2022).

#### 2019–2020 Dönemi: DOP Oranının %45’e Çıkarılması ve Kamulaştırma Amaçlı Tahsis

2019 yılına gelindiğinde klasik DOP uygulamasının kamusal ihtiyaçları karşılamada yetersiz kaldığı açıkça görülmekteydi. Artan nüfus yoğunluğu, ulaşım altyapısı gereksinimleri ve sosyal donatı alanlarındaki eksiklikler, elde edilen alanların ihtiyacı karşılamasını zorlaştırıyordu. Bu nedenle kanun koyucu yeni bir düzenlemeye gitmiştir. İmar Kanunu’nun 18. maddesinde yapılan değişiklik ile DOP oranı %40’tan %45’e çıkarılmış, böylece idarelerin kamusal alan edinimindeki imkânları genişletilmiştir. Ancak esas yenilik, bu oranın üzerinde kalan alanların Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği uyarınca “kamulaştırılmak üzere tahsis” edilmesidir. Bu yöntemde alanlar doğrudan kamuya devredilmemekte, ilgili kurumlar adına ayrılarak beş yıl içinde kamulaştırılması öngörülmektedir. Yaklaşımın amacı, DOP sınırını aşan kısımlar için mülkiyet hakkının tamamen ortadan kalkmasını önlemek ve malike bedel ödenmesini sağlayarak kamu yararı ile özel mülkiyet arasında denge kurmaktır. Böylece, kamu hizmetleri için ihtiyaç duyulan alanların temini ile mülkiyet hakkının korunması aynı anda gözetilmeye çalışılmıştır.

#### Uygulamada Ortaya Çıkan Sorunlar

Düzenlemeler kısa sürede ciddi tartışmalara yol açtı. Öncelikle, hangi maliklerin taşınmazlarının kamulaştırma amacıyla tahsis edileceği belirsizdi. Bu seçim sürecinde eşitlik ilkesinin nasıl korunacağı, idarenin keyfi davranışlarının nasıl engelleneceği soruları gündeme geldi (HKMO, 2021). İkinci olarak, tahsisin hangi kurum adına yapılacağı belirsizdi. Okul, park, sağlık ocağı gibi farklı ihtiyaçlar bulunmasına rağmen kamulaştırma yükünün kimde olacağı netleşmedi. Ayrıca sınırlı mali kaynaklar nedeniyle beş yıl içinde bu alanların kamulaştırılmasının gerçekçi olmadığı eleştirileri yapıldı (Odabaş, 2022). Üçüncü olarak, kamulaştırma süresinin sonunda ne olacağı belirsizdi. Yani, beş yıl içinde kamulaştırma yapılmazsa, bu alanın malikine geri mi verileceği, yoksa kamuya tahsis edilmiş şekilde mi kalacağı açık değildi. Bu durum, mülkiyetin hukuki güvenliği açısından büyük bir sorun teşkil etmekteydi.

#### Yargı Kararı: Danıştay’ın Müdahalesi

Bu belirsizlikler çok sayıda davaya yol açmış, Danıştay 6. Dairesi’nin 08/06/2021 tarihli kararı ile “kamulaştırma amaçlı tahsis”in yürütmesi durdurulmuştur. Kararda, mülkiyet hakkının belirsiz süreyle ortadan kaldırılmasının Anayasa’ya aykırı olduğu ve kamulaştırma yükü ile kaynakların tanımlanmamasının ciddi hukuki sorun yarattığı belirtilmiştir. Bu kararla 2019–2020’deki yeni yaklaşım fiilen uygulanamaz hale gelmiş, DOP’u aşan alanların edinimi yeniden belirsizliğe sürüklenmiştir.

#### 2021 Sonrası Dönem:

Danıştay’ın yürütmeyi durdurma kararı hem idareler hem de mülkiyet sahipleri açısından ciddi bir belirsizlik yaratmıştır. İdareler, kamu hizmet alanlarını karşılamak için hangi yöntemi kullanacaklarını kestiremez hale gelmiş; maliklerin ise taşınmazlarının geleceğine ilişkin öngörülerini tamamen ortadan kalmıştır. Özellikle büyükşehir belediyelerinde, yeni planlanan alanlarda kamu

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0212) 383 5314

ayilmaz@yildiz.edu.tr (Yılmaz A.)\*

oytun.yilmaz@yildiz.edu.tr (Yılmaz O.)\*

*Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Kamulaştırma Amaçlı Tahsis Yaklaşımı: Tarihsel Süreç, Uygulama Sorunları ve 2025 Düzenlemeleri*

hizmetlerinin finansmanı için kamulaştırma yükünün nasıl karşılanacağı sorunu daha da ağırlaştırmıştır (Odabaş, 2022). Kamulaştırma için ayrılan bütçeler yetersiz kalmakta; bu da projelerin gecikmesine veya hiç uygulanamamasına yol açmaktadır. Bu dönemde yapılan akademik çalışmalar, kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının doğurduğu sorunların hâlâ güncelliğini koruduğunu ortaya koymuştur (Akdeniz, 2022; Çepni, 2021, 2022, 2023; Yılmaz & Yılmaz, 2024). Mülkiyet hakkı ile kamu yararı arasındaki denge, yasal boşluklar nedeniyle sağlanamamış; özellikle de mülkiyetin hukuki güvenliği açısından ciddi riskler devam etmiştir.

**2025 Gelişmeleri:**

2025 yılına gelindiğinde hem Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'nde yapılan değişiklikler hem de İmar Kanunu'na eklenen yeni hükümler ile düzenleme farklı bir boyuta taşınmıştır. Değişiklikler doğrudan kamulaştırma amaçlı tahsise ilişkin olmasa da umumi hizmet alanlarının tanımı ve kullanımında önemli yenilikler getirmiştir. Park, sağlık tesisi, eğitim alanı ve ibadet yeri gibi fonksiyonların yapılaşma koşulları yeniden düzenlenmiş, yargı kararları doğrultusunda yapılaşma oranları sınırlandırılmıştır. Böylece kamu hizmet alanları daha belirgin hâle gelmiş, ancak DOP'u aşan kısımların edinimine dair doğrudan bir çözüm getirilmemiştir. En dikkat çekici yenilik ise 2024 sonunda kabul edilip 2025'te yürürlüğe giren düzenleme ile "İmar Hakkı Aktarımı" olmuştur. Buna göre, imar planı kararıyla bir parselin tamamı veya bir kısmı kamu hizmetine ayrıldığında, maliklere verilemeyen yapılaşma hakkı başka bir parselde aktarılabilecektir. Bu düzenleme, kamulaştırma amaçlı tahsisin yerine geçebilecek alternatif bir araç olarak görülmekte; mülkiyet hakkının korunması ile kamu yararının sağlanması arasında yeni bir denge kurmayı hedeflemektedir.

**Tartışmalar ve Belirsizlikler**

Her ne kadar imar hakkı aktarımı yeni bir çözüm olarak sunulsa da uygulamada çeşitli sorunlar barındırmaktadır. Aktarım yapılacak parsellerin belirlenmesi, eşdeğerlik ölçütleri, maliklerin rızası ve idarelerin yönetim kapasitesi hâlâ tartışmalıdır. Ayrıca büyükşehirlerde uygun parsel stoğunun sınırlı olması düzenlemenin etkinliğini azaltabilir. Dolayısıyla, 2025 düzenlemeleri kamulaştırma amaçlı tahsisin yarattığı sorunları tümüyle çözememiş, yalnızca 'imar hakkı aktarımı' ile kamu yararı-mülkiyet hakkı dengesini farklı bir yöntemle kurmaya çalışmıştır. Ancak belirsizlikler ve uygulama zorlukları dikkate alındığında, bu düzenlemelerin tek başına yeterli olmadığı açıktır.

**Değerlendirme ve Öneriler**

Bu çalışmada, arazi ve arsa düzenlemelerinde yasal sınırı aşan alanların edinimine yönelik düzenlemeler ele alınmış; özellikle 2019-2020'de getirilen ve 2021'de Danıştay kararıyla durdurulan kamulaştırma amaçlı tahsis uygulamasının teknik, hukuki ve sosyal sorunları ortaya konulmuştur. Uygulamanın, tahsis edilecek fonksiyonların ve kamulaştırma yükünün belirsizliği ile kadastral parsellerdeki hesaplama sorunları nedeniyle ciddi aksaklıklar yarattığı görülmüştür. 2021 sonrası oluşan boşluk, imar hakkı aktarımı ile giderilmeye çalışılmıştır. Ancak bu yöntem de parsel stoğu, eşdeğerlik ölçütleri, malik rızası ve idarelerin kapasitesi gibi kısıtlar nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Sonuç olarak, tahsis yaklaşımının doğurduğu belirsizliklerin önemli kısmı halen devam etmektedir. 2025 düzenlemeleri yeni bir çözüm aracı sunmuş olsa da tek başına yeterli değildir. Bu nedenle, arazi ve arsa düzenlemelerinde kalıcı bir çözüm için:

- Yasal sınırı aşan alanların ediniminde belirsizlikleri ortadan kaldıracak, net ve uygulanabilir düzenlemeler yapılmalı,
- Kamulaştırma yükünün finansmanına yönelik mekanizmalar güçlendirilmeli,
- Belediyelere arazi bankacılığı, ön alım hakkı, pazarlanabilir imar hakları ve değer kazanım araçları gibi farklı politika araçları tanımlanmalı,
- İmar hakkı aktarımı uygulaması, hukuki ve teknik altyapısı güçlendirilerek daha işlevsel hale getirilmelidir.

Sonuç olarak, 2019-2020 döneminde getirilen kamulaştırma tahsisi yaklaşımı 2021'de Danıştay kararıyla geçerliliğini yitirmiş, bu da ciddi bir belirsizlik yaratmıştır. 2025 düzenlemeleri imar hakkı aktarımı gibi yeni araçlar getirirse de yasal sınırı aşan alanların ediniminde kalıcı bir çözüm sağlayamamış, mülkiyet hakkı ile kamu yararı arasındaki denge sorunu ile hesaplama problemleri de devam etmektedir.

**Anahtar Kelimeler**

Arazi ve Arsa Düzenlemesi, İmar Planı Uygulaması, Kamulaştırma, Mülkiyet Hakkı, Düzenleme Ortaklık Payı

**Kaynaklar**

- Akdeniz, H. (2022). Kent Planlarının Uygulama Aracı Olarak Arazi ve Arsa Düzenlemesi. *İDEALKENT*, 13(37), 1753-1771.
- Çay, T., & Kandemir, E. S. (2022). Türkiye'de imar uygulama mevzuatındaki gelişim süreci. *Geomatik*, 7(1), 26-40.
- Çepni, M.S., & Akıncı, M. (2020). Şekillenmeyen Hamur: İmar Mevzuatındaki Değişiklikler İçin Bazı Tespitler, *Mahalli İdareler Dergisi* 94(220), 3-16.
- Çepni, M. S. (2021). İmar Yasası'nın 18. Maddesindeki Değişiklikler ve İdare Hukuku Açısından Olası Sorunlar: Eşdeğer Tahsis ve Hisse Çözümü. *İzmir Barosu Dergisi*, 86(1), 53- 72.
- Çepni, M. S. (2022). Tescil dışı alanların arsa düzenlemelerinde değerlendirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 9(2), 127-136.
- Çepni, M. S. (2023). Arazi ve arsa düzenlemelerinde düzenleme ortaklık payının alınmadığı durumlarda bedele dönüştürülmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 10(1), 16-29.
- HKMO (2021). Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik Uygulamaları Çalıştayı Sonuç Raporu. HKMO Yayınları, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası. <https://obs.hkmo.org.tr/show-media/uploads/news/dda1dd69efb38342d9e50e6888732368.pdf> (Erişim Tarihi: 11 Kasım 2022).
- Odabaş, A. İ. (2022). *Arazi ve arsa düzenlemesi mevzuatında yapılan değişikliklerin ve etkilerinin incelenmesi: Çorum ili örneği* (Yüksek Lisans Tezi), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun, Türkiye.
- Yılmaz, A. (2020). Kamulaştırmaz el atma ve hukuki el atma kavramlarının tüzel gelişiminin incelenmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 7(2), 155-183.
- Yılmaz, A., & Yılmaz, O. (2024). Arazi ve arsa düzenlemesinde kamulaştırma amaçlı tahsis yaklaşımının incelenmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 11(2), 171-189. <https://doi.org/10.9733/JGG.2024R0012.T>

## Kentsel Dönüşümde Etkin Strateji Geliştirme ve Uygulama: Mekânsal Karar Destek Sistemleri ile Kayseri Talas İlçesi Örneği

Mehmet Bak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Talas Belediyesi, Kentsel Dönüşüm Müdürlüğü, 38280, Kayseri.

### Genişletilmiş Özet

Kentsel dönüşüm, çöküntü alanı haline gelmiş bölgelerde ekonomik, fiziksel, sosyal ve çevresel koşulları kalıcı olarak iyileştirmeyi hedefleyen kapsamlı bir süreçtir [1,2]. Bu süreç, kent içi bölgelerde altyapıyı ve yaşam kalitesini iyileştirmeyi hedefleyen stratejik bir eylem planı çerçevesinde uygulanır. Aynı zamanda olası afetlere karşı önleyici çözümler geliştirerek, fiziksel ve işlevsel olarak zarar görmüş kentsel dokuyu yeniden yapılandırmayı, ekonomik kalkınmayı teşvik etmeyi, sosyal refahı arttırmayı ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamaya çalışır [3-9]. Kentsel mekânların iyileştirilmesine yönelik uygulanan kentsel dönüşüm projeleri; sosyal, yasal, yönetsel ve ekonomik yapısal farklılıklara bağlı olarak şekillenir [10,11]. Bu projeler farklı vizyon, hedef ve stratejilere sahip olsa da ortak hedefleri, sorunlu kentsel bölgeleri planlı bir yaklaşımla daha iyi yaşam koşullarına kavuşturmak [12,13]. Kentsel dönüşüm projeleri, genellikle konut, ticaret, sanayi, kamu hizmetleri ve rekreasyon alanlarını kapsar. Zamanla, bu projeler toplumların kendine özgün sosyal yapıları, kurumsal düzenlemeleri ve toplumsal dinamiklerine göre şekillenmiş ve uyarlanmıştır. Bu süreç, her toplumun kentsel ihtiyaçları ve öncelikleri doğrultusunda farklılık göstermekle birlikte, temel olarak sorunlu bölgelerin iyileştirilmesini hedefler. Dolayısıyla kentsel dönüşüm, kent dokusunu oluşturan unsurların fiziksel değişim ihtiyacına yanıt vermelidir. Ayrıca bu projeler, kentin hızla değişen, büyüyen ve bozulan yapısına bağlı olarak ortaya çıkan yeni fiziksel, toplumsal, ekonomik, çevresel ve altyapısal ihtiyaçları karşılamak üzere kent parçalarının yeniden geliştirilmesine olanak sağlamalıdır [14]. Kentlerin kendiliğinden yenilenmesi genellikle uzun sürdüğü ve maliyetli olduğu için, yenilenmeye ihtiyacı olan kesimlerine ve kimliğini yitirmiş alanlara parçalı yaklaşımlarla kentsel dönüşüm programları uygulanmalıdır. Planlı stratejik bir yaklaşım, ekonomik yükü azaltma konusunda daha etkilidir [15].

Başarılı ve sürdürülebilir bir kentsel dönüşüm için doğru bölgelerin tespiti büyük önem taşır. Bu süreçte; imar planları, ruhsat ve altyapı durumu, yapıların yaşı, taşınmazların mülkiyet yapısı ve risk analizleri gibi faktörler dikkatle değerlendirilmelidir. Aynı zamanda bölgedeki toplulukların ve özel grupların ihtiyaçları da titizlikle göz önünde bulundurulmalıdır [16,17]. Kentsel dönüşüm fırsat olarak düşünülerek plansız ve düzensiz kentleşme sorunları ortadan kaldırılarak daha yaşanabilir kentler oluşturulabilir. Bu hedefe ulaşmanın yolu ise, büyük ölçekli kentsel dönüşüm projelerinin hayata geçirilmesiyle mümkündür. Buna karşın kentsel dönüşüm kapsamında tekil bina yenileme uygulamaları, yalnızca depreme dayanıklılığı artırmakla kalmakta, kent sorunlarını tam olarak çözmemektedir. Genellikle, bu projeler olumsuz sonuçlar doğurmakta ve yerel toplumun itirazlarına neden olmaktadır [18,19]. Bu nedenle başarılı bir kentsel dönüşüm projesi için, çöküntü haline gelmiş bir kentin veya alanın sınırlarını ve mevcut fiziksel stokunu anlayarak dönüşümün; kentsel, bölgesel ya da mahalle ölçeğinde uygulanmasına karar verilmelidir. Kentsel dönüşüm yalnızca yıkım ve yeniden inşaa süreci olmadığından, kentin stratejik ve bütüncül bir yaklaşımla planlanması zorunludur. Tekil projelerde anlaşmalar daha hızlı sağlanabilir, ancak bu tür uygulamalar kent sorunlarına kalıcı çözümler üretmez. Toplu projelerde anlaşma süreci daha karmaşık olsa da, altyapı ve genel planlama ile kent düzeni daha planlı ve düzenli bir şekilde oluşturulur. Dolayısıyla, kentin düzenlenmesi bilinçli ve stratejik bir yaklaşımla, ilgili idarelerin planlamaları doğrultusunda gerçekleştirilmelidir [19]. Kentsel dönüşüm projelerinde sağlıklı kararlar alınabilmesi için imar, mülkiyet, vergi, taşınmaz değeri, altyapı, üst yapı, konut ve çevre gibi birçok farklı alandan üretilen ve birbiriyle ilişkili olan verilerin bütüncül olarak toplanıp analiz edilmesi gerekmektedir. Mekânsal bilgilerinin çoğunun konum tabanlı olduğu göz önüne alındığında, dijital haritalar ve veri tabanlarına duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu veriler, küçük ölçekli planlardan büyük ölçekli planlara kadar konum odaklı coğrafi bilgileri içermektedir. Bu nedenle, kentsel dönüşüm projelerinde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanımı kaçınılmazdır. Yerel yönetimler, kent kaynaklarını en verimli şekilde halka sunabilmek için planlama, yönetim, analiz ve yatırım süreçlerini yürütmektedir. Kentin fiziki, sosyal, ekonomik ve idari yapısı hakkındaki veriler büyük bir önem taşımakla birlikte bu verilerin temini oldukça zaman alıcı, pahalı ve zordur. Bu hizmetlerin etkili bir şekilde sağlanabilmesi için verilerin toplanması, düzenlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi gereklidir. Bu noktada, kent verilerinin yönetimi ve kentsel dönüşüm projelerinin hayata geçirilmesi için CBS'nin önemi belirgin hale gelmektedir [20]. Ülkemizde dönüşüm projelerine olan ihtiyacın artması ile birlikte bir takım yasal düzenlemeler yapılmış ve günümüzde de yapılmaya devam etmektedir. Bu çerçevede On Birinci ve On İkinci Kalkınma Planları hazırlanarak kentsel dönüşüm hedefleri belirlenmiştir. Bu planlarda il ve ilçe bazında riskli ve rezerv yapı alanları, sosyal yapı analizi, ekonomik bütünleşme, altyapı durumu, finansman modelleri ve dönüşüm hedeflerini içeren kentsel dönüşüm stratejileri hazırlanacağı, afet riskli alanların tespiti ve ilanı için mevcut kriterlerin geliştirileceği ve netleştirileceği belirtilmiştir. Böylelikle kentsel dönüşüm alanlarının belirlenmesinde afet riskleri, toplumsal ve ekonomik zorluklar, yapı stoku ve risk analizleri dikkate alınarak, strateji belgelerinin hazırlanması zorunlu hale getirilecektir [21,22].

Bu çalışma kapsamında, Kayseri ili Talas ilçesinde katılımcılık esasları ve yerinde dönüşüm ilkesi gözetilerek; mevcut sosyal yapının mekânsal ihtiyaçlarına uygun, kent dokusuyla uyumlu ve alan bazlı uygulamaların yürütülmesi amacıyla, On Birinci ve On İkinci Kalkınma Planları doğrultusunda Talas Belediyesi tarafından kentsel dönüşüm strateji belgesi hazırlanmıştır. Bu çerçevede, kentsel dönüşüm çalışmalarına temel oluşturmak amacıyla öncelikle kentin mülkiyet yapısının ayrıntılı olarak ortaya konulması sağlanmıştır. Hâlihazır haritalar ve kadastro verileri kullanılarak veri toplama süreci başlatılmış; ihtiyaç duyulan mekânsal ve mekânsal olmayan veriler temin edilmiştir. CBS kullanılarak parsel, bina ve bağımsız bölümlere (daire, dükkân, depo) ilişkin haritalar hazırlanmış ve mekânsal analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, CBS tabanlı kentsel donatı analizi, mevcut arazi kullanımı, nüfus yoğunluğu, yapıların fiziksel durumu ve ruhsat durumunu gösteren, kentsel dönüşümüne uygunluk açısından haritalar üretilmiştir. Bu analizler, çok kriterli karar verme yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile birlikte değerlendirilerek, farklı kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş ve alternatif alanlar bilimsel bir yaklaşımla sıralanmıştır. Bu sayede, kentsel dönüşüm uygulamalarında karşılaşılan sorunların çözümü, sürecin iyileştirilmesi ve bütüncül bir yönetim anlayışının sağlanması amacıyla, Talas ilçesinde potansiyel kentsel dönüşüm alanları belirlenmiş ve kentsel dönüşüm strateji belgesi hazırlanmıştır.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0352) 437 00 54 Faks: (0352) 4372221

E-posta: bakmehmet@gmail.com (Mehmet Bak)

Kentsel Dönüşümde Etkin Strateji Geliştirme ve Uygulama: Mekânsal Karar Destek Sistemleri ile Kayseri Talas İlçesi Örneği

Stratejik plan kapsamında Talas ilçesinin genel analizi yapılmış ve ilçe, merkez ve diğer mahalleler dikkate alınarak iki ana gruba ayrılmıştır. İlçeye bağlı 30 mahallenin merkezinde yer alan 7 mahallede toplam 169 hektarlık alan, 6306 sayılı yasa kapsamında olası afet riskli alan olarak öngörülmüştür. Bu alan, 167 yapı adasında kapsamaktadır. Bunlardan 28'i alan bütünlüğünü sağlamak amacıyla dahil edilmiş, kalan 139 yapı adasında ise 640 yapı, 6224 bağımsız bölüm ve yaklaşık 630000 m<sup>2</sup> inşaat alanı bulunmaktadır. Öngörülen afet riskli alanlarda yürütülen kentsel dönüşüm çalışmalarında, 12 yapı adasında uygulamalar tamamlanmış, 44 yapı adasında çalışmalar devam etmekte, 83 yapı adasında ise henüz başlanmamıştır. Uygulama alanlarında hak sahipleriyle yapılan uzlaşma oranı %90 seviyesindedir. Şu ana kadar afet riski taşıyan alanlarda yer alan 2589 bağımsız bölüm, toplamda yaklaşık 291980 m<sup>2</sup> inşaat alanı yıkılmıştır. Bunun yanında, 5 mahallede 172 hektarlık alan 5393 sayılı yasanın 73'üncü maddesi kapsamında kentsel dönüşüm ve gelişim proje alanı olarak; diğer 5 mahallede ise 62 hektarlık alan, 5366 sayılı yasa kapsamında yenileme alanı olarak öngörülmüştür. Ayrıca, 35 hektarlık alan kentsel dönüşüm ve gelişim proje alanı olarak ilan edilmiş; bunun 15 hektarı afet riskli alanlarla birlikte değerlendirilmiş, kalan 20 hektar ise deprem riskine karşı tedbir amacıyla donatı alanı olarak planlanmıştır.

Başarılı bir kentsel dönüşüm sürecinin temelinde, projelerin bütüncül bir bakış açısıyla, stratejik ve katılımcı bir anlayışla hazırlanması ve kentin ihtiyaçlarına uygun çözümler üretecek şekilde uygulanması yer almaktadır. Bu noktada, kentsel dönüşümün en kritik unsuru stratejik planlama sürecidir. Stratejik planın doğru yönetilmesi, projelerin amacına hızlı, etkili ve sürdürülebilir biçimde ulaşmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve mekânsal karar destek sistemleri kullanılarak Kayseri ili Talas ilçesi için stratejik bir plan oluşturulmuş; bu plan doğrultusunda en uygun kentsel dönüşüm alanları belirlenmiş ve ada bazında dönüşüm uygulamaları hayata geçirilmiştir. CBS tabanlı bu yöntem, kentsel dönüşüm alanlarının belirlenmesinde karşılaşılan karmaşık karar problemlerini, mekânsal veriler ve çok kriterli analiz yöntemleri üzerinden çözerek bilimsel bir temel sağlamıştır. Böylelikle yerel yönetimlerin süreçte aktif rol üstlenmesiyle halkla iletişim güçlendirilerek kısa vadeli ve yanlış uygulamaların önüne geçilecektir. Katılımcı, ada bazlı, mekânsal analizlerle desteklenmiş ve stratejik olarak doğru kurgulanmış bir kentsel dönüşüm sürecinin hayata geçirilmesiyle kentsel yaşam kalitesinin artırılması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler

İmar Uygulamaları ve Kentleşme, Kadastro ve Arazi Yönetimi, Afet Yönetimi, Kentsel Dönüşüm, CBS Uygulamaları, Mekânsal Karar Destek Sistemleri, Mekânsal Planlama

Kaynakça

- [1] Mehta, P. (2008). The impact of urban regeneration on local housing markets—a case study of Liverpool. *Liverpool UK, Retrieved March, 30, 2014.*
- [2] Roberts, P. (2000). The evolution, definition and purpose of urban regeneration. *Urban regeneration: A handbook, 1, 9-36.*
- [3] Ülger, N. E. (2010). *Türkiye'de arsa düzenlemeleri ve kentsel dönüşüm.* Nobel Yayın Dağıtım.
- [4] İlkme, M. (2008). *Kentsel dönüşüm ve Bursa raporu.* Bursa: TMMOB Şehir Plancıları Odası.
- [5] Turok, I. (2005). Urban regeneration: What can be done and what should be avoided. *Istanbul 2004 international urban regeneration symposium: Workshop of küçükçekmece district, 57-62.*
- [6] Arasteh, R., Ali Abbaspour, R., & Salmanmahiny, A. (2019). A modeling approach to path dependent and non-path dependent urban allocation in a rapidly growing region. *Sustainable Cities and Society, 44, 378-394.* <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.029>
- [7] Gladwin, T. N., Kennelly, J. J., & Krause, T.-S. (1995). Shifting paradigms for sustainable development: Implications for management theory and research. *Academy of management Review, 20(4), 874-907.*
- [8] Carter, A., & Roberts, P. (2017). Strategy and partnership in urban regeneration. *Roberts, P., Sykes, H., & Granger, R. (Eds.). Urban regeneration. 2nd ed. Sage, London, 44-67.*
- [9] Arslan, G. Y. (2014). Kentsel dönüşümün sürdürülebilirlik boyutu: Hammarby (İsveç) ve Fener-Balat örneklerinin incelenmesi. *Artium, 2(2), 180-190.*
- [10] Doğan, U., Koçak Güngör, M., Bostancı, B., & Yılmaz Bakır, N. (2020). GIS Based Urban Renewal Area Awareness and Expectation Analysis Using Fuzzy Modeling. *Sustainable Cities and Society, 54, 101945.* <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101945>
- [11] Roberts, P., & Sykes, H. (1999). *Urban regeneration: a handbook.* Sage.
- [12] Çolak, N. İ. (2013). Kentsel Dönüşüm/Kenti Dönüştürme ve Uygulanma Şekilleri. *Kocaeli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, C, 4, 7.*
- [13] Ayhan, F. (2013). Kentsel Dönüşüm Kavramı ve Tarihsel Gelişimi. *Kentsel Dönüşüm Hukuku, (Ed. YASİN, Melikşah/ŞAHİN, Cenk), İstanbul Üniversitesi SS ONAR İdare Hukuku ve İlimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi Yayınları, İstanbul, 71-90.*
- [14] Roberts, P. (2000). The evolution, definition and purpose of urban regeneration. *Urban regeneration: A handbook, 1, 9-36.*
- [15] Nihat Kandaloğlu. (2016). *Kentsel Dönüşüm* (Erol Köktürk, Ed.; C. 1). Yazarın Kendi Yayını.
- [16] Yasin, M., & Şahin, C. (2015). *Kentsel Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Temel İlkeler, Kentsel Dönüşüm Hukuku.* İstanbul.
- [17] Köktürk, E., & Köktürk, E. (2007). Deprem ve Kentsel Dönüşüm İlişkileri. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 97, 57-64.* <https://dergipark.org.tr/pub/hkmojjd/issue/53149/704740>
- [18] Lombard, M. (2013). Citizen Participation in Urban Governance in the Context of Democratization: Evidence from Low-Income Neighbourhoods in <sc>M</sc> exico. *International Journal of Urban and Regional Research, 37(1), 135-150.* <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2012.01175.x>
- [19] Köktürk, E., & Köktürk, E. (2007). Türkiye'de kentsel dönüşüm ve Almanya deneyimi. *TMMOB (The Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects) Chamber of Survey and Cadastre Engineers, 11th Turkish Scientific and Technical Mapping Symposium, 2-6.*
- [20] Banger, G. (2011). *Kent bilgi sisteminin esasları.* Nobel Akademik Yayıncılık.
- [21] Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, T. (2024). *On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028).* 205-206. [https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-İkinci-Kalkınma-Planı\\_2024-2028\\_11122023.pdf](https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-İkinci-Kalkınma-Planı_2024-2028_11122023.pdf)
- [22] Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, T. (2019). *On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023.* 162-163. [https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On\\_Birinci\\_Kalkınma\\_Planı-2019-2023.pdf](https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On_Birinci_Kalkınma_Planı-2019-2023.pdf)

## Yapı Yoğunluğu Arazi Kullanımı İlişkisinde Zamansal Nitelikli Bir Analiz Çalışması

Şehadet Sevra MİNTEMUR<sup>1,\*</sup>, Murat Selim ÇEPNİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli.

<sup>2</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli.

### Genişletilmiş Özet

Kentsel alanlardaki hızlı genişlemeye koşut olarak yapı kütlelerinin de giderek agresifleştiği, arazi kullanımının maksimize edildiğine dair güçlü bir toplumsal algı mevcuttur. İmar planlarında tanımlı yapılaşma koşulları ölçülebilir büyüklükler olmakla birlikte hem plan kararlarının zamansal değişimi hem de plan notları ve yönetmelikler ile getirilen istisnai durumların etkisi muğlaktır. Bunların yanında inşaat sahipleri ve sektörün tercihlerindeki değişime bağlı olarak yapı kütlesi-arazi arasındaki yoğunluk, doluluk, boşluk gibi parametrelerin değişimi yönündeki algıyı doğrulayacak, ölçüye dayalı somut veri bulunmamaktadır. Bu bildiriye, arazi kullanımının maksimizasyonu eğilimi, nicel verilere dayalı olarak, nesnel bir metodik ile araştırılmaktadır. Bulguların nicel sunumları ve regresyon eğrilerine ek olarak, ilgili disiplinlerden uzmanların mülakatları ve nitel değerlendirmelere yer verilmiştir. Çalışma, karşılaştırılabilir olması açısından aynı ilçede, yerel ya da merkezi idarelerce yapılmış toplu konut projeleri verilerini materyal olarak kullanmış, Kocaeli ili İzmit ilçesinde 1990 yılı sonrası projeler çalışılmıştır. 1990-2014 yılları arasına tarihlenen özel sektöre ait olmayan, 9 toplu konut projesinde arazi kullanım eğilimini ifade edebilecek KAKS/Emsal, TAKS ve Bina Yakınlık İndeksi değerleri elde edilmiştir. Yapılaşma değerleri dışında yine arazi kullanımını tanımlayabilmek adına aktif-pasif yeşil alanlar, oyun alanları, spor alanları ve otopark alanlarına ilişkin sayısal veriler türetilmiştir. Bulgular TAKS ve KAKS değerlerinde zamana bağlı bir artış, yeşil alanlar ve bina yakınlıklarında ise azalışı göstermektedir. Donatı alanlarının bazılarında anlamlı değişim görülmemekle birlikte boş alanların genel azalışı içerisinde bunu olumsuzlamak anlamlı değildir. Otopark alanları ise yine azalış göstermekle birlikte mevzuat değişimleri eşliğinde yorumlamak daha doğrudur. Mimar, Şehir Plancısı ve Harita Mühendisliği disiplinlerine mensup, kamu, özel sektör çalışanı ve müteahhit olarak faaliyet gösteren 15 kişilik uzman grubu bulguları yorumlamış ve bazı spesifik sorulara yanıt aranmıştır. Uzman mülakatları arazi kullanımındaki sınırları zorlama eğilimini yapılaşma izinlerindeki artışın yanı sıra inşaat maliyetlerindeki yükselişe ve kar odaklı yapı sektörüne işaret etmektedir. Çalışmanın mevcut durumda en önemli handikapı tarih aralığının 2014 sonrasına taşınmamış olmasıdır. Bununla birlikte, çalışma kapsamındaki toplu konut projelerinin yapı projelerinden, zemin ölçülerine varan şekilde analizi ile zamansal değişime dair ciddi bir referans ortaya konulmuştur. Birim alandaki yapı yoğunluğu ve kütle artışı ölçüye dayalı verilere bulgulara dökülmüş ve sektördeki araştırmacılar için bir veri kaynağı oluşturulmuştur. Farklı disiplinlerin derinleşen irdelemeleriyle tespitlerin daha ileri taşınması yolu açıktır.

**Tablo 1.** Çalışma kapsamındaki toplu konut projeleri ve tamamlanma tarihleri

Proje	Yahya Kaptan	Yuvam Akarca	İzmitkent 1. Etap	İzmitkent 2. Etap	İzmitkent 3. Etap	Yuvacık Bahçekent	İzmitkent 4. Etap	Yıldız Konutları	İzmitkent 5. Etap
Yılı	1990	2000	2008	2008	2010	2010	2011	2011	2014

**Gerçekleşen KAKS/Emsal:** İmar planlarında belirtilen yapılaşma koşulları, zeminde fiili durumu tam anlamıyla yansıtmayabilir. Bu yüzden, gerçekleşen KAKS/Emsal, ifadesi kullanılmıştır. Bu oran, sıva, kaplama ile mimari tasarım sürecinde belirlenen emsal dışı alanları ve benzeri faktörleri de kapsar.

**Gerçekleşen TAKS:** Gerçekleşen KAKS/Emsal gibi toplu konut projelerinde yer alan konut bloklarının zeminde kapladığı alanı ifade eder.

**Aktif Yeşil Alanlar:** Toplu konut projelerinde yer alan, toplumun sosyal etkileşimde bulunabileceği aktif olarak kullanılabilen yeşil alanlar olarak tanımlanmıştır. Konut bahçeleri, umumi yeşil alanlar bu alana dahil edilmiştir.

**Pasif Yeşil Alanlar:** Toplu konut projelerinde yer alan, refüjler, ormanlık alanlar, mesire alanları ve şevli yeşil alanlar bu alan içerisinde tanımlanmıştır.

**Oyun Alanları :** Çocuk oyun yerleri, çocuk bahçesi oyun alanları bu kapsamda ele alınmıştır.

**Spor Alanları:** Futbol sahası, basketbol sahası, tenis kortu gibi belirli bir spor veya aktivite için özel olarak tasarlanmış alanlar ayrıca çeşitli spor aletlerini içerisinde barındıran umuma açık alanlar bu kapsamda ele alınmıştır.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

**Otopark Alanları:** Toplu konut projelerinde yer alan açık otoparkları kapsamaktadır. Yıldız Konutlarının otopark alanı olarak ayrılan kısımlarının büyük bir çoğunluğu yer altında tanımlandığı için bu alanlar da otopark alan hesabına dahil edilmiştir.

**Bina Yakınlığı İndeksi:** Toplu konut bloklarının her birinin komşu bloklara olan mesafelerinin ortalamasından elde edilen ortalama mesafe değerinin, bina yüksekliklerine oranlanması sonucu ortaya çıkan indeks değeridir. Bu indeksin yükselmesi, binalar arası aralığın genişlemesi ve dolayısıyla yaşam alanlarının daha ferah olması anlamına gelmektedir.

**Harita 1.** Çalışma kapsamındaki toplu konut projeleri



**Tablo 2.** Toplu konut projeleri yapı alanları

Projeler	Çalışma Alanının Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )	Konut Bloğu Taban Alanı Toplamı (m <sup>2</sup> )	Konut Bloğu İnşaat Alanı Toplamı (m <sup>2</sup> )	Konut Blok Sayısı	Konut Sayısı
Yahya Kaptan	1014379	93212	590015	210	5386
Yuvam Akarca	810760	70244	483857	132	3899
İzmitkent-1	40683	7257	80521	10	555
İzmitkent-2	34393	5942	68151	14	679
İzmitkent-3	30726	5129	27106	16	696
Yuvacık Bahçekent	43072	12753	60138	35	610
İzmitkent-4	10536	1803	21636	5	220
Yıldız Konutları	43596	8307	141226	11	687
İzmitkent-5	24322	3830	46467	8	494

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

**Tablo 3.** Toplu konut projeleri donatı alanları

Projeler	Aktif Yeşil Alan Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )	Pasif Yeşil Alan Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )	Oyun Alanı Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )	Spor Alanı Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )	Otopark Alanı Yüzölçümü (m <sup>2</sup> )
Yahya Kaptan	551192	4818	6379	36887	63213
Yuvam Akarca	303416	162879	6384	3812	51694
İzmitkent-1	14369	2802	632	573	6634
İzmitkent-2	13790	1510	319	458	3832
İzmitkent-3	14885	1026	449	0	3237
Yuvacık Bahçekent	15885	0	881	0	3608
İzmitkent-4	4738	0	216	0	983
Yıldız Konutları	12401	2298	1028	622	13268
İzmitkent-5	12467	0	464	499	2675

**Tablo 4** Mülakata Katılan Uzman Listesi

Sıra No	Uzman Katılımcı	Unvan	Mesleki Deneyim (Yıl)
1	MİM.1	Mimar	23
2	MİM.2	Mimar	40
3	MİM.3	Mimar	10
4	MİM.4	Mimar	13
5	MİM.5	Mimar	13
6	ŞPLN.1	Şehir Plancısı	7
7	ŞPLN.2	Şehir Plancısı	13
8	ŞPLN.3	Şehir Plancısı	17
9	ŞPLN.4	Şehir Plancısı	16
10	HM.1	Harita Mühendisi	37
11	HM.2	Harita Mühendisi	34
12	HM.3	Harita Mühendisi	27
13	MTHT.1	Müteahhit (Maden Mühendisi)	14
14	MTHT.2	Müteahhit (İnşaat Y. Mühendisi)	12
15	MTHT.3	Müteahhit (Harita Mühendisi)	39

# Bildiriler

## Teknik Oturum 3

### Hızlı Sunumlar

**Oturum Başkanı:** Doç. Dr. Utkan Mustafa Durdağ, *Artvin Çoruh Üniversitesi*

- 3.1. YBM-CBS Entegrasyonunda IFC-Citygml Dönüşümü: Açık Kaynak Araçların İncelenmesi ve Denenmesi (Bildiri Özet)  
(*Ebru Kaya, Güray Çetin, Yusuf Biçer, Bilal Erkek, Mustafa Yaman, Ekrem Ayyıldız*)
- 3.2. Akıllı Şehir Büyükçekmece: E-Belge Ekosistemi ile Sürdürülebilirlik ve Dijital Dönüşüm (Bildiri Özet)  
(*Yasin Sezer Türk, Onur Işık*)
- 3.3. NETCAD Veterinerlik Bilgi Sistemi (VETBİS) (Bildiri Özet)  
(*Cihan Çırak, Caner Ünsal*)
- 3.4. Kuzey Anadolu Fay Zonu Yedisu Segmenti Depremselliğinin Araştırılmasına Jeodezik Katkıları (Bildiri Özet)  
(*Oğuzhan Tecel, Hüseyin Duman, Bekir Poyraz, Kemal Özgür Hastaoğlu, Fatih Poyraz, Fikret Koçbulut, Yavuz Gül, Abdullah Kapıcıoğlu*)
- 3.5. GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler (Tam Metin)  
(*Şeyma Gökçe Çelik Kubat, Muzaffer Kahveci*)
- 3.6. GNSS ve SBAS Sistemlerinin Güncel Durumu ve Türkiye Perspektifi: 2025 Değerlendirmesi (Tam Metin)  
(*İlknur Mutlu Çetin, Ekrem Ayyıldız*)
- 3.7. Statik GNSS, Ağ-RTK, PPP-RTK ve SBAS Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması  
Yöntemlerinden Elde Edilen Koordinat Doğruluklarının Karşılaştırılması (Tam Metin)  
(*İbrahim Cihan Demirel, Muzaffer Kahveci*)
- 3.8. Farklı Yer Potansiyeli Modelleri ile TG-20 Jeoidinin Karşılaştırılması-ICGEM Parametrelerinin İncelenmesi  
(Tam Metin)  
(*İbrahim Ağgöz, İrem Köz, Serkan Doğanalp*)
- 3.9. İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi (Tam Metin)  
(*Abdurahman Yasin Yiğit, Halil İbrahim Şenol*)
- 3.10. Fotoğraftan Bilgiye, Harita Mühendisinin Gücü (Bildiri Özet)  
(*Hazal Arslanoğlu*)
- 3.11. Maden İşletmelerinde İşçi Güvenliği İçin IOT Tabanlı Maden İzleme Sistemi (Tam Metin)  
(*Nihan Çobancık, Burak Akpınar*)

## YBM–CBS Entegrasyonunda IFC–CityGML Dönüşümü: Açık Kaynak Araçların İncelenmesi ve Denenmesi

Ebru KAYA<sup>1</sup>, Güray ÇETİN<sup>1</sup>, Yusuf BİÇER<sup>2</sup>, Bilal ERKEK<sup>3</sup>, Mustafa YAMAN<sup>4</sup>, Ekrem AYYILDIZ<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Harita Dairesi Başkanlığı, Ankara

### Genişletilmiş Özet

Dördüncü Sanayi Devrimi ile birlikte şehirlerin dijital ikizler aracılığıyla modellenmesi, yönetim ve karar destek süreçlerinde stratejik bir öneme kavuşmuştur (Barricelli vd., 2019). Bu bağlamda, Yapı Bilgi Modellemesi (YBM/BIM) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS/GIS) arasındaki entegrasyon giderek önemli hâle gelmektedir (Azari, Li, Shaker ve Sattar, 2025).

YBM (BIM), yapıların fiziksel ve işlevsel özelliklerini dijital ortamda tanımlayan, tasarım, inşaat ve işletme süreçlerinde çok disiplinli veri paylaşımına olanak tanıyan bir yaklaşımdır (Xia, Liu, Efremochkina, Liu ve Lin, 2022). YBM verilerinin yaygın standart formatı olan Industry Foundation Classes (IFC), buildingSMART tarafından geliştirilmiş ve ISO 16739 standardı kapsamında uluslararası kabul görmüş açık bir veri modelidir. IFC, parametrik geometri ve semantik zenginlik ile mimari bileşenlerin detaylı tanımını mümkün kılmaktadır.

Diğer yandan, CBS mekânsal veri toplama, yönetme, analiz etme ve görselleştirme yetenekleriyle şehir ölçeğinde karar destek süreçlerinde kullanılmaktadır (Sulaiman, Liu, Binalhaj, Al-Kasasbeh ve Abudayyeh, 2021). CBS ortamında 3B şehir modellerinin temsili için CityGML standardı geliştirilmiştir. Açık Coğrafi Konsorsiyum (OGC) tarafından yayımlanan bu standart, kentsel nesnelere (bina, yol, köprü, bitki örtüsü vb.) farklı Detay Seviyeleri (LoD) ile tanımlayabilmektedir.

BIM–CBS entegrasyonunun önündeki teknik zorluk, IFC ve CityGML arasındaki veri yapısı farklılıklarıdır, IFC, yerel proje koordinat sistemine dayalı parametrik nesnelere çalışırken; CityGML, EPSG tabanlı küresel CRS kullanır ve yüzey tabanlı B-Rep geometrileri temel alır (Tan, Liang ve Zhu, 2023). Bu nedenle IFC–CityGML dönüşümü, yalnızca biçimsel bir veri aktarımı değil; geometri, semantik ve koordinat sistemlerinin uyulanmasını da gerektiren çok katmanlı bir süreçtir (El-Mekawy vd., 2012).

Literatürde IFC–CityGML dönüşümü için farklı araç ve yöntemler önerilmiştir. Bunlar arasında öne çıkanlar FME (Feature Manipulation Engine), BIMserver ve IfcOpenShell + Python yaklaşımlarıdır.

FME, görsel programlama tabanlı güçlü bir ETL (Extract–Transform–Load) platformudur. IFC dosyalarındaki parametrik geometrileri CityGML ile uyumlu MultiSurface temsillerine dönüştürebilir; semantik eşleştirmeleri kullanıcı tanımlı şemalarla yapabilir (Azari vd., 2025). Ayrıca affine dönüşümlerle EPSG tabanlı CRS'e aktarım sağlayarak CBS entegrasyonunu mümkün kılar (Safe Software, 2022). Ancak lisans maliyeti ve ölçeklenebilirlik sınırlılıkları bulunmaktadır.

BIMserver, Java tabanlı açık kaynak bir sunucu çözümüdür; IFC verilerinin depolanması, sürüm kontrolü ve paylaşımı için geliştirilmiştir. Ancak Hijazi, Krauth, Donaubaue ve Kolbe (2020) çalışmasına dayanarak, CityGML entegrasyonu temel dönüşümlerle sınırlı kalmakta, LoD yönetimi, geometri onarımı ve koordinat sistemleri konusunda kısıtlı yetenekler sunduğu görülmektedir.

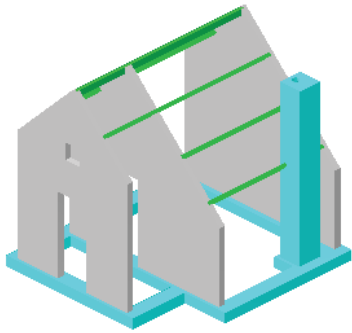
IfcOpenShell, Python ile birlikte kullanılan açık kaynaklı ve esnek bir çözümdür. IFC dosyaları doğrudan okunabilir, parametrik geometriler yüzey tabanlı yapılara dönüştürülebilir. Ayrıca Python ortamında kod seviyesinde özelleştirme ve otomasyon imkanı sunduğu için, özellikle araştırma ve kurumsal entegrasyon projelerinde tercih edilmektedir (IfcOpenShell, 2025). BIM–GIS entegrasyonu bağlamında IfcOpenShell gibi açık kaynaklı araçların kullanımı, geometrik dönüşüm ve veri entegrasyonunda esneklik sağlamaktadır (Arroyo Ohori vd., 2017).

Bu kapsamda iki farklı IFC dosyası üzerinden dönüşüm senaryosu gerçekleştirilmiştir. İlk örnek, buildingSMART tarafından yayımlanan Building-Architecture.ifc (IFC4.0.2.1) dosyası olup bina kabuğu, duvar ve çatı elemanlarını içermektedir, ek olarak yapısal unsurları barındıran Building-Structural.ifc dosyasında kullanılmıştır. Her iki dosyada da IFC formatı içerisinde EPSG:32760 (WGS 84 / UTM Zone 60S) bilgisi tanımlanmıştır. Ancak kullanılan dönüşüm betiğinde reprojection işlemi yapılmamakta, bu bilgi yalnızca `srsName` etiketi olarak CityGML çıktısına aktarılmaktadır. Örnek dosyalar yurt dışı kaynaklı olduğundan ve Türkiye'ye ait bir koordinat sistemini temsil etmediğinden, herhangi bir koordinat dönüşümü veya yeniden projeksiyon uygulanmamıştır.

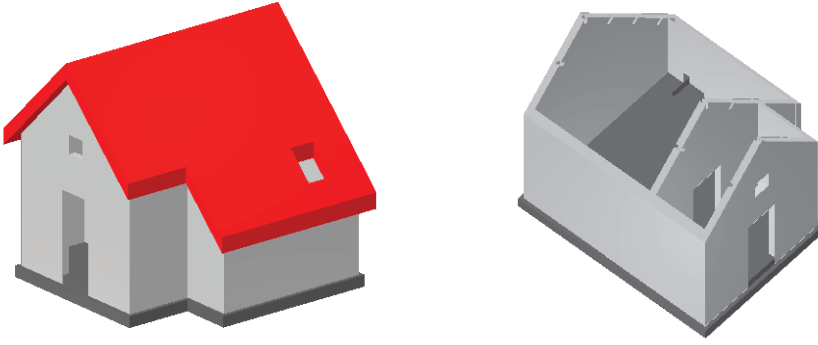
Çalışmada IfcOpenShell kütüphanesi ve geliştirilen Python betiği kullanılarak, bu iki IFC dosyası tek bir CityGML çıktısı içerisinde bütünleştirilmiştir. Dönüşüm süreci, öncelikle IFC dosyalarının IfcOpenShell kütüphanesi aracılığıyla belleğe alınması ile başlamış, ardından parametrik olarak tanımlı mimari ve yapısal elemanlar üçgen mesh ve yüzey temsillerine dönüştürülmüştür. Bu geometrik temsiller, CityGML'in LoD2 düzeyindeki tematik sınıflarıyla eşleştirilmiştir. Örneğin, **IfcWall** elemanları `bldg:WallSurface`, **IfcRoof** elemanları `bldg:RoofSurface` ve **IfcSlab** (floor/baseSlab) elemanları `bldg:GroundSurface` olarak aktarılmıştır. Ayrıca `IsExternal=False` özelliği taşıyan duvarlar, `bldg:InteriorWallSurface` olarak sınıflandırılmıştır. Dönüşüm sonucunda elde edilen `gml` dosyasında, CityGML 2.0 standardına uygun `CityModel` kök elemanı altında LoD2 seviyesinde bir bina nesnesi üretilmiş, her yüzeye özgün `gml:id` değerleri atanmış ve bina bilgileri (örneğin kat sayısı, yükseklik ve çatı tipi) `stringAttribute` etiketleriyle kayıt altına alınmıştır. Bunun yanı sıra, `Envelope` bilgisi otomatik olarak hesaplanmış, alt ve üst köşe koordinatları GML çıktısına işlenmiştir. Dönüşüm sürecinde elde edilen log raporları, işlenen yüzey sayıları, toplam yüzey alanı ve eksik yüzeylere ilişkin uyarılarla birlikte detaylı olarak üretilmiştir.



Şekil 1. buildingSMART tarafından yayımlanan *Building-Architecture.ifc* dosyasına ait mimari model örneği

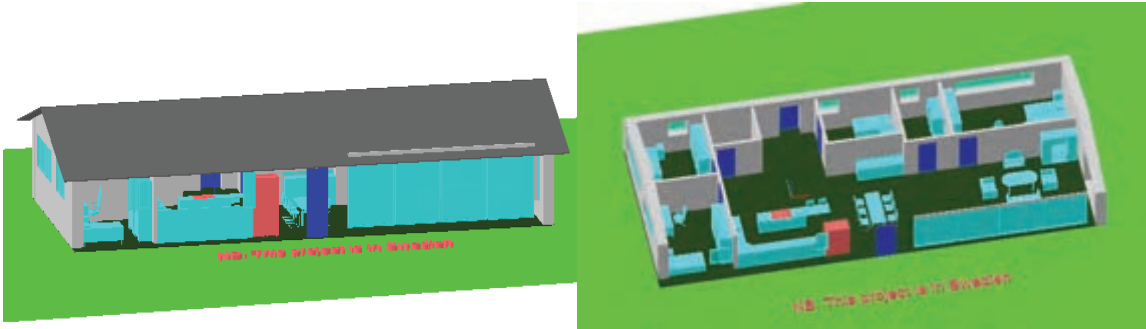


Şekil 2. buildingSMART tarafından yayımlanan *Building-Structural.ifc* dosyasına ait yapısal model örneği

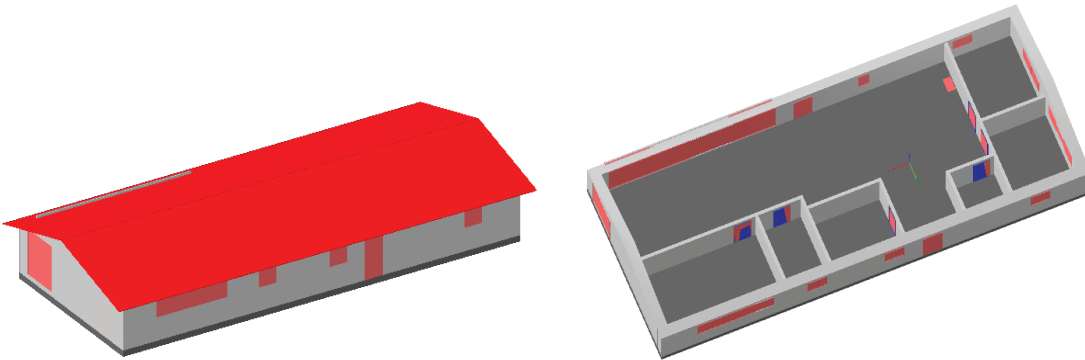


Şekil 3. IfcOpenShell betiği ile dönüştürülmüş CityGML çıktısı

İkinci örnek ise, BIM Whale tarafından yayımlanan açık kaynak *BasicHouse* modelidir (IFC2x3). Bu modelde, temel bina kabuğu yanında kapı ve pencere açıklıkları da yer almaktadır. Dönüşüm sürecinde geliştirilen Python betiği, IfcOpenShell kütüphanesiyle birlikte çalıştırılmış ve açıklıkların CityGML'e aktarılması amacıyla `--include-openings` parametresi etkinleştirilmiştir. Böylece `IfcDoor` ve `IfcWindow` nesnelere, CityGML çıktısında `GenericCityObject` ya da tercihe göre `bldg:Door` ve `bldg:Window` alt sınıfları altında temsile kavuşmuştur. Ayrıca `IfcOpeningElement` nesnelere, boşluk (VoidOpening) olarak işlenmiştir. Çıktı dosyası olan `gml`, CityGML 2.0 standardına uygun olarak üretilmiş, bina geometrisi LoD2 seviyesinde `WallSurface`, `RoofSurface` ve `GroundSurface` tematik sınıfları altında tanımlanmıştır.



Şekil 4. BIM Whale tarafından yayımlanan *BasicHouse.ifc* dosyasına ait örnek bina modeli



**Şekil 5.** *BasicHouse.ifc* modelinin IfcOpenShell betiği ile dönüştürülmüş CityGML çıktısı

Bu çalışma, IFC'den CityGML'e dönüşüm sürecinin yalnızca teknik bir veri aktarımı olmadığını, aynı zamanda kurumların ihtiyaçlarına göre şekillenen çok boyutlu bir entegrasyon süreci olduğunu ortaya koymuştur (El-Mekawy vd., 2012; Donkers vd., 2016). İlk örnekte bina kabuğu ve temel tematik yüzeylerin üretildiği görülürken, ikinci örnekte açıklıkların (kapı, pencere) de dönüştürülmesiyle modelin semantik zenginliği artırılmıştır. Her iki örnekte de TKGM'nin geliştirdiği ek öznitelikler doğrudan entegre edilememiş olsa da, yöntem ulusal veri setleri üzerinde uygulanabilirliğini göstermektedir (Usta ve Cömert, 2023).

Buna ek olarak, açık kaynak topluluklarında geliştirilen farklı araçlar da YBM verilerinin CBS ortamlarına aktarılmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, deneysel olarak açık kaynaklarla geliştirilen ifc2geojson (ifc2gis) kütüphanesi IFC formatındaki bina modellerini doğrudan GeoJSON'a dönüştürerek YBM verilerinin CBS ortamlarına taşınmasını mümkün kılmaktadır. Araç hem **Node.js** hem de tarayıcıda çalışmakta ve IFC verilerini **web-ifc** üzerinden okuyup **three.js** ile işleyerek 3B GeoJSON çıktısı üretmektedir. **EPSG koordinat sistemlerini** desteklemekte ve IFC4'teki **IfcMapConversion** sayesinde modelleri doğru konumlandırabilmektedir. Dönüşümde belirli IFC sınıfları filtrelenebilmektedir ve çıktılar **GeoJSON veya GeoPackage** formatında alınabilmektedir. (URL 1)

Bunun yanında, Avrupa Birliği Horizon Europe Programı kapsamında fonlanan ve TU Delft koordinatörlüğünde yürütülen CHEK (Change toolkit for digital building permit) projesi, yapı ruhsat süreçlerini dijitalleştirmeyi ve paydaşlar arasında şeffaf, izlenebilir bir değişiklik yönetimi sağlamayı hedeflemektedir. Projenin önemli katkılarından birisi ise YBM (özellikle IFC) ve kentsel veri modelleri (örneğin CityGML) arasında entegrasyonu güçlendirmesine katkı sunmasıdır (URL 1). CHEK projesi kapsamında IFC ve CityGML entegrasyonunu destekleyen çeşitli araçlar geliştirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen **GML2IFC** aracı CityGML'den IFC'ye dönüşüm imkânı sunarken (URL 3), **IFC\_BuildingEnvExtractor (BIM2GEO)** aracı IFC modellerinden bina kabuğunu farklı LoD seviyelerinde otomatik olarak çıkarıp CityJSON formatına dönüştürmektedir. Bu sayede hem düşük detaylı hızlı analizler hem de yüksek detaylı uygulamalar için uyarlanabilir çıktılar üretilebilmektedir. Ayrıca, IFC2x3, IFC4 ve IFC4x3 formatlarını desteklemekte ve georeferencing özelliğiyle CBS entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır (Van der Vaart, 2022). Diğer geliştirilen araçlardan biri olan **IfcGref** ise IFC dosyalarının coğrafi referanslama sürecini yönetmekte, mevcut IFC bilgileri veya eklenen ölçüm noktalarıyla doğru koordinat dönüşümleri sağlamaktadır. Böylelikle YBM verileri yalnızca geometrik değil, mekânsal bağlamıyla da uyumlu hâle gelerek dijital ikiz, ruhsat ve akıllı şehir uygulamalarında etkin biçimde kullanılabilir. (URL 4)

Dijital ikiz perspektifinde, IFC'nin mühendislik detayları ile CityGML'nin konumsal doğruluğu bir araya getirilerek akıllı şehir planlamaları için önemli bir temel oluşturulabileceği görülmektedir (Xia vd., 2022; Tan vd., 2023). Sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, açık kaynak tabanlı, ölçeklenebilir ve yeniden kullanılabilir yöntemlerin kullanılması; özellikle IfcOpenShell gibi araçların tercih edilmesiyle maliyet etkinliği ve esneklik sağlanabileceği öngörülmektedir (Arroyo Oho vd., 2017). Gelecek çalışmalarda, IFC5 ve CityGML 3.0 sürümlerine yönelik uyarlamalarla dönüşüm sürecinin daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir. Bu tür çalışmaların, Türkiye'nin 3B Şehir modelleri, dijital ikiz altyapısını ve ulusal dijital dönüşüm stratejilerini destekleme potansiyeli bulunmaktadır.

#### **Anahtar Kelimeler**

Yapı Bilgi Modelleme, IFC, CityGML, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Dijital ikiz

## REFERANSLAR

Arroyo Ogori, K., Ledoux, H. ve Stoter, J. (2017). Modelling and manipulating space subdivision of complex indoor environments. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-4/W5*, 1–8. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W5-1-2017>

Azari, P., Li, S., Shaker, A. ve Sattar, S. (2025). Georeferencing Building Information Models for BIM/GIS integration: A review of methods and tools. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 14*(5), 180. <https://doi.org/10.3390/ijgi14050180>

Barricelli, B. R., Casiraghi, E. ve Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access, 7*, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>

Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J., Stoter, J. ve Peters, R. (2016). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS, 20*(4), 547–569. <https://doi.org/10.1111/tgis.12162>

El-Mekawy, M., Östman, A. ve Hijazi, I. (2012). An evaluation of IFC–CityGML unidirectional conversion. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 3*(5), 159–171. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2012.030526>

IfcOpenShell Contributors. (2025). *IfcOpenShell 0.8.3 documentation*. Retrieved from <https://docs.ifcopenshell.org/>

Hijazi, I. H., Krauth, T., Donaubaauer, A., & Kolbe, T. (2020). 3DCITYDB4BIM: A system architecture for linking BIM server and 3D CityDB for BIM-GIS-integration. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-4-2020, XXIV ISPRS Congress (2020 edition)*, 73–80. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2020-73-2020>

Safe Software. (2025). *FME Desktop Documentation*. Safe Software. <https://docs.safe.com>

Sulaiman, M., Liu, H., Binalhaj, M., Al-Kasasbeh, M. ve Abudayyeh, O. (2021). ICT-based integrated framework for smart facility management: An industry perspective. *Journal of Facilities Management, 19*(5), 652-680. <https://doi.org/10.1108/JFM-11-2020-0084>

Tan, Y., Liang, Y. ve Zhu, J. (2023). CityGML in the integration of BIM and GIS: Challenges and opportunities. *Buildings, 13*(7), 1758. <https://doi.org/10.3390/buildings13071758>

Usta, Z. ve Cömert, Ç. (2023). TKGML CityGML veri modeli için bir uygulama şeması geliştirilmesi. *19. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildirileri*, Ankara, Türkiye.

Van der Vaart, J. A. J. (2022). *Automatic building feature detection and reconstruction in IFC models* (Master's thesis, Delft University of Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment). TU Delft Repositories. <https://resolver.tudelft.nl/uuid:db6edbf6-5310-47db-b2c7-3d8e2b62de0f>

Xia, H., Liu, Z., Efremochkina, M., Liu, X., & Lin, C. (2022). Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society, 84*, 104009. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104009>

URL 1: <https://citygeometrix.com/ifc2gis/>

URL 2: <https://chekdbp.eu/>

URL 3: <https://github.com/peterrdf/gml2ifc>

URL 4: <https://ifcgreg.bk.tudelft.nl/templates/guid.html>

## Akıllı Şehir Büyükçekmece: e-Belge Ekosistemi ile Sürdürülebilirlik ve Dijital Dönüşüm

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı şehirler, e-belge yönetimi, e-ruhsat, e-iskan, e-numarataj, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Sürdürülebilirlik, Kâğıtsız belediyecilik, Kamu dijital dönüşümü

Belediyeler, halka en yakın hizmet birimleri olarak yalnızca sorumlu oldukları sınırlar içinde değil, ülkemizin ve dünyanın geleceği için de doğru, hızlı ve sürdürülebilir çözümler üretmekle yükümlüdür. Büyükçekmece Belediyesi olarak biz de “Akıllı Şehir Büyükçekmece” vizyonu doğrultusunda, hizmetlerimizi dijitalleştirerek hem vatandaşımıza en doğru ve en hızlı şekilde ulaşmayı hem de yeşil ve yaşanabilir bir gelecek için kaynaklarımızı verimli kullanmayı temel ilke edindik. Bu yaklaşımın somut çıktısı olan entegre e-belge ekosistemimiz; e-Çap, e-Ruhsat, e-İskan, e-Numarataj, e-Asansör, e-Eksper, e-Bilirkişi ve e-Yapı Tatil Tutanığı uygulamalarını bir bütün olarak hayata geçirerek, kâğıda dayalı, zaman alan ve tekrarlı işlemleri dijital, izlenebilir ve çevreci süreçlere dönüştürmüştür.

Dijital dönüşümün odağında, başvurudan incelemeye, ödemedен onaya ve arşivlemeye kadar uzanan tüm akışların web tabanlı platform üzerinden uçtan uca yönetilmesi yer almaktadır. Vatandaşlarımız evlerinden, iş yerlerinden veya mobil cihazlarından tek ekrandan başvurularını yapabilmekte; kimlik doğrulama, belge yükleme, tahakkuk, ödeme ve bilgilendirme adımlarının tamamını çevrimiçi tamamlamaktadır. Sürecin her aşamasında şeffaflık esastır; neyin hangi aşamada olduğu, hangi belgelerin kontrol edildiği ve bir sonraki adımda vatandaşın ne yapması gerektiği anlık bildirimlerle aktarılmaktadır. Böylece “başvuru durumu belirsizliği” gibi sık karşılaşılan sorunlar ortadan kalkmakta, belediyeye defalarca gelmesini gerektiren klasik işleyiş yerini net, izlenebilir ve hızlı bir hizmet anlayışına bırakmaktadır.

Bugün Büyükçekmece’de e-belge ekosisteminin omurgasını oluşturan modüller birbirini tamamlar biçimde çalışmaktadır. e-Çap ile parsel ve plan verileri doğrultusunda çap üretimi otomatikleşmiş, ölçü ve kısıt bilgileri standart bir formatta sunulur hale gelmiştir. e-Ruhsat ile projelerin başvurudan onaya kadar tüm yaşam döngüsü sayısal ortama taşınmış, proje revizyonları ve uygunluk kontrolleri denetlenebilir kayıtlar halinde tutulmuştur. Özellikle e-Ruhsat süreci kapsamında mimari, elektrik, mekanik, peyzaj, statik projeler ve zemin etüd raporlarının tamamı e-izmalı olarak sisteme yüklenmekte; bu belgelerin birer kopyası belediye bünyesinde yer alan ploter cihazlarından alınarak güvenli şekilde arşivlenmektedir. Böylece hem dijital arşivleme hem de fiziksel doğrulama katmanlarıyla güvenlik sağlanmakta, evrak sahteciliğinin önüne geçilmektedir. Bu uygulama, belediye ve vatandaş açısından güvenilirliği artırmakta, sürecin her aşamasının geçerliliğini resmi olarak garanti altına almaktadır.

e-Ruhsat süreçlerinin sağladığı faydalar yalnızca güvenlik ve hızla sınırlı değildir. Bu zamana kadar yapılan uygulamalarla ölçülebilir düzeyde çevresel ve ekonomik kazanımlar elde edilmiştir. 2024 yılı içerisinde yalnızca e-Ruhsat süreçlerinde **1.442.046 TL tasarruf sağlanmış**, toplamda ise bugüne kadar **9.315.300 TL’lik tasarruf** gerçekleşmiştir. Dijitalleşme sayesinde **4.864 ağacın kesilmesi önlenmiş**, doğaya salınacak **717 ton CO<sub>2</sub> emisyonu azaltılmıştır**. Kurum içi evrak dolaşımında sağlanan verimlilik ise **3.613.962 TL’lik ek tasarruf** üretmiştir. 2024 yılında e-Ruhsat modülüne yapılan **1.268 başvuru**, sistemin devreye girdiği tarihten bugüne kadar ise toplam **8.191 başvuru** ile önemli bir kullanıcı yoğunluğuna ulaşılmıştır. Bu veriler, dijitalleşmenin yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma ve kamu kaynaklarının etkin yönetimi açısından da stratejik bir kazanım olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu sürecin doğal devamı olan e-İskan ile yapının kullanıma geçiş evresindeki teknik ve idari uygunluk, tesisat ve güvenlik koşulları, erişilebilirlik düzenlemeleri ve asansör uygunluk raporları sayısal olarak doğrulanmakta; eksiklerin takibi ve tamamlanması çevrimiçi yürütülmektedir. e-Numarataj sayesinde adres üretimi kimlik ve sicil doğrulaması ile ilişkilendirilmiş, mahalle-ada-parsel tutarlılığı coğrafi doğrulamalarla güvence altına alınmıştır. e-Asansör uygulaması periyodik kontrol ve uygunsuzluk giderim sürecini standartlaştırırken; e-Eksper ve e-Bilirkişi, sahadan fotoğraflı ve konum damgalı raporların hızlı ve güvenilir şekilde oluşturulmasını sağlamaktadır. e-Yapı Tatil Tutanağı ise tespitlerin konum, zaman ve görsel kayıtlarla dijital tutulması ve gerekli yazışmaların otomatik oluşturulmasıyla süreci hızlandırmakta, denetim ve hukuki izlenebilirliği güçlendirmektedir.

Bu bütünsel yapı yalnızca bir yazılım dönüşümü değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği önceleyen bir kamu politikasıdır. Klasik işleyişte her bir ruhsat veya iskan dosyası onlarca sayfayı bulan basılı evraktan oluşurken, bugün aynı süreçler elektronik ortamda gerçekleşmektedir. Bir başvurunun ortalama sayfa yükünün ruhsat ve numaratajda yirmi beş, iskan dosyalarında kırka ulaşabildiği düşünülürse, yılda binlerce işlemin dijitalleşmesiyle yüz binlerce sayfa kâğıt tasarrufu sağlanmaktadır. Bu tasarruf yalnızca ağaçların korunması açısından değil, mürekkep, lojistik, fiziksel arşivleme ve imha gibi ikincil maliyetlerin azaltılması bakımından da anlamlıdır. Üstelik çevrimiçi başvuru ve randevusuz süreç yönetimiyle belediyeye yapılan yolculuklar azalmakta, toplu ya da bireysel ulaşım kaynaklı karbon salımı düşmektedir. Pandemi döneminde tüm dünyanın deneyimlediği gibi, kesintisiz kamu hizmeti için dijital kanalların varlığı yalnızca konfor değil, aynı zamanda süreklilik ve dayanıklılık meselesidir. Büyükçekmece’de imar ve şehircilik başta olmak üzere ilgili birimlerimizin iş akışlarının dijital platforma taşınması, olağanüstü durumlarda dahi hizmetin aksamadan yürütülmesini mümkün kılmaktadır.

Dijitalleşmenin en güçlü ayağı mekânsal zekâdır. Büyükçekmece’nin üç boyutlu dijital ikiz platformu ve kurumsal CBS altyapısı, e-belge çıktılarının yalnızca bir dosya veya PDF olarak kalmamasını, kentin yaşayan verisine dönüşmesini sağlar. e-Ruhsat ve e-İskan sonuçlarının 3B bina modelleri üzerinde zamansal katmanlarla izlenmesi, yapı stokunun dönüşüm dinamiklerinin anlaşılmasına; e-Numarataj üretimlerinin mahalle ölçeğinde sıcaklık haritalarıyla değerlendirilmesi, adres bütünlüğünün güçlenmesine ve hizmet erişilebilirliği açısından boşlukların görülmesine yardımcı olur. Böylece belediyenin farklı birimleri güncel ve ortak bir veri zemininde buluşur; saha denetimleri hedefe daha doğru yönelir, yatırım planlamaları veriye dayalı biçimde şekillenir.

Güvenlik ve uyumluluk bu dönüşümün vazgeçilmezidir. Kimlik doğrulamada OTP-SMS, sistem erişiminde rol ve yetki matrisi, tüm işlemler için zaman damgalı kayıt ve denetim izi standarttır. Kişisel verilerin korunması ve bilgi güvenliği ilkeleri doğrultusunda veri asgariyetine özen gösterilir; üretilen tüm belgeler güvenli dijital arşivde benzersiz kimliklerle saklanır, gerektiğinde e-imza ve KEP süreçleriyle uyumlu biçimde üretilebilir. Bu çerçeve hem vatandaşın hem de kurumun haklarını gözetken şeffaf ve denetlenebilir bir yapıyı garanti eder.

Operasyonel düzeyde sağlanan kazanımlar belirgindir. Başvuruların ilk seferde doğru yapılma oranı standart formlar ve yönlendirici arayüzler sayesinde artmakta; ön inceleme ve karar süreleri kısalmakta; “kim, neyi, ne zaman yaptı?” sorusunun cevabı tek tıkla görülebilmektedir. Vatandaş memnuniyeti, başvuru sahibinin süreç boyunca düzenli bilgilendirilmesiyle yükselirken; belediye personelinin tekrar eden işlemler yerine kontrol ve

değerlendirme gibi daha nitelikli işlere zaman ayırması mümkün olmaktadır. Bu sayede kâğıt, baskı ve arşiv maliyetlerindeki düşüşe ek olarak iş gücü verimliliği de artmaktadır.

Büyükçekmece’de kurulan e-belge ekosistemi modüler yapısı gereği ölçeklenebilir ve uyarlanabilir. Veri standartlarının kararlılığı, kullanıcı deneyimi odaklı ekranlar, eğitim ve değişim yönetimi adımlarının planlı yürütülmesi ve açık API yaklaşımı, farklı ölçeklerdeki belediyelerin de bu modeli kısa sürede hayata geçirebilmesine imkân sunar. Yakın gelecekte yapay zekâ destekli belge kontrolü, eksik ya da hatalı evrakın başvuru anında tespiti, görsel ve metin tabanlı saha denetimi asistanları ve iş yükü öngörülerini ile süreçlerin daha da hızlanması öngörülmektedir. Tüm bu adımların etkisinin düzenli izlenebilmesi için ortalama işlem süresi, ilk seferde doğru başvuru oranı, ret gerekçeleri dağılımı, dijital arşiv büyüklüğü, kâğıt eşdeğeri tasarruf ve bildirim teslim başarısı gibi göstergelerin yönetim panolarında yayımlanması hedeflenmektedir.

Sonuç olarak Büyükçekmece Belediyesi, e-Çap’tan e-Ruhsat ve e-İskan’a, e-Numarataj’dan e-Asansör, e-Eksper, e-Bilirkişi ve e-Yapı Tatil Tutanağı’na uzanan entegre e-belge ekosistemi ile akıllı şehir yaklaşımını somut ve sürdürülebilir bir kamu hizmeti pratiğine dönüştürmüştür. Kâğıtsız süreç, şeffaf yönetim, mekânsal zekâ ve dijital arşiv kültürü bir araya geldiğinde, hem vatandaşımızın aldığı hizmetin kalitesi yükselmekte hem de kentin veriye dayalı yönetimi güçlenmektedir. Büyükçekmece’nin “yeşil gelecek için dijital dönüşüm” anlayışı, bugünün gereksinimlerini karşılarken gelecek kuşaklara daha yaşanabilir bir kent bırakma sorumluluğunun da gereğini yerine getirmektedir.

## NETCAD VETERİNERLİK BİLGİ SİSTEMİ (VETBİS)

Cihan ÇIRAK<sup>1</sup>, Caner ÜNSAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Netcad Yazılım A.Ş., Nidakule Göztepe, 34732, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Netcad Yazılım A.Ş., Bilkent Cyberpark, 06800, Ankara, Türkiye

### Genişletilmiş Özet

Türkiye, sokak hayvanı popülasyonunun yoğun olduğu ülkelerden biridir. Özellikle kedi ve köpekler, başta büyükşehirler olmak üzere birçok kentte kamusal yaşamın bir parçası hâline gelmiştir. Bu durumun oluşmasında vatandaşların sokak hayvanlarına karşı gösterdiği sevgi, şefkat ve duyarlılığın önemli bir payı bulunmaktadır. İyi niyetli fakat kontrolsüz besleme alışkanlıkları ve bireysel koruma çabaları zamanla sokak hayvanı sayısında artışa neden olmakta; bu artış da toplum sağlığı, güvenlik ve çevre yönetimi açısından yeni gereksinimler yaratmaktadır. Sokak hayvanlarının kent kültürüne en fazla entegre olduğu şehirlerin başında İstanbul gelmektedir. Tarih boyunca kedilere gösterilen hoşgörü ve ilgiyle öne çıkan kent, günümüzde uluslararası alanda “Kedi Başkenti” olarak anılmakta ve bu unvanıyla dikkat çekmektedir. Bu sosyo-kültürel arka plan, yerel yönetimlerin sorumluluğunu daha görünür hâle getirmekte; kısırlaştırma, aşılama, tedavi, rehabilitasyon ve sahiplendirme gibi hizmetlerin, hem hayvan refahını hem de toplum sağlığını gözetin bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesini zorunlu kılmaktadır.

Yerel yönetimlerin sunduğu veterinerlik hizmetleri, yalnızca hayvan sağlığı ile sınırlı bir faaliyet alanı değildir. Halk sağlığı, kent güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve kamu kaynaklarının etkin yönetimi açısından da stratejik bir bileşen niteliği taşır. Buna karşın süreçlerin uzun yıllar boyunca geleneksel yöntemlerle, yani telefon görüşmeleri, yüz yüze başvurular ve basılı formlar üzerinden sürdürülmesi; iş yükünün gereksiz yere artmasına, bilgi akışında gecikmeye, veri kaybına ve yanlış anlamalara neden olabilmektedir. Ayrıca vatandaşın başvurusunu, sürecin hangi aşamada olduğunu ve ne zaman sonuçlanacağını takip edememesi, hem memnuniyeti düşürmekte hem de kurum-vatandaş etkileşiminde şeffaflık algısını zayıflatmaktadır. Bu tablo, veterinerlik hizmetlerinin dijital dönüşümüne duyulan ihtiyacı somut biçimde ortaya koymaktadır.

Netcad tarafından geliştirilen Veterinerlik Bilgi Sistemi (VETBİS), söz konusu gereksinimlere yanıt veren bütüncül bir web platformudur. VETBİS; yerel yönetimlerin veterinerlik hizmetlerine ilişkin veri akışını düzenlemek, kurum içi süreçleri hızlandırmak, karar vericilere güvenilir göstergeler sunmak ve vatandaşla etkileşimi şeffaf, izlenebilir, ölçülebilir bir çerçeveye taşımak amacıyla tasarlanmıştır. Sistem; hayvan kayıtlarının standart biçimde tutulması, aşı ve tedavi bilgilerinin izlenmesi, klinik müdahalelerin belgelenmesi, sahiplendirme ve rehabilitasyon süreçlerinin yönetilmesi, saha yakalama-bırakma operasyonlarının planlanması ve sonuçlarının raporlanması gibi temel işlevleri tek bir çatı altında toplar. Böylece hem operasyonel verimlilik artar hem de veriye dayalı yönetim anlayışı desteklenir.

VETBİS'in en görünür yararlarından biri, bilgiye erişimi kolaylaştırmasıdır. Vatandaş, bakım veya tedavi için başvurusunu yaptığı hayvanla ilgili temel verileri, uygulanan işlemleri ve planlanan kontrolleri çevrimiçi olarak görebilir; süreci adım adım takip edebilir. Bu sayede mükerrer aramalar azalır, yanlış beklentiler minimuma iner ve şikâyetlerin önemli bir kısmı sistem üzerinden şeffaf biçimde yönetilebilir. Kurum tarafında ise dijital kayıt, standart form ve otomatik doğrulama adımları sayesinde veri kalitesi yükselir; dağıtık dosya ve tablolar yerine tekil kimlik ve vaka numaraları üzerinden izlenebilir bir yapı kurulur. Raporlama ve denetim süreçleri hızlanır; birim yöneticileri sahadaki yükü ve tıkanma noktalarını gerçek zamanlı panolardan izleyebilir hâle gelir.

Dijitalleşmenin ikinci belirgin katkısı, kaynakların etkin kullanımını mümkün kılmadır. Geleneksel kanallar üzerinden işleyen bilgi akışı, özellikle yoğun dönemlerde personelin mesaisinin hatırı sayılır kısmını tüketmekte; telefon trafiği, fiziksel evrak ve manuel listeleme gibi kalemler iş gücü kaybına yol açmaktadır. VETBİS, başvuru ve iş atama akışlarını çevrimiçi ortama taşıyarak otomatik bilgilendirmeler, durum güncellemeleri ve bekleme listeleri ile süreç yükünü azaltır. Ekiplerin görevlendirilmesi, randevu planlama, stok ve sarf takibi, aşı takvimleri ve tekrar çağrıları gibi operasyonel ayrıntılar sistematik hâle gelir. Böylece veteriner hekimler ve saha ekipleri, zamanlarını doğrudan klinik ve sahadaki asıl görevlere ayırabilir.

Kurumlar arası koordinasyon, sokak hayvanı yönetiminde çoğu zaman başarıyı belirleyen unsurlardan biridir. İlçe belediyeleri, bölgesel barınaklar, gönüllü ağları ve ilgili sivil toplum kuruluşları arasındaki eşgüdüm zayıf olduğunda mükerrer işlemler artabilir, tedavi sürekliliği kesintiye uğrayabilir ve kayıtların izlenebilirliği düşebilir. VETBİS, paydaşlar arasında ortak bir veri dili kurulmasını destekler; tekil hayvan kimliği ve vaka numarası üzerinden kurumlar arası veri paylaşımını kolaylaştırır. Yetki temelli görünürlük sayesinde her paydaş, yalnızca kendi rolü dahilindeki kayıtlara erişir; bu da hem güvenliği sağlar hem de işbirliğini hızlandırır.

Sistem mimarisi modüler ve ölçeklenebilir bir yaklaşımla kurgulanmıştır. Hayvan kayıt modülü; tür, cinsiyet, yaş, işaretleme ve konum bilgileriyle birlikte tıbbi geçmişi standart alanlar üzerinden toplar. Aşılama-tedavi modülü, planlı işlemler için takvim ve hatırlatma üretir; stok-sarf yönetimi ile entegre çalışarak kritik ilaç ve malzemeler için eşik uyarıları sağlar. Olay yönetimi modülü, vatandaş bildirimlerinin alınması, vakaların sınıflandırılması ve önceliklendirilmesi, ilgili ekip veya kliniğe atanması ve kapanışının belgelenmesi adımlarını tek akışta birleştirir. Sahiplendirme-rehabilitasyon modülü, aday değerlendirme, sözleşme ve sonrasındaki takip görüşmelerini kayıt altına alır. Bu modüller, yönetsel raporlama ve gösterge panoları ile beslenir; yöneticiler, operasyonel etkinliğe dair göstergeleri (ortalama müdahale süresi, kısırlaştırma/aşılama sayıları, barınak dolulukları vb.) dönemsel olarak izleyebilir.

Harita tabanlı işlevler, VETBİS'in kent yönetimiyle entegrasyonunu güçlendiren bir başka bileşendir. Vakaların mekânsal dağılımı ısı haritaları ve yoğunluk analizleriyle izlenebilir; kısırlaştırma ve aşılama kampanyalarının etkisi bölgesel olarak ölçülebilir. Böylece sınırlı kaynaklar, popülasyonun yoğunlaştığı alanlara yönlendirilir. Rota planlama özellikleri, ekiplerin görev noktaları arasında en verimli güzergâhı oluşturarak yakıt, zaman ve personel maliyetlerini düşürür. Acil vakalar için önceliklendirme kuralları tanımlanabilir;

Sorumlu Yazar:

Cihan Çırak, Netcad Yazılım A.Ş.

Tel: +90 (312) 265 05 11 | Faks: +90 (312) 265 05 20

E-posta: cihan.cirak@netcad.com

Bildirinin Türkçe Başlığı

saha dönüşlerinde elde edilen veriler anlık olarak harita katmanlarına yansır. Bu yaklaşım, planlamayı tepkisel değil, veriye dayalı ve önleyici bir çizgiye taşır.

Vatandaş katılımı ve iletişim kanalları, sistemin benimsenmesi ve sürdürülebilirliği açısından kritik önemdedir. VETBİS, başvuru ve bildirim süreçlerini sadeleştirerek kullanıcılara anlaşılır bir arayüz sunar; başvuruların durumu, randevular ve sonuçlar çevrimiçi olarak izlenebilir. Geri bildirim mekanizmaları, hem hataların hızla düzeltilmesini hem de hizmet kalitesinin ölçülmesini mümkün kılar. Duyuru ve kampanya modülleriyle kısırlaştırma günleri, aşılama taramaları veya sahiplendirme etkinlikleri hedef gruplara hızlıca duyurulabilir. Bu sayede kurum–vatandaş etkileşimi, şeffaflık ve güven ilkeleri temelinde güçlenir.

Veri güvenliği ve mevzuat uyumu, kamu bilişim projelerinde olmazsa olmazdır. VETBİS; rol tabanlı erişim, ayrıntılı denetim günlükleri, yetkilendirme ilkeleri, güvenli yedekleme ve şifreli veri aktarımı gibi yöntemlerle hassas kayıtların korunmasını sağlar. Yetkisiz erişimlerin önlenmesi ve işlemlerin izlenebilir olması, hem kurumsal güveni pekiştirir hem de olası denetimlerde açık ve tutarlı bir kayıt seti sunar. Standartlara uygun servisler aracılığıyla kurum içi–kurumlar arası sistemlerle entegrasyon mümkün hâle gelir; tekrar veri girişi ve tutarsızlık riski azalır.

Performans izleme ve etki değerlendirme, VETBİS'in değer önerisinin önemli bir boyutudur. Yetkili kullanıcılar, belirlenen anahtar performans göstergeleri üzerinden operasyonel verimliliği ve politika hedeflerine ulaşma düzeyini izleyebilir. Örneğin belirli bir bölgede kısırlaştırma müdahaleleri ile sokak hayvanı şikâyetlerinin seyri karşılaştırılabilir; mobil ekiplerin müdahale süreleri, barmak devir hızı, klinik kapasite kullanımı ve tedavi sonrası takip oranları gibi göstergeler dönemsel raporlarla sunulabilir. Bu görünürlük, bütçe planlaması ve kaynak tahsisini kolaylaştırır; kanıta dayalı karar alma kültürünü besler.

Bütün bu işlevler bir araya geldiğinde, VETBİS yalnızca bir yazılım değil; kent yönetiminde dijital dönüşümün taşıyıcı bir aracı olarak konumlanır. Hızlı nüfus artışı, göç ve kentleşmenin getirdiği yeni talepler karşısında geleneksel yöntemlerin sınırları belirginleşmektedir. Dijital platformların sağladığı standartlaşma, izlenebilirlik, şeffaflık ve ölçülebilirlik; hem hayvan refahı hem de toplum sağlığı hedeflerine ulaşmada belirleyici avantajlar yaratır. Ayrıca kurumsal öğrenme kültürü güçlenir: geçmiş müdahalelerden edinilen veriler, sonraki planlamalara ışık tutar; iyi uygulamalar çoğaltılır, zayıf halkalar hızla iyileştirilir.

Sonuç olarak, Türkiye’de sokak hayvanlarının kent yaşamının bir parçası olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, yerel yönetimlerin yürüttüğü veterinerlik hizmetlerinin etkinliği her geçen gün daha kritik hâle gelmektedir. Netcad Veterinerlik Bilgi Sistemi (VETBİS), sunduğu dijital çözümlerle belediyelerin iş yükünü hafifletmekte, süreçleri hızlandırmakta ve vatandaşların hizmetlere erişimini kolaylaştırmaktadır. Şeffaflık, izlenebilirlik ve veriye dayalı karar alma mekanizmaları sayesinde hem kurumsal kapasite artmakta hem de toplumun güveni güçlenmektedir. Bu bağlamda VETBİS’in yaygınlaşması ve sürekli geliştirilmesi, yalnızca veterinerlik hizmetlerinin kalitesini yükseltmekle kalmayacak; aynı zamanda kamu kaynaklarının verimli kullanılmasına, çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine ve hayvan refahının uzun vadede güvence altına alınmasına da anlamlı katkılar sunacaktır.

Anahtar Kelimeler

Yerel Yönetimler, Kent Bilgi Sistemleri, Toplum Sağlığı, Veterinerlik İşleri, Hayvan Severler, Netcad, Netigma

## Kuzey Anadolu Fay Zonu Yedisu Segmenti Depremselliğinin Araştırılmasına Jeodezik Katkıları

Oğuzhan Tecel<sup>1</sup>, Hüseyin Duman<sup>2,\*</sup>, Bekir Poyraz<sup>3</sup>, Kemal Özgür Hastaoğlu<sup>2</sup>, Fatih Poyraz<sup>2</sup>, Fikret Koçbulut<sup>4</sup>, Yavuz Gül<sup>5</sup>, Abdullah Kapıcıoğlu<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 58140, Sivas

<sup>2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

<sup>3</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, 58140, Sivas

<sup>4</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

<sup>5</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

<sup>6</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

### Genişletilmiş Özet

Kuzey Anadolu Fayı (KAF), doğuda Bingöl/Karlıova üçlü eklem bölgesinden batıda Saros Körfezi'ne kadar kabaca Karadeniz'e paralel olarak uzanan ve yaklaşık 1500 kilometre uzunluğa sahip, dünyanın en aktif sağ yanal doğrultu atımlı fay zonlarından biridir (Ketin, 1969; Şengör, 1979; Barka, 1992; Şengör vd., 2005). Bu fay, Anadolu ve Avrasya levhalarını birbirinden ayıran temel sınır konumundadır. Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) yıllık yer değiştirme oranlarının 20–25 mm/yıl aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, KAFZ yalnızca Türkiye'nin değil, tüm Akdeniz tektoniğinin en önemli deformasyon kuşaklarından birini temsil etmektedir. Yaklaşık 250 yıllık periyotlarla yıkıcı depremler ürettiği bilinen bu fay, Doğu Akdeniz Bölgesindeki en aktif ve en tehlikeli doğrultu atımlı faylardan biridir (Emre vd., 2018). Emre vd. (2018), KAFZ'nun fay geometrilerini ve sismik davranışlarını dikkate alarak zonu 38 ayrı geometrik segmente ayırmıştır. Erzincan civarında KAFZ, batıda 1939 Erzincan Depremi yüzey kırığı ve doğuda 1949 Elmalı Depremi yüzey kırığı ile ayrılan segmentlere bölünmektedir (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Zabcı vd., 2017). Bu bölünme içerisinde batıda Erzincan/Tanyeri'nden doğuda Bingöl/Yedisu'ya kadar uzanan Yedisu segmenti, yaklaşık 75 km uzunluğa ve N65°–70°B doğrultusuna sahiptir (Zabcı vd., 2017).

Zabcı vd. (2017) tarafından yapılan paleosismolojik çalışmalar sonucunda, bu segment üzerinde 27 Haziran 1583 ve 18 Temmuz 1784 tarihlerinde meydana gelen iki büyük deprem belgelenmiştir. 1784 depremi daha önce birçok araştırmacı tarafından dile getirilmiş olsa da (Barka, 1995; Okumura vd., 1994), 1583 depremi ilk kez Zabcı vd. (2017) tarafından rapor edilmiştir. Bu iki deprem arasında yaklaşık 201 yıl vardır. Paleosismolojik kanıtlara göre, Yedisu Segmenti'nin deprem tekrarlamaya aralığı son beş tarihsel deprem aktivitesi dikkate alındığında yaklaşık 200–250 yıl arasında değişmektedir (Okumura vd., 1994).

KAFZ'nun Yedisu Segmenti, 1784 yılından bu yana kırılmamış olup, yalnızca 26 Temmuz 1967 tarihinde meydana gelen ve yaklaşık  $M_s 5.6-6.0$  büyüklüğünde olduğu tahmin edilen depremde toplam 4 km yüzey kırığı ve 20 cm sağ yanal atım meydana gelmiştir (Ambraseys ve Jackson, 1998; Zabcı vd., 2017). Dolayısıyla, yaklaşık 241 yıldır büyük bir deprem üretmeyen bu segment, KAFZ'nun en önemli sismik boşluklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Zabcı vd., 2017; Akbayram vd., 2022, 2023; Alkan vd., 2023). Mogi (1979), sismik boşluğu: (i) bir fay kuşağında meydana gelmiş en büyük depremlerin yüzey kırıkları arasında kalan ve henüz kırılmamış boşluk bölgeleri; (ii) büyük depremlerden önce küçük depremlerin azaldığı veya tamamen ortadan kalktığı alanlar olarak üzere iki kategoriye ayırmıştır ki, Yedisu Segmenti bu tanımların her ikisine de uyan bir sismik boşluk niteliği sergilemektedir.

Zabcı vd. (2017), Wells ve Coppersmith (1994) denklemlerini kullanarak yaptıkları hesaplamalarda, 75 km uzunluğundaki Yedisu Segmenti'nin kırılması halinde yaklaşık  $M_w 7.2$  büyüklüğünde yıkıcı bir deprem üretebileceğini vurgulamışlardır. Benzer şekilde, Stein vd. (1996) Yedisu Segmenti'nin 1996–2026 yılları arasında  $M_w 6.7$  büyüklüğünde bir deprem üretme olasılığını hesaplamışlardır. Aktuğ vd. (2013) ise yaklaşık 80 km uzunluğunda bir yüzey kırığı senaryosunda, bu segmentin  $M_w 7.5$  büyüklüğünde bir deprem üretebileceğini ifade etmiştir. Bu bulgular, bölgenin depremselliğinin yalnızca tarihsel kayıtlarla değil, modern jeodezik yöntemlerle de ayrıntılı şekilde incelenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Jeodezik yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, Weiss vd. (2020) tüm Anadolu'yu kapsayan geniş ölçekli bir InSAR çalışması yürütmüş ve elde edilen hız verilerini toposentrik koordinat sistemine dönüştürerek yayımlamıştır. Bu veri seti kullanılarak çalışma alanı içindeki yüzey deformasyonları analiz edilmiştir. InSAR verilerine ek olarak, TUSAGA-Aktif ağına ait istasyonlardan (Kurt vd., 2023) ve Avrasya plakası sabit kabul edilerek Tatar vd. (2012) ile Özener vd. (2010) tarafından yayımlanan altı kampanya istasyonundan elde edilen hızlar da değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda, Yedisu Segmenti'ni temsil eden bir profil oluşturularak, deformasyonların fay-paralel bileşenleri incelenmiştir. Savage ve Burford (1973) ile Okada (1985) elastik dislokasyon modeline göre fay kayma hızı ve kilitleme derinlikleri fay davranışı hem simetrik hem de asimetrik yaklaşımlar ile ele alınmıştır. Ön sonuçlar, Yedisu Segmenti'nin kilitleme derinliğinin yaklaşık 37 km olduğunu ortaya koymuştur. Literatürde KAFZ için hesaplanan kilitleme derinliklerinin genellikle 10–15 km arasında değiştiği bilinmektedir. Ancak Duman vd. (2018), Yedisu Segmenti ve çevresindeki sismik aktivitenin 40 km'ye kadar derinliklerde etkili olabileceğini göstermiştir (bkz. ilgili yayın Şekil 9). Dolayısıyla 37 km'lik kilitleme derinliği bulgusu, mevcut bilgilerle uyumlu ve ihtimal dahilindedir. Fay kayma hızları açısından, simetrik modelde yaklaşık 12 mm/yıl'lık bir hız hesaplanmıştır. Aktuğ vd. (2013), Reilinger vd. (2006) ve Özener vd. (2010) tarafından yayımlanan hız verilerini kullanarak Karlıova üçlü eklemi ve çevresinde blok modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Ovacık Fayı ile Doğu Anadolu Fay Zonu arasında kalan ve Yedisu Segmenti'ni de içeren Kuzey Anadolu Fayı kesimi için yaklaşık 11.8 mm/yıl doğrultu atım bileşeni elde edilmiştir. Benzer şekilde, Kurt vd. (2023) Anadolu genelinde yapılmış tüm jeodezik ölçümleri birleştirerek hem Kuzey Anadolu

\* Sorumlu Yazar E-posta: hduan@cumhuriyet.edu.tr (Hüseyin Duman)

Kuzey Anadolu Fay Zonu Yedisu Segmenti Depremselliğinin Araştırılmasına Jeodezik Katkıları

hem de Doğu Anadolu fay zonları boyunca hız alanlarını modellemiştir. Yedisu Segmenti'ni de kapsayan fay parçası için, Okada (1985) elastik dislokasyon modeline dayalı olarak (çalışmadaki NAF01 ve NAF02 profilleri) 16 km sabit kilitlenme derinliği varsayımıyla yaklaşık 20 mm/yıl fay kayma oranı hesaplanmıştır. Jeodezik bulgulara ek olarak, Zabcı vd. (2015) iki farklı sahada yer alan ve toplam dört farklı yüzey şeklinin yer değiştirmelerini optik uyarımlı lüminesans (OSL) yaşlandırmalarıyla incelemiş ve fay kayma hızlarını 13.0–14.3 mm/yıl aralığında rapor etmiştir. Farklı olarak, asimetrik modelde ise kuzeydoğu bloğu için 16.4 mm/yıl, güneybatı bloğu için ise 8 mm/yıl değerleri elde edilmiştir.

TÜBİTAK-1001 124Y204 numaralı proje kapsamında, KAFZ Yedisu Segmenti'nin depremselliği hem jeodezik hem de sismolojik yöntemlerle ele alınacaktır. Jeodezik açıdan hem GNSS/GPS ölçümleri hem de InSAR teknolojileri kullanılacaktır. Ön çalışmalar kapsamında Weiss vd. (2020) tarafından yayımlanan InSAR verileri analiz edilmiş ve 2014 Ekim'den itibaren yaklaşık 5 yıllık süreyle karşılık gelen deformasyon hızları değerlendirilmiştir. Projede, Avrupa Uzay Ajansı'nın Sentinel-1 A/B/C radar uydularına ait alçalan ve yükselen yöre verilerinin analiz edilmesiyle zaman serileri günümüze kadar uzatılacak, böylelikle yaklaşık 11 yılı aşan bir veri seti oluşturulacaktır. Bu uzun süreli zaman serileri, intersismik deformasyonların güvenilir biçimde belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, mevcut TUSAGA-Aktif ve TUTGA istasyonlarına ek olarak, Tatar vd. (2012) ve Özener vd. (2010) tarafından yayınlanan kampanya istasyonları hızları da kullanılacak ve yeni ölçüm noktalarıyla ağ sıklaştırılacaktır. Proje kapsamında 5 adet sürekli GNSS istasyonu tesis edilmiş olup, bunlara ek olarak kampanya tipi ölçümlerle de istasyon sayısı artırılacaktır. Bu yoğun ağ, segment boyunca deformasyonların yüksek çözünürlükle belirlenmesini sağlayacaktır. Çalışmanın hedeflerinden biri, jeodezik yöntemlerle elde edilen yüzey deformasyonları ve gerinim birikimlerinin, aletsel ve tarihsel sismik kayıtlar aracılığıyla hesaplanacak sismik gerinim birikimleriyle karşılaştırılmasıdır. Bu sayede, segmentin deprem potansiyeli daha güvenilir bir şekilde değerlendirilebilecektir. Nihai olarak, Yedisu Segmenti'nin güncel davranışı, kilitlenme derinliği, kayma hızı ve asimetrik tektonik özellikleri ortaya konularak, bölgenin sismik tehlikesine ilişkin daha sağlıklı öngörüler yapılabilecektir. Bu çalışma, yalnızca akademik bilgi üretmekle kalmayıp, aynı zamanda bölgesel ölçekte deprem tehlikesinin daha iyi anlaşılmasına ve olası afet risklerinin azaltılmasına da katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler

Kuzey Anadolu Fay Zonu, Yedisu Segmenti, Deprem, GNSS, InSAR

Kaynaklar

- Akbayram, K., Bayrak, E., Pamuk, E., Özer, Ç., Kıranşan, K., ve Varolğüneş, S. 2022. "Dynamic sub-surface characteristic and the active faults of the Genç District locating over the Bingöl Seismic Gap of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey", *Natural Hazards*, 114(1), 825-847.
- Akbayram, K., Kıranşan, K., Varolğüneş, S., Büyükaşınar, P., Karasözen, E., ve Bayık, Ç. 2023. "Multidisciplinary analyses of the rupture characteristic of the June 14, 2020, Mw 5.9 Kaynarıpınar (Karlova, Bingöl) earthquake reveal N70E-striking active faults along the Yedisu Seismic Gap of the North Anatolian Fault Zone", *International Journal of Earth Sciences*, 112(2), 489-509.
- Aktug, B., Dikmen, U., Dogru, A., ve Ozener, H. 2013. "Seismicity and strain accumulation around Karlova triple junction (Turkey)", *Journal of Geodynamics*, 67, 21-29.
- Alkan, H., Öztürk, S., ve Akkaya, İ. 2023. "Seismic Hazard Implications in and Around the Yedisu Seismic Gap (Eastern Türkiye) Based on Coulomb Stress Changes, b-Values, and S-wave Velocity", *Pure and Applied Geophysics*, 180(9), 3227-3248.
- Ambraseys, N. N., ve Jackson, J. A. 1998. "Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region", *Geophysical Journal International*, 133(2), 390-406.
- Barka, A. A. 1992. "The north Anatolian fault zone", *Annales tectonicae*, 6, 164-195.
- Barka, A. A., ve Kadinsky-Cade, K. 1988. "Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity", *Tectonics*, 7(3), 663-684.
- Barka, A.A. 1995. "Erzincan ve Çevresini Etkileyen Kuzey Anadolu Fayı'nın iki Segmenti ve Ovacık Fayı üzerinde paleosismolojik çalışmalar", TÜBİTAK.
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadıroğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., ... & Kurt, A. İ. 2018. "Seismotectonic database of Turkey". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3277-3316.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013, "Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü", Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- Ketin, I. 1969. "About the North Anatolian Fault", *Bull. Miner. Res. Explor. Inst. Turkey*, 72, 1-29.
- Kurt, A. İ., Özbakır, A. D., Cingöz, A., Ergintav, S., Doğan, U., ve Özarpacı, S. 2023. "Contemporary velocity field for Turkey inferred from combination of a dense network of long term GNSS observations", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(3), 275-293.
- Mogi, K. 1979. "Two kinds of seismic gaps", *Pure and Applied Geophysics*, 117, 1172-1186.
- Okada, Y. 1985. "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135-1154.
- Okumura, K., Yoshioka, T., Kuşçu, İ., Nakamura, T., ve Suzuki, Y. 1994. "Recent surface faulting on the North Anatolian Fault East of Erzincan Basin, Turkey—a trenching survey", *Summaries of Researches using AMS at Nagoya University (in Japanese with English Abstract)*.
- Özener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Dogru, A., Cakmak, R., Turgut, B. ve Dogan, U. 2010. "Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone", *Journal of Geodynamics*, 49(3-4), 141-150.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, h., Kadırov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., ve Karam, G. 2006. "GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5).

*Tecel, O., Duman, H., Poyraz, B., Hastaoğlu, K.Ö., Poyraz, F., Koçbulut, F., Gül, Y., Kapıcıoğlu, A.*

- Savage, J. C., ve Burford, R. O. 1973. "Geodetic determination of relative plate motion in central California", *Journal of Geophysical Research*, 78(5), 832-845.
- Şengör, A. M. C. 1979. "The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance", *Journal of the Geological Society*, 136(3), 269-282.
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., ve Rangin, C. 2005. "The North Anatolian fault: A new look", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 37-112.
- Stein, R. S., Dieterich, J. H., ve Barka, A. A. 1996. "Role of stress triggering in earthquake migration on the North Anatolian Fault", *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(4), 225-230.
- Tatar, O., Poyraz, F., Gürsoy, H., Cakir, Z., Ergintav, S., Akpınar, Z., Koçbulut, F., Sezen, F., Türk, T., Hastaoğlu, K.Ö., Polat, A., Mesci, B.L., Gürsoy, Ö., Ayazlı, İ.E., Çakmak, R., Belgen, A. ve Yavaşoğlu, H. 2012. "Crustal deformation and kinematics of the Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) from GPS measurements". *Tectonophysics*, 518, 55-62.
- Weiss, J. R., Walters, R. J., Morishita, Y., Wright, T. J., Lazecky, M., Wang, H., Hussain, E., Hooper, A.J., Elliott, J.R., Rollins, C., Yu, C., Gonzales, J., Spaans, K., Li, Z., ve Parsons, B. 2020. "High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data", *Geophysical Research Letters*, 47(17), e2020GL087376.
- Wells, D. L., ve Coppersmith, K. J. 1994. "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.
- Zabcı, C., Akyüz, H. S., ve Sançar, T. 2017. "Palaeoseismic history of the eastern part of the North Anatolian Fault (Erzincan, Turkey): Implications for the seismicity of the Yedisu seismic gap". *Journal of Seismology*, 21, 1407-1425.
- Zabcı, C., Sançar, T., Akyüz, H. S., ve Kıyak, N. G. 2015. "Spatial slip behavior of large strike-slip fault belts: Implications for the Holocene slip rates of the eastern termination of the North Anatolian Fault, Turkey", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8591-8609.



# GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler

Şeyma Gökçe ÇELİK KUBAT<sup>1,\*</sup>, Muzaffer KAHVECİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim dalı, Konya.

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim dalı, Konya.

## Özet

Uyduların uzaydaki konumlarının oluşturduğu geometrik yapı, ölçüm doğruluğunu etkileyen temel unsurlardan biridir. Bu etkiyi değerlendirmek amacıyla çeşitli ölçütler kullanılarak uyduların konum dağılımına bağlı olarak alıcının konum güvenilirliği belirlenmektedir. Uydu geometrisinden farklı olarak gezen alıcı koordinatlarının doğruluğu onu çevreleyen referans istasyonlarının geometrisine ve alıcı-istasyon uzaklığına da bağlıdır. Schwarz vd. (2009)' nin yaptıkları çalışmada; gezen alıcı koordinatlarının daha yüksek doğrulukta hesaplanabilmesinin referans istasyonları ile gezici arasındaki mesafeye ve referans istasyonlarının geometrisine bağlı olup olmadığı araştırılmıştır. Bu bağlamda birimsiz bir büyüklük olan IDOP (Interpolative Dilution Of Precision) kavramını geliştirmiştir. Bu çalışmada, Schwarz vd. (2009), çalışması referans alınarak birbirinden farklı uzaklıklarda ve farklı geometrik durumlarda değerlendirilen ülkemizdeki TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılarak IDOP değerinin ağ geometrisi sonuçları üzerinde etkili olup olmadığı araştırılmıştır. Böylece bu değişkenlerin uygulamalarda ya da daha kısa süreli ölçümlerde yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmede gerçekten faydalı olup olmadığı anlaşılacaktır.

## Anahtar Sözcükler

GNSS, IDOP, RMSD

## Abstract

The geometric structure formed by the satellites' positions in space is one of the fundamental factors affecting measurement accuracy. To evaluate this effect, various criteria are used to determine the receiver's position reliability based on the satellites' position distribution. Unlike satellite geometry, the accuracy of rover receiver coordinates also depends on the geometry of the surrounding reference stations and the receiver-station distance. In the study conducted by Schwarz et al. (2009), it was investigated whether the ability to calculate rover receiver coordinates with higher accuracy depends on the distance between the reference stations and the rover and on the geometry of the reference stations. In this context, they developed the concept of IDOP (Interpolative Dilution Of Precision), which is a unitless quantity. In this study, Schwarz et al. (2009) were referenced, and TUSAGA-Aktif stations evaluated at different distances and in different geometric situations in our country were used to investigate whether the IDOP value affects the network geometry results. Thus, it will be understood whether these variables are truly useful for obtaining high-accuracy results in applications or short-term measurements.

## Keywords

GNSS, IDOP, RMSD

## 1. Giriş

Günümüzde uydularla konum belirleme ve navigasyon sistemleri (GNSS), navigasyon ve ölçme alanlarında yaşanan önemli teknolojik gelişmelere paralel olarak; konum, hız ve zaman belirleme, navigasyon, haritacılık, güvenlik, hassas tarım, deprem ve hava durumu tahmini gibi disiplinleri de kapsayan, yaşantımızın vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir (Kumar, 2025). Diğer bir ifadeyle GNSS, hızlı, ekonomik ve güvenilir konum hizmeti sunmasıyla günlük yaşantımızda yerini almıştır. GNSS' in gerçek zamanlı dinamik konum belirleme özellikleri geliştikçe, tüm disiplinlerdeki önemi de giderek artmaktadır. GNSS ile birçok konum belirleme tekniği (statik, kinematik vb.) mevcut olup bunlardan gerçek zamanlı kinematik (RTK) tekniği önemli bir yöntemdir (Dong, 2023). GNSS ile konum belirleme yöntemlerinden birisi olan Ağ-RTK tekniği sayesinde gerçek zamanlı, yüksek kalitede, etkin ve performansı yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir (Kahveci, 2017). Klasik-RTK tekniğinin getirmiş olduğu mesafeye bağlı hatalar, Ağ-RTK tekniği ile büyük oranda ortadan kalkmış olup Ağ-RTK tekniğinde, gezen (rover) alıcıların 3 boyutlu gerçek zamanlı koordinatlarının 2-6 cm doğruluğunda belirlenmesi artık günümüzde standart bir uygulama haline gelmiştir (Çelik Kubat, 2025). Bu doğruluklara ise TUSAGA-Aktif (Türkiye) ağı örneğinde gezen alıcının yaklaşık 40-80 km etrafındaki Ağ-RTK referans istasyonlarından elde edilen atmosferik parametreler gezen alıcı noktasına enterpole edilerek ulaşılmaktadır. Bu nedenle Ağ-RTK tekniği, referans istasyonları ağına geometrik yapısını kullanarak hataları zamansal ve mekânsal olarak modellemeyi amaçlar. Ağ-RTK tekniğinde temel olarak, gezen alıcıya belirli uzaklıktaki referans istasyonlarından elde edilen ağ verileri hesaplanarak (modellenecek) son kullanıcılara hassas koordinat düzeltmeleri

\* Sorumlu Yazar: Tel:

E-posta: gkegcelik@gmail.com (Çelik Kubat Ş. G.), mkahveci@ktun.edu.tr (Kahveci M.)

sağlanmaktadır. Ancak, bu düzeltmelerin kalitesi, referans istasyonlarının arasındaki mesafeye, gezicinin konumuna ve ölçüm hatalarının özelliklerine bağlıdır (Kahveci vd., 2011; Kahveci, 2017). Bu durumda, gezicinin konumunun doğruluğu, ağıdan alınan atmosferik düzeltmelerin doğruluğuna ve bu düzeltmelerin kablosuz bağlantılarla kullanıcılara iletilme yöntemlerine bağlıdır. Ağın geometrisi önemlidir çünkü zayıf bir ağ yapısı, iyonosferik ve troposferik değişiklikleri doğru şekilde modelleyemeyebilir. Bu da gezici konumuna yapılan enterpolasyonla iletilen düzeltmelerin kalitesinin düşmesine ve dolayısıyla belirsizlik çözümünün güvenilirliğinin azalmasına neden olabilir (Tsakiri, 2011). Sonuç olarak hesaplanan gezen alıcı koordinatların doğrulukları büyük oranda Ağ-RTK referans istasyonlarının geometrisi ve gezen alıcı ile referans istasyonları arasındaki uzaklığa bağlıdır. Dolayısıyla referans istasyonunun örneğin 10 km yakınındaki bir gezen alıcı koordinatının doğruluğu ile referans istasyonuna örneğin 150 km uzaklıktaki bir gezen alıcı koordinatının doğruluğu bu parametrelere bağlı olarak farklı olacaktır (Çelik Kubat, 2025). İşte bu uzaklığa bağlı doğrulukların belirlenebilmesi için bazı ölçütlere gereksinim bulunmaktadır. Diğer taraftan, Ağ-RTK ölçülerinde gezen alıcı koordinatlarının doğruluğu onu çevreleyen (gezen alıcı koordinatlarının hesaplanmasında kullanılan) referans istasyonlarının geometrisine bağlı olarak da değişmektedir. Bu bağlamda birimsiz bir büyüklük olan IDOP (Interpolative Dilution Of Precision) kavramının kullanılabileceği değerlendirilmektedir. IDOP, ABD’de OPUS-RS isimli Ağ-RTK yazılımında kullanılmakta olan bir kavramdır.

## 2. Yöntem

Schwarz vd. (2009)’da yapılmış olan çalışmada; gezen alıcı koordinatlarının daha yüksek doğrulukta hesaplanabilmesinin referans istasyonları ile gezen alıcı arasındaki mesafeye ve referans istasyonlarının geometrisine bağlı olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla, alıcı ile referans istasyonları arasındaki uzaklığa bağlı olarak oluşan yerel ağ geometrisinin, atmosferik etkilerin düzeltilmesi amacıyla bir ölçüt olarak kullanılması için birimsiz bir büyüklük olan IDOP (Interpolative Dilution Of Precision) kavramı geliştirilmiştir. Buna göre IDOP, Ağ-RTK’nın yerel geometrik gücünü (etkisini) gezen alıcının konumuna göre belirlemektedir. Bu ise gezen alıcıyı çevreleyen Ağ-RTK referans noktalarındaki atmosferik koşulların gezen alıcı konumundaki değerlerinin enterpolasyon veya ekstrapolasyon ile hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu sebeple oluşan ağın geometrisi sunulan geometrik düzeltme için önemlidir ve hesaba katılmalıdır.

Schwarz vd. (2009)’da IDOP, aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  için  $(x_i, y_i)$  noktalarında gösterilen  $n$  bağımsız gözlem kümesi olduğu varsayılırsa, bu durumda

$$R = (\sum \Delta x_i^2)(\sum \Delta y_i^2) - (\sum \Delta x_i \Delta y_i)^2 \quad (1)$$

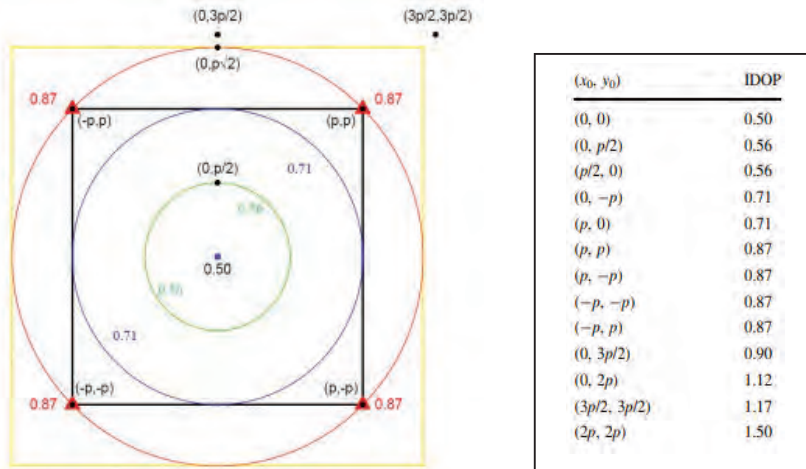
$$Q = nR + 2(\sum \Delta x_i)(\sum \Delta y_i) - (\sum \Delta x_i)^2(\sum \Delta y_i^2) - (\sum \Delta y_i)^2(\sum \Delta x_i^2) \quad (2)$$

Burada  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  olmak üzere

$\Delta x_i = x_i - x_0$  ve  $\Delta y_i = y_i - y_0$  ile ifade edilmektedir.

$$IDOP = \sqrt{\frac{R}{Q}} \quad (3)$$

Bu duruma göre Şekil 1’de belirtilen IDOP’un konumuna göre değişimini gösteren bir örnek verilmiştir.



Şekil 1 : Karenin köşesinde bulunan dört referans istasyonlu durum için konumun bir fonksiyonu olarak IDOP değerleri (Schwarz vd., 2009)

IDOP' un önemli bir özelliği, hesaplanan değerlerin mutlak anlamda referans istasyonu ile gezen alıcı arasındaki uzaklığa bağlı olmamasıdır. Bazlar arası mesafeler önemlidir. Çünkü Ağ-RTK sisteminde her bir referans istasyonu konumu için iyonosferik ve troposferik gecikmeler hesaplanır. Daha sonra gezen alıcı konumundaki atmosferik etkilerin hesaplanması için enterpolasyon kullanılır. Kullanılan enterpolasyon referans ve gezici arasındaki mesafeye ve dolayısıyla ağın geometrisine bağlıdır. Bu nedenle Schwarz vd. (2009) 'da yapılan çalışmada gezen alıcı konumunda hesaplanan RMSD (referans istasyonu-gezen alıcı arasındaki ortalama uzaklık) hata büyüklüğü Eşitlik 4'teki gibi hesaplanmaktadır. Aşağıdaki  $d_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  olmak üzere gezen alıcı ile  $i$ ' inci referans istasyonu arasındaki yatay mesafeleri ifade etmektedir.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (4)$$

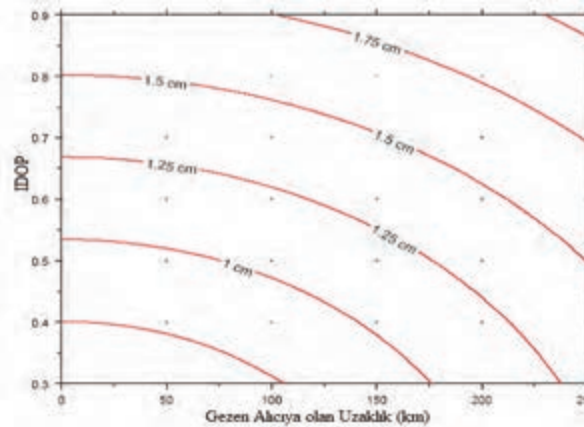
Bu yaklaşımla iki hata kaynağı belirlenmiş olup bunlar; atmosferik parametreleri belirlemede kullanılan hata ile enterpolasyon hatasıdır. İşte bu iki hata kaynağı birleştirilerek gezen alıcı konumunda hesaplanan atmosferik etkinin standart hatası Eşitlik 5 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\sigma(IDOP, RMSD) = \sqrt{(\alpha \cdot IDOP)^2 + (\beta \cdot RMSD)^2} \quad (5)$$

Burada,  $\alpha$  ve  $\beta$  deneysel olarak belirlenmiş sabit değerler olup,  $\alpha \cdot IDOP$  doğrusal enterpolasyondan gelen rastlantısal hatayı,  $\beta \cdot RMSD$  terimi ise atmosferik gecikmenin doğrusal olmamasından kaynaklanan ve uzaklığa bağlı olarak değişen sistematik hatayı gösterir. Zaman içerisinde  $\alpha$  ve  $\beta$  deneysel değerleri ile tam olarak giderilemeyen (CORS koordinatlarındaki hatalar, sinyal yansımaları (multipath) gibi etkiler nedeniyle oluşan hatalar vb.) diğer artık rastlantısal hataları absorbe edecek şekilde " $\gamma$ " sembolü ile gösterilen ilave bir sabit belirlenmesi üzerinde de çalışma yapılmıştır. Soler vd. (2011)'de yapılan çalışmada  $\gamma$  değeri ve ölçüm sürelerine göre değişkenlik gösteren  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  değerleri hesaplanmış ve bu durum Eşitlik 6 ile ifade edilmiştir.

$$\sigma(IDOP, RMSD) = \sqrt{(\alpha \cdot IDOP)^2 + (\beta \cdot RMSD)^2 + \gamma^2} \quad (6)$$

Örnek olarak, OPUS-RS Ağ yazılımında (6) eşitliği ile IDOP ve RMSD'nin fonksiyonu olarak hesaplanan yatay koordinatlardaki doğruluklar yerel koordinat sisteminde (n, e) Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Yatay (n,e) koordinatlarda, IDOP ve gezen alıcıdan uzaklığın fonksiyonu olarak elde edilecek standart hata (cm) (15 dk'lık gözlemler kullanılmıştır) (Schwarz vd., 2009)

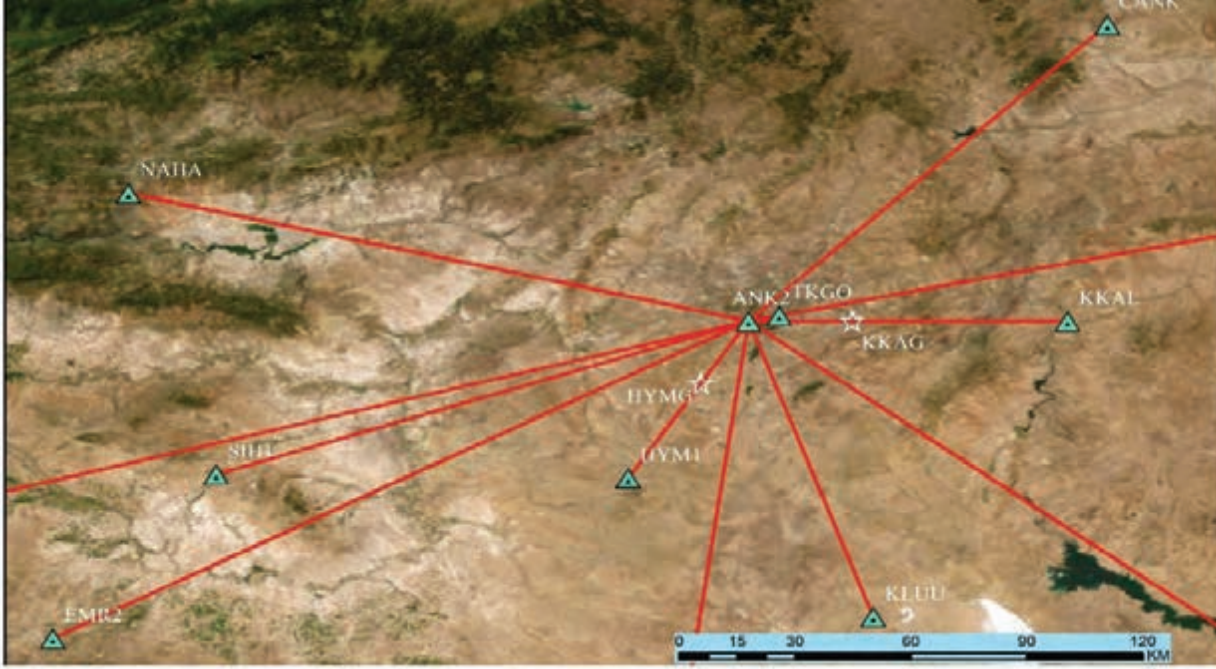
### 3. Bulgular

Bu çalışmada, referans istasyonlarının geometrisinin ve referans istasyonlarının gezen alıcıya uzaklığının, gezen alıcı koordinatlarının doğruluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Uygulamaya yönelik GNSS ölçü planı ve nokta yerleri Şekil 3'te gösterilmektedir.

## GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler

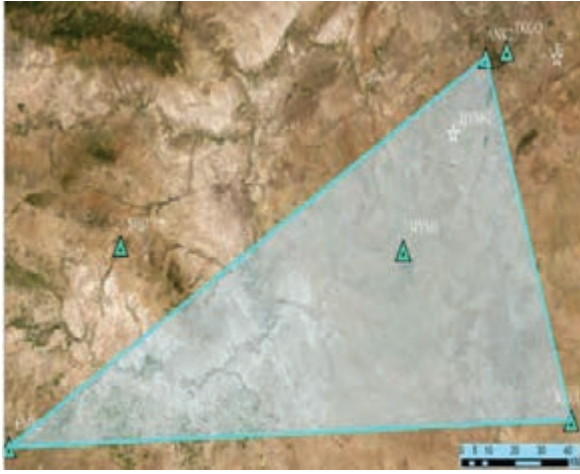


Şekil 3: Çalışmada seçilen TUSAGA-Aktif noktaları



Şekil 4: GNSS ölçüm düzeni ve noktaların konumları

Uygulama kapsamında, Ankara ilinde bulunan ANK2 TUSAGA-Aktif istasyonu merkez kabul edilerek, çevresinde farklı uzaklıklarda ve yönlere bulunan CANK (Çankırı), EMR2 (Emirdağ), HYM1 (Haymana), IZMI (İzmir), KKAL (Kırıkkale), KLS1 (Kilis), KLUU (Kulu), KNYA (Konya), NAHA (Nallıhan), SIH1 (Sivrihisar), SUN1 (Sungurlu) ve TKGO olmak üzere toplam 13 TUSAGA-Aktif istasyonu seçilmiştir. Ayrıca, yakın mesafelerdeki etkileri de gözlemleyebilmek amacıyla tarafımızca ölçümleri yapılan ANK2 noktasına yaklaşık olarak 20 km mesafede seçilen HYMG ve KKAG adlı 2 nokta daha çalışmaya dahil edilmiştir. Bu bağlamda, IDOP ve RMSD değerleri Türkiye'deki TUSAGA-Aktif istasyonları için hesaplanarak ağ geometrisinin gezen alıcı koordinatları ve baz uzunlukları üzerindeki etkileri Şekil 4'te belirtildiği gibi incelenmiştir.



Şekil 5: Üç TUSAGA-Aktif istasyonu için IDOP ve RMSD



Şekil 6: Dört TUSAGA-Aktif istasyonu için IDOP ve RMSD

Referans istasyonuna olan mesafeye bağlı olarak, gözlem süresinin konum doğruluğu üzerindeki etkilerini inceleyebilmek amacıyla, ölçüm verileri 15 dakika, 60 dakika, 120 dakika ve 24 saatlik (1440 dakika) periyotlar halinde elde edilerek ofis yazılımı ile analiz edilmiştir. Çalışma ile ölçü süreleri ve noktalar arasındaki uzaklıklara bağlı olarak koordinatlar ve baz uzunluklarındaki farklar ve bunların hataları (6 numaralı eşitlik) araştırılmıştır. ANK2, EMR2 ve KLUU istasyonlarının oluşturduğu üçgen geometrik yapı esas alınarak, Şekil 5'te konumları gösterilen HYMG ve HYM1 noktaları gezici alıcı olarak değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 6'da konumları verilen ANK2, KLUU, SIH1 ve NAHA istasyonlarının tanımladığı dörtgen geometrik yapı içerisinde de aynı noktalar gezici alıcı olarak kullanılmıştır. Her iki geometrik yapı için IDOP, RMSD ve koordinat bileşenlerine ait standart hata değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ağırlık merkezine daha yakın konumda bulunan HYM1 gezici alıcısının geometrik duyarlılığının daha yüksek olduğu ancak daha uzun süreli gözlemlerde HYMG noktasına ait koordinat bileşenlerinin daha düşük standart hata değerleriyle daha tutarlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

#### 4. Sonuç

Schwarz ve arkadaşlarının (2009) çalışmasında, kısa süreli GNSS gözlemlerinde konum doğruluğunu etkileyen temel faktörler ayrıntılı biçimde incelenmiştir. OPUS-RS yazılımı kullanılarak, referans istasyonlarında troposferik ve iyonosferik gecikmelerin tahmini yapılmış ve bu tahminlerin enterpolasyon yöntemiyle gezici alıcı konumuna aktarılabilirliği değerlendirilmiştir. Araştırmada, gezici alıcı koordinatlarının doğruluğunun, referans istasyonlarının konum geometrisi ve geziciyle olan uzaklıktan ne ölçüde etkilendiği analiz edilmiştir. Bu kapsamda, konum belirleme doğruluğunu değerlendirmede kullanılmak üzere birimsiz bir ölçüt olan IDOP kavramı tanıtılmış ve beklenen standart hata değerlerinin IDOP ile RMSD'ye bağlı olarak değiştiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, IDOP ve RMSD'nin gerçek zamanlı Ağ-RTK sistemlerinde atmosferik etkilerin modellenmesinde ve yüksek doğrulukta konum belirlemede dikkate alınması gereken kritik parametreler olduğu vurgulanmıştır.

Türkiye'de mevcut TUSAGA-Aktif ve diğer tüm Ağ-RTK sistemlerinde, bu parametrelerin belirlenerek sistem performansının değerlendirilmesinde bir ölçüt olarak kullanılması yararlı olacaktır. Bu kapsamda, ülkemiz geneli için yürütülecek deneysel çalışmalarla  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  katsayılarının tespit edilmesi, Türkiye'nin jeodezik ve coğrafi koşullarını temsil edecek biçimde yeni eşitliklerin (6) oluşturulması gerekmektedir. Bu tür bir yaklaşım, referans istasyonlarından elde edilen düzeltmelerin gezen alıcılara nasıl yansıtıldığını ve bu düzeltmelerin konum doğruluğu üzerindeki etkisini daha net biçimde ortaya koyacaktır.

RTK yöntemiyle koordinat belirlemeye yönelik yeni araştırmaların yapılmasıyla elde edilecek bulguların, özellikle TUSAGA-Aktif sisteminin haritacılıkta kullanımıyla ilgili mevcut mevzuatın Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY) dâhil istatistik ve dengeleme ilkeleri göz önünde bulundurularak gözden geçirilmesi gerektiği açıktır.

#### Kaynaklar

Çelik Kubat, Ş.G. (2025). GNSS Ağ-RTK Sisteminde Referans İstasyonları Geometrisinin ve Gezen Alıcıya Ola Uzaklığın Önemi. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya.



---

**GNSS Ağ-RTK Sisteminde Gezen Alıcı Koordinat Doğruluklarına Etki Eden Faktörler**

---

Dong, Y. (2023). Research on the application of carrier phase difference technology in geological exploration. In R. Rashid & Y. Zhang (Eds.), *Advances in mineral resources, geotechnology and geological exploration: Proceedings of the 7th International Conference on Mineral Resources, Geotechnology and Geological Exploration (MRGGE 2022), China* (pp. 132–136). <https://doi.org/10.1201/97810033194-20>.

Kahveci, M., Karagöz, H. ve Selbesoğlu, MO., (2011). Statik ve RTK GNSS Ölçüm ve Hesaplamalarının Karşılaştırılması, *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (104), 3-13.

Kahveci M., (2017). *Kinematik GNSS ve RTK CORS Ağları*, 2. Basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.

Kumar, S. (2025). Introduction to navigation satellite system (GNSSs) in a global perspective. In D. K. Gupta & A. K. Singh (Eds.), *GNSS applications in Earth and space observations: Challenges and prospective approaches* (pp. 3-12). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781032712444-2>.

Schwarz, C. R., Snay, R. A., & Soler, T. (2009). Accuracy assessment of the National Geodetic Survey's OPUS-RS utility. *GPS Solutions*, 13(2), 119–132. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0105-0>

Soler, T., Snay, R. A., Schwarz, C. R., & Choi, K. (2011). Accuracy of Rapid Static Online Positioning User Service (OPUS-RS) revisited. In *CORS and OPUS for engineers* (Ch. 12, pp. 88–99).

Tsakiri, M. (2011). Evaluation of GPS/Galileo RTK network configuration: Case study in Greece. *Journal of Surveying Engineering*, 137(4), 156–166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000054](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000054)

# GNSS ve SBAS Sistemlerinin Güncel Durumu ve Türkiye Perspektifi: 2025 Değerlendirmesi

İlknur Mutlu Çetin<sup>1\*</sup>, Ekrem AYYILDIZ<sup>1</sup>

<sup>1,2</sup> Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM), Ankara

## Özet

2025 yılı itibarıyla küresel uydu konumlama sistemleri (GNSS) en yüksek uydu sayısı ve sinyal çeşitliliğine ulaşmıştır. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou küresel kapsama sağlarken; QZSS ve NavIC sistemleri bölgesel doğruluk ve sürekliliği desteklemektedir. Bu gelişmeler, Multi-GNSS alıcılarıyla aynı anda ortalama 40 uydu gözlemini mümkün kılmaktadır. GNSS sistemlerini tamamlayan Uydu Tabanlı Düzeltme Sistemleri (SBAS) —WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, BDSBAS ve KASS— metre altı doğrulukla konumlama güvenilirliğini artırmaktadır. Türkiye’de EGNOS sinyali yalnızca batı bölgelerinde sınırlı katkı sağlamakta olup, resmi hizmet kapsamında değildir. Bu nedenle Türkiye Uzay Ajansı (TUA) ve TÜBİTAK tarafından yerli Bölgesel Konumlama ve Zamanlama Sistemi (BKZS) ve Rubidyum Atomik Frekans Standardı (RAFS) geliştirme çalışmaları başlatılmıştır. GNSS ve SBAS teknolojilerindeki bu ilerlemeler, Türkiye’nin konumlama altyapısında bağımsızlık, doğruluk ve süreklilik açısından stratejik bir dönüm noktası oluşturmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

GNSS, GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS, QZSS, NavIC, EGNOS, SBAS, TUA, BKZS

## 1. Giriş

İnsanoğlunun bulunduğu yeri belirleme çabası, ilkel yaşamdan günümüze kadar süregelen temel bir problem olmuştur. İkel yöntemlerle başlayan bu serüven, tarih boyunca gök cisimlerinin kullanımıyla zenginleşmiş, günümüzde ise yapay gök cisimleri olan uydularla yeni bir boyut kazanmıştır (Mutlu, İ., & Kahveci, M., 2019). Modern çağda, küresel uydu konumlama sistemleri sayesinde atmosferik ve arazi koşullarından bağımsız olarak, gökyüzünün görülebildiği her noktada bir GNSS alıcısı aracılığıyla anlık ve sürekli konum, zaman ve hız bilgisi elde etmek mümkün hale gelmiştir. Bu yöntem, pratikliği ve ekonomikliğinden dolayı en yaygın kullanılan konum belirleme tekniği olmuştur.

Uydu sayısının her geçen gün artmasıyla birlikte, sistemlerin sağladığı hassasiyet, kapsama alanı ve kullanıcı sayısı da sürekli artmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri’nin 1970’li yıllarda askerî amaçlarla geliştirdiği GPS ile başlayan uydu tabanlı konum belirleme süreci, zamanla diğer ülkelerin kendi sistemlerini devreye almalarıyla birlikte GNSS (Global Navigation Satellite Systems) olarak anılmaya başlanmıştır. 2025 yılı itibarıyla gökyüzünde yaklaşık 120 aktif uydu, küresel ve bölgesel sistemler aracılığıyla konumlama hizmeti sunmaktadır. Bu sistemler Tablo 1’de uydu sayıları, yörünge bilgileri ve faaliyet yılları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 1. GNSS sistemleri, uydu sayıları, ve yörünge bilgileri.

Sistem	Uydu sayısı	Nominal/Yörünge mimarisi	Operasyonel Başlangıç
GPS 1978	31	MEO ~20.200 km, 55°, 6 düzlem küresel kapsama ve iyi geometri	1993 (24 uydulla tam operasyonel)
GLONASS 1982	24	MEO ~19.100 km, 64.8°, 3×8 uydu yüksek enlemlerde iyi görünüm	1996 (tam operasyonel)
Galileo 2011	24 + 1	MEO ~23.222 km, 56°, 3 düzlem GPS’ten biraz daha yüksek irtifa; çoklu frekans/sinyal	2016 (Initial Services ilanı)

Sistem	Uydu sayısı	Nominal/Yörünge mimarisi	Operasyonel Başlangıç
BeiDou-3 2000	30 24 MEO 3 IGSO 3 GEO	MEO ~21.528 km, 55°; IGSO/GEO Asya-Pasifik destekli	2012 (BeiDou-2, Asya-Pasifik hizmeti)
QZSS 2010	5	IGSO/GEO + 1 MEO hibrit, (Japonya zenitinde uzun süreli görünürlük)	2018 (4 uydu ile bölgesel operasyonel)
NavIC 2013	7	3 GEO (32.5°E, 83°E, 129.5°E) + 4 IGSO (29° eğim) Hindistan ve çevresi için bölgesel yüksek kullanılabilirlik.	2016 (bölgesel operasyonel)

## 2. 2025 yılında GNSS sistemleri

### 2.1. Küresel Sistemler

Günümüzde küresel ölçekte hizmet veren uydu navigasyon sistemi sayısı, Çin'in 2020'de BeiDou-3 ile küresel kapsama sağlamasıyla birlikte dörde çıkmıştır (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).

#### I. GPS

Yaklaşık 6 milyar kullanıcısı bulunan GPS sistemi, günümüzde 31 operasyonel uydu ile hizmet vermektedir. GPS'in nominal tasarımı 24 uyduya dayanmasına rağmen, sistem pratikte bunun üzerinde uydu işletmektedir. Ayrıca yörüngede 7 yedek uydu ve fırlatılmaya hazır 2 GPS III uydusu bulunmaktadır.

30 Mayıs 2025'te fırlatılan GPS III SV08 (USA-545) henüz test aşamasında olduğu için operasyonel sayıya dahil değildir. Bu nedenle sistemdeki son "operasyonel" uydu 2022 yılında devreye girmiştir (GPS.gov, 2025).

#### II. GLONASS

Rusya'ya ait GLONASS sistemi, 1990'lı yıllardan itibaren küresel konumlama hizmeti sunmaya başlamış ve GPS'ten sonra faaliyete geçen ikinci küresel uydu navigasyon sistemi olmuştur. Sistem, nominal olarak 24 uydudan oluşacak şekilde tasarlanmıştır ve 2025 yılı itibarıyla 24 operasyonel uydu ile küresel kapsama sağlamaktadır.

GLONASS'ın yörünge mimarisi sayesinde sistem, özellikle yüksek enlemlerde (Kuzey bölgeleri) daha güçlü sinyal görünürlüğü sağlamaktadır.

Son yıllarda GLONASS, K2 serisi yeni nesil uyduların fırlatılmasıyla modernize edilmektedir. 2023 ve 2025 yıllarında gerçekleştirilen fırlatmalarla K2 uyduları konstelasyona eklenmiş, sistemin doğruluk ve güvenilirlik düzeyi artırılmıştır. 2025 Ağustos itibarıyla 24 uydu kullanımda, birkaç uydu ise bakım veya test statüsünde bulunmaktadır (GLONASS Information Center, 2025).

#### III. GALILEO

Avrupa Birliği'nin uydu navigasyon sistemi Galileo, 19 Eylül 2024'te gerçekleştirilen 13. fırlatma

programı ile 31. ve 32. uydularını orta yörüngeye (MEO) yerleştirmiştir. Avrupa'daki bu iki uydunun konuşlandırılmasıyla birlikte Galileo, tasarım gereği öngörülen konstelasyonu 29 Ocak 2025'de tamamlamış, her yörünge düzleminde bir yedek uydusu ile birlikte operasyonel seviyeye ulaşmıştır. Mevcut plana göre, kalan 6 birinci nesil (FOC – Full Operational Capability) uydunun 2025–2026 yılları arasında fırlatılması hedeflenmektedir. Böylece 2026 itibarıyla toplam 38 uydusu ile Galileo'nun birinci nesil takımıyla tamamlanacaktır.

2025 başı itibarıyla Galileo'nun 32 uydusundan 27'si usable (operational), 4'ü unusable, 1'i işlevsiz statüsünde bulunmaktadır.

Galileo, GPS'e kıyasla daha yüksek yörünge irtifasında (yaklaşık 23.222 km, 56° eğim) çalışmakta olup, çoklu frekans yapısı (E1, E5, E6) ve ücretsiz HAS (High Accuracy Service) ile cm–dm düzeyinde hassasiyet sağlayabilmektedir (European Space Agency, 2025)

#### IV. BeiDou-3

Çin'in uydusu navigasyon sistemi BeiDou, 2020 yılında küresel hizmete geçiş yaparak GPS, GLONASS ve Galileo'nun ardından dördüncü küresel GNSS sistemi olmuştur. BeiDou-3 takımıyla, 24 orta yörünge (MEO), 3 eğik jeosenkron (IGSO) ve 3 jeostatik (GEO) uydusu olmak üzere toplam 30 operasyonel uydudan oluşan hibrit bir yapıya sahiptir. Bu mimari, özellikle Asya-Pasifik bölgesinde sinyal sürekliliği ve güvenilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Diğer küresel navigasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında BeiDou, özellikle düşük enlem bölgelerinde performansı artırmak için yüksek yörüngelerde daha fazla uydusu kullanmakta, bu sayede anti-kesilme (anti-jamming) kabiliyetleri ve sinyal güvenilirliği açısından öne çıkmaktadır. Ayrıca sistem, çoklu frekansta sinyal yayını sayesinde kombine frekans kullanımı ile konum doğruluğunu artırmaktadır.

BeiDou, yalnızca konumlandırma ve zamanlama değil, aynı zamanda navigasyon ve iletişim işlevlerini entegre eden bir yapıya sahiptir. Kullanıcılara kısa mesaj iletişimi, uluslararası arama-kurtarma, uydusu tabanlı artırma (BDSBAS), yer tabanlı artırma, hassas nokta konumlandırma (PPP-B2b) gibi çok sayıda ek hizmet sunmaktadır. Bu çok işlevli yapı, BeiDou'yu diğer küresel sistemlerden ayıran en önemli özelliklerden biridir.

2025 yılı itibarıyla BeiDou-3'ün operasyonel durumu kararlı olup, çoklu frekans sinyalleri sayesinde desimetre (dm) seviyesinde hassasiyet sağlamaktadır. Çin ayrıca 2030 sonrası için BeiDou-4 adı verilen yeni nesil takımıyla çalışmalarına başlamıştır (China Satellite Navigation Office, 2025).

### 2.2. Bölgesel Sistemler

#### I. QZSS

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), Japonya tarafından geliştirilen bölgesel bir uydusu konumlandırma sistemidir ve esas olarak yarı-zenit yörüngelerinde (QZO) bulunan uydulardan oluşmaktadır.

QZSS, Japonya merkezli olmakla birlikte, Asya-Okyanusya bölgesinde, özellikle Japonya'ya yakın boylamlarda da kullanılabilir. Bu özellik sayesinde, sistemin kullanımının diğer bölge ülkelere doğru genişletilmesi planlanmaktadır.

2018'den itibaren 4 uydusu operasyonel hale gelen QZSS, 4 uydusu yapıdayken GPS ile uyumlu (compatible) çalışabilme özelliği sunmuştur. Japonya, 2027 yılına kadar uydusu sayısını 7'ye çıkarmayı

hedeflemektedir. 2025 yılı itibarıyla sistem 5 aktif uydusu ile hizmet vermektedir (Cabinet Office, Government of Japan, 2025).

## II. NavIC

Hindistan'a ait NavIC (Navigation with Indian Constellation) veya resmî adıyla IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System), bölgesel hizmet veren bir GNSS sistemidir. Sistem, 7 uydudan oluşan bir yapıya sahiptir: bunların 3'ü jeostatik (GEO), 4'ü eğik jeosenkron (IGSO) yörüngede bulunmaktadır. Bu yapı sayesinde Hindistan ve çevresinde yüksek kapsama ve güvenilirlik sağlanmaktadır.

NavIC'in geliştirilmesine 2013 yılında başlanan fırlatmalarla start verilmiş, sistem 2016 yılında bölgesel operasyonel hizmet sunmaya başlamıştır. 2023'te fırlatılan NVS-01 uydusu, ikinci neslin ilk üyesi olarak L1 frekansında sinyal desteğini de sağlamaya başlamıştır. Ancak 2024 Ağustos'unda fırlatılan NVS-02 uydusu, fırlatma sırasında yaşanan anomali nedeniyle kaybedilmiştir. Buna rağmen Hindistan Uzay Araştırma Organizasyonu (ISRO), 2025–2026 yıllarında planlanan NVS serisi ile konstelasyonu güçlendirmeyi hedeflemektedir (ISRO, 2025).



Şekil 1. Ankara lokasyonu için uydu gözlem grafiği (Trimble, 2025).

Şekil 1'de görüleceği üzere, tüm bu uydu sistemleri ile birlikte, multi-GNSS bir alıcı -olağan şartlar altında- ortalama 40 uyduyu gözlemleyebilmektedir.

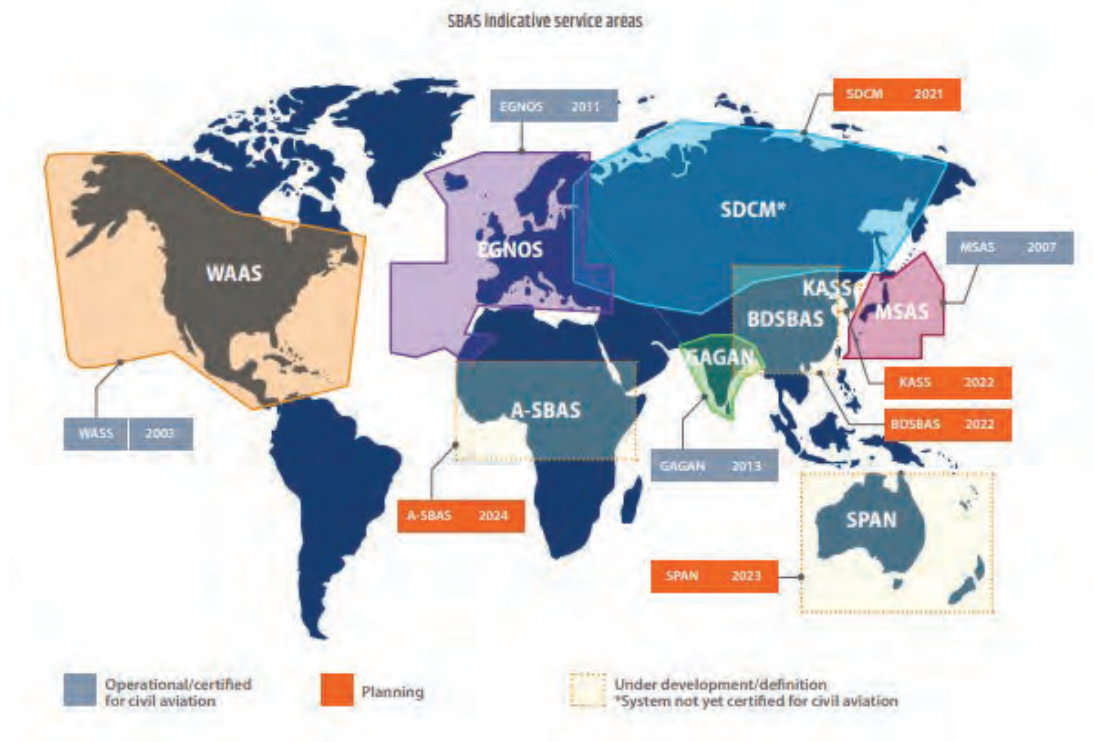
## 3. SBAS

Başlangıçta yalnızca tek bir ülkenin kontrolünde olan uydu konumlama teknolojileri, günümüzde küresel ve bölgesel düzeyde çeşitlenmiş; çoklu frekans desteği ve bütünleyici servislerle (ör. SBAS/EGNOS) güçlendirilmiş bir yapıya dönüşmüştür. Bu gelişmeler, özellikle **jeodezik ölçmeler, mühendislik uygulamaları ve akıllı şehir projeleri** açısından yüksek doğruluklu ve güvenilir konumlama olanakları sunmaktadır.

Uydu Tabanlı Düzeltme Sistemleri (SBAS), GNSS sinyallerinin **doğruluk, bütünlük ve sürekliliğini artıran tamamlayıcı hizmetlerdir**. Günümüzde **WAAS (ABD), EGNOS (Avrupa), MSAS (Japonya), GAGAN (Hindistan), BDSBAS (Çin) ve KASS (Kore)** gibi çeşitli SBAS sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler, çok sayıda jeostatik uydu üzerinden GNSS sinyallerine düzeltme bilgileri ekleyerek, kullanıcıların özellikle **havacılık, denizcilik, kara taşımacılığı ve tarım** alanlarında daha güvenilir konum belirlemelerine imkân tanır.

SBAS'ın temel amacı bütünlük güvencesi sağlamak olmakla birlikte, sistemin kullanımı aynı zamanda doğruluğu artırmakta ve konum hatalarını **1 metrenin altına** düşürmektedir (Skybrary, 2024). Bu sistemlerden **WAAS**, 2003 yılında operasyonel hale gelen ilk örnek olup, günümüzde kıta ABD'sinin yanı sıra **Kanada, Alaska ve Meksika**'yı kapsamaktadır. Kuzey Amerika'da ise **binin üzerinde havaalanı**, aletli yaklaşımlar için WAAS'a dayanmaktadır (Skybrary, 2024).

2020 yılı itibarıyla kapsama alanlarını **Şekil 2**'de, isimlerini ve güncel statülerini ise **Tablo 2**'de görülen toplam **11 farklı SBAS sistemi** mevcuttur.



Şekil 2. Dünya genelindeki SBAS sistemleri ve kapsama alanları (European GNSS Service Centre, 2020).

Tablo 2. Dünya'daki SBAS sistemleri ve kapsama alanları

Sistem	Bölge/Kapsama Alanı	Durum
WAAS	ABD, Kanada, Meksika	Operasyonel
EGNOS	Avrupa	Operasyonel
MSAS/QZSS	Japonya ve çevresi	Operasyonel
GAGAN	Hindistan, çevresi	Operasyonel

Sistem	Bölge/Kapsama Alanı	Durum
SDCM	Rusya	Geliştirme/test aşamasında (SatNav-Africa Joint Programme Office, 2025)
BDSBAS	Çin	Operasyonel (L1; DFMC gelişim aşamasında) (Cao et al., 2022)
SouthPAN	Avustralya & Yeni Zelanda	Aktif; tam operasyon için sertifikasyon süreci devam ediyor (Cozzens, 2025)
A-SBAS, SACCSA, KASS	Afrika, Güney/Orta Amerika, Güney Kore	Geliştirme ve planlama aşamalarındadır (SatNav-Africa Joint Programme Office, 2025)
ASECNA	Afrika	Planlama

### 3.1. EGNOS ve Türkiye

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), Avrupa'da GPS ve gelecekte Galileo sinyallerinin doğruluğunu, bütünlüğünü ve kullanılabilirliğini artırmak için geliştirilmiş bölgesel bir SBAS sistemidir (European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), 2024). Bu sistem, özellikle uçuş, denizcilik ve karayolu navigasyonu gibi kritik güvenlik uygulamaları için tasarlanmıştır. EGNOS, üç jeostatik uydu ve Avrupa ile Kuzey Afrika'daki yer istasyonları aracılığıyla sinyal düzeltme ve bütünlük bilgilerini kullanıcıya ulaştırır (European GNSS Service Centre, 2025).

Türkiye'de, bir adet SBAS referans istasyonu (RIMS) Ankara'da yer almakta olup, EGNOS sinyali Türkiye'nin batı bölgelerine ulaşabilmektedir. Ancak bu kapsama, sistemin nominal alanı dışında gerçekleşmektedir (TUA, 2023). Bu nedenle Türkiye'de EGNOS, resmi bir navigasyon hizmeti olarak kullanılmamakta; daha ziyade batı bölgelerde sınırlı düzeltme katkısı sağlayabilmektedir.

### 3.2. Türkiye Uzay Ajansı ve TÜBİTAK'ın desteğiyle geliştirilen BKZS (Bölgesel Konumlama ve Zamanlama Sistemi)

Türkiye, küresel GNSS sistemlerine olan bağımlılığını azaltmak amacıyla Bölgesel Konumlama ve Zamanlama Sistemi (BKZS) geliştirme çalışmalarını başlatmıştır. Bu kapsamda, sistemin en kritik alt bileşenlerinden biri olan atomik saat teknolojisinin yerleştirilmesine yönelik Rubidyum Atomik Frekans Standardı (RAFS) Projesi, 2023 yılında TÜBİTAK UME yürütücülüğünde ve Türkiye Uzay Ajansı desteğiyle hayata geçirilmiştir.

Proje ile laboratuvar ortamında geliştirilen rubidyum tabanlı atomik saat, 6U boyutlarında bir küp uyduya entegre edilerek uzay ortamında test edilecektir. Yörüngeye fırlatılacak uydu üzerinden en az bir yıl süreyle frekans kararlılığı gözlenecek ve bu süreç sonunda teknolojiye uzay tarihçesi kazandırılacaktır. Böylelikle, BKZS için zorunlu olan uzay kalifiye atomik saat standardı geliştirilme sürecinde kritik bir eşik aşılmış olacaktır (TÜBİTAK, 2023)

## 4. Tartışma ve Sonuç

2025 itibarıyla GNSS sistemleri uydusu sayısı, sinyal çeşitliliği ve kapsama alanı bakımından küresel ölçekte en gelişmiş seviyesine ulaşmıştır. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou'nun küresel kapsama sağlaması, QZSS ve NavIC gibi bölgesel sistemlerin ise doğruluk ve sürekliliği artırması jeodezik ve mühendislik uygulamalarında kritik rol oynamaktadır. Multi-GNSS yaklaşımı, ve SBAS sistemleri özellikle hata kaynaklarının azaltılması ve bütünlük güvenilirliğinin artırılması açısından öne çıkmaktadır.

Türkiye özelinde, EGNOS sinyalinin yalnızca batı bölgelerinde sınırlı katkı sağlaması önemli bir eksiklik. Bu nedenle BKZS projesi stratejik bir gereklilik olup, RAFS çalışmalarıyla bağımsızlık yolunda kritik bir adım atılmıştır.

Uluslararası deneyimler, SBAS sistemlerinin tarım, havacılık, akıllı şehir ve otonom sistemlerde yüksek fayda sağladığını göstermektedir. Türkiye'de benzer uygulamalara yönelik pilot çalışmaların geliştirilmesi, GNSS tabanlı altyapıların etkinliğini artıracaktır.

### Kaynaklar

Cabinet Office, Government of Japan. (2025) Quasi-Zenith Satellite System (QZSS). <https://qzss.go.jp>

Cao Y., Hu X., Zhou J., Wu B., Liu L., Zhou S., Su R., Chang Z., Wu X. (2022) Development status and service performance preliminary analysis for BDSBAS. *Remote Sensing* 14(17), 4314. <https://doi.org/10.3390/rs14174314>

China Satellite Navigation Office. (2025) BeiDou Navigation Satellite System. <http://www.beidou.gov.cn>

Cozzens T. (2025, July 17) SouthPAN satnav program for Australia passes Critical Design Review milestone. *GPS World*. <https://www.gpsworld.com/southpan-satnav-program-for-australia-passes-critical-design-review-milestone/>

Defraigne P., Pinat E., Bertrand B. (2021) Impact of Galileo-to-GPS-Time-Offset accuracy on multi-GNSS positioning and timing. *GPS Solutions* 25, 45.

European GNSS Service Centre. (2020) SBAS systems around the world [Map]. European Space Agency (ESA) Navipedia. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Systems](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Systems)

European GNSS Service Centre. (2025) About EGNOS. GSC-EUROPA. <https://egnos.gsc-europa.eu/egnos-system/about-egnos>

European Space Agency (ESA). (2025) Galileo programme updates. <https://www.esa.int>

European Union Agency for the Space Programme (EUSPA). (2024) EGNOS performance reports. <https://www.euspa.europa.eu>

GLONASS Information Center. (2025) Official GLONASS status. <https://www.glonass-iac.ru>

GPS.gov. (2025) Global Positioning System official website. <https://www.gps.gov>

ISRO. (2025) Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS/NavIC). <https://www.isro.gov.in>

Mutlu İ., Kahveci M. (2019) GNSS uydusu dağılımının gerçek zamanlı kinematik GNSS ve ağ-RTK ölçülerindeki önemi. *Geomatik* 4(3), 179-189. <https://doi.org/10.29128/geomatik.522343>

SatNav-Africa Joint Programme Office. (2025) SBAS systems around the world. SatNav-Africa. <https://www.satnav-africa.com/index.php/en/gnss-and-sbas-at-a-glance/sbas-systems-around-the-world>

Skybrary. (2024) Satellite Based Augmentation System (SBAS). *SKYbrary Aviation Safety*. <https://skybrary.aero/articles/satellite-based-augmentation-system-sbas>

TUA. (2023) Turkish Satellite Based Navigation Program. *UNOOSA / Türkiye*. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2023/ICG-17/icg17.03.03.pdf>



TMMOB

**Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası**

TÜBİTAK. (2023, 21 Haziran) TUA ve TÜBİTAK UME'den BKZS için ilk adım: Rubidyum atomik frekans standardı geliştirme projesi başladı [Duyuru]. *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu*.  
<https://tubitak.gov.tr/tr/duyuru/tua-ve-tubitak-umeden-bkzs-icin-ilk-adim-rubidyum-atomik-frekans-standarti-gelistirme-projesi-basladi>

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

İbrahim Cihan DEMİREL<sup>1,\*</sup>, Muzaffer KAHVECİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

### Özet

Bu çalışmada Ankara ili bölgesinde bulunan 10 adet Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) noktası çalışma noktası olarak seçilmiştir. Statik ve PPP yöntemleri için her bir noktada 3'er saatlik gözlem yapılmıştır. PPP-RTK yöntemi için faz belirsizliklerinin çözümlendiği (fix) çözüm elde edilene kadar ölçüm gerçekleştirilmiş ve bu süreler kayıt edilerek her bir noktanın yakınsama süresi belirlenmiştir. AĞ-RTK yöntemi için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) sunucularına bağlanarak 60 epok (her saniyede 1 ölçüm) ölçüm yapılmıştır. SBAS yöntemi için İSTA IGS istasyonu GPS ve GPS+SBAS verileri ile analiz edilerek SBAS'ın konumsal doğruluğu değerlendirilmiştir.

TUTGA noktalarına ait koordinat ve hız değerleri Harita Genel Müdürlüğü (HGM)'den temin edilmiş ve uygulanan yöntemlerin konum doğruluklarının belirlenebilmesi için bilinen koordinatlar olarak kabul edilmiştir. Arazi çalışması sonucunda Statik, PPP, PPP-RTK ve AĞ RTK (CORS) yöntemleri ile elde edilen koordinatlar HGM'den elde edilen ve bilinen olarak kabul edilen koordinatlar ile karşılaştırılmış, koordinat farkları ile Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca SBAS yönteminin değerlendirilmesi amacıyla İSTA IGS istasyonunun verileri kullanılmıştır.

HGM'den alınan hassas koordinatlar ile arazi çalışması sonucunda elde edilen koordinatların karşılaştırılması neticesinde Statik yöntemde X, Y, Z, konumlarında sırası ile 2.5, 2.3, 2.8 cm'lik KOH değerleri hesaplanmıştır. PPP yöntemi ile X, Y, Z, konumlarında sırası ile 3.3, 3.0, 3.9 cm'lik KOH değerleri hesaplanmıştır. PPP-RTK yöntemi ile X, Y, Z, konumlarında sırası ile 6.8, 3.2, 25.0 cm'lik KOH değerleri hesaplanmış ve faz belirsizliklerinin çözümlendiği (fix) süreler her bir nokta için kaydedilerek ortalama 3.9 dakika yakınsama süresi hesaplanmıştır. AĞ-RTK (CORS) yöntemi ile X, Y, Z, koordinat bileşenlerinde sırası ile 5.9, 3.4, 3.8 cm'lik KOH değerleri hesaplanmıştır. SBAS verisinin konum iyileşmesinin hesaplanması için GPS verileri ile ilk olarak SPP çözümü yapılmış, daha sonra ise GPS ve SBAS verileri birlikte çözümlenerek SBAS'ın GPS'e yatayda 2.34 metre düzeyde ise 2.13 metre iyileştirme getirdiği hesaplanmıştır.

### Anahtar Kelimeler

GNSS, Statik Ölçüm, AĞ-RTK, SBAS, PPP-RTK, PPP

### Summary

In this study, ten stations from the Turkish National Fundamental GPS Network (TUTGA) located within the Ankara region were selected as the study sites. For both the Static and PPP methods, three-hour observations were conducted at each point. In the PPP-RTK method, measurements continued until a fixed solution (i.e., phase ambiguities were resolved) was obtained, and the convergence times were recorded for each station. For the Network-RTK method, measurements were performed by connecting to the General Directorate of Land Registry and Cadastre (TKGM) servers, collecting data for 60 epochs (one observation per second). For the SBAS method, the positional accuracy of SBAS was evaluated by analyzing GPS and GPS+SBAS data from the İSTA IGS station.

The coordinate and velocity values of the TUTGA stations were obtained from the General Directorate of Mapping (HGM) and were considered as reference (true) coordinates for assessing the positional accuracy of the applied methods. The coordinates obtained from the Static, PPP, PPP-RTK, and Network-RTK (CORS) methods were compared with the reference coordinates provided by HGM, and the coordinate differences along with Root Mean Square Error (RMSE) values were computed. Additionally, the SBAS method was evaluated using observation data from the İSTA IGS station.

As a result of the comparison between the precise coordinates obtained from HGM and the field survey results, RMSE values of 2.5 cm, 2.3 cm, and 2.8 cm were computed in the X, Y, and Z components, respectively, for the Static method. For the PPP method, the RMSE values were 3.3 cm, 3.0 cm, and 3.9 cm in the X, Y, and Z components, respectively. Using the PPP-RTK method, RMSE values of 6.8 cm, 3.2 cm, and 25.0 cm were obtained for the X, Y, and Z components, respectively, with an average convergence time of 3.9 minutes based on recorded fix durations. For the Network-RTK (CORS) method, RMSE values of 5.9 cm, 3.4 cm, and 3.8 cm were obtained for the X, Y, and Z coordinate components, respectively. To assess the positional improvement provided by SBAS, a Single Point Positioning (SPP) solution was first computed using GPS data, followed by a combined GPS+SBAS solution. The analysis showed that SBAS improved GPS positioning accuracy by approximately 2.34 meters horizontally and 2.13 meters vertically.

### Keywords

GNSS, Static Measurement, Network-RTK, SBAS, PPP-RTK, PPP

\* Sorumlu Yazar: Tel: Faks:

E-posta: ibrahimcihandemirel@gmail.com (İbrahim Cihan DEMİREL) mkahveci@ktun.edu.tr (Muzaffer KAHVECİ)

## 1.GİRİŞ

Yüksek doğrulukta konum belirleme, günümüz teknolojik uygulamalarında kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Mühendislik, ulaşım, tarım ve savunma gibi pek çok alanda konumlama sistemlerinin performansı, uygulamaların başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tabanlı konumlama teknikleri, farklı doğruluk, altyapı ihtiyacı ve maliyet parametreleri ile ön plana çıkmaktadır. Uydularla konum belirlemede çok fazla yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; statik görelî konum belirleme, tek nokta konum belirleme (SPP:Single Point Positioning), tek nokta hassas konum belirleme (PPP:Precise Point Positioning), diferansiyel GPS/GNSS (DGPS/DGNSS), SBAS (Satellite Based Augmentation Systems), Statik GNSS, standart RTK (Real Time Kinematic) ve AĞ-RTK (CORS: Continuously Operating Reference Stations) çözümleri olarak özetlenebilir. Bu yöntemler kullanılarak elde edilen doğruluklar farklı veri yapılarına, alıcı modellerine, veri toplama sıklığına, matematiksel modellemelere vb. dayanmakta olup her bir çözüm yönteminin amacı (jeodezik, jeodinamik, kadastro, meteoroloji, gerçek zamanlı navigasyon vb.) ve hedef kitlesi farklı olabilmektedir. Mevcut araştırmalar çoğunlukla bu yöntemlerin bireysel performanslarını ayrı ayrı incelemekte, aynı ortam koşullarında karşılaştırmalı analizler sınırlı kalmaktadır. Bu durum, özellikle farklı GNSS tekniklerinin avantaj ve dezavantajlarının net bir şekilde ortaya konmasını engellemekte, uygulayıcıların doğru yöntem seçiminde rehberlik ihtiyacını artırmaktadır.

Statik GNSS ölçüm yöntemi, yüksek doğruluk gerektiren konum belirleme uygulamaları için kullanılan, alıcının belirli bir süre boyunca sabit bir noktada veri toplamasına dayalı bir tekniktir. Ölçüm süresi genellikle baz uzunluğuna, çevresel koşullara ve istenen doğruluk düzeyine bağlı olarak değişir. Toplanan faz ve kod ölçümleri, sonrasında diferansiyel işleme tabi tutularak milimetre/santimetre düzeyinde konum hassasiyeti elde edilir. Statik GNSS ölçüm yöntemi, yüksek doğruluk istendiğinde, uzun bazlar söz konusu olduğunda, atmosferik etkilerin dikkate alınması durumunda, uydu geometrisi diğer ölçü yöntemlerine imkân vermediğinde, sistematik etkilerin dikkate alınması durumunda (iyonosfer, troposfer) en iyi yöntemdir (Kahveci & Yıldız, 2018).

Klasik diferansiyel GNSS yöntemi, koordinatları hassas olarak belirlenmiş en az bir referans istasyonu ile bu istasyona yakın konumda bulunan hareketli alıcılardan elde edilen verilerin birleştirilmesiyle konum belirleme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu yöntem, veri iletiminin çeşitli iletişim teknolojileri aracılığıyla gerçek zamanlı olarak sağlanması durumunda, gerçek zamanlı kinematik (RTK) ölçüm tekniği adını almaktadır. Ancak RTK yönteminde, sabit istasyondan uzaklık arttıkça sistematik hataların etkisiyle konum doğruluğu azalmaktadır (Kahveci, 2011). Bu sınırlılığını ortadan kaldırmak amacıyla birden fazla referans istasyonundan oluşan sabit GNSS ağları (AĞ-RTK/Net-RTK) geliştirilmiştir (Raquet, 1998). Bu ağlar, bölgesel atmosferik modellemeye olanak tanıyarak ionosferik ve troposferik hataların etkisini azaltmakta ve böylece konum belirleme doğruluğunu artırmaktadır. Günümüzde, bu tür sabit GNSS ağları; jeodezik çalışmalar, mühendislik ölçmeleri, kadastro uygulamaları, afet izleme ve meteorolojik analizler gibi çok sayıda alanda hem gerçek zamanlı hem de büroda değerlendirme (post-processing) amaçlı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle kadastro, araç takibi, hassas tarım ve makine kontrol sistemleri gibi alanlarda artan gerçek zamanlı konum ihtiyacı, RTK CORS (Continuously Operating Reference Stations) ağlarının sürekli aktif çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu ağlar, sadece veri kaydı ve analiz değil, aynı zamanda konum düzeltme bilgilerinin anlık iletimini de sağlayarak kullanıcıya yüksek doğrulukta konum verisi sunmaktadır. AĞ-RTK (CORS) ile ölçü noktasında genel olarak birkaç dakikada, hatta saniyeler içinde santimetre doğruluğunda harita ve konum bilgisi elde edebilmek mümkündür.

Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP), Zumberge vd. (1997) tarafından tanıtılmış bir tekniktir. Bu yöntem, gözlem farkları kullanılmadan, taşıyıcı fazı ve kod ölçümleri ile çalışır (Kouba vd., 2017). PPP, Uluslararası GNSS Servisi tarafından sağlanan yüksek doğruluklu taşıyıcı faz ölçümleri ve uydu yörüngeleri ile saat düzeltmelerini kullanarak, santimetre seviyesinde konum doğruluğu sağlayabilir (Cai vd., 2015; Fu vd., 2019; Hadas vd., 2019).

PPP-RTK yöntemi, hassas tek nokta konum belirleme (PPP) tekniği ile gerçek zamanlı kinematik (RTK) yaklaşımının avantajlarını birleştiren hibrit bir konumlandırma yöntemidir. PPP'de kullanılan küresel yörünge ve saat düzeltmeleri ile birlikte, RTK'da olduğu gibi bölgesel düzeltme bilgileri (özellikle atmosferik ve saat hataları) kullanıcıya gerçek zamanlı olarak iletilir. Bu sayede, tek bir GNSS alıcısıyla santimetre seviyesinde konum doğruluğuna kısa yakınsama süresiyle ulaşmak mümkün hale gelir. PPP-RTK, sabit referans istasyon ağlarından elde edilen düzeltmeleri kullanarak, RTK'nın yüksek doğruluğunu ve PPP'nin geniş kapsama alanını bir araya getirir. Bu yöntem, özellikle mobil uygulamalar, tarım, otomasyon ve düşük maliyetli konum çözümleri açısından önemli avantajlar sunmaktadır. PPP-RTK ile AĞ-RTK erişimi sağlanamayan, uzun süreli statik ölçü imkânı olmayan ölçme çalışmalarında, internet/GSM erişiminin olmadığı durumlarda GEO uyduları üzerinden kullanılan servise göre değişmekle birlikte birkaç dakika ile birkaç 10 dakika arasında değişen yakınsama süresi sonunda cm-dm aralığında konum ve yükseklik doğruluğuna erişmek mümkündür.

SBAS, (WAAS, EGNOS ve MSAS vd.) GNSS tabanlı konum belirleme hizmetlerinin doğruluk, güvenilirlik ve bütünlük düzeylerini artırmak amacıyla geliştirilmiş bir uydu destek sistemidir. Bu sistem, GNSS sinyallerine ait yörünge, uydu saat hatası ve atmosferik gecikme gibi hata bileşenlerini modelleyerek düzeltmeleri hesaplar ve bu düzeltmeleri yer istasyonları aracılığı ile Yer-sabit (GEO: Geostationary uydularına iletir. GEO uyduları üzerinden de kullanıcılara iletilir (Teunissen & Montenbruck, 2017). SBAS sistemleri, geniş alan kapsamı sağlamakta birlikte, özellikle havacılık sektöründe bir kalite kontrol ve izleme sistemi olarak kullanılmaktadır. Burada öne çıkan düşünce, uydu navigasyon sistemlerinin; her yerde ve her zaman ulaşılabilen, doğru, güvenilir ve kullanımı kolay olması, uçakların güvenli bir şekilde uçuşması ve gemilerin özellikle dar boğaz ve kanallarda güvenli yol almalarını sağlamaktır (Kahveci, 2017).

**STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

SBAS, Ağ-RTK, PPP, PPP-RTK ve Statik Ölçüler, jeodezik ölçümler için farklı üstünlükler ve zayıflıklar sunar. Hangi yöntemin tercih edileceği, kullanıcının ihtiyaçlarına, uygulama alanına ve doğruluk gereksinimlerine bağlıdır. Bu çalışmanın temel amacı, statik yöntem, PPP, PPP-RTK, SBAS ve Ağ-RTK tekniklerinin doğruluk ve performans kriterleri açısından karşılaştırmalı analizini yaparak, farklı uygulama senaryolarında en uygun yöntemin belirlenmesine bilimsel katkı sağlamaktır. Böylece, GNSS tabanlı konumlama teknolojilerinin hem akademik hem de pratik alanlardaki uygulamalarında karar vericilere sağlam bir referans oluşturulması hedeflenmektedir.

## 2. ÇALIŞMA ALANI

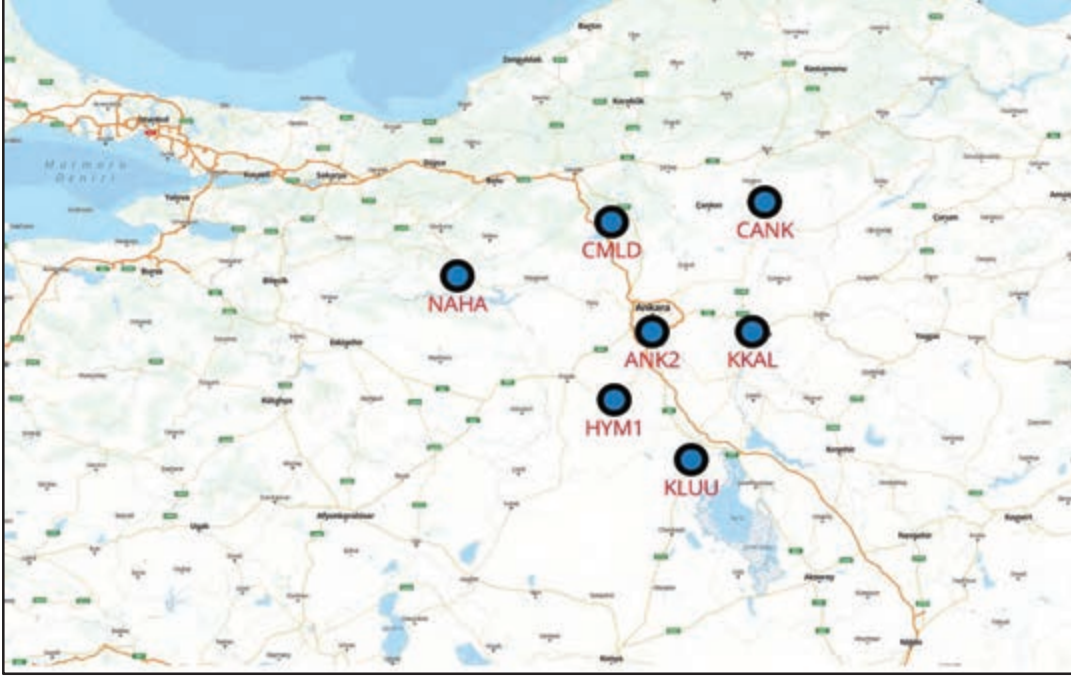
Çalışma kapsamında, Ankara ili sınırları içerisinde yer alan Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) noktalarından CBUK (Çubuk), PAZR (Pazar), KUCU (Kuşçu), HAYM (Haymana), AYS2 (Ayaş), AYA2 (Yağlıpınar), MESE (Meşedağ), CAML (Çamlıdere), NALL (Nallıhan) ve BAL2 (Bala) uygulama noktaları olarak seçilmiştir (Şekil 2.1).

Statik ölçülerin analizi kapsamında KULU (Kulu), ANK2 (Ankara), HYM1 (Haymana), KKAL (Kırıkkale), CANK (Çankırı), CMLD (Çamlıdere), NAHA (Nallıhan), MİHA (Mihalıççık) ve SIH1 (Sivrihisar) TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait 30 sn'lik, 2024 yılının 237-242'nci günlerinin gözlem (RINEX) verileri ve ARTU, KİT3, MATE, NİCO, NOT1, ONSA, PENC, POLV, RAMO, WRST, YİBL, ARUC, GLSV, POL2, WTZR, ZECK IGS noktalarının 237-242'nci günlerinin RINEX verileri kullanılmıştır. TUSAGA-Aktif ve IGS istasyonları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 'te sunulmuştur.

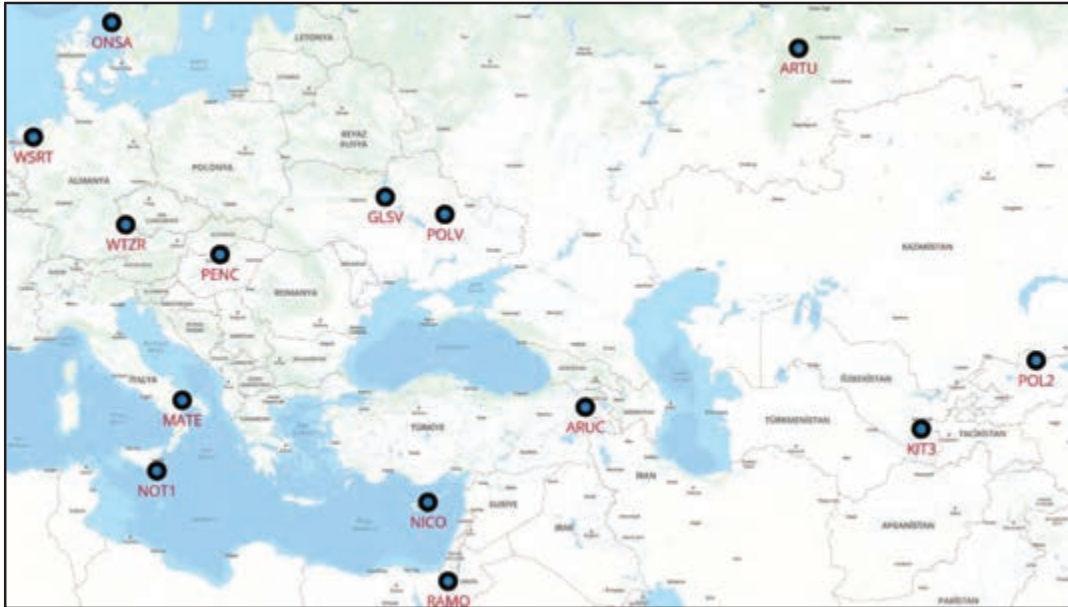


Şekil 2. 1: TUTGA Noktaları

## STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 2. 2: TUSAGA-Aktif Noktaları



Şekil 2. 3: IGS Noktaları

### 3. Materyal Metod

Bu çalışmada, konumlama yöntemlerinin karşılaştırmalı analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, Ankara ili içerisinde yer alan Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) bünyesindeki 10 referans noktası üzerinde uygulama gerçekleştirilmiştir. TUTGA noktalarına ait hassas koordinatlar ve hız bilgileri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. TUTGA noktalarında gerçekleştirilen ölçümler için GPS (L1C/A, L2C, L2P, L5), GLONASS (L1C/A,

**STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

L2C/A), BeiDou (B1, B2, B3 ), Galileo (E1, E5A, E5B), QZSS (L1C/A, L1C, L2C, L5), SBAS (EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN, L1C/A) uydu sistemlerini ve frekanslarını destekleyen Oscar TAP Ultimate GNSS Alıcısı kullanılmıştır.

Pilye türü TUTGA noktalarında, bronz yüzeye su terazisi yerleştirilmiş ve dört yönde yapılan ölçümlerle pilye yüzeyinin yüksekliği belirlenmiştir. Elde edilen ölçümler aritmetik ortalamaya tabi tutularak nihai yükseklik değeri elde edilmiştir. Elde edilen yükseklik değeri “Tribrah” yüksekliğinden çıkartılarak düşey alet yüksekliği hesaplanmıştır. TUTGA noktası kayada bronz olan tesislerde ise üç ayak sehpa (Tripod) noktaya düzgün şekilde yerleştirilmiş ve rüzgârdan etkilenmeyecek şekilde kurulmuştur (Şekil 3.1).

Statik ve PPP yöntemlerinin analizi amacıyla, Oscar TAP Ultimate GNSS alıcısı tüm uydu sinyallerini alacak şekilde ayarlanmış ve her bir TUTGA noktasında 3'er saatlik gözlem gerçekleştirilmiştir. Gözlem sonunda elde edilen RINEX verileri analiz aşamasında kullanılmıştır. Ağı-RTK (CORS) yönteminin analizi amacıyla Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) sunucularına bağlanılarak RTCM data formatında ve VRS ağı model desteği ile 60 epok (her saniyede bir olmak üzere) fix çözüm gerçekleştirilmiştir. PPP-RTK yönteminin analizi amacıyla, Oscar TAP Ultimate GNSS alıcısı (üyelik bilgisi gerekmektedir) ile uydu yörünge ve saat kaynaklı düzeltme bilgilerini doğrudan L-bandından yayın yapan uydular kullanılarak fix çözüm elde edilene kadar beklenmiş ve beklenen bu süre kayıt edilerek yakınsama süreleri hesaplanmıştır. SBAS konum iyileştirmesinin hesaplanması için İSTA IGS istasyonu 24 saatlik GPS gözlem verisi ile ilk olarak SPP çözümü yapılmış, daha sonra ise GPS ve SBAS gözlem verileri birlikte çözümlenerek SBAS'ın GPS'e ne ölçüde bir iyileştirme getirdiği hesaplanmıştır.



Şekil 3. 1: TUTGA Noktalarında Gerçekleştirilen Ölçümlere ait Görseller

## 4. Uygulama

### 4.1 Statik Yöntem ile Toplanan Gözlem Verilerinin GAMIT-GLOBK Yazılımı ile Analizi

Bu çalışmada, GNSS ölçü verilerinin değerlendirilmesi amacıyla Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilen GAMIT/GLOBK (sürüm 10.7) yazılım paketi kullanılmıştır. Yazılım, statik GNSS verilerinden yüksek doğrulukta konum bilgisi üretmek için iki ana modülden oluşmaktadır. GAMIT modülü, günlük gözlemleri işleyerek her bir istasyon için bağımsız koordinat çözümleri oluştururken, GLOBK modülü ise bu günlük çözümleri birleştirerek istasyon konumlarının, hızlarının ve ağı içerisindeki görelî hareketlerin belirlenmesini sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında Ankara ili sınırları içerisinde yer alan Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) noktaları, TUSAGA-Aktif noktaları ve ağı uluslararası referans sistemine bağlanması amacıyla, IGS (International GNSS Service) noktaları analize dahil edilmiştir.

#### 4.1.1 GAMIT Aşaması

Verilerin ön işlenmesi, GAMIT modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Çözüm sürecinde, her bir istasyon için 30 saniyelik gözlem aralığı kullanılmıştır. Yörünge ve parametre tanımlamaları için GAMIT'in tables/ dizininde yer alan dosyalar düzenlenmiş; station.info, sestbl., lfile., eq\_file.eq, eop., igs20.atx ve rcvant.dat dosyaları güncel verilere göre oluşturulmuştur. “sh\_gamit -d 2024 237 237 -expt anka -orbit IGSF -eops bull\_b -yrex -h -ion -update\_1 N” komutu kullanılarak analiz süreci başlatılmıştır.

Bu aşamada uydu yörüngeleri IGS hassas yörünge (SP3) dosyalarından alınmış, yer yönelim parametreleri (EOP) IERS verilerine göre uygulanmış, anten faz merkezi düzeltmeleri güncel kalibrasyon bilgileriyle yapılmış, troposferik

## STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

gecikmeler zenit yönünde serbest parametre olarak çözülmüş ve GAMIT çözümü sonucunda her istasyona ait günlük çözüm dosyaları (h-file) üretilmiştir.

### 4.1.2 Globk Aşaması

sh\_gamit komutu kullanılarak elde edilen günlük çözüm dosyaları (h-file) gevşek kısıtlarla (istasyonların koordinatlarına çok düşük ağırlıklarla bağlanması) üretilmiş çözümleri içermektedir. Datum dönüşümünün sağlıklı şekilde yapılabilmesi için günlük çözümlerin oluşturulmasının ardından, analizde kullanılan IGS istasyonlarının koordinat ve hız bilgileri temel alınarak Helmert dönüşümü uygulanmıştır. Bu süreç, Referans Sistemi Tanımlaması (stabilization) olarak adlandırılmaktadır. “sh\_gfred -d 2024 237 2024 242 -expt anka -opt H G T -yrex -globk\_cmd globk.cmd -glorg\_cmd glorg.cmd” komutu ile analiz yapılmıştır.

Bu aşamada, referans koordinat sistemi tanımlaması amacıyla seçilen 14 IGS istasyonunun ITRF2014 koordinat ve hız değerleri ile Helmert dönüşümü uygulanmıştır. ITRF2014’e ait koordinat ve hız verileri, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) tarafından, ITRF, IGS, EPN ve NGS çözümlerinin birleştirilerek ITRF2014’e göre düzenlendiği “igs14\_comb.apr” dosyasından temin edilmiştir (Herring vd., 2018). Bu dosya, bahsi geçen kurumlarca sağlanan global ve bölgesel GNSS istasyon çözümlerinin MIT tarafından bir araya getirilmiş koordinat ve hız listesini içermektedir. Ayrıca, 14 IGS istasyonunun deprem etkileri ve yerel değişimler gibi faktörlerden kaynaklanan koordinat değişimlerini içeren “igs14\_comb.eq” dosyası da dikkate alınmıştır.

Böylece elde edilen gevşek kısıtlı çözüm, 14 IGS istasyonunun koordinat ve hızlarına minimum kısıt uygulanarak ITRF2014 datumunda dengelenmiş ve her bir nokta için koordinatlar belirlenmiştir. Üretilen koordinatlar HGM’den temin edilen TUTGA noktalarına ait hızlar ile ITRF96 datumuna ve 2005.0 epoğuna (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi-TUREF) getirilmiştir.

### 4.2 PPP Yöntemi ile Uygulama

PPP yönteminin değerlendirilmesi amacıyla BERNESE yazılımı kullanılarak TUTGA noktalarında yapılan 3’er saatlik gözlem sonucunda oluşturulan RINEX verileri PPP çözümü ile analiz edilmiştir. Bernese GNSS Yazılımı, tek bir GNSS alıcısından elde edilen ölçümlerle yüksek doğruluklu mutlak konum ve hız çözümleri üretmek amacıyla Precise Point Positioning (PPP) yöntemini uygulamaktadır. PPP çözümü için hassas yörünge ve uydu saat düzeltmeleri, atmosferik etkiler ve donanım gecikmelerini dikkate alarak koordinat hesaplaması yapılmıştır. Yazılım ITRF 2020 datumunda ve güncel epokta koordinat üretmiştir. Bernese programı kullanılarak üretilen bu koordinatlar HGM’den elde edilen TUTGA noktalarına ait hızlar ile birlikte TUREF (ITRF 96 datumu ve 2005.00 Epoğu) sistemine dönüştürülmüştür.

### 4.3 PPP-RTK Yöntemi ile Uygulama

PPP-RTK yönteminin değerlendirilmesi amacıyla TUTGA noktalarında Oscar TAB cihazı ile PPP-RTK yöntemi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her noktada taşıyıcı dalga faz belirsizliklerin tam olarak çözüldüğü (fix) çözüm için cm seviyesinde doğruluk elde edilene kadar beklenmiş ve yakınsama süreleri hesaplanmıştır.

PPP-RTK ile ITRF2020 referans sisteminde ve güncel epokta koordinatlar elde edilmektedir. Söz konusu koordinatlar EUREF’in sitesinde TUTGA nokta hızları ile ITRF 96 datumu ve 2005.00 epoğuna (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi-TUREF) getirilmiştir. Her bir TUTGA noktası için PPP-RTK sisteminde belirsizliklerin tam sayı çözümü (fix) süreleri belirlenmiş ve ortalama yakınsama süreleri hesaplanmıştır.

### 4.4 TUSAGA-Aktif Yöntemi ile Uygulama

TUSAGA-Aktif sisteminin konum doğruluğunun değerlendirilmesi amacıyla Harita Genel Müdürlüğü ile Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü sunucularına bağlanılarak TUTGA noktalarında CORS yöntemi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her noktada RTCM 3.x, VRS formatlarında AĞ-RTK moduna geçilerek 60 epok (saniyede bir olmak üzere) TUSAGA-Aktif sisteminden düzeltme alınmış ve CORS çözümü kayıt edilmiştir. TUSAGA-Aktif sisteminden elde edilen koordinatlar ITRF96 datumunda ve 2005.0 epoğunda (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi-TUREF) olduğundan herhangi bir datum dönüşüm işlemine tabi tutulmamıştır.

### 4.5 SBAS Yöntemi ile Uygulama

Glab programı ile İSTA IGS istasyonunun yılın 237. Gününe ait RINEX gözlem verisi, yine yılın 237nci gününe ait “broadcast ephemeris” yörünge dosyası ile SPP yöntemi ile proses edilmiştir.

SPP prosesi tamamlandıktan sonra şablonlardan SBAS ikonu seçilerek SBAS için 136 PRN numaralı “\*.b” uzantılı mesaj dosyası “ftp://serenad-public.cnes.fr/SERENAD0/FROM\_NTMFV2/MSG/” ftp adresinden indirilmiş ve İSTA İGS

**STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

istasyonuna ait 237'inci güne ait rinex ve broadcast efemeris dosyaları gLAB yazılımına girdi yapılarak GPS+SBAS analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak GNSS hesaplama (proses) ve GNSS+SBAS hesaplamaları yapılmıştır. Proses işlemi esnasında broadcast efemeris kullanılmasının sebebi SBAS'ın her yerde ve her zaman ulaşılabilen, doğru ve güvenilir bir hizmeti anlık olarak sağlamasıdır. Çünkü hassas uyduların yörünge bilgileri için yaklaşık 13- 17 gün bekleme süresi gerekmektedir. Oysa SBAS devamlı bir sistemdir. Yapılan GNSS ve GNSS+SBAS analizleri sonucunda SBAS'ın GPS'e getirdiği konum iyileştirmesi hesaplanmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Ankara ili bölgesinde bulunan 10 adet TUTGA noktası test bölgesi olarak seçilmiştir. TUTGA noktalarına ait hız ve koordinat bilgileri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiş, Statik, PPP, PPP-RTK ve TUSAGA-Aktif (Ağ-RTK) yöntemleri ile arazi çalışması sonucu elde edilen veriler analiz edilerek HGM'den temin edilen koordinatlar ile karşılaştırılmış ve koordinat farkları ile KOH değerleri belirlenmiştir (Tablo 4.1). Ayrıca SBAS yönteminin değerlendirilmesi amacıyla İSTA IGS istasyonunun verileri kullanılmıştır. İSTA istasyonuna ait veriler GPS ve GPS+SBAS verilerinin birlikte analiz edilmesi ile SBAS'ın GPS'e ne ölçüde bir konum iyileştirmesi yaptığı hesaplanmıştır.

Tablo 4. 1: Hesaplanan Kartezyen Koordinatların HGM Koordinatlarından Olan Farkları

HGM KOORDİNATLARINDAN OLAN FARKLAR (cm)												
NOKTA ADI	Statik			PPP			PPP-RTK			Ağ-RTK (TUSAGA-Aktif)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
AYA2	-1.8	-1.5	-1.9	-4.3	-4.7	-4.6	-7.3	-5.1	-8.2	-2.8	-3.2	-5.6
AYS2	1.4	2.7	0.6	-1.3	0.4	-3.4	-1.7	2.0	-1.7	-5.1	4.2	1.8
BAL2	2.6	4.2	4.7	-0.4	1.6	1.3	-3.8	-0.8	-2.8	0.9	-0.4	-4.7
CAML	-0.1	3.2	0.3	-3.0	2.7	-2.0	0.3	2.7	0.1	-0.7	-2.8	0.2
CBUK	-1.0	-1.0	-0.2	-2.2	-0.8	-2.1	1.7	2.6	3.9	4.7	1.2	3.8
HAYM	-4.2	-1.6	-5.0	-5.5	-2.6	-6.2	-3.3	-0.3	-5.1	1.4	4.8	1.4
KUCU	-2.7	1.4	-1.5	-3.7	1.2	-3.7	-2.6	3.8	-2.1	-13.0	-5.9	-6.9
MESE	-3.8	-1.9	-3.7	-2.9	1.5	-3.9	-3.0	0.4	-2.1	-5.4	-0.8	-3.7
NALL	-2.7	1.2	0.1	-3.8	-0.2	-2.3	2.8	4.7	1.9	5.3	4.6	2.5
PAZR	-0.7	-2.2	-3.3	-2.7	-6.8	-6.3	-18.7	-4.3	-78.2	8.1	-0.2	-0.6
<b>EN KÜÇÜK FARK</b>	<b>-0.1</b>	<b>-1.0</b>	<b>0.1</b>	<b>-0.4</b>	<b>-0.2</b>	<b>1.3</b>	<b>0.3</b>	<b>-0.3</b>	<b>0.1</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.2</b>	<b>0.2</b>
<b>EN BÜYÜK FARK</b>	<b>-4.2</b>	<b>4.2</b>	<b>-5.0</b>	<b>-5.5</b>	<b>-6.8</b>	<b>-6.3</b>	<b>-18.7</b>	<b>-5.1</b>	<b>-78.3</b>	<b>-13.0</b>	<b>-5.9</b>	<b>-6.9</b>
<b>KOH</b>	<b>2.5</b>	<b>2.3</b>	<b>2.8</b>	<b>3.3</b>	<b>3.0</b>	<b>3.9</b>	<b>6.8</b>	<b>3.2</b>	<b>25.0</b>	<b>5.9</b>	<b>3.4</b>	<b>3.8</b>

Statik yöntem ile her bir noktada 3'er saat toplanan gözlem verileri GAMIT-GLOBK bilimsel yazılımı ile değerlendirilerek HGM'den temin edilen koordinatlar ve diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda X, Y, Z kartezyen koordinatları sırası ile 2.5 cm, 2.3 cm, 2.8 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Sağa, yukarı, yükseklik, 2D ve 3D koordinatlarında ise sırası ile 1.7 cm, 0.9 cm, 3.7 cm, 2.0 cm ve 4.2 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır.

Üçer saat toplanan gözlem verileri PPP yöntemi kullanılarak Bernese bilimsel yazılımında analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, HGM'den elde edilen TUTGA koordinatları ve diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda X, Y, Z kartezyen koordinatlarında sırası ile 3.3 cm, 3.0 cm, 3.9 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Sağa, yukarı, yükseklik, 2D ve 3D koordinatlarında ise sırası ile 2.5 cm, 1.1 cm, 5.3 cm, 2.7 cm, 5.9 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır.

## STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ağ-RTK (TUSAGA-Aktif) yöntemi ile TUSAGA-Aktif ağına bağlanılarak TUTGA noktalarında 1 saniyelik aralıklarla 60 epok ölçüm yapılmıştır. Ölçümler HGM'den temin edilen koordinatlar ve diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda X, Y, Z kartezyen koordinatlarda sırası ile 5.9 cm, 3.4 cm, 3.8 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Sağa, yukarı, yükseklik, 2D ve 3D koordinatlarında ise sırası ile 3.0 cm, 2.7 cm, 6.7 cm, 4.0 cm, 7.8 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır.

PPP-RTK yönteminde ise TUTGA noktalarında taşıyıcı dalga faz belirsizliklerinin tam olarak çözüldüğü (fix) çözüm için cm seviyesinde doğruluk elde edilene kadar beklenmiş ve bekleme süreleri kaydedilerek yakınsama süresi ortalama 3.9 dakika olarak hesaplanmıştır. Elde edilen koordinatlar HGM TUTGA koordinatları ve diğer yöntemler ile elden edilen koordinatlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda X, Y, Z kartezyen koordinatlarda sırası ile 6.8 cm, 3.2 cm, 25.0 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Sağa, yukarı, yükseklik, 2D ve 3D koordinatlarında ise sırası ile 3.0 cm, 15.2 cm, 21.0 cm, 15.5 cm, 26.1 cm karesel ortalama hata hesaplanmıştır.

SBAS'ın konum iyileştirmesinin hesaplanması amacıyla gLAB programı ile 2024 yılının 237. günü için GPS SPP analizi ve GNSS+SBAS gözlem verilerinin birlikte çözüldüğü analiz yapılmıştır. Analiz işlemi esnasında broadcast efemeris kullanılmıştır. Broadcast efemeris kullanılmasının sebebi SBAS'ın her yerde ve her zaman ulaşılabilen, doğru ve güvenilir bir hizmeti anlık olarak sağlamasıdır. Çünkü final (13- 17 gün) gibi hassas uydu yörünge bilgileri için bekleme süresi gerekmektedir. Oysa SBAS devamlı bir sistemdir. GPS gözlem verileri ile yapılan SPP çözümü ve GPS+SBAS gözlem verilerinin birlikte analiz edilmesi sonucunda elde edilen koordinatlar karşılaştırılmış ve SBAS'ın GPS'e yatay konumda 2.34 metre iyileştirme yaptığı, düşey konumda ise 2.13 metre konum iyileştirmesi yaptığı hesaplanmıştır.

Statik ölçüm yöntemi, yüksek doğruluk istendiğinde, uzun bazlar söz konusu olduğunda, atmosferik etkilerin dikkate alınması durumunda, uydu geometrisi diğer ölçü yöntemlerine olanak vermediğinde, sistematik etkilerin dikkate alınması durumunda (iyonosfer, troposfer) en iyi yöntemdir.

TUSAGA-Aktif (Ağ-RTK) ile herhangi bir yer ve zamanda, birkaç saniye içinde santimetre doğruluğunda harita ve konum bilgisi elde edebilmek mümkündür. Bu yöntemden faydalanmak ve hassas koordinat üretmek için kullanıcı üyeliği, yıllık üyelik ücreti, kapsama alanı, internet olan bir bölgede olma şartı gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Kurumlar tarafında işletme, kurulum ve idame açısından maliyetli olmasına karşın kullanıcılar açısından oldukça düşük maliyetlidir. Zaman açısından da oldukça hızlı bir yöntem olup Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHÜY) Madde-27'ye göre poligon noktası üretiminde kullanılmaktadır.

PPP yöntemi ile tek bir alıcı ile cm doğruluğunda konum elde etmek mümkündür. Düşük maliyetli, her yerde kullanılabilir olması sebebiyle jeodezi ve bilimsel ölçmeler için uygulanabilir bir yöntemdir. Ancak cm doğruluğuna ulaşmanın 15-45 dakika arasında sürmesi, hassas yörünge ve saat bilgilerine ihtiyaç duyması, gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlı olması bu yöntemin zayıflıklarıdır.

PPP-RTK ile TUSAGA-Aktif (Ağ-RTK) erişimi sağlanamayan, uzun süreli statik ölçü olanağı olmayan görevlerde, internetin olmadığı durumlarda GEO uyduları üzerinden yaklaşık dört dakika yakınsama süresinde beş santim altında bir konum doğruluğu sağlamak mümkündür. Daha hassas koordinat üretmek için daha uzun süreli bekleme olanağı vardır.

SBAS, (WAAS, EGNOS ve MSAS vd.) havacılık sektöründe bir kalite kontrol ve izleme sistemi olarak kullanılmaktadır. GPS alıcılarında hesaplanan konumların doğruluk ve güvenilirliğini artırıcı (augmentation) düzeltme bilgileri (yörünge, saat ve atmosferik) yer sabit (geostationary) uydularla gönderilir. Burada öne çıkan düşünce, uydu navigasyon sistemlerinin; her yerde ve her zaman ulaşılabilen, doğru, güvenilir ve kullanımı kolay olması, uçakların güvenli bir şekilde uçuşması ve gemilerin özellikle dar boğaz ve kanallarda güvenli yol almalarını sağlamaktır.

SBAS, havacılık sektörü dışında konum belirleme amacı ile de kullanılmaktadır. Ancak bunun için SBAS düzeltmesi alabilen cihaz, abonelik (ücretli) gerekmektedir. EGNOS'un Avrupa Birliği ülkeleri arasında kullanıldığı, ücreti karşılığı da olsa bu hizmetten yararlanılamayacağı bilgisine ulaşılmıştır. Yapılan incelemeler ve literatür taraması neticesinde SBAS'ın konum doğruluğunun yatayda 1-3 metre düşeyde ise 2-5 metre mertebesinde olduğu öğrenilmiştir. Bu mertebedeki doğruluk hassas konumlama çalışmaları için uygun değildir. Fakat navigasyon amaçlı kullanımlar için uygundur.

Yapılan çalışmanın sonucunda: elde edeceğimiz doğruluğun, verinin ne kadar zamanda, hangi süre aralığında, hangi güvenilirlikte, hangi kapsama alanında olduğuna dair bilgiler verilmektedir. SBAS, Ağ-RTK (TUSAGA-Aktif), PPP-RTK ve Statik ölçüler, jeodezik ölçümler için farklı avantaj ve dezavantajlar sunar. Bu ihtiyaçların belirlenerek doğru ölçüm yönteminin kullanılması en doğru tercih olacaktır. Tüm bu sistemlerin ekonomik açıdan göz önüne alındığında; kullanıcı açısından en hızlı ve ekonomik yöntemin Ağ-RTK olduğu göze çarpmaktadır. Fakat Ağ-RTK dünyanın her yerinde kapsama alanına dahil değildir. En hassas ve doğru sonuç veren yöntem ise Statik ölçüdür. Statik ölçünün dezavantajı ise uzun süreli olmasıdır. PPP yöntemde de Statik yöntemde olduğu gibi hassas koordinat elde edilebilir fakat ölçülerin uzun süreli olması dezavantajdır. PPP-RTK ise geniş kapsama alanı ile GEO uyduları üzerinden konum düzeltmesi ile öne çıkmaktadır. Fakat PPP-RTK'nin dezavantajı ise yakınsama süresidir ve daha geniş testler ile doğruluğunun araştırılması gerekmektedir. SBAS ise havacılık sektöründe bir kalite kontrol ve izleme sistemi olarak kullanılmakta ve konum doğruluğu 1.5-2 metreden daha iyi doğruluklara ulaşamamaktadır. Sonuç olarak, kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun yöntemi seçmesi en önemli konudur.

*STATİK GNSS, AĞ-RTK, PPP-RTK, VE SBAS YÖNTEMLERİNİN VE BUNLARDAN ELDE EDİLEN KOORDİNAT DOĞRULUKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI***Kaynaklar**

- Cai, C., Gao, Y., Pan, L. and Zhu, J., 2015, Precise point positioning with quad constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo, *Advances in space research*, 56 (1), 133-143.
- Fu, W., Huang, G., Yang, Y., Zhang, Q., Cui, B., Ge, M. and Schuh, H., 2019, Multi GNSS combined precise point positioning using additional observations with opposite weight for real-time quality control, *Remote Sensing*, 11(3), 311.
- Herring, T. A., King, R., Floyd, M. A., & McClusky, S. C. (2018). *GAMIT reference manual: GPS analysis at MIT*, release 10.7; department of Earth, Atmospheric and planetary sciences.
- Hadas, T., Kazmierski, K. and Sosnica, K., 2019, Performance of Galileo-only dual frequency absolute positioning using the fully serviceable Galileo constellation, *GPS Solutions*, 23(4), 1-12.
- Kahveci M. (2011). *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi* 2009/1 Sayı 100)
- Kahveci, M., & Yıldız, F. (2018). *GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori-Uygulama*, 10. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti, 2018
- Raquet, J. F. (1998). *Development of a method for kinematic GPS carrier-phase ambiguity resolution using multiple reference receivers* (Doctoral dissertation, University of Calgary).
- Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (Eds.). (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer.

# Farklı Yer Potansiyeli Modelleri ile TG-20 Jeoidinin Karşılaştırılması-ICGEM Parametrelerinin İncelenmesi

İbrahim AĞGÖZ<sup>1</sup>, İrem KÖZ<sup>2\*</sup>, Serkan DOĞANALP<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya.

## Özet

Jeodezi bilimi; üzerinde yaşadığımız gezegenin şekil ve boyutlarının merak edilmesi üzerine ortaya çıkmıştır. Jeodezinin amacı fiziksel yer yüzünün yüksek hassasiyetle ölçülmesi ve bu ölçüler için matematiksel model geliştirmektir. Yatay koordinatlar için matematiksel olarak tanımlanabilen referans elipsoidlerinden elde edilen düşey koordinatlar/yükseklikler, fiziksel olarak anlamlı değildir. Bu sebeple suyun akış yönünü, eğimini belirleyebilecek fiziksel anlamlı yükseklikler için jeoit tanımı yapılmaktadır. Bu çalışmada, nivelman ve gravite ölçümleri kullanılarak oluşturulan Türkiye'ye özgü TG-20 hibrit jeoit modeline en uyumlu küresel yer potansiyel modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, TG-20 modeline ait 5'x5' çözünürlüğündeki enlem, boylam verileri kullanılarak; ICGEM servisinde bulunan EGM2008, XGM2019e\_2159, EIGEN-6C4 ve SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelleri (GGM) üzerinden jeoit yükseklikleri hesaplanmıştır ve TG20 modeli ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar, GRS80 elipsoidi referans alınarak yapılmış ve sıfır derece terimi (Zero Degree Term) dikkate alınarak ve alınmadan, üç farklı gelgit sistemi (gelgitten arındırılmış – Tide-Free, sıfır gelgit – Zero Tide ve ortalama gelgit – Mean-Tide) kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen jeoit yükseklikleri, TG-20 modelinin değerleriyle karşılaştırılmış ve farkların standart sapmaları hesaplanarak analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda çalışmanın son aşamasında, üretilen modele parametrik modeller (üç, dört, beş ve yedi parametrelili) uygulanarak model ile TG20 ile arasındaki sistematik hataların minimize edilmesi amaçlanmış ve istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda TG-20 jeoit modeliyle en uyumlu olan modele sistematik hataların giderilmesi için parametrik modeller uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 2190 açılım derecesine sahip SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelin, ortalama gelgit sistemi ve sıfır derece değeri etkisinin olmadığı, Half Transfer Gauss filtresinin ve 7 parametrelili parametrik modelin uygulandığı versiyonunda  $\pm 0.148$  m standart sapmayla en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

## Anahtar Sözcükler

Jeoid, Küresel Yer Potansiyel Model, ICGEM, TG20, Gauss Filtresi

## Abstract

The science of geodesy emerged out of curiosity about the shape and size of the planet we live on. The aim of geodesy is to measure the physical surface of the earth with high accuracy and develop mathematical models for these measurements. The vertical coordinates/heights obtained from reference ellipsoids, which can be defined mathematically for horizontal coordinates, are not physically meaningful. Therefore, geoid is defined as providing physically meaningful heights that can represent the flow direction of water and the slope. In this study, it is aimed to determine the global geopotential model that best fits the TG-20 hybrid geoid model, developed specifically for Türkiye using leveling and gravity measurements. In this direction, using the data of 5'x5' resolution for latitude and longitude of TG20 model, geoid elevations were calculated from the EGM2008, XGM2019e\_2159, EIGEN-6C4 and SGG-UGM-2 global geopotential models (GGM) in the ICGEM service. The computations were performed with reference to the GRS80 ellipsoid, both considering and neglecting the zero-degree term, and under three different tide systems: tide-free, zero-tide, and mean-tide. The obtained geoid heights were compared with the values of the TG20 model and differences were analyzed by calculating the standard deviations. Based on these results, parametric models (with three, four, five, and seven parameters) were applied to minimize the systematic differences between the produced model and TG-20, and statistical results were derived. As a result, it was found that the global geopotential model SGG-UGM-2, with a maximum degree and order of 2190, yielded the best agreement with the TG-20 geoid model when the mean-tide system, zero-degree term exclusion, Half-Transfer Gaussian filter, and the 7-parameter parametric model were applied, achieving a standard deviation of  $\pm 0.148$  m.

## 1. Giriş

Jeodezi klasik ve uydu teknikleri kullanılarak doğrultu, uzunluk, yükseklik, zaman ve gravite gibi temel ölçülerle yeryüzünün şeklini, boyutlarını ve gravite alanı ile bunların zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi bilimidir (Kahveci vd., 2021). Yeryüzünün matematiksel şekli olarak 1872 yılında Listing tarafından tanımlan jeoit karmaşık bir yüzeydir ve matematiksel olarak kolayca tanımlanamaz (Şişman ve Elevli, 2018). Jeoit deniz seviyesini başlangıç olarak kabul eden bir referans yüzeyidir ve matematiksel bir anlam ifade etmez fakat fiziksel anlamlıdır. Elipsoidin ise fiziksel anlamı olmamasının karşısında matematiksel fonksiyonlarla ifade edilebilen hayali bir referans yüzeyidir. Jeoit belirleme kullanılan verilere ve uygulanan yöntemlere göre çeşitlilik göstermektedir (Arslan vd., 2005). Fiziksel yeryüzünün şeklinin daha hassas belirlenebilmesi için jeoit belirleme çalışmaları hız kazanmış ve global jeoit, bölgesel jeoit ve lokal jeoit türleri ortaya çıkmıştır. Uydu jeodezisi yöntemleri ile belirlenen ve elipsoid normal boyunca elipsoidal yükseklik (h) ve jeoitten itibaren çekül doğrultusu boyunca ölçülen ortometrik yükseklik (H) arasındaki ilişkinin jeoit ondülasyonu (N) ile kurulmasıyla bölgesel jeoit belirleme çalışmaları hız kazanmıştır (Şişman ve Elevli, 2018). Uydu teknolojilerinin gelişmesiyle jeoit belirleme çalışmaları hız kazanmış yersel tekniklere göre uydu verilerine göre jeoit belirleme

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0332) 205 18 53

E-posta: ikoz@ktun.edu.tr (İrem KÖZ)

çalışmaları noktalar arası görüş mesafesinin olmasından kaynaklı yersel teknikle jeoit belirleme yöntemine göre daha avantajlı konumda olmuştur (Aşık, 2013). Jeoidin yüksek doğruluklu olması yer yüzünde yapılan çalışmaların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir fakat yeryüzünün sürekli hareket eden canlı bir yapıya sahip olması jeoit çalışmalarının belirli zaman aralıklarında yapılması gerektiği varsayımını ortaya koymaktadır. Uydu ölçümlerinin veri kaynağı olarak eklenmesi zamansal çözünürlüğü iyileştirmiştir. Yüksek doğruluklu jeoit belirlemek için zaman çerçevesince gravite anomalileri ölçülmüş ve düzeltmeler getirilerek yüksek doğruluklu jeoit modelleri oluşturulmuştur. Jeoit sadece yeryüzünün canlı olmasından kaynaklı değişime uğramamaktadır. Üzerinde yaşadığımız gezegenin farklı gezegenler tarafından bir çekim kuvvetine maruz kalması nedeniyle deniz yüzeyinde farklılıklar gözlemlenmekte ve bu farklılıklar nedeniyle jeoidin referans aldığı deniz yüzeyi sürekli değişmektedir.

Harita Genel Müdürlüğüne yayınlanan TG-20 Türkiye jeoit modeli hibrit yöntemle oluşturulmuş ve TG-03'e göre daha yüksek doğruluklu bir global jeoit modeli olduğu açıklanmıştır. Yapmış olduğumuz çalışma TG-20 (5 yay dakikası) hibrit jeoit modeline ait noktaların enlem ve boylam değerleri ICGEM servisine aktarılarak EGM2008, XGM2019e\_2159, EIGEN-6C4 ve SGG-UGM-2 global yer potansiyel modellerine ait jeoit yükseklikleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda sıfırcı değer etkisi (Zero Degree Term) dikkate alınarak ve alınmayarak; gelgitten arındırılmış sistem (Tide-Free), sıfır gelgit sistemi (Zero-Tide) ve ortalama gelgit sistemi (mean-tide) olmak üzere 3 farklı gelgit sistemi kullanılmıştır. Kullanılan modeller ve gelgit sistemlerine ait jeoit yüksekliği TG-20 jeoit modeline ait jeoit yüksekliği farkları alınarak bu farklılıklarla ilişkin standart sapmalar hesaplanarak GGM modelleri ve farklı gelgit sistemleri karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar doğrultusunda standart sapma değeri en düşük olan GGM modeline half reponse, half transfer ve 6 sigma Gauss filtresi uygulanarak standart sapma değerleri incelenmiştir. Çıkan sonuçlar doğrultusunda TG-20 jeoit modeline en uyumlu küresel yer potansiyel modeline sistematik hataların giderilmesi için parametrik modeller uygulanmış ve sistematik hatalar giderilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Kullanılan Küresel Yer Potansiyel Modelleri (GGM) ve TG20 Jeoidi

Tablo 1: Jeoid modellerine ait bilgiler

Model	Yıl	Açınım Derecesi	Veri Kaynağı	Kaynak
EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)	Pavlis, N.K. et al, (2012)
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, C. et al, (2014)
XGM2019e_2159	2019	2190-5540-760	A, G, S(GOCO06s)	Zingerle, P. et al, (2019)
SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)	Liang, W. et al, (2020)
TG20	2020		G, GOCO06S, SRTM, XGM2019e	Harita Genel Müdürlüğü (HGM, 2021) Yıldız ve diğ. (2020)

- Altimetre(A) = Uydu altimetre verileri (özellikle okyanus yüzeyinden yükseklik verisi)
- Gravimetri(G) = Yer tabanlı veya uydu destekli yerçekimi ölçümleri
- GRACE verisi (S(GRACE)) = GRACE uydularının verileri
- LAGEOS uydusu verileri (S(LAGEDOS)) = LAGEOS uydusundan alınan uydu lazer mesafe ölçüm verileri
- GOCE verisi (S(GOCE)) = GOCE uydusunun yüksek hassasiyetli yerçekimi gradiyent ölçümleri
- Küresel yerçekimi model verisi (SGOCO06s) = Küresel yerçekimi alanı – Küresel harmonik katsayılarıdır.

### 2.2. Gelgitten Arındırılmış Sistem (Tide-Free) Sistemi

Yerçekimi alanı fonksiyonlarının hesaplanmasındaki bir diğer önemli bileşen, referans gelgit sistemiyle ilgili olarak Dünya'nın basıklığı (flattening) nedeniyle oluşan sistematik etkidir. Bu etki, jeoidin tanımlanması açısından önemlidir. Hesaplama sayfasında, aşağıda belirtilen üç farklı gelgit sistemi arasından seçim yapılabilir (İnce vd., 2019);

- Gelgitten arındırılmış sistem (Tide-free): Güneş ve Ay'ın doğrudan ve dolaylı etkileri kaldırılmış sistem,
- Sıfır gelgit sistemi (Zero-tide): Güneş ve Ay'ın kalıcı doğrudan etkileri kaldırılır, ancak Dünya'nın elastik deformasyonu ile ilgili dolaylı etki korunmuş sistem,
- Ortalama gelgit sistemi (Mean-tide): Hiçbir kalıcı gelgit etkisi kaldırılmamış sistem.

### 2.3. Sıfıncı Derece Terimi (Zero Degree Term)

Sıfıncı derece terim,  $W_0$  değeri  $U_0$ 'dan farklı şekilde seçildiğinde veya hesaplandığında ve/veya jeopotansiyel model ile referans elipsoit arasındaki  $GM$  (yerçekimi sabiti) değerleri farklı olduğunda ortaya çıkar. Bu nedenle, bilinen bir referans elipsoidal yüzeye göre jeoit ondülasyonunun doğru şekilde hesaplanabilmesi için bu terimin dikkate alınması gerekir (İnce vd., 2009).

### 2.4. Gauss Filtreleme

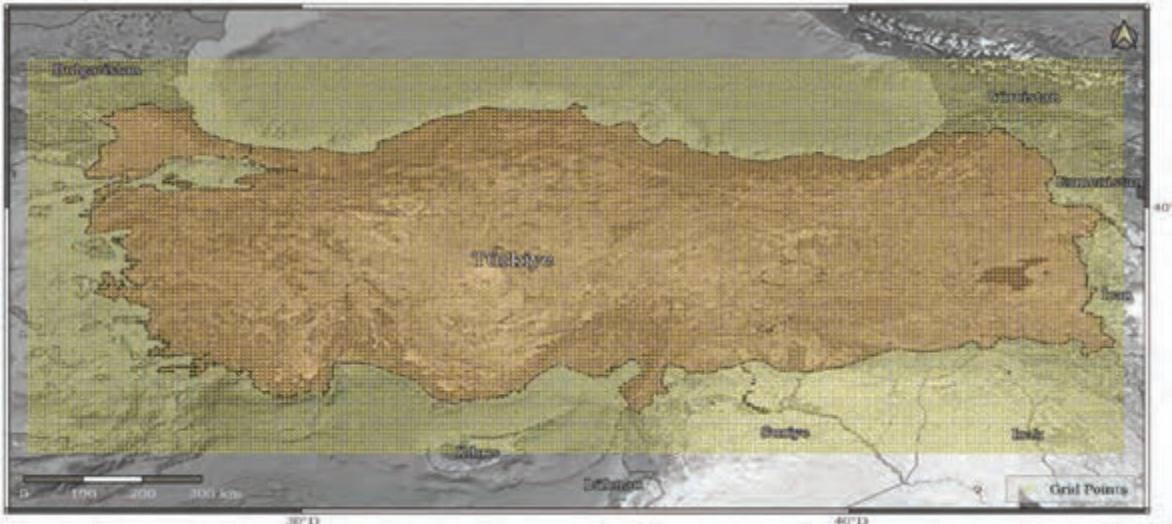
Küresel alanda elde edilen gridin düşük geçiren (low-pass) filtrenmesi, ortalama bir Gauss eğrisi fonksiyonuyla kullanılarak gürültü dalgalarını azaltılır. Girdi verisine Gauss eğrisi uygulanarak ortalaması alınır ve Gauss çan eğrisine göre yumuşatılır. Bu Gauss eğrisi, çan şeklindedir ve bu çanın küre etrafında döndürülerek çevrelemesiyle uzaysal alanda Gauss fonksiyonu elde edilir (URL1).

*Tablo 2: Gauss filtrelerine ait bilgiler*

Filtre İsmi	Formülü
6sigma	$\Phi=6\sigma$
Half transfer	$T\lambda(\lambda=\Phi) = \frac{1}{2}$
Half response	$R(x=\Phi) = \frac{1}{2}$

## 3. Sayısal Uygulama

Bu çalışmada EGM2008, EIGEN6C4, XGM2019e\_2159 ve SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelleri TG-20 Türkiye Hibrit Jeoit modeline ait enlem ve boylam verileri aktararak jeoit yükseklikleri sıfıncı değer etkisi (Zero Degree Term) dikkate alınarak ve alınmayarak; gelgitten arındırılmış sistem (Tide-Free), sıfır gelgit sistemi (Zero-Tide) ve ortalama gelgit sistemi (mean-tide) olmak üzere 3 farklı gelgit sistemi ve en düşük standart sapma değerine sahip olan GGM modeline half response, half transfer, 6 sigma Gauss filtresi, daha sonra en iyi çıkan modele sistematik hataların giderilmesi için 3, 4, 5 ve 7 parametreliler modeller uygulanmıştır. Çalışmada 23040 adet nokta kullanılmıştır. Çalışma alanı ve veri konumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



*Şekil 1: Çalışma alanı ve kullanılan grid noktaları*

### 3.1. TG-20 Modeli ile Küresel Yer Potansiyel Modelleri (GGM) Sıfıncı Terim ve Farklı Gelgit Sistemlerinde Karşılaştırmaları

Tablo 2 incelendiğinde sıfıncı değer etkisi hesaba katıldığında farklı gelgit sistemlerinde yapılan hesaplamalarda tüm gelgit sistemlerinde en düşük standart sapma değerlerinin ortalama gelgit sistemlerinde olduğu görülmüştür. En düşük

standart sapma değeri 0.18643 m ile SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelindedir. Aynı şekilde sıfırcı değer etkisi hesaba katılmadan farklı gelgit sistemlerinde hesaplanan standart sapma değerleri karşılaştırıldığında, en düşük standart sapma değeri yine SGG-UGM-2 GGM modelinde, ortalama gelgit sisteminde  $\pm 0.18640$  m standart sapma ile olduğu görülmüştür.

Tablo 2: ICGEM Küresel yer potansiyel modellerinin TG20 jeoidi ile karşılaştırması-standart sapma değerleri

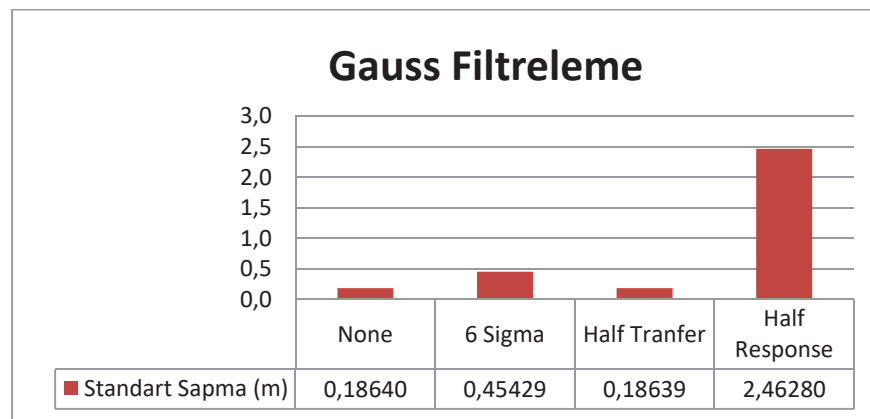
Küresel Yer Potansiyel Model	Sıfırcı Değer Etkisi Varken			Sıfırcı Değer Etkisi Yokken		
	Tide Free (m)	Mean Tide (m)	Zero Tide (m)	Tide Free (m)	Mean Tide (m)	Zero Tide (m)
EGM2008	0.217	0.210	0.215	0.215	0.210	0.215
EIGEN-6C4	0.195	0.188	0.194	0.194	0.188	0.194
XGM2019e_2159	0.194	0.187	0.192	0.192	0.187	0.192
SGG-UGM-2	0.194	<b>0.186</b>	0.192	0.192	<b>0.186</b>	0.192

### 3.2. SGG-UGM-2 GGM modeline Gauss Filtresi Uygulaması

Uygulamanın bu aşamasında, Gauss filtrelerinin etkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda en düşük standart sapma değerine sahip olan sıfırcı değer etkisi yokken ortalama gelgit sisteminde hesaplanan SGG-UGM-2 GGM modeline Half Response, Half Transfer ve 6 Sigma Gauss filtreleri uygulanarak jeoit yükseklikleri hesaplanmış, TG-20 jeoit yükseklikleri ile farkları alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. 2190 açınım derecesine sahip olan SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelinin farklı filtreler altında belirli açınım değerlerine kadar hesaplandığı dikkat çekmiştir. Çalışmanın bu aşamasına ait standart sapma sonuçları Tablo 3'te ve grafiksel gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 3: Farklı Gauss filtreleri uygulanan SGG-UGM-2 modeli ile TG20 jeoidi karşılaştırması

Gauss Filtresi Adı	Standart Sapma (m)	Açınım Derecesi
None	0.186	2190
6 Sigma	0.454	1277
Half Transfer	<b>0.186</b>	2190
Half Response	2.462	250



Şekil 2: Farklı Gauss filtreleri uygulanan SGG-UGM-2 modeli ile TG20 jeoidi karşılaştırması

Tablo 3'te görüldüğü üzere gauss filtreleri farklı açınım derecelerine göre hesaplama yapmaktadır. Standart sapmaları incelendiğinde açınım derecesinin hesaplamalara etkisinin oldukça büyük olduğu gözlemlenmiştir. Açınım derecesinin düşük olması yapılan uygulamanın doğruluğunu negatif anlamda etkilemiştir. En yüksek standart sapma değeri 250 açınım derecesine sahip Half Response filtresinde  $\pm 2.46280$  m olduğu görülmüştür. En düşük standart sapma değeri ise 2190 açınım derecesine sahip Half Transfer filtresinde  $\pm 0.18639$  m olduğu görülmüştür. Açınım derecesi değerinin, farklara ilişkin standart sapma değerlerini doğrudan etkilediği görülmüştür. Uygulama sonucunda en düşük standart sapma değerini veren parametreler SGG-UGM-2 küresel yer potansiyelinde, ortalama gelgit sistemine sıfırcı değer

etkisi (Zero Degree Term) hesaplamaya katılmadan Half Transfer Gauss filtresi uygulanarak yapılan uygulamada  $\pm 0.18639$  m olarak hesaplandığı görülmüştür.

### 3.3. Küresel Yer Potansiyel Modeline (GGM) Parametrik Modellerin Uygulanması

Çalışmanın son aşamasında, Half Transfer Gauss Filtresi uygulanarak en iyi sonucu veren SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modeline parametrik modeller uygulanmış ve TG20 jeoit modeli ile arasındaki uyumun ne kadar iyileştiği incelenmiştir. Uygulanan parametrik modellere ait fonksiyonlar Tablo 4'te verilmiş olup bilinmeyen elemanlar  $x_i$  En Küçük Kareler yöntemi ile hesaplanmıştır.

Tablo 4: Parametrik modellere ait bilgiler

Parametrik Model	Matematiksel Formülü
3 parametrelili	$\Delta N = \cos\varphi_i \cos\lambda_i * x_1 + \cos\varphi_i \sin\lambda_i * x_2 + \sin\varphi_i * x_3 + v_i$
4 parametrelili	$\Delta N = \cos\varphi_i \cos\lambda_i * x_1 + \cos\varphi_i \sin\lambda_i * x_2 + \sin\varphi_i * x_3 + x_4 + v_i$
5 parametrelili	$\Delta N = \cos\varphi_i \cos\lambda_i * x_1 + \cos\varphi_i \sin\lambda_i * x_2 + \sin\varphi_i * x_3 + x_4 + x_5 + v_i$
7 parametrelili	$\Delta N = \cos\varphi_i \cos\lambda_i * x_1 + \cos\varphi_i \sin\lambda_i * x_2 + \sin\varphi_i * x_3 + \frac{\cos\varphi_i \sin\varphi_i \cos\lambda_i}{w_i} * x_4$ $+ \frac{\cos\varphi_i \sin\varphi_i \sin\lambda_i}{w_i} * x_5 + \frac{\sin^2\varphi_i}{w_i} * x_6 + x_7 + v_i$

$x_i$  değerleri iki datum arasındaki dönüştürme parametrelerini,  $v_i$  değerleri artık rastgele gürültü terimini,  $(\varphi_i, \lambda_i)$  değerleri noktanın jeodezik koordinatlarını,  $e$  referans elipsoidinin birinci eksantrikliğini olmak üzere  $w_i = \sqrt{1 - e \sin^2\varphi_i}$ 'yi temsil etmektedir (Doğanalp, S. 2016). Parametrik modellerin uygulanması ile elde edilen farklara ait istatistiksel sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Parametrik modellerin uygulama sonuçları

Küresel Yer Potansiyel Model	Parametrik Model	Minimum (m)	Maksimum (m)	Standart Sapma (m)	Karesel Ortalama Hata (m)
SGG-UGM-2	3 parametrelili	-0.626	1.082	0.164	0.164
	4 parametrelili	-0.662	1.068	0.163	0.163
	5 parametrelili	-0.642	1.037	0.158	0.158
	7 parametrelili	-0.568	1.057	<b>0.148</b>	<b>0.148</b>

Tablo 5'e bakıldığında 7 parametrelili modelin uygulanması ile SGG-UGM-2 ile TG20 arasındaki farkların azalarak standart sapma değerinin iyileştiği gözlenmiştir. Parametre sayısının artması ile modelin standart sapma ve karesel ortalama hata açısından sonuçları iyileştirdiği görülmüştür.

### Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, kullanılan 4 farklı küresel yer potansiyel modelin TG20 jeoidine olan uyumlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ICGEM hizmetindeki farklı gelgit sistemleri ve Gauss filtrelerinin etkileri araştırılmış. Ardından en uyumlu olduğu düşünülen modelin sistematik hatalarının giderilmesi amacıyla parametrik modeller kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 2190 açınım derecesine sahip SGG-UGM-2 küresel yer potansiyel modelin, ortalama gelgit sistemi ve sıfıncı değer etkisinin olmadığı, Half Transfer Gauss filtresinin ve 7 parametrelili parametrik modelin uygulandığı versiyonunda  $\pm 0.148$  m standart sapma ile en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan verilerin doğruluğu ve modellerin açınım derecelerinin, çıkan sonuçların doğruluklarını oldukça etkilemekte olduğu analizler sonucunda görülmüştür.

**Kaynaklar**

- Arslan, E., & Yılmaz, M. (2005) Geoit Belirleme Yöntemleri. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- Aşık, E. (2013) *Lokal jeoit belirlemede yapay sinir ağları ve Kriging yöntemlerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye.
- Doğanalp, S. (2016) An Evaluation of Recent Global Geopotential Models for Strip Area Project in Turkey. *Earth Sciences Research Journal* 20(3), C1-C10. <http://dx.doi.org/10.15446/esri.v20n3.55440>.
- Förste, C., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., Biancale, R. (2014) EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *GFZ Data Services*. <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.
- HGM, (2021) *Proje Tamamlama Raporu, Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi 2015K090710 (2015K09-2464)*, Ankara, Türkiye.
- Ince, E.S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F. ve Schuh, H. (2019) ICGEM–15 yıllık küresel yerçekimi modelleri, ilişkili hizmetler ve gelecek planlarının başarılı bir şekilde toplanması ve dağıtılması. Dünya sistemi bilimi verileri , 11 (2), 647-674.
- Kahveci, M., Tuşat, E., ve Doğanalp, S. (2021) Jeodezik Kordinat Sistemleri Teori&Uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Liang W., Li J., Xu, X., Zhang, S., Zhao, Y. (2020) A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008. *Engineering*, 860-878. DOI: [10.1016/j.eng.2020.05.008](https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008).
- Pavlis, N.K, Holmes, S.A, Kenyon, S.C, Factor, J.K. (2012) The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research. Solid Earth* (1978-2012) Volume 117, B04406. DOI: [10.1029/2011JB008916](https://doi.org/10.1029/2011JB008916).
- Şişman, Y., Elevli, B. (2018) En Küçük Kareler Kollokasyon ve Kriging Yöntemleri ile Lokal Jeoit Belirleme. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 8(2), 106-118. <https://doi.org/10.31466/kfbd.447658>.
- Zingerle, P., Brockmann, J.M., Pail, R.; Gruber, T., Willberg, M. (2019) The polar extended gravity field model TIM\_R6. GFZ Data Services. DOI: [10.5880/ICGEM.2019.005](https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.005).
- Yıldız, H., Simav, M., Sezen, E., Akpınar, İ., Akdoğan, Y.A., Cingöz, A., Akabalı, O.A. (2020) The Turkish hybrid geoid: TG-20. V. 1.0. GFZ Data Services. DOI: [10.5880/isg.2020.011](https://doi.org/10.5880/isg.2020.011).
- URL1: Gaussian Filtering. <https://icgem.gfz-potsdam.de/docs/GaussianFilter.pdf> [Erişim tarihi: 05.08.2025].

# İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi

Abdurahman Yasin Yiğit<sup>1</sup>, Halil İbrahim Şenol<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin

<sup>2</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63000, Şanlıurfa

## Özet

Bu çalışmada, İHA görüntüleri kullanılarak üretilen ortofoto ve sayısal yükseklik modeli (SYM) ürünlerinin konumsal doğruluğu, farklı Yer Kontrol Noktası (YKN) senaryoları üzerinden değerlendirilmiştir. Düz topoğrafyaya sahip kırsal bir alanda gerçekleştirilen uygulamada, sabit sayıda ve homojen dağıtılmış 12 Denetleme Noktası (DN) kullanılarak 4, 8, 12, 16 ve 20 YKN içeren beş farklı senaryo oluşturulmuştur. Her senaryoda blok dengeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve doğruluk analizleri DN'ler üzerinden yapılmıştır. Planimetrik ve yükseklik doğruluğu, kök ortalama kare hata (RMSE) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, YKN sayısındaki artış doğruluk üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamış, ancak 12 YKN'den sonra bu artış sınırlı kalmıştır. 12 YKN ile elde edilen doğruluk değerleri mühendislik uygulamaları için yeterli bulunmuş, 16 ve 20 YKN senaryolarında ise doğruluk yalnızca marjinal düzeyde artmıştır. Bu durum, saha uygulamalarında optimum kontrol noktası planlaması açısından 12 YKN'nin dengeli ve verimli bir tercih olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, sahada zaman ve kaynak tasarrufu sağlamak adına kontrol noktası dağılımının planlanmasında dikkat edilmesi gereken kritik unsurlara ışık tutmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

İHA, Fotogrametri, Yer Kontrol Noktası, Doğruluk Analizi, Ortofoto, Sayısal Yükseklik Modeli

## 1. Giriş

Mekânsal Günümüzde mekânsal bilgi, sadece haritacılık ve mühendislik uygulamaları için değil; doğal kaynak yönetimi, arazi kullanım planlaması, tarımsal izleme, orman yönetimi, afet risk değerlendirmesi, çevresel modelleme ve şehirleşme dinamiklerinin analizi gibi birçok alanda kritik bir veri katmanı olarak konumlanmaktadır (Reddy 2018, Rezvani vd. 2023). Söz konusu bu alanlarda ihtiyaç duyulan mekânsal verilerin çoğu zaman yüksek çözünürlüklü, güncel ve güvenilir olması beklenmektedir. Özellikle kısa sürede geniş alanları kapsayacak şekilde veri üretebilme kabiliyeti, geleneksel yöntemlerin yerine daha esnek ve teknolojik çözümlerin tercih edilmesine yol açmıştır (Xia vd. 2018).

Bu bağlamda insansız hava araçları (İHA), mekânsal veri üretim teknolojileri içerisinde önemli bir konum edinmiş; hem operasyonel kolaylıkları hem de yüksek doğruluk potansiyelleri sayesinde son yıllarda birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Mohsan vd. 2022). Yüksek çözünürlüklü görüntü toplama kabiliyeti, esnek uçuş senaryoları, düşük maliyetli donanım seçenekleri ve yazılım destekli iş akışları sayesinde İHA'lar, hem akademik hem de sektörel üretim süreçlerinin ayrılmaz bir bileşeni haline gelmiştir (Muhamad Kamarulzaman vd. 2023). İHA destekli veri üretim süreçleri, özellikle ortofoto ve sayısal yükseklik modellerinin (SYM) oluşturulmasında klasik hava fotoğrafçılığına kıyasla daha erişilebilir ve hızlı çözümler sunmaktadır (Quamar vd. 2023).

Bununla birlikte, İHA ile üretilen fotogrametrik ürünlerin güvenilirliğini değerlendirmede en temel kriter, konumsal doğruluktur. Ortofoto ve SYM gibi ürünlerin doğruluğu, elde edilen görüntülerin çözünürlüğü, uçuş irtifası, örtüşme oranları gibi faktörlerin yanı sıra, kullanılan kontrol noktalarının sayısı, kalitesi ve özellikle dağılım desenleri ile doğrudan ilişkilidir (Rauhala vd. 2017). Fotogrametrik üretim sürecinde kullanılan Yer Kontrol Noktaları (YKN), modelin geometrik iskeletini sabitlemek amacıyla blok dengeleme işlemine dahil edilirken; Denetleme Noktaları (DN), bu sisteme dahil edilmeyip yalnızca ürünlerin doğruluğunu bağımsız olarak test etmek amacıyla kullanılmaktadır (Alkan vd. 2023).

Literatürde YKN sayısının doğruluk üzerindeki etkisini araştıran çok sayıda akademik çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğu, belirli sayılarda YKN kullanılarak üretilen ürünlerin planimetrik ve yükseklik doğruluğunu analiz etmeye odaklanmıştır (Atik ve Arkali 2024). Ancak, YKN ve DN noktalarının arazi üzerindeki dağılım desenlerinin doğruluk üzerindeki etkisi daha az sayıda çalışmada sistematik biçimde incelenmiştir. Oysa sahadaki gerçek uygulamalarda, nokta yerleşimi çoğu zaman arazi koşullarına, erişim olanaklarına veya operasyonel sınırlamalara göre şekillenmektedir. Bu durum, teorik olarak optimum görünüm nokta sayısına rağmen, ürün doğruluğunun istenen düzeye ulaşamamasına neden olabilmektedir (Pourreza vd. 2022). Özellikle düz topoğrafyalı, yapılaşmamış ve geniş alanlı kırsal bölgelerde, kontrol noktalarının rastlantısal ya da gelişigüzel şekilde konumlandırılması; hem planimetrik hem de yükseklik bileşeninde öngörülemeyen sapmalara neden olabilmektedir.

Bu çalışma, bu boşluğa doğrudan yanıt veren ve uygulama odaklı öneriler sunmayı hedefleyen bir yapıda tasarlanmıştır. Düz topoğrafyaya sahip kırsal bir alanda İHA görüntüleri ile elde edilen ortofoto ve SYM ürünleri üzerinden, farklı YKN senaryoları oluşturulmuş; her senaryoda YKN sayısı sabit DN noktaları ile değerlendirilerek ürün doğruluğu analiz edilmiştir. YKN'lerin yalnızca sayısal değil, aynı zamanda homojen dağılımlı ve tüm alanı kapsayıcı

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (539) 3799149

E-posta: ayasinyigit@mersin.edu.tr (Yiğit A.Y.), hsenol@harran.edu.tr (Şenol H. İ.)

*İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi*

şekilde yerleştirildiği bu yaklaşım, sahaya yönelik sistematik bir kontrol noktası planlamasının doğruluk üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel katkısı, saha uygulamaları için minimum eforla maksimum doğruluk sağlayacak YKN stratejilerini ortaya koymak ve “daha fazla nokta = daha yüksek doğruluk” anlayışının sınırlarını net biçimde belirlemektir. Ayrıca bu çalışma, hem mühendislik uygulamaları için gerekli doğruluk eşiklerine ulaşmak adına optimum nokta dağılımını belirlemeyi hem de sahada kaynak ve zaman kullanımını verimli hale getirmeyi hedefleyen araştırmacılar ve uygulayıcılar için yol gösterici niteliktedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, topoğrafik olarak büyük ölçüde düz, yapılaşmadan uzak ve doğal yüzey örtüsüne sahip kırsal bir alanda gerçekleştirilmiştir. Alan, Türkiye'nin İç Anadolu iklim ve topoğrafyasına benzer koşulları yansıtmakta olup, zemin karakteri homojen dağılımlı, seyrek bitki örtüsüyle kaplıdır. Çalışma sahası üzerinde herhangi bir yapılaşma veya yüksek eğim değişimi bulunmadığından, fotogrametrik ürünlerin doğruluk analizinde YKN ve DN dağılımının etkilerini izole biçimde değerlendirme açısından uygun bir test ortamı sunmaktadır.

Görsel analiz ve SYM verilerine göre, çalışma alanı genel olarak düz karakterli olmakla birlikte, batı-güneybatı yönlerinde düşük genlikli yükseltiler, doğu sınırında ise stabilize bir yol yapısı yer almaktadır. Bu farklılıklar, analiz edilen alan içerisinde doğal varyasyonların sınırlı düzeyde temsil edildiğini göstermekte; böylece kontrol noktalarının dağılımından kaynaklı doğruluk değişimlerinin daha net biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

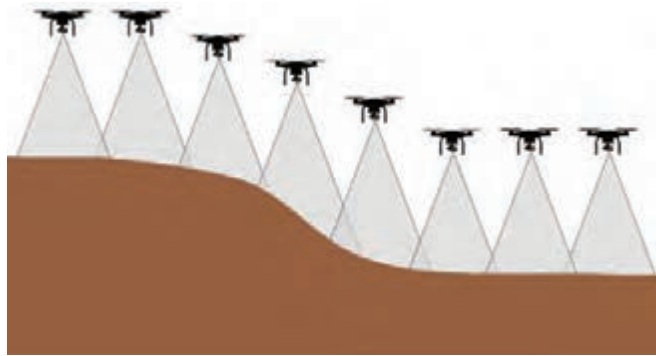
Alan üzerinde konumlandırılan YKN ve DN, homojen bir dağılımla tüm yüzeye yayılarak, doğruluk analizlerinin alan genelini temsil edecek şekilde gerçekleştirilmesine imkân vermiştir. Özellikle topoğrafik sadelik ve erişilebilirlik kolaylığı, bu alanı kontrol noktası dağılımına odaklanan çalışmalar için model niteliğinde bir test ortamına dönüştürmektedir.

### 2.2. Donanım ve Veri Seti

Bu çalışmada, görüntü verileri DJI Phantom 4 Pro model sabit kameralı İHA ile toplanmıştır. Uçuş planlaması, Map Pilot Pro yazılımı kullanılarak yapılmış; "Terrain Awareness" (Arazi Farkındalık) özelliği aktif hale getirilerek, İHA'nın yer yüzeyine sabit mesafede uçuşu sağlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, arazideki mikro topoğrafik değişimlere rağmen görüntü örtüşmesi (%80 boyuna, %60 enine) ve harita çözünürlüğü (Yer örneklem aralığı/YÖA) sabit kalmış, özellikle sayısal yükseklik modeli üretiminde geometrik bozulmaların önüne geçilmiştir.

Şekil 1'de gösterildiği gibi, arazi farkındalık özelliği aktif olmayan uçuşlarda, İHA sabit yükseklikten uçtuğunda örtüşme ya da çözünürlük dengesizliği meydana gelebilmektedir. Ancak bu çalışmada, dinamik irtifa ayarlaması sayesinde zeminle İHA arasındaki mesafe yaklaşık sabit tutularak, hem ortofoto hem de SYM ürünlerinde daha homojen kalite ve doğruluk elde edilmiştir. Uçuş nominal olarak 60 metre irtifada planlanmış, bu değer cihazın sistem yüksekliğiyle birlikte yaklaşık 73 metreye karşılık gelmiştir. Görüntüler çift yönlü (double grid) uçuş modeliyle elde edilmiş, her görüntü 2.5 cm/piksel yer örnekleme aralığına sahiptir.

Kontrol verileri için sahaya toplam 20 YKN ve 12 DN yerleştirilmiştir. Tüm noktaların koordinatları, santimetre altı doğruluk sağlayan GNSS ölçüm sistemiyle belirlenmiş ve fiziksel olarak sahaya işaretlenmiştir. Nokta seçiminde hem yatay hem de düşey doğruluğun sağlanmasına dikkat edilmiş, dağılım desenleri analiz sürecine uygun olacak şekilde kurgulanmıştır.



Şekil 1: Arazi farkındalık özelliği ile sabit yüzey mesafesinde uçuş

### 2.3. Fotogrametrik Süreç

İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, fotogrametrik değerlendirme için Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak işlenmiştir. İlk aşamada, ham görüntüler yazılım ortamına aktarılmış ve uçuş parametrelerine göre hizalanmıştır. Kamera iç yönelme parametreleri (fokal uzunluk, ana nokta, bozulma katsayıları) otomatik olarak kalibre edilmiş; görüntüler arasında eşleşen noktalar tespit edilerek ilk blok yapısı oluşturulmuştur.

Fotogrametrik dengeleme aşamasında, YKN her bir senaryo için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Beş farklı senaryo kapsamında sırasıyla 4, 8, 12, 16 ve 20 YKN kullanılarak blok dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, demet dengeleme algoritması ile uygulanmış, her senaryoda yalnızca belirlenen YKN seti kullanılarak dış yönelme parametreleri optimize edilmiştir. DN ise bu sürece dâhil edilmemiş; yalnızca doğruluk analizine esas olacak biçimde ayrı bir referans kümesi olarak korunmuştur.

YKN'lerin dağılımında homojen ve kapsayıcı yerleşim esas alınmıştır. Başlangıçta dört köşe noktasına yerleştirilen YKN'ler, her yeni senaryoda dış çevreden iç alana doğru sistematik biçimde artırılmıştır. Bu yaklaşım, hem minimum sayıda kontrol noktasıyla yeterli doğruluğun sağlanıp sağlanamayacağını test etmeye, hem de nokta yoğunluğunun etkilerini belirlemeye olanak tanımıştır. Diğer yandan, 12 adet DN her senaryo boyunca sabit tutulmuş ve çalışma alanına simetrik, dengeli şekilde dağıtılmıştır. Bu sayede tüm doğruluk analizleri tutarlı bir karşılaştırma temeli üzerinden yürütülmüştür.

Her senaryo sonucunda, Agisoft Metashape yazılımı üzerinden ortofoto ve SYM ürünleri üretilmiştir. Bu ürünler, GNSS ile santimetre altı doğrulukta ölçülen DN koordinatları ile karşılaştırılarak konumsal doğruluk analizine tabi tutulmuştur. Planimetrik (X, Y) ve yükseklik (Z) bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilerek, farklı YKN senaryolarının doğruluk üzerindeki etkisi istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

### 2.4. Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi kapsamında hem planimetrik (X ve Y) hem de yükseklik (Z) bileşenleri dikkate alınmıştır. Her bir DN için, fotogrametrik modelden elde edilen koordinatlar ile arazi ölçümleri sonucu elde edilen gerçek koordinatlar karşılaştırılmıştır. Bu farklar üzerinden, her senaryo için kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error – RMSE) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca doğruluk değerlendirmelerinde maksimum mutlak hata ve ortalama sapma gibi destekleyici istatistiksel ölçütlerden de yararlanılmıştır. Ortofoto doğruluğu planimetrik doğruluğa göre; sayısal yükseklik modeli doğruluğu ise yükseklik farkları üzerinden değerlendirilmiştir. Her iki ürün türü için yapılan analizlerde, DN noktalarının görüntülerdeki konumları manuel olarak kontrol edilerek, otomatik eşleştirme hatalarının etkisi ortadan kaldırılmıştır. Böylece analizler yalnızca YKN sayısı ve dağılımının ürün doğruluğuna etkisini yansıtacak şekilde kurgulanmıştır.

## 3. Bulgular

Çalışma kapsamında İHA görüntülerinden elde edilen ortofoto ve SYM ürünleri başarıyla üretilmiş olup, her iki veri seti de görsel bütünlük, yüzey ayrıntısı ve geometrik tutarlılık açısından yüksek kalitededir. Şekil 2'de, analiz edilen alana ait ortofoto ve SYM örnekleri sunulmakta; aynı zamanda YKN ve DN noktalarının dağılımı görsel olarak gösterilmektedir. Üretilen bu fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğu, her senaryoda sabit tutulan 12 adet DN kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan 20 adet YKN, beş farklı senaryo için kademeli olarak kullanılmış ve her bir senaryoda farklı sayıda nokta ile blok dengeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yapılandırma, hem YKN sayısının hem de dağılım deseninin doğruluk üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla kurgulanmıştır. Tüm senaryolarda, aynı 12 DN sabit tutularak doğruluk analizinde karşılaştırmalı bir zemin oluşturulmuştur.

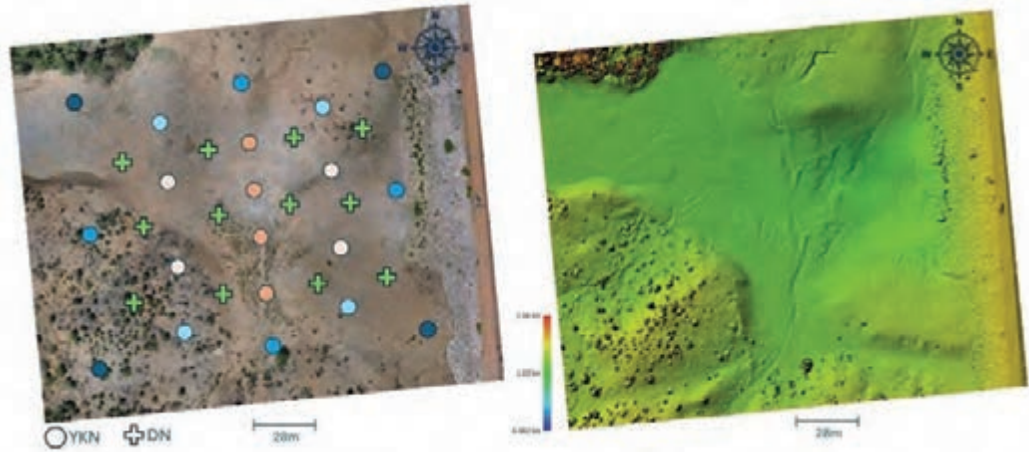
Senaryolar Şekil 2'de gösterildiği üzere şu şekilde kurgulanmıştır:

1. Aşama (4 YKN): Yalnızca koyu mavi renk ile gösterilen 4 YKN kullanılmıştır.
2. Aşama (8 YKN): İlk 4 noktaya ek olarak açık turkuaz renkli 4 YKN daha dahil edilmiştir.
3. Aşama (12 YKN): Önceki 8 YKN'ye ilave olarak turkuaz renkli 4 YKN daha kullanılmıştır.
4. Aşama (16 YKN): Turuncu renkli 4 YKN'nin de dâhil edilmesiyle toplam 16 YKN kullanılmıştır.
5. Aşama (20 YKN): Son olarak açık turuncu renkli 4 YKN ile toplam 20 YKN'ye ulaşılmıştır.

Bu kademeli yapı sayesinde, kontrol noktalarının hem sayısal artışı hem de mekânsal yayılımı sistematik olarak test edilmiş, doğruluk analizleri bu senaryolara göre ayrı ayrı yürütülmüştür. Böylece, kontrol noktalarının hem niceliksel hem de dağılımsal katkısı bütüncül şekilde değerlendirilmiştir.

Beş farklı YKN senaryosu için hesaplanan doğruluk değerleri her senaryo için Tablo 1-5'te sunulmaktadır. Her bir senaryo için planimetrik (X, Y) ve yükseklik (Z) bileşenlerine ait RMSE değerleri hesaplanmış ve XY doğruluğu birleşik olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca Tablo 6'da ise her senaryo için toplam RMSE değerleri verilmiştir.

İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi



Şekil 2: Üretilen ortofoto (sol) ve SYM (sağ)

Tablo 1: İlk senaryo için (4 YKN) DN'lere ait X, Y ve Z bileşenlerindeki konum farkları

DN No	V <sub>x</sub> (cm)	V <sub>y</sub> (cm)	V <sub>z</sub> (cm)
DN1	-1.30	1.45	-2.35
DN2	1.65	-1.10	1.85
DN3	-1.55	1.90	-2.05
DN4	1.10	-1.60	2.40
DN5	-1.25	1.10	-1.85
DN6	1.40	-1.35	2.10
DN7	-1.10	1.00	-2.45
DN8	1.60	-1.85	1.90
DN9	-1.45	1.35	-1.80
DN10	0.95	-1.20	2.50
DN11	-1.15	1.30	-2.05
DN12	1.50	-1.25	2.20

Tablo 2: İkinci senaryo için (8 YKN) DN'lere ait X, Y ve Z bileşenlerindeki konum farkları

DN No	V <sub>x</sub> (cm)	V <sub>y</sub> (cm)	V <sub>z</sub> (cm)
DN1	-1.30	1.45	-2.35
DN2	1.65	-1.10	1.85
DN3	-1.55	1.90	-2.05
DN4	1.10	-1.60	2.40
DN5	-1.25	1.10	-1.85
DN6	1.40	-1.35	2.10
DN7	-1.10	1.00	-2.45
DN8	1.60	-1.85	1.90
DN9	-1.45	1.35	-1.80
DN10	0.95	-1.20	2.50
DN11	-1.15	1.30	-2.05
DN12	1.50	-1.25	2.20

İlk senaryoda yalnızca dört adet YKN kullanılmış olup, DN noktaları üzerinden hesaplanan ortalama konum hataları tüm eksenlerde en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Planimetrik doğruluk (XY bileşeni) bu senaryoda yaklaşık 3.8 cm, yükseklik doğruluğu (Z bileşeni) ise 5.6 cm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, düşük sayıda ve sınırlı dağılıma sahip YKN ile yapılan blok dengelemenin modelin genel doğruluğunu olumsuz etkilediğini göstermektedir. Özellikle düşey yöndeki hata, hassasiyet gerektiren mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir düzeyin üzerindedir.

İkinci senaryoda YKN sayısı sekize çıkarıldığında, hem yatay hem de düşey doğrulukta belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. Planimetrik RMSE değeri 2.5 cm'ye, yükseklik RMSE değeri ise 4.0 cm'ye düşmüştür. Bu gelişme, YKN sayısındaki artışın model geometrisini daha iyi tanımlamaya olan katkısını açık biçimde ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, hâlâ birçok hassas uygulama için bu doğruluk düzeyleri sınırlayıcı olabilir. Bu durum, daha homojen bir YKN dağılımına ve daha fazla kontrol noktasına ihtiyaç duyulduğunu işaret etmektedir.

Bu iki senaryonun karşılaştırmalı analizi, düşük YKN ile yapılan fotogrametrik işlemlerde doğruluk seviyesinin yetersiz kaldığını ve özellikle düşey ekseninde ciddi sapmalar oluşabileceğini göstermektedir. Ayrıca, doğrulukta sağlanan iyileşmenin ilk aşamalarda daha hızlı gerçekleştiği; ancak artan YKN sayısı ile birlikte bu artışın göreceli olarak yavaşladığı gözlemlenmektedir.

Tablo 3: Üçüncü senaryo için (12 YKN) DN'lere ait X, Y ve Z bileşenlerindeki konum farkları

DN No	Vx (cm)	Vy (cm)	Vz (cm)
DN1	-0.85	1.00	-1.65
DN2	1.10	-0.70	1.40
DN3	-0.95	1.20	-1.50
DN4	0.75	-1.00	1.85
DN5	-0.90	0.85	-1.40
DN6	1.00	-1.05	1.60
DN7	-0.75	0.80	-1.70
DN8	1.15	-1.15	1.35
DN9	-0.95	1.00	-1.30
DN10	0.65	-0.90	1.90
DN11	-0.85	1.10	-1.55
DN12	1.05	-0.95	1.50

Tablo 4: Dördüncü senaryo için (16 YKN) DN'lere ait X, Y ve Z bileşenlerindeki konum farkları

DN No	Vx (cm)	Vy (cm)	Vz (cm)
DN1	-0.65	0.75	-1.35
DN2	0.85	-0.55	1.10
DN3	-0.75	0.90	-1.20
DN4	0.55	-0.80	1.50
DN5	-0.70	0.65	-1.05
DN6	0.80	-0.90	1.30
DN7	-0.55	0.60	-1.45
DN8	0.95	-0.95	1.15
DN9	-0.75	0.75	-1.10
DN10	0.45	-0.70	1.60
DN11	-0.65	0.85	-1.25
DN12	0.85	-0.75	1.20

Tablo 5: Beşinci senaryo için (20 YKN) DN'lere ait X, Y ve Z bileşenlerindeki konum farkları

DN No	Vx (cm)	Vy (cm)	Vz (cm)
DN1	-0.50	0.60	-1.15
DN2	0.65	-0.45	0.90
DN3	-0.55	0.75	-1.00
DN4	0.45	-0.65	1.25
DN5	-0.60	0.50	-0.95
DN6	0.70	-0.75	1.10
DN7	-0.45	0.45	-1.25
DN8	0.80	-0.85	0.95
DN9	-0.60	0.65	-0.85
DN10	0.35	-0.60	1.40
DN11	-0.50	0.70	-1.05
DN12	0.75	-0.65	1.00

Tablo 6: Beş (5) senaryo için her senaryo da 12 KN ile elde edilen doğruluk analizi

YKN Sayısı	KN	RMSE (X, cm)	RMSE (Y, cm)	RMSE (XY, cm)	RMSE (Z, cm)
4		2.4	2.9	3.8	5.6
8		1.6	1.9	2.5	4.0
12	12	1.1	1.2	1.6	2.8
16		1.0	1.1	1.5	2.6
20		0.9	1.0	1.4	2.5

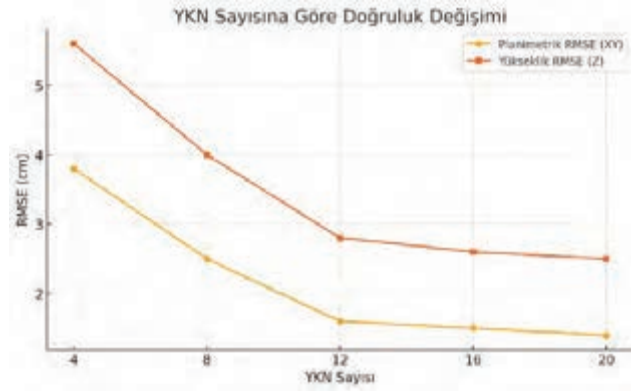
## İHA Tabanlı Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluk Analizinde YKN ve Denetleme Noktalarının Etkisi

Analiz sonuçlarına göre, YKN sayısının artırılması hem yatay hem de düşey doğruluk üzerinde anlamlı düzeyde iyileşme sağlamaktadır. Özellikle 4 ve 8 YKN içeren senaryolarda hata değerleri görece yüksek bulunurken; 12 YKN senaryosundan itibaren ortofoto ve SYM ürünlerinin mühendislik uygulamaları için yeterli doğruluk düzeyine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Ancak, 12 YKN sonrası senaryolarda doğruluk eğrisinde belirgin bir doygunluk eğilimi gözlemlenmektedir. 16 ve 20 YKN kullanımıyla doğruluk artışı devam etse de bu artış oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır. Planimetrik doğruluk sadece 0.1–0.2 cm kadar artarken, yükseklik doğruluğunda da benzer şekilde 0.2–0.3 cm düzeyinde bir iyileşme sağlanmıştır. Bu sonuçlar, doğruluk–maliyet–zaman dengesinin dikkate alınması gerektiğini ve optimal kontrol noktası sayısının 12 civarında olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 3'te, planimetrik ve yükseklik bileşenlerine ait doğruluk değerlerinin YKN sayısına göre nasıl değiştiği karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafik, özellikle 4 ve 8 YKN senaryoları arasında doğrulukta belirgin bir iyileşme olduğunu; 12 YKN'den itibaren ise doğruluk eğrisinin yataylaştığını ve artış oranının azaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, doğruluk eğrisinin logaritmik bir doygunluk eğilimi gösterdiğine işaret etmektedir. 16 ve 20 YKN senaryolarında elde edilen doğruluk kazanımları oldukça sınırlı kalmakta; örneğin planimetrik RMSE değeri 1.6 cm'den 1.4 cm'ye, yükseklik doğruluğu ise 2.8 cm'den 2.5 cm'ye gerilemektedir.

Elde edilen bulgular, uygulamalarda “ne kadar çok YKN, o kadar iyi” yaklaşımının her durumda geçerli olmadığını ortaya koymaktadır. Doğru planlanmış homojen bir dağılım ile belirli sayıda kontrol noktası, yeterli doğruluk düzeyini sağlayabilir. Bu da hem arazi çalışması süresini hem de veri işleme yükünü azaltarak fotogrametrik süreci daha verimli hale getirme potansiyeli sunmaktadır.



Şekil 3: DN noktalarına göre doğruluk grafik dağılımı

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, düz topoğrafyaya sahip bir kırsal alanda gerçekleştirilen deneysel uygulama ile YKN sayısının fotogrametrik ürün doğruluğu üzerindeki etkisi sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, YKN sayısının artırılmasının planimetrik ve yükseklik doğruluğunu anlamlı ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle 4 ve 8 YKN senaryolarında gözlenen yüksek hata değerleri, düşük sayıda kontrol noktası ile üretim yapıldığında model bütünlüğünün bozulabileceğini göstermektedir. Ancak 12 YKN senaryosundan itibaren, ortofoto ve sayısal yükseklik modeli ürünlerinin doğruluk düzeyleri mühendislik uygulamaları için yeterli seviyeye ulaşmıştır.

Bununla birlikte, 12 YKN'nin ötesinde –örneğin 16 ve 20 YKN senaryolarında– elde edilen doğruluk artışı oldukça sınırlı kalmış; doğruluk eğrisinde belirgin bir doygunluk davranışı gözlemlenmiştir. Bu durum, gereğinden fazla YKN kullanımının sahada zaman ve kaynak israfına yol açabileceği gibi, ürün kalitesine anlamlı bir katkı sunmadığını da ortaya koymaktadır. Özellikle geniş alanlarda çalışın, zaman ve ekipman açısından sınırlı imkânlarla sahip saha ekipleri açısından, gereksiz sayıda kontrol noktası yerleştirmek yerine optimum düzeyde ve dengeli dağılım esasına dayalı bir planlamanın daha verimli olacağı anlaşılmaktadır.

Bu kapsamda, çalışmanın bulguları, hem veri üreticileri hem de karar vericiler açısından kontrol noktası planlamasında dikkat edilmesi gereken stratejik unsurlara ışık tutmaktadır. Sadece sayı değil; aynı zamanda noktaların sahaya homojen ve kapsayıcı biçimde dağıtılması, doğruluk üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bulgular, özellikle tarımsal uygulamalar, altyapı haritalaması ve kırsal alan modellemeleri gibi sahada yoğun operasyon gerektiren uygulamalarda doğrudan kullanılabilir niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda, farklı topoğrafik karaktere sahip sahalarda (örneğin eğimli arazi, dağlık alanlar, şehirsiz doku) benzer senaryoların test edilmesi, kontrol noktası dağılım stratejilerinin daha genel geçer kurullarla sistematik hale getirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, farklı yazılım platformlarında yapılan karşılaştırmalı analizler ve düşük/mid-range GNSS alıcıları ile elde edilen noktaların doğruluk katkıları da araştırma kapsamına alınarak uygulama sahasını daha da genişletmek mümkün olacaktır.

## Kaynaklar

- Alkan O., Alzubade M.K., Alkan M.N. (2023) Assessing the effects of alluvial transport in the Kizilirmak river on dams with local, photogrammetric and remote sensing methods. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics* 26, 217-224.
- Atik M.E., Arkali M. (2024) Comparative assessment of the effect of positioning techniques and ground control point distribution models on the accuracy of UAV-based photogrammetric production. *Drones* 9(1), 15.
- Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. (2022) Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones* 6(6), 147.
- Muhmad Kamarulzaman A.M., Wan Mohd Jaafar W.S., Mohd Said M.N., Saad S.N.M., Mohan M. (2023) UAV implementations in urban planning and related sectors of rapidly developing nations: A review and future perspectives for Malaysia. *Remote Sensing* 15(11), 2845.
- Pourreza M., Moradi F., Khosravi M., Deljouei A., Vanderhoof M.K. (2022) GCPs-free photogrammetry for estimating tree height and crown diameter in Arizona Cypress plantation using UAV-mounted GNSS RTK. *Forests* 13(11), 1905.
- Quamar M.M., Al-Ramadan B., Khan K., Shafiullah M., El Ferik S. (2023) Advancements and applications of drone-integrated geographic information system technology—A review. *Remote Sensing* 15(20), 5039.
- Rauhala A., Tuomela A., Davids C., Rossi P.M. (2017) UAV remote sensing surveillance of a mine tailings impoundment in sub-arctic conditions. *Remote Sensing* 9(12), 1318.
- Reddy G.O. (2018) Geospatial technologies in land resources mapping, monitoring, and management: An overview. *Geospatial technologies in land resources mapping, monitoring and management*, 1-18.
- Rezvani S.M., Falcão M.J., Komljenovic D., de Almeida N.M. (2023) A systematic literature review on urban resilience enabled with asset and disaster risk management approaches and GIS-based decision support tools. *Applied Sciences* 13(4), 2223.
- Xia G.S., Datcu M., Yang W., Bai X. (2018) Information processing for unmanned aerial vehicles (UAVs) in surveying, mapping, and navigation. *Geo-spatial Information Science* 21(1), 1-1.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Fotoğraftan Bilgiye, Harita Mühendisinin Gücü

Hazal ARSLANOĞLU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Netcad Yazılım, Ankara.

### Geniştirilmiş Özet

İnsan ile doğa arasındaki dengenin giderek bozulduğu günümüzde, artan nüfus, küresel ısınma, iklim değişikliği, orman yangınları, kuraklık, salgın hastalıklar ve savaşlar yalnızca çevreyi değil, insan yaşamını da tehdit eden çok boyutlu krizler üretmektedir. Dünya nüfusu son otuz yılda %40 artmış, doğal kaynak tüketimi ise iki katına çıkmıştır (UN, 2022). Türkiye’de son beş yılda yaşanan on binlerce orman yangını, yüz binlerce hektar alanı yok etmiş ve ekosistemin kırılganlığını gözler önüne sermiştir (FAO, 2020). Bu krizler karşısında doğayı anlama, ölçme ve yönetme ihtiyacı artık sadece bilimsel bir merak değil, toplumsal bir zorunluluktur. Doğayı anlamamanın en güçlü yollarından biri, uzamsal verilerin üretilmesi ve bu verilerin analiz edilmesidir. Yeryüzünün şeklinin, değişimlerinin ve insan faaliyetleriyle ilişkilerinin güvenilir biçimde ortaya konulması, ancak fotogrametri gibi yüksek doğruluk sağlayan yöntemlerle mümkündür. Fotogrametri, yüz yılı aşkın süredir kullanılan köklü bir teknik olmasına rağmen, günümüzde geldiği nokta itibarıyla yalnızca bir ölçüm yöntemi değil, mühendislik, şehir planlama, çevre yönetimi ve afet stratejilerinin omurgasını oluşturan stratejik bir teknolojidir (Wolf & Dewitt, 2000).

Fotogrametri sayesinde elde edilen ortofotolar, sayısal arazi modelleri, yoğun nokta bulutları ve üç boyutlu yüzeyler, doğanın ve insan yapılarının milimetrik doğrulukla modellenmesine imkân tanır. Bu ürünler, yalnızca coğrafyanın fotoğrafik bir kaydı değil, aynı zamanda karar vericiler için analiz edilebilir, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir verilerdir. Örneğin bir sel felaketinden önce ve sonra elde edilen sayısal arazi modelleri, suyun akış yönünü, taşkın alanlarını ve riskli bölgeleri belirleyebilir. Bir orman yangını sonrasında üretilen ortofotolar, tahribatın boyutunu sayısal olarak ortaya koyar. Bu nedenle fotogrametri, afet yönetiminde, doğal kaynakların korunmasında, şehirlerin planlanmasında ve tarımsal üretimin izlenmesinde hayati rol oynar (Kraus, 2007). Farklı zamanlarda maden sahalarında gerçekleştirilen kübaj analizleri, depremler sonrasında üretilen ortofotolar aracılığıyla yapılan bozuk çatı tespitleri, orman yangınlarının ardından ortaya çıkan kayıpların alan hesaplarıyla belirlenmesi ve güzergâh boyunca yürütülen kamu çalışmalarında gerçekleştirilen çeşitli ölçümler, bu alandaki teknik ve sosyal uygulamalara örnek teşkil eden başlıca yöntemlerdir.

Günümüzde insansız hava araçları ve yapıdan-harekete algoritmalarının yaygınlaşması, fotogrametriyi daha hızlı, erişilebilir ve düşük maliyetli hale getirmiştir (Westoby et al., 2012). Eskiden yalnızca büyük kamu kurumlarının ve askeri projelerin erişebildiği doğruluk seviyeleri, artık üniversitelerin, yerel yönetimlerin, organize sanayi bölgelerin, özel sektörün ve küçük araştırma gruplarının kullanımına da açılmıştır. Bu durum, fotogrametriyi yalnızca teknik bir uzmanlık alanı olmaktan çıkarak, toplumsal yarar üreten bir platform haline getirmiştir. Ancak bu dönüşüm, beraberinde fotogrametrik yazılımların önemini de artırmıştır.

Fotogrametrik yazılımlar, yalnızca görüntüleri işleyen teknik araçlar değil, aynı zamanda verinin doğruluğunu, standardını ve güvenilirliğini belirleyen mesleğin omurgasıdır. Kamera kalibrasyonu, yer kontrol noktalarının entegrasyonu, GPS/IMU verilerinin işlenmesi, farklı zamanlarda üretilen modeller üzerinden hacim hesaplamaları, farklı veri formatlarının desteklenmesi, büyük veri setlerinin performanslı şekilde yönetilmesi ve coğrafi bilgi sistemleriyle uyumlu çalışma, günümüz yazılımlarının temel gereksinimleridir (Colomina & Molina, 2014). Yüksek doğrulukta ve hızda veri üretiminin sağlanması, bu veriler üzerinden çeşitli analizlerin yapılması aslında bir tür doğayı okuma, anlama ve analiz etme biçimidir. Bu nedenle fotogrametrik yazılımlar, yalnızca kullanıcı dostu birer arayüz değil, mühendislik kalitesinin ve mesleki sorumluluğun güvencesidir. Burada harita mühendislerinin rolü belirleyicidir. Çünkü harita mühendisleri yalnızca bu yazılımların kullanıcıları değil, aynı zamanda onların gelişimine yön veren aktörlerdir. Yazılım geliştiriciler çoğu zaman algoritmalara ve yazılım mimarisine odaklanırken, uygulamada karşılaşılan sorunları, doğruluk beklentilerini ve mesleki standartları en iyi dile getirebilecek kişiler harita mühendisleridir. Çünkü üretilen verilerin koordinatlı veriler olması, kalite parametreleri ve kullanılacak alana göre ilgili standartları belirleyen yetkin kişilerdir. Yazılımlara getirilen geri bildirimler, doğruluk raporlamalarının standarda bağlanması, 3B kadastro ve akıllı şehir veri modellerinin desteklenmesi, CBS entegrasyonunun geliştirilmesi ve veri kalitesinin raporlama süreçlerine eklenmesi gibi öneriler, yazılımların evriminde mesleğin doğrudan etkisini göstermektedir. Bu açıdan bakıldığında harita mühendisleri, yazılım geliştirme sürecinde yalnızca kullanıcı değil, aynı zamanda yön verici, standart koyucu ve doğru konumlandırılarda aktörlerdir. Aynı zamanda fotogrametrik harita yapım yöntemlerini, standartlarını ve yönetmeliklerini belirleyen idari bir yol gösterici rolünü üstlenmektedir. Harita mühendisleri, teknik kuralları belirleyen, doğruluğunu denetleyen, uygulanmasını sağlayan ve kurallara uygun bir şekilde süreci yöneten temel bir rol üstlenmektedir.

Bu durum, mesleğin stratejik konumunu da güçlendirmektedir. Harita mühendisleri, fotogrametri ve fotogrametrik yazılımlar aracılığıyla yalnızca teknik çözümler üretmekle kalmamakta, aynı zamanda toplumsal sorunların çözümünde kilit rol üstlenmektedir. Afet yönetiminde fotogrametrik verilerin kullanılması, afet öncesi risk analizlerinin ve afet sonrası müdahalelerin daha etkin yapılmasını sağlar. Sağlık alanında, salgın hastalıkların uzamsal izlenmesi ve yayılım modellerinin çıkarılmasında fotogrametri ve CBS verileri kritik rol oynar. Doğal kaynak yönetiminde, su havzalarının, ormanların ve tarımsal üretim alanlarının izlenmesi, sürdürülebilirlik politikalarının bilimsel temellere dayanmasını mümkün kılar. Kültürel mirasın korunmasında, tarihi yapıların üç boyutlu fotogrametrik modelleri hem restorasyon süreçlerine katkı sağlar hem de geleceğe dijital bir arşiv bırakır (Steffen et al., 2015).

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0507) 669 22 80

E-posta: hazalozzer@netcad.com (Hazal ARSLANOĞLU)

Gelecekte ise fotogrametri ve yazılımların yapay zekâ ile entegrasyonu, mesleğin yeni yönünü belirleyecektir. GeoAI olarak adlandırılan bu yaklaşımlar, uzamsal analizlerin hızını ve doğruluğunu artırarak büyük veri setlerinin işlenmesinde devrim yaratmaktadır. Ancak bu gelişmeler beraberinde etik, veri gizliliği ve güvenilirlik sorunlarını da getirmektedir. Harita mühendisleri, bu noktada yalnızca teknolojiyi kullanan değil, aynı zamanda onun sınırlarını, standartlarını ve etik çerçevesini belirleyen aktörler olmalıdır (Colomina & Molina, 2014). Mesleğin sorumluluğu, yalnızca teknik doğruluk değil, aynı zamanda toplumsal fayda ve doğaya zarar vermeme ilkesini de kapsamaktadır.

Tüm bu sürecin başlangıcı ise üniversite eğitiminden geçmektedir. Fotogrametri ve fotogrametrik yazılımların yalnızca teknik bir ders konusu değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, etik ve toplumsal fayda boyutlarıyla da müfredata girmesi gerekmektedir. Geleceğin harita mühendisleri, yalnızca teknik bilgiye sahip değil, aynı zamanda fotogrametriyi doğa-insan ilişkisinin yönetiminde stratejik bir araç olarak gören bir bilinçle yetiştirildiğinde, meslek toplumsal sorunların çözümünde daha güçlü bir rol üstlenecektir.

Sonuç olarak, fotogrametri ve fotogrametrik yazılımlar günümüz mühendisliğinin ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının ayrılmaz bir parçasıdır. Doğayı anlamak, afetlere hazırlıklı olmak, şehirleri planlamak, doğal kaynakları korumak ve kültürel mirası geleceğe aktarmak, ancak bu teknolojilerin sunduğu doğruluk ve güvenilirlikle mümkündür.

Harita mühendisleri, yazılım geliştirmeye katkıları ve standart belirleyici rolleriyle fotogrametrimin yönünü şekillendiren temel aktörlerdir. Bugün atılacak adımlar, üniversite sıralarında kazandırılacak bilinç ve meslektaşların yazılımlara sunacağı yenilikçi öneriler; fotogrametrik harita yapımında uluslararası standartların oluşmasını sağlayacak, teknolojinin askeri ve sivil tüm koşullarda etkin kullanılmasına zemin hazırlayacaktır.

Fotogrametri olmadan konumdan elde edilen verinin doğru şekilde görselleştirilmesi ve yorumlanması mümkün değildir. Harita mühendisleri olarak fotoğraftan elde edilen gücü anlamlandırmak, topluma, doğaya ve teknolojiye sunduğumuz birçok kıymetli katkıdan yalnızca biridir. Bu nedenle fotogrametri, fotogrametriden elde edilen verilerin anlamlı hale gelmesi geleceğin daha dirençli ve yaşanabilir dünyasının inşasında kritik bir anahtar rol üstlenmektedir.

## Kaynaklar

1. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
2. FAO. (2020). *Global forest resources assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/ca9825en/ca9825en.pdf>
3. Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter.
4. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
5. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2022). *World population prospects 2022*. United Nations. <https://population.un.org/wpp/>
6. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
7. Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). *Elements of photogrammetry: With applications in GIS*. McGraw-Hill.

## Anahtar Kelimeler

Afet Yönetimi, Çevre ve Orman Yönetimi, Fotogrametri, Harita Mühendisliğinde Eğitim-Öğretim Sorunları, Harita Mühendisliğinde Kapasite Geliştirme, Mühendislik Etiği, Uzamsal Yapay Zeka, Veri Bilimi ve Açık Veri



# Maden İşletmelerinde İşçi Güvenliği İçin IOT Tabanlı Maden İzleme Sistemi

Nihan ÇOBANCIK<sup>1,\*</sup>, Prof. Dr. Burak AKPINAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul.

## Özet

Madencilik, gerek çalışma alanının yer altında yapılmasından gerekse çıkarılan ham maddeler dolayısıyla oluşabilecek zehirli gazlar ve göçükler dolayısıyla iş güvenliği açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Bu riskleri önlemek amacıyla kullanılan kamera, sensör ve donatı sistemleri çalışanların iş güvenliğini yeterince sağlayabilecek nitelikte değildir. Bu sebeple kazaların yaşanmadan önce verildiği ilk uyarıları tespit edebilecek, madendeki iç güven mekanizmasını stabilize edebilecek aynı zamanda da tüm önlemlere rağmen oluşabilecek bir iş kazası sonucunda acil durum kuruluşlarının hasar tespitini ve kurtarma çalışmalarına hız kazandırabilecek bir maden izleme sistemi ihtiyacı doğmuştur. Yapılan prototipteki amaç basınç, sıcaklık, hava kalitesi sensörleri ile bütünleşmiş prototip maden izleme sistemi ve web sitesi oluşturulmasıdır. Python temelli yazılım sistemi oluşturularak tasarlanmış bu prototip ve web sitesinin her an her yerden izlenebilmektedir. Proje kapsamında geliştirilen maden izleme sistemi ve web sitesi tüm maden ocaklarında, ağır çalışma koşulları olan yer altı metro şantiyeleri vb. mekanlarda aktif olarak kullanılacak niteliktedir.

## Anahtar Sözcükler

Maden İzleme Sistemi, Nesnelerin İnterneti, Madencinin Yerelleştirilmesi, Raspberry Pi 4, İnsan Tespiti

## Abstract

Mining inherently involves significant occupational safety risks due to its underground working environment and the potential release of toxic gases and collapses associated with extracted raw materials. The existing use of cameras, sensors, and auxiliary equipment to mitigate these risks has proven insufficient in fully ensuring worker safety. Consequently, there is a critical need for a mining monitoring system capable of detecting early warning signals of potential accidents, stabilizing the internal safety mechanisms within the mine, and, despite all precautions, facilitating rapid damage assessment and rescue operations by emergency response teams in the event of an accident. The prototype developed in this study integrates pressure, temperature, and air quality sensors into a comprehensive monitoring system supported by a web-based interface. Designed using a Python-based software infrastructure, the system and its associated website enable continuous monitoring from any location and at any time. The proposed mining monitoring system and web platform are suitable for deployment not only in underground mining operations but also in other challenging environments such as metro tunnel construction sites and similar high-risk workplaces.

## Keywords

Mine Monitoring System, Internet of Things (IoT), Localization of Miners, Raspberry Pi 4, Human Detection

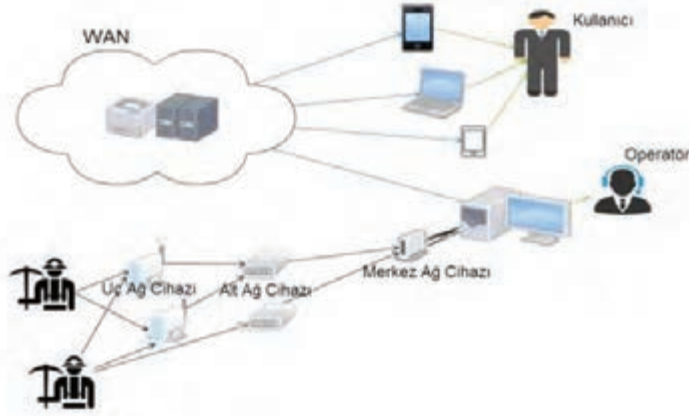
## 1. Giriş

Madencilik, insanlık tarihinin en eski üretim faaliyetlerinden biri olup günümüzde de ekonomik kalkınmanın temel taşlarından biri olmaya devam etmektedir. Enerji ihtiyacının karşılanması, sanayinin hammadde gereksinimi ve toplumların refah düzeyinin yükselmesi açısından stratejik öneme sahip olan madencilik, aynı zamanda iş güvenliği bakımından en riskli sektörlerden biridir. Yeraltında yürütülen faaliyetler, göçükler, zehirli gaz birikmeleri, yangınlar, patlamalar ve ekipman arızaları gibi ciddi tehlikeler barındırmaktadır. Bu nedenle madencilikte güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi, yalnızca çalışanların sağlığı açısından değil, aynı zamanda üretim sürekliliği ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından da kritik öneme sahiptir.

Yeraltında çalışan işçilerin güvenliğinin sağlanabilmesi için öncelikli gereksinimlerden biri, işçilerin konumlarının anlık olarak belirlenebilmesi ve yer üstündeki kontrol merkezleriyle kesintisiz iletişiminin sağlanabilmesidir. Mevcut uygulamalarda madencilerin güvenliği için kullanılan kamera ve sensör sistemleri ayrı ayrı çalışmakta, bu durum verilerin bütüncül olarak değerlendirilmesini ve hızlı karar alınmasını zorlaştırmaktadır. Kameralar yalnızca görüntü sağlamaktayken sensörler sıcaklık, nem, basınç ve gaz verilerini üretmekte; ancak bu iki sistemin entegrasyonu yapılmamaktadır. Oysa bu verilerin bir arada değerlendirilmesi, kazaların önceden önlenmesi veya olası bir kaza sonrasında hızlı müdahale edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, madencilikte iş güvenliğini artırmaya yönelik olarak kamera ve sensörleri bütünleşik biçimde kullanılan, madencilerin sayısını ve kimlik bilgilerini QR/barkod sistemi aracılığıyla tanyabilen, çevresel koşulları izleyen ve tüm verileri web tabanlı bir platform üzerinden 7/24 erişime açan bir IoT tabanlı maden izleme sistemi prototipi geliştirmektir. Şekil 1'de gösterilen çalışma sistemi sayesinde, yalnızca lokal güvenlik odalarında değil, internet erişimi olan her ortamda madenin anlık durumu izlenebilecek, acil durum kuruluşları da bu verilere doğrudan ulaşarak müdahale süresini en aza indirebilecektir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (541) 7808286  
E-posta: nihan.cobancik@std.yildiz.edu.tr (Çobancı N.)



Şekil 1: Madenci İzleme Sisteminin Çalışma Prensibi

Madencilik dünyada iş kazalarının en yoğun yaşandığı sektörlerden biri olduğu görülmektedir. Dünya genelinde yaklaşık 30 milyon insan madencilik sektöründe çalışmakta olup toplam iş gücünün yalnızca %1'ini oluşturan bu grup, ölümlü iş kazalarının %8'ini yaşamaktadır (Tanır, 2009). Sanayi ve teknolojideki tüm gelişmelere rağmen iş kazalarını tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmamış, özellikle kömür madenlerinde ölüm oranlarının yüksekliği dikkat çekmiştir (Mallı, Kun ve Köse, 2014). Bu nedenle pek çok ülkede yeraltı madenlerinde izleme ve kontrol sistemleri yasal zorunluluk haline gelmiştir (Ergüzen & Lüy, 2017).

Günümüzde geliştirilen madenci izleme sistemlerinin çoğu yüksek maliyetli, karmaşık yapılı ve kullanıcı dostu olmayan arayüzlere sahiptir. Bu durum, özellikle küçük ve orta ölçekli maden işletmelerinde bu tür sistemlerin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca mevcut sistemler, kazalardan sonra madencilerin konumlarını belirlemede yetersiz kalabilmektedir. Yapılacak olan bu çalışma ile düşük maliyetli donanımlar (Raspberry Pi 4, sensörler, kamera modülü) ve açık kaynak yazılımlar (Python, PHP, MySQL) kullanılarak hem iş güvenliği hem de kullanılabilirlik açısından daha erişilebilir bir çözüm geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada üç ana unsur üzerinde durulmuştur:

1. Kamera sistemi ve entegre sensörler,
2. Web sitesi tasarımı,
3. Python ile yazılım geliştirilmesi.

Bu yapı sayesinde, madencilerin kimlik ve konum bilgilerinin yanı sıra çevresel parametreler (sıcaklık, nem, gaz) sürekli olarak izlenebilecek, elde edilen veriler gerçek zamanlı olarak web tabanlı arayüzde görselleştirilecek ve eşik değerlerin aşılması durumunda otomatik alarm mekanizmaları (SMS, e-posta) devreye girecektir.

Ayrıca son yıllarda Nesnelerin İnterneti (IoT), Şekil 2'de gösterilen Nesnenin İnterneti katmanları, makine öğrenmesi ve sensör teknolojilerindeki teknik gelişmeler kullanılarak, maden ortamının daha etkin izlenmesini mümkün kılmıştır (Narkhede, Walambe, Chandel & Kotecha, 2022; Tsai, Liao & Yuan, 2022). İnsan tespiti için derin öğrenme algoritmaları (ör. SSD, CNN tabanlı yaklaşımlar) kullanılarak kamera görüntülerinden işçi sayımı yapılabilmekte, QR kod entegrasyonu ile işçilere ait kişisel ve sağlık bilgileri güvenli şekilde doğrulanabilmektedir (Jo & Khan, 2017). Gaz sensörleri ve hava kalitesi izleme cihazları ise metan, karbonmonoksit ve hidrojen sülfür gibi tehlikeli gazların tespitinde etkin rol oynamaktadır (Mallı vd., 2014).



Şekil 2: Nesnelerin İnterneti Katmanları

Sonuç olarak, bu çalışma madencilik sektöründe iş güvenliği açısından büyük önem taşıyan veri bütünleşmesi, gerçek zamanlı izleme ve acil durum yönetimine yönelik özgün bir prototip sunmaktadır. Geliştirilen sistem, yalnızca madencilik faaliyetlerinde değil, aynı zamanda metro tüneli inşaatları, kimya endüstrisi tesisleri gibi yüksek riskli kapalı alanlarda da kullanılabilecek niteliktedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1 Kullanılan Materyaller ve Yazılım Programı

Bu çalışmada kullanılan donanım ve yazılım bileşenleri, maden ortamında çevresel parametrelerin ve insan varlığının eş zamanlı olarak izlenebilmesine yönelik bütünlük bir sistemin oluşturulması amacıyla seçilmiştir. Sistem mimarisinin temelini Raspberry Pi 4 Model B (4 GB RAM) oluşturmaktadır. Düşük maliyet, taşınabilirlik ve güçlü işlem kapasitesinin yanı sıra geniş GPIO pin yapısı sayesinde çoklu sensör ve kamera modüllerinin aynı platform üzerinde entegre edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylelikle, donanımın merkezi bir kontrol ünitesi olarak işlev görmesi ve farklı bileşenlerin koordineli çalışması mümkün hale getirilmiştir.

Çevresel parametrelerin ölçülmesinde BME680 sensör modülü tercih edilmiştir. Bu modül, sıcaklık, basınç, nem ve hava kalitesi gibi farklı parametreleri tek bir donanım üzerinde sağlayabilmesiyle dikkat çekmektedir. Böylece, çevresel koşulların bütüncül ve gerçek zamanlı olarak izlenmesine imkân tanınmış, aynı zamanda sistemin donanım karmaşıklığı azaltılmıştır. Maden ortamında patlayıcı özellik gösterebilen gazların takibi amacıyla ise MQ-4 metan gazı sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, metan yoğunluğunu sürekli olarak ölçerek kritik eşik değerlerin aşılması durumunda erken uyarı mekanizmalarının devreye alınmasını sağlamaktadır.

Çalışmada ayrıca işçilerin kimliklendirilmesi ve sayısının belirlenebilmesi için NoIR Kamera V2 (8 MP) kullanılmıştır. Bu kamera, düşük ışık koşullarında yüksek kaliteli görüntü sağlayabilmesi sayesinde maden ortamında görsel doğrulama için önemli bir bileşen olarak değerlendirilmiştir. Kamera, QR kod ve barkod tabanlı kimlik doğrulama sistemleriyle birlikte çalıştırılarak işçilerin giriş-çıkışlarının kontrol edilmesine ve kayıt altına alınmasına imkân tanımıştır. Uzun süreli çalışmalarda sistem kararlılığını korumak amacıyla Ice Tower CPU Fan entegre edilmiş ve bu sayede Raspberry Pi'nin ısı performansı optimize edilmiştir. Tüm donanım bileşenleri GPIO bağlantıları, jumper kablolar ve breadboard aracılığıyla birbirine entegre edilerek işlevsel bir bütünlük sağlanmıştır.

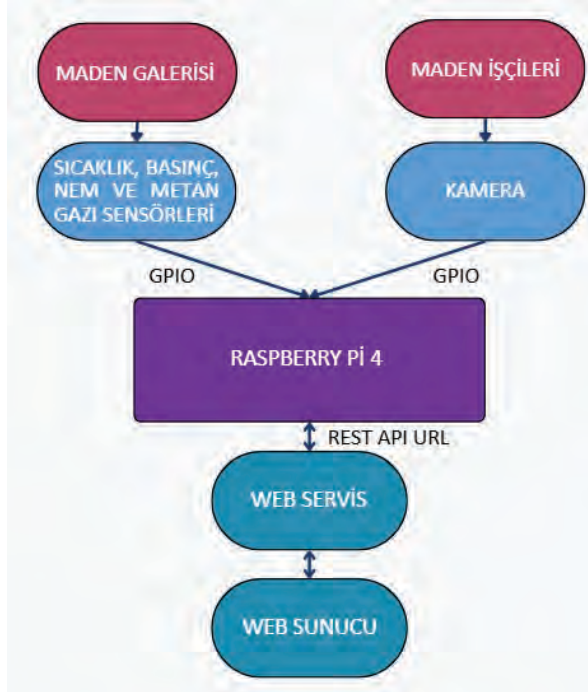
Veri işleme aşamasında Python programlama dili tercih edilmiştir. Sensörlerden elde edilen sıcaklık, basınç, nem ve gaz verileri Python kütüphaneleri ile okunmuş, işlenmiş ve sistemin karar mekanizmalarında kullanılmak üzere yapılandırılmıştır. Görüntü verilerinin değerlendirilmesinde derin öğrenme tabanlı YOLOv8 nesne algılama modeli uygulanmıştır. Bu model aracılığıyla madenci varlığı, işçi sayımı ve QR kodların okunması işlemleri yüksek doğruluk oranı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Python'un esnek kütüphane desteği sayesinde sensör verileri ve görüntü işleme çıktıları entegre edilerek sistemin IoT tabanlı veri akışı tamamlanmıştır.

Verilerin merkezi bir yapıda saklanması ve görselleştirilmesi için sunucu tarafında PHP, HTML, CSS, JavaScript ve MySQL tabanlı bir yönetim paneli geliştirilmiştir. Bu panel aracılığıyla sensör ve kamera verileri gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, geçmiş verilere ilişkin raporlamalar yapılabilmekte ve kritik durumlarda alarm mekanizmaları otomatik olarak devreye girmektedir. Panelin çoklu kullanıcı desteği, farklı erişim seviyeleri tanımlanmasına ve acil durum yönetiminde karar verme süreçlerinin hızlandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, kullanılan donanım ve yazılım bileşenleri, maden ortamında hem çevresel koşulların hem de işçi güvenliğinin eş zamanlı olarak izlenmesine yönelik bütüncül bir çözüm oluşturmuştur. Donanımın ölçeklenebilir yapısı ve yazılımın modüler tasarımı, sistemin farklı madencilik sahalarına uyarlanabilmesini ve gelecekte yeni sensör veya analiz araçlarıyla genişletilebilmesini mümkün kılmaktadır.

### 2.2 Materyallerden Veri Elde Edilmesi

Verilen sistem sınıflandırılmasına uygun olarak Şekil 3'te gösterildiği şekilde sensörlerden alınacak olan veriler ve kameradan alınacak olan çalışan verileri Raspberry Pi 4'e aktarılır. Python tabanlı yazılım işlemleri yapıldıktan sonra web servisine daha sonra da web sunucusuna aktarılarak sistem tamamlanır.



Şekil 3: Maden İzleme Sisteminin Sınıflandırılması

### 2.2.1 Sıcaklık, Basınç, Nem ve Metan Gazı Sensörleri

Ocağın çeşitli kısımlarında, sıcaklık ve nem oranı düzenli olarak ölçülür. Nem oranı göz önünde bulundurularak hava sıcaklığının sağlığa zararlı düzeye yükselmemesi için gerekli tedbirler alınır (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği, 2013a). Üretim ünitelerinden dönüş havası içinde ve üretim yerlerindeki gazların birikebileceği yerlerde metan gazı seviyesi sürekli olarak izlenir (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği, 2013b). Tespit edilen riskli bölgelerin yakınında çalışanlar ile bu bölgelerden geçen galerilerdeki çalışanların korunması sağlanır ve risklerin kontrol altına alınması için gerekli tedbirler alınır (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği, 2013a).

Her madenin metan gazı, sıcaklık, nem, basınç değer aralıkları farklılık gösterebilmektedir. Her işyeri için çalışanların sağlık ve güvenliklerinin korunması, patlayıcı maddelerin taşınması, depo edilmesi ve iş ekipmanlarının güvenli bir şekilde kullanılması için gerekli kuralları belirleyen yazılı talimatlar hazırlanır (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği, 2013b). Bu talimatlara uygun şekilde sensörlerin uyarı sistemlerinde kullanılacak değerler değişmektedir. Bu sebeple yapılan sistem bu değer aralıklarının değişebileceği şekilde geliştirilmiştir.

Sıcaklık, basınç, nem sensörünün Raspberry Pi4'e bağlanabilmesi için "adafruit\_bme680" kütüphanesi kullanılmıştır. BME680 Sensörü I2C bağlantılarını kullanarak veri okuması yapmaktadır. Bu verileri okuyabilmesi ve anlamlı bir şekilde kodda döndürebilmesi için "board" ve "adafruit\_bme680" kütüphaneleri birlikte kullanılmalıdır. Senkronizasyon sağlandıktan sonra sensörden alınan sıcaklık verisinin hassas ölçüm yapabilmesi için "temperature offset" değerinin ayarlanması gereklidir. Ayarlan offset değeriyle birlikte veriler istenen doğrulukta elde edilebilmiştir.

Benzer şekilde metan gazı sensörü için, sensörün Raspberry Pi4'e bağlanabilmesi ve GPIO pinlerinin kontrol edilebilmesi için "RPi.GPIO" kütüphanesi kullanılmıştır. Metan gazı sensörünün bağlı olduğu pinin kontrolü yapılır ve sonsuz bir döngü oluşturulur.

Metan gazı sensörü metan gazı tespit etti ise 1 eğer metan gazı tespit edilmedi ise 0 çıktısını yazdırmaktadır. Sıcaklık, basınç nem sensörü metan gazı sensöründen farklı olarak o anki sıcaklığı (°C), nemi (hPa) ve basıncı (%) sayısal veri olarak yazdırmaktadır.

### 2.2.2 Kamera ile İşçi Sayımı ve Kimlik Tespiti

İşyerlerinde çalışanlara dair kayıtlar tutulmalıdır. Ocağa giriş ve çıkışlar ile çalışanların bulunduğu yerler belirtilerek kayıt altına alınmalıdır. Ayrıca, yeraltı maden ocaklarında, yeraltında çalışacakların giriş-çıkışlarının ve buldukları yerlerin her an doğru bir şekilde yerüstünde takip edilebileceği bir sistem kurulmalıdır. Bu sistemde kullanılan ekipmanlar, kablolar ve tamamlayıcı unsurların yeraltında yaşanan göçük, su baskını, patlama, yangın gibi acil hallere karşı korumalı olması ve bu hallerde de çalışabilir durumda olması sağlanmalıdır. Sistem tarafından tutulan kayıtlar en az bir yıl süreyle saklanmalıdır (Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği, 2013c).

Bu sebeple yapılan izleme sisteminde bir nesne algılama modeli olan Yolov8 kullanılmıştır. Özellikle bilgisayarlı görü işleme alanında önemli bir yere sahip olan derin öğrenme tekniklerinden biri olan Convolutional Neural Networks (CNN) üzerine kurulmuş nesne algılama konusunda oldukça etkili bir modeldir. Sistemin geliştirilmesinde bu modelin kullanılmasının en büyük sebebi görüntüyü tek bir geçişte tarayarak nesnenin türünü ve konumunu belirlemesidir. Bu özelliği sayesinde diğer geleneksel nesne algılama yöntemlerine kıyasla oldukça hızlı çalışmaktadır.

Raspberry Pi4'e bağlı kameradan gelen verilerin Yolov8 ile algılanabilmesi için "ultralytics" kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane her döngüde kameradan bir kare olarak ve Yolov8 modelini kullanarak kişileri algılar. Algılanan kişi sayısal olarak veri olarak yazdırılmıştır.

Tespit edilen kişilerin aynı zamanda kimlik tespitinin de yapılması acil durum anlarında ve sonrasında büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple her bir işçinin yeleklerinin sırt kısmına yerleştirilecek QR kodlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu QR kodların içeriğinde işletmenin talebine yönelik olarak T.C. kimlik numarası ya da bir seri numarası bulunmaktadır. Sisteme aktarılacak bu özel numaralar sayesinde web servis kısmında daha detaylı kişisel bilgilere sadece işveren ve yetkili kişiler ulaşabilmektedir. Böylelikle işçilerin de kişisel veri gizlilikleri korunmuştur.

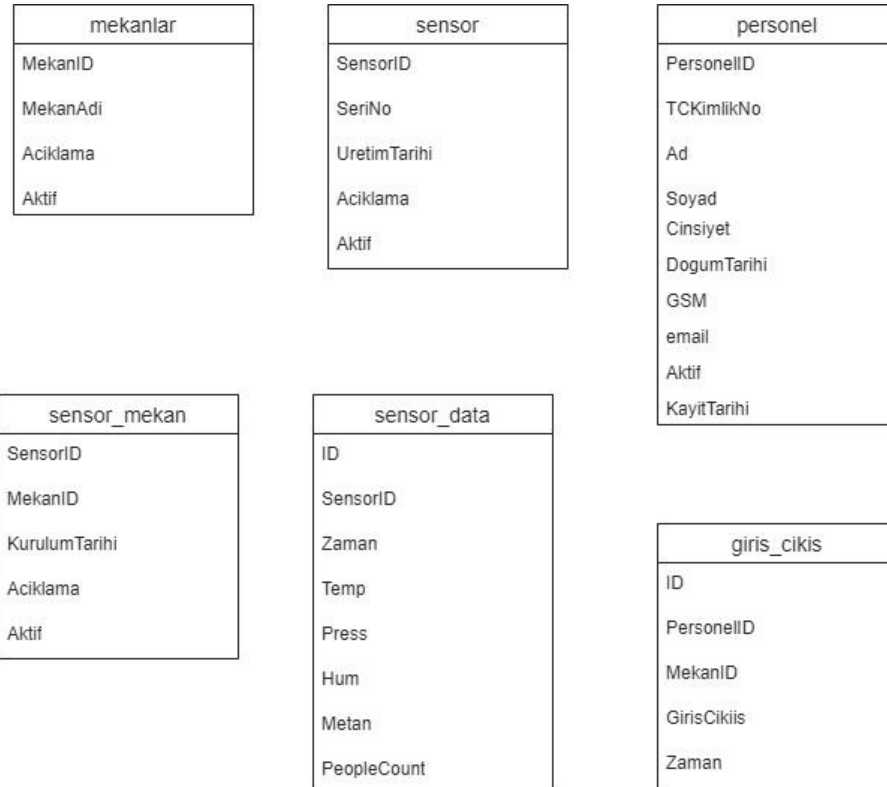
Bu sistem, maden galerilerinde aynı anda en az 3, en çok 6 işçinin çalışabildiği koşullar göz önünde bulundurulularak test edilmiştir. Deneysel uygulama gerçek maden ortamında değil, laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testlerde 4 kişilik bir ekip kullanılmış ve farklı mesafelerde hem baretlere hem de yeleklere yerleştirilen QR kodların okunabilirliği incelenmiştir. Bu düzenek, maden ortamındaki olası senaryoların kontrollü şekilde simüle edilmesine olanak sağlamıştır.

QR kod ile kimlik tespitinde kişi sayma işlemine bütünleşmiş bir yol olan "QReader" tercih edilmiştir. Kamera ile alınan her kare için QR kodun okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kameradan sürekli olarak alınan görüntülerde QR kodun olması durumunda bu QR kodu öncelikle tespit eder sonrasında bu QR kodu çözerek içerisindeki bilgi web servise aktarır.

### 2.3 Web Server Kurulumu ve Acil Durum Geri Bildirimi

Maden sahasına kurulan sensörlerden alınan verilerin sunucu ortamına anlık olarak aktarılması planlanmıştır. Buna göre Yıldız Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Intel Xeon E5-2620 v4 işlemciye ve Windows Server 2019 Standard işletim sistemine sahip sunucu üzerinde bulunan PHP, HTML, CSS, JavaScript programlama dilleri ile MySQL veri tabanı yönetim sistemi kullanılmıştır.

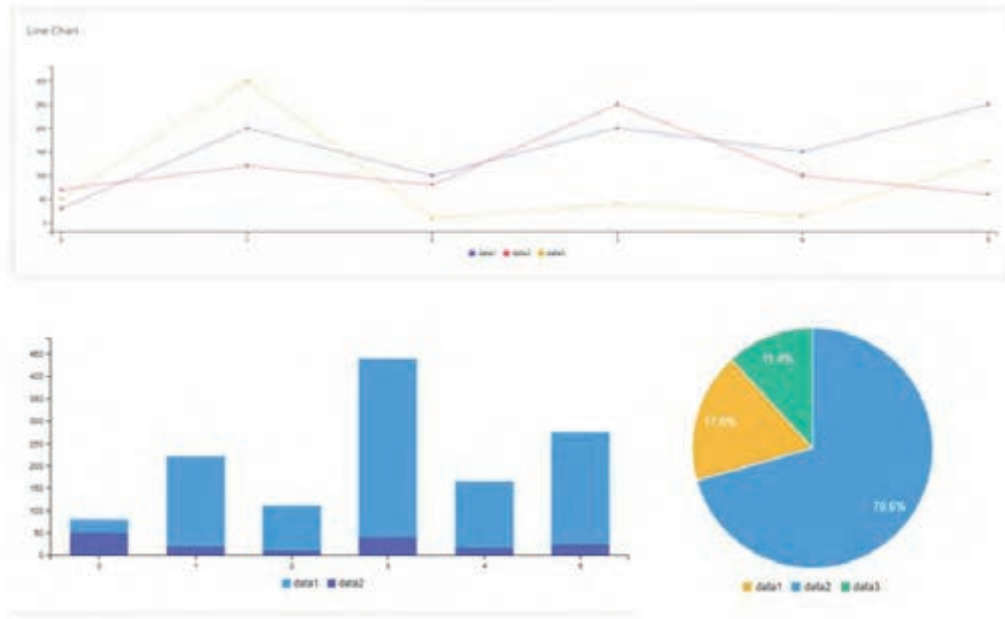
Öncelikle maden sahasından alınan verilerin depolanacağı veri tabanı tasarımı yapılmıştır. Söz konusu veri tabanında sensörlerin kurulacağı mekanların bilgilerinin saklanacağı mekanlar tablosu, sensör bilgilerinin saklanacağı sensör tablosu, personel bilgileri için personel tablosu, mekân-sensör ilişkilerinin tutulacağı mekan\_sensor tablosu, personelin giriş ve çıkış bilgilerinin saklanacağı giriş\_cikis tablosu ve sensör verilerinin depolanacağı sensör\_data tablosu oluşturulmuştur. Şekil 4'te veri tabanı yapısı verilmiştir.



Şekil 4: Veri Tabanı Yapısı

Maden sahasındaki sensörlerden alınan verilerin sunucu ortamına aktarılması için PHP programlama dilince Restful webservis hazırlanmıştır. Bu sayede verilerin veri tabanına müdahalesine gerek kalmadan webservis aracılığı ile kaydedilmesi sağlanmıştır. Hazırlanan webservis [http://193.255.118.211/2209b/sensor\\_data.php](http://193.255.118.211/2209b/sensor_data.php) adresinde çalışmakta ve parametre olarak SensorID, Time, Temp, Press, Hum, Metan, People bilgilerini GET metodu ile almaktadır. Alınan veriler webservis tarafından Şekil 5'te verilen sensor\_data tablosuna otomatik olarak kaydedilmektedir.

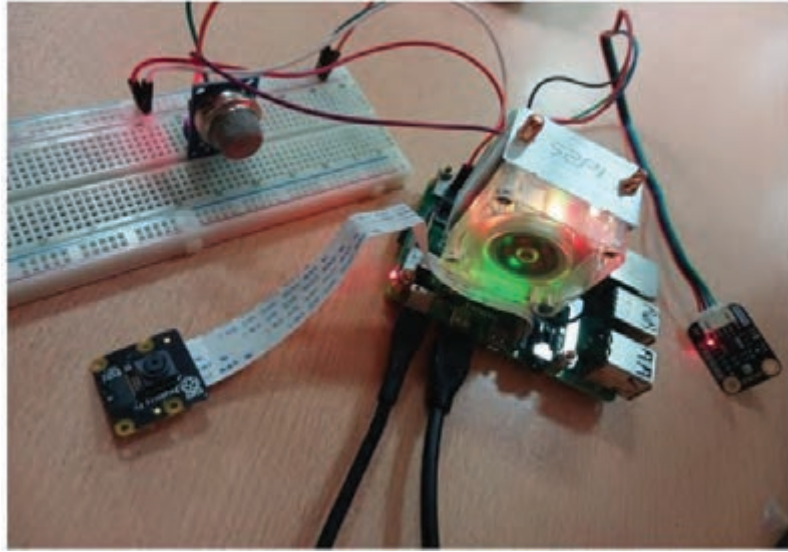
Sensörlerden alınan verilerin sunucu ortamında online olarak izlenebilmesi için PHP, HTML, CSS, JavaScript ve Bootstrap teknolojilerinin kullanılması ile bir yönetim paneli hazırlanmıştır. Söz konusu yönetim paneli aynı sunucu üzerinde çalışmaktadır ve sensor\_data tablosundaki verilerin görselleştirilmesi bu panelde yapılmaktadır. Ayrıca sıcaklık, basınç ve nem için verilen eşik değerlere ulaşılması durumunda ya da sensör verilerinde metan gazının tespit edilmesi durumunda tanımlanan alarm mekanizmaları çalıştırılmakta, yöneticilere e-posta ve SMS gönderimi sağlanmaktadır. Söz konusu yönetim panelinden örnek ekran Çizelge-3'te verilmiştir.



Şekil 5: Yönetim Paneli Örnek Ekran

### 3. Sonuçlar ve Öneriler

Günümüzde, iletişim ve bilişim teknolojileri hızlı bir gelişim göstermektedir. İşyerlerinin iş kazası ve meslek hastalıklarını önlemek ve üretimdeki verimliliklerinin artırılması adına, teknolojiye bu hızlı gelişime ayak uydurulması büyük önem arz etmektedir. Personel takip ve haberleşme sistemleri, madenlerde yeraltında bulunan çalışanların birbiriyle ve aynı zamanda yerüstü kontrol merkeziyle iletişimin sağlanması ve anlık olarak buldukları konumların takibinin yapılması amacıyla uygulanmakta olup acil durum yönetimi için hayati öneme sahiptir. Proje kapsamında gerçekleştirilen bu IoT tabanlı maden izleme sistemi, Python tabanlı yazılım ve Raspberry Pi 4 donanımı kullanılarak tasarlanmıştır; sıcaklık, basınç, nem ve metan gazı sensörleri ile entegre edilmiş kamera modülü Şekil 6'da belirtilen "Maden İzleme Sistemi" oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde hem çevresel parametrelerin hem de işçilerin kimlik ve sayım bilgilerinin gerçek zamanlı izlenmesine imkân tanımıştır.



Şekil 6: Kamera ve Sensör Sistemi

Donanım bileşenlerinin teknik performansı değerlendirildiğinde, BME680 sensörünün sıcaklığı  $\pm 1$  °C doğrulukla 0–65 °C aralığında, nemi %0–100 RH aralığında  $\pm 3\%$  hassasiyetle ölçebildiği; atmosferik basınç ölçüm aralığının 300–1100 hPa olup  $\pm 1$  hPa hassasiyet sunduğu görülmüştür. Bu özellikler, proje kapsamında kullanılan referans değerler (sıcaklık 0–35 °C, basınç 800–1200 hPa, nem  $\leq 70\%$ ) ile uyumlu şekilde çalışmış ve eşik değerlerin güvenilir biçimde takibini sağlamıştır.

Metan gazı izleme amacıyla kullanılan MQ-4 sensörü 200–10000 ppm aralığında  $\pm 50$  ppm hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Sistem, kritik eşik değeri olarak 200 ppm seviyesinde yapılandırılmıştır. Bu değer mevcut iş sağlığı ve güvenliği standartlarıyla uyumlu olmakla birlikte, sensörün sıcaklık ve nem değişimlerine duyarlı olması nedeniyle düzenli kalibrasyon gerektirmektedir.

Kullanılan NoIR Kamera V2 (8 MP), düşük ışık koşullarında tatmin edici görüntü performansı sergilemiş ve YOLOv8 nesne algılama modeli ile bütünleştirildiğinde işçi tespiti ve QR kod okuma işlemlerinde yüksek doğruluk sağlamıştır. Ancak QR kodların yerleşim şekli okuma başarısını doğrudan etkilemiştir. Yapılan 80 tekrarlı ölçüm sonucunda, QR kod okuma başarı oranlarının %95 güven aralıkları hesaplanmıştır. Yelek üzeri QR kodlarda 1–2 m mesafede başarı oranı %98 (CI: %94,9–100), 2–3 m mesafede %89 (CI: %82,1–95,9), 3 m üzerinde ise %75 (CI: %65,5–84,5) olarak bulunmuştur. Buna karşılık baret üzeri QR kodlarda başarı oranı 0.5–1 m mesafede %78 (CI: %68,9–87,1), 1–2 m mesafede %49 (CI: %38,0–59,9), 2 m üzeri mesafelerde ise %30 (CI: %19,6–40) düzeyinde kalmıştır. Bu sonuçlar, yelek üzerine yerleştirilen QR kodların hem doğruluk hem de güvenilirlik açısından baret üzeri kodlara kıyasla daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle proje kapsamında QR kodların yeleklere yerleştirilmesi tercih edilmiştir.

QR kodlarda yalnızca T.C. kimlik numarasının bulunması, görsel karmaşıklığı azaltarak okuma doğruluğunu artırmış, ayrıca kişisel verilerin korunmasına katkı sağlamıştır. Detaylı bilgiler doğrudan QR kodda saklanmamış, kurulan web sunucusundaki veri tabanı üzerinden T.C. kimlik numarasıyla ilişkilendirilmiştir. Böylece yalnızca yetkili kişiler tarafından erişilebilen sistem, acil durumlarda işçilerin sağlık ve kimlik bilgilerine güvenli ve hızlı erişim sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar, sistemin aşağıdaki başarı kriterlerini karşıladığını göstermektedir:

- 7/24 web tabanlı erişim ile hem maden güvenlik ekipleri hem de acil müdahale kuruluşları tarafından izlenebilirlik,
- Maden galerilerinde işçi kapasitesinin aşılması durumunda uyarı üretme,
- Çevresel parametrelerin referans değerlerin dışına çıkması halinde gerçek zamanlı alarm mekanizmasının devreye girmesi,
- QR kod tabanlı kimlik doğrulama ile işçilerin kişisel bilgilerinin güvenli biçimde yönetilmesi,
- Muhtemel kazaların erken uyarı sistemiyle minimize edilmesi.

Bununla birlikte sistemin geliştirilmesi için; maden koşullarında uzun zamanlı saha uygulamalarının yapılması, daha düşük hata oranına sahip gaz sensörlerinin kullanılması, daha yüksek çözünürlüklü kamera modüllerinin entegrasyonu, sensör çeşitliliğinin artırılması (örneğin CO ve H<sub>2</sub>S sensörlerinin eklenmesi) ve yapay zekâ tabanlı tahmin algoritmalarının kullanılması önerilmektedir. Bu sayede sistem, yalnızca mevcut güvenlik standartlarını karşılamakla kalmayacak, aynı zamanda proaktif bir risk yönetim aracı olarak da işlev görecektir.

## Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Ayrıca, proje sürecinde değerli yönlendirmeleri, eleştirel geri bildirimleri ve sabrı ile çalışmanın her aşamasında rehberlik etmiş olan danışmanım Prof. Dr. Burak Akpınar'a içten teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynaklar

- Efe, U. (2013). Maden işletmelerinin planlanmasında üç boyutlu modelleme (3D) ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Ergüzen, A., & Lüy, H. İ. (2017). Real-time tracking and monitoring software application for underground mines. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(2), 50–58. <https://doi.org/10.29137/umagd.351743>
- Gökrem, L., & Bozuklu, M. (2016). Nesnelerin interneti: Yapılan çalışmalar ve ülkemizdeki mevcut durum. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 47–68.
- Jo, B. W., & Khan, R. M. A. (2017). An event reporting and early-warning safety system based on the internet of things for underground coal mines: A case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(9), 925. <https://doi.org/10.3390/app7090925>
- Mallı, T., Kun, M., & Köse, H. (2014). Yeraltı kömür işletmelerinde gaz izleme ve erken uyarı sistem teknolojisinin iş kazalarının önlenmesindeki önemi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 59–67.
- Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği (Resmî Gazete Tarihi: 19.09.2013). EK-1: Sondajla maden çıkarılan işlerin yapıldığı işyerleri ile yeraltı ve yerüstü maden işlerinin yapıldığı işyerlerinde uygulanacak asgari genel hükümler 1.1.6.
- Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği (Resmî Gazete Tarihi: 19.09.2013). EK-1: Sondajla maden çıkarılan işlerin yapıldığı işyerleri ile yeraltı ve yerüstü maden işlerinin yapıldığı işyerlerinde uygulanacak asgari genel hükümler 1.6/1. cümle.
- Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Yönetmeliği (Resmî Gazete Tarihi: 19.09.2013). EK-3: Yeraltı maden işlerinin yapıldığı işyerlerinde uygulanacak asgari özel hükümler 12.3.
- Narkhede, P., Walambe, R., Chandel, P., Mandaokar, S., & Kotecha, K. (2022). MultimodalGasData: Multimodal dataset for gas detection and classification. *Data*, 7, 112. <https://doi.org/10.3390/data7080112>
- Preethi, R., Praneeth, G. V., & Sarma, E. S. S. K. (2021). Human detection and counting using Python. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(4), 1000–1006.
- Tanır, F. (2009). Madenlerde iş sağlığı ve güvenliğine bakış. *TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu*, Adana, 7–8.
- Tsai, P.-F., Liao, C.-H., & Yuan, S.-M. (2022). Using deep learning with thermal imaging for human detection in heavy smoke scenarios. *Sensors*, 22, 5351. <https://doi.org/10.3390/s22145351>

# Bildiriler Teknik Oturum 4

## Jeodezi ve Ölçme Uygulamaları

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Bahadır Aktuğ, Ankara Üniversitesi

4.1. Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yüğü (Bildiri Özet)  
(Mehmet Fikret Öcal, Ali Özgür Taşoğlu)

4.2. Elektronik Harp Koşullarında İHA GNSS Navigasyon Performansının Otonom Kalkış Analizi (Bildiri Özet)  
(Furkan Karlıtepe)

4.3. Mobil Haritalama Sistemleri İçin Çok-Antenli GNSS Sisteminden Konum ve Dönüklük Bilgisi Elde Edilmesi  
(Bildiri Özet)  
(Hasan Dilmaç, Veli İlçi, İbrahim Murat Ozulu)

4.4. Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi (Tam Metin)  
(Bilal Mutlu, Serdar Erol, Reha Metin Alkan)

4.5. Büyük Ölçekli Harita Üretiminde Yer Kontrol Noktası Koordinatlarının Türkiye Ulusal Referans Ağı Çerçevesi (TUREF)'ne Dayalı Olarak Belirlenmesinde Türkiye Yatay Hız Alanının Etkisinin Araştırılması  
(Bildiri Özet)  
(Ali Kılıçoğlu, Mert Can Günendi)

4.6. GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelenmesi (Tam Metin)  
(Ali Utku Akar, Cevat İnal)

## Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yüğü

Mehmet Fikret ÖCAL<sup>1\*</sup>, Ali Özgür TAŞOĞLU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN A.Ş., Uydu, Uzay Sistemleri ve Kamu Güvenliği Haberleşme Sistem Mühendisliği Direktörlüğü, Haberleşme ve Bilgi Teknolojileri Sektör Başkanlığı, Macunköy, 06200, Ankara.

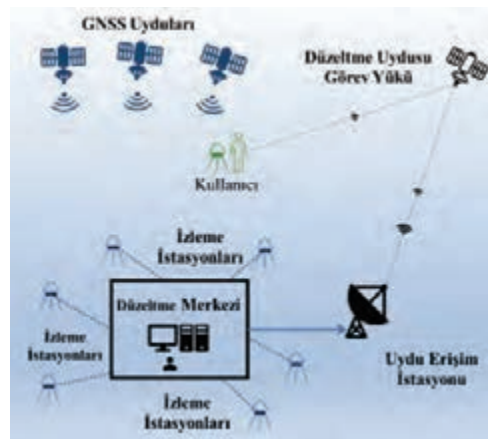
### Genişletilmiş Özet

Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemleri (ing. Global Navigation Satellite Systems, GNSS), Uzaydan Dünyaya pasif mesafe ölçme sistemleridir (Teunissen ve Montenbruck, 2017). Bu sistemler, tüm Dünya üzerinde ve her türlü hava koşulunda kullanılabilirliğinin yanı sıra düşük maliyetli alıcılar tarafından sinyalleri alınabilmesi sebebiyle askeri ve sivil birçok uygulamada temel konum belirleme sistemi olmuştur. Bu sistemlerden konum bilgisi elde edilebilmesi amacıyla ölçülen uydu-alıcı arasındaki sözde-uzaklık bilgisi (ing. pseudorange) ve uydu konumu kullanılarak geriden kestirme yöntemiyle alıcı konum bilgisi elde edilmektedir. Elde edilen konum bilgisinin doğruluğu uydu yörünge/saat hatası ve sinyalin yayılım yaptığı ortamlardan etkilenmektedir. GNSS'in hava taşıtlarının seyrüseferinde kullanılabilmesi için belirli güvenlik ve performans gereksinimlerini sağlamaları gerekmektedir (ICAO, 2018). Bu şartların sağlanabilmesi için temel olarak uydu kaynaklı hataların ve iyonosfer gecikmesinin belirlenip belirli seviyelerde azaltılması gerekmektedir. Ayrıca sistemde oluşacak olağan dışı durumların tespit edilip, kullanıcıya gerekli uyarıların belirlenen süreler içerisinde üretilmesi beklenmektedir (RTCA, 2016).

Uydu Tabanlı Düzeltme Sistemi (ing. Satellite Based Augmentation System, SBAS), tek frekanslı GPS kullanıcılarının doğruluk, süreklilik, bütünlük ve erişilebilirlik performans kriterlerini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bölgesel düzeltme sistemidir. Bu sistemler arasında ABD'de WAAS, Avrupa Birliği'nde EGNOS gibi örnekler yer almaktadır. SBAS, özellikle hava seyrüseferinde hassas yaklaşma ve iniş uygulamaları başta olmak üzere, kara ve deniz taşımacılığı, haritacılık, tarım ve afet yönetimi gibi birçok alanda yüksek güvenilirliğe sahip konumlama hizmeti sunmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, Türkiye'nin ulusal SBAS altyapısının geliştirilmesine yönelik yürütülen projenin genel mimarisi, amaçları, Türkiye'nin seyrüsefer sistemleri konusundaki bilgi birikimine sunacağı katkıları ve nihai performans hedefleri ele alınmaktadır.

Günümüzde düzeltme sistemlerinde genellikle iki farklı yöntemle düzeltme sinyalleri alıcılara iletilmektedir. Bu yöntemlerin ilki NTRIP yöntemi ile internet üzerinden düzeltme sinyallerinin iletilmesidir. Diğer yöntem ise uydu üzerinden iletimdir. İnternetin erişilemediği kırsal alanlar, açık denizler ile yüksek irtifa hava sahasında uydu üzerinden erişim vazgeçilmez olmaktadır. Ayrıca uydu üzerinden yayınlanan SBAS sinyali herhangi bir harici donanıma ihtiyaç duymadan mevcut DO-229 (RTCA, 2016) uyumlu GNSS alıcıları tarafından alınabilmektedir.

SBAS gereksinimi olan hava araçlarında bulunan GNSS alıcılarının önemli bir kısmı GPS L1 frekansını kullanarak konum belirlemektedir. Tek frekanslı alıcılar, çift frekanslı alıcıların aksine iyonosfer etkisini iyonosfer bağımsız gözlemleri kullanarak giderememektedir. Bu sebeple tek frekanslı alıcılar ile belirli bir doğruluk seviyesinde konum üretebilmesi için diğer hata kaynaklarının etkisine ilaveten iyonosfer gecikmesinin de düzeltilmesi gerekmektedir. SBAS uydularından, ilgili kapsama alanında bulunan GPS uydu ölçümlerinin düzeltilmesi amacıyla gerekli parametreler yayınlanmaktadır. Bu düzeltmelerin ilki 120 saniye aralıklarla yayınlanan ve uzun vadeli değişen GPS uydu yörünge ve saat hatasıdır. İkinci olarak GPS uydu saatinin hızlı değişen kısmı hızlı düzeltme olarak 6 saniyede bir yayınlanmaktadır. Son olarak 300 saniye aralıklarla güncellenen bir mesaj ile, iyonosferin sebep olduğu sinyal gecikmesi yayınlanmaktadır. İyonosfer düzeltmesi DO-229 (RTCA, 2016) standardında belirlenen ızgara noktaları için dikey gecikme değeri olarak üretilmektedir. SBAS alıcısı kendi görüş hattının iyonosferi kestiği nokta etrafında bulunan ızgara noktalarına kullanarak sinyalin gecikme miktarını hesaplayabilmektedir. Bulunan hata değerleri parametre kestirimi öncesi ölçülerden indirgenmektedir. Bu düzeltmelerin SBAS alıcıları tarafından alınıp çözülmesi ile birlikte, kullanıcı konumunu daha hassas bir şekilde hesaplayabilmektedir. EGNOS açık servisinin kullanıcılarına sunduğu anlık konum doğruluğu yatay ve düşeyde sırasıyla 3 ve 4 metrenin altında (95%) olacağını belirtmektedir (GSA, 2017). SBAS gereksinimlerinde (ICAO, 2018) ise CAT I hassas yaklaşma için gereken konum doğruluğu ise yatay ve düşeyde sırasıyla 16 ve 4 metre (95%) olarak belirtilmiştir.



Şekil 1: SBAS sistem mimarisi

\* Sorumlu Yazar: Tel: (312) 592 10 00

E-posta: ocalmf@gmail.com (Mehmet Fikret ÖCAL)

*Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yükü*

Proje, yer ve uzay kesimleri olmak üzere iki ana unsurdan oluşmaktadır. Yer kesiminde, izleme istasyon ağı alt sistemi, düzeltme merkezi alt sistemi, uydu erişim alt sistemi ana bileşenlerinden oluşan bir mimari benimsenmiştir. Yer kesiminin, GNSS verilerini toplamaya başlaması akabinde, GNSS sinyaline etki eden hata kaynaklarını hesaplayacağı ve bu düzeltmeleri SBAS uyduları aracılığıyla kullanıcılara ulaştıracağı bir yapı kurgulanmıştır. Uzay kesiminde ise görev yükü alt sistemi bulunmaktadır. Bu alt sistem, yer sabit yörüngede bulunan bir uydu üzerinde yerleşik olarak, yer kesiminden gelen sinyalleri kapsama bölgesine yayınlamaktadır.

Yer kesiminde Türkiye üzeri ve yakın çevresine dağıtılmış bir GNSS CORS (ing. Continuously Operating Reference Stations) ağı kurulması planlanmaktadır. Bu istasyonlardan alınan veriler düzeltme merkezinde toplanmaktadır. Düzeltme merkezi; uzun vadeli, hızlı ve iyonosferik düzeltmeleri sistemin en kritik parçalarından olan ASELSAN'a ait algoritmalar ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan düzeltmeler, ilgili SBAS formatına (DO-229, RTCA 2016) çevrilerek, uydu erişim alt sistemi vasıtasıyla GEO (ing. Geosynchronous Earth Orbit) uyduya gönderilmektedir. Uzay kesiminde yer alan uydu görev yükü, Ku-bant sinyali L-banda çevirerek tekrardan yer yüzüne iletmektedir. Bu görev yükü, mevcut SBAS L1 sistem mimarisine uygun olmakla birlikte ileride yer sisteminde yapılacak değişikliklerle L5 frekansı üzerinden çift-frekanslı SBAS mimarisini de destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda görev yükü içerisinde kullanılacak ekipmanlar ASELSAN kabiliyetleri ile tasarlanıp, üretilmekte ve doğrulanmaktadır.

Tasarlanan mimarinin konsept gösterimi amacıyla oluşturulan masaüstü modellerinde: izleme istasyon ağı alt sistemi, düzeltme merkezi alt sistemi ve uydu görev yükü tasarımlarında sona gelmiş olup sistem testleri devam etmektedir. Düzeltme verisi oluşturabilmek için mevcutta bulunan CORS ağları (IGS, TUSAGA vb.) verileri kullanılarak ilgili hata parametreleri üretilmiştir. Masaüstü gösterim modeli ile yapılan testlerde, geliştirilen düzeltme algoritmalarının kullanımıyla SBAS standartlarına uygun seviyede doğruluk sağlandığı görülmüştür. Performans analizleri, geliştirilen sistemin kapsama alanı içerisinde operasyonel kullanıma uygunu göstermiştir.

Türkiye'nin GNSS düzeltme sisteminin, havacılık başta olmak üzere tarım, afet yönetimi, akıllı ulaşım ve otonom araç teknolojileri gibi millileştirilmesi kritik olan uygulamalarda kullanılması planlanmaktadır. Hedeflenen kapsama alanı Türkiye ve yakın çevresi olarak belirlenmiştir. SBAS ağ zamanı oluşturma yeteneği de belirli bir takvim dahilinde sisteme kazandırılacak yeteneklerden biri olacaktır. Ayrıca, mevcutta geliştirilen açık servis dışında can güvenliği servisi ve veri erişim hizmetleri desteği de sağlanması planlanmaktadır. Projenin bir diğer hedefi ise Türkiye'nin seyrüsefer ve konumlama teknolojilerindeki dışa bağımlılığını azaltmak, bu alanlarda kademeli yetenek kazanımını sağlamak ve insan kaynağı yetiştirmektir. Dünya örneklerinde SBAS vasıtasıyla PPP (ing. Precise Point Positioning) hizmetleri sağlanabilmektedir. Projenin ileriki safhalarında operasyonel konsept gereksinimleri dahilinde geliştirilecek PPP, PPP-AR (ing. Ambiguity Resolution) ve PPP-RTK (ing. Real-time Kinematic) servislerinin sunulması değerlendirilmektedir. Milli Konumlama ve Zamanlama Sistemi'ne yönelik ilk adım olan GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yükü kapsamındaki çalışmalar Türkiye'de ilk defa gerçekleştirilmek üzere ASELSAN tarafından Ar-Ge Projesi olarak başlatılmıştır. Hedeflenen nihai amacın büyüklüğü düşünüldüğünde projenin aşamalı olarak gerçekleştirilmesi ve her bir fazda kademeli yetenek kazanımı planlanmıştır. Bu fazlı yapının ilk ayağı olan ve gerekli literatür çalışmalarının yapılarak sistem mimarisinin ortaya konduğu Faz-0 aşaması, 2022 yılının ocak ayında başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Faz-1 kapsamında da devam eden 4 senelik çalışmaların sonuna gelmiş ve 2026 yılı ilk çeyreğinde yer kesimi algoritmalarının ve masaüstü modelin doğrulanmasının bitirilmesi planlanmıştır. Faz-2 kapsamında da projenin GEO yörüngeye gönderilecek bir uyduya entegrasyonu ve yer kesiminin projelendirilmesi öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler

SBAS, GPS, İyonosfer Gecikmesi, Yörünge Hatası, Saat Hatası

Kaynaklar

Teunissen, P. J. G. & Montenbruck Oliver (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer.

ICAO. (2018). *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume 1 Radio Navigation Aids*. ICAO.

RTCA. (2016). *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (DO-229E)*. RTCA, Inc.

GSA. (2017). *EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document*. European Global Navigation Satellite Systems Agency.

# Elektronik Harp Koşullarında İHA GNSS Navigasyon Performansının Otonom Kalkış Analizi

Furkan KARLITEPE

Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği

## Genişletilmiş Özet

Küresel Konumlandırma Sistemleri (GNSS), günümüzde hem sivil hem de askeri alanlarda konum, hız ve zaman bilgisinin elde edilmesi için kritik bir altyapı olarak kabul edilmektedir. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi farklı uydu takımlarından yayınlanan sinyaller, kullanıcı konumundaki GNSS alıcıları tarafından işlenerek hassas konumlama ve senkronizasyon sağlar. GNSS uyduları tipik olarak 25–28 dBW (55–58 dBm) mertebesinde bir iletim gücü ile sinyal yayınlamakta olup, serbest uzayda yaklaşık 175–185 dB'lik bir yayılım kaybına maruz kalmaktadır. Bu nedenle, yeryüzüne ulaştığında GNSS sinyali oldukça zayıftır ve –125 dBm seviyelerinde GNSS alıcı antenine ulaşır. Bu denli zayıf sinyaller, alıcı ön uç yükselteçleri (LNA: Low Noise Amplifier) tarafından 30–40 dB civarında güçlendirilerek işlenebilir hâle getirilir. GNSS alıcılarında gözlenen RSSI (Received Signal Strength Indicator) değerleri genellikle –90 dBm seviyelerinde seyrederek ve bu durum GNSS konum çözümü için idealdir. Bununla birlikte, GNSS sinyal kalitesinin değerlendirilmesinde kritik parametre RSSI değil, taşıyıcı ile gürültü yoğunluğu oranı olarak bilinen C/N<sub>0</sub>'dur. C/N<sub>0</sub>'nun 35–45 dB-Hz aralığında olması, konum çözümünün güvenilir bir biçimde üretilebilmesi için gerekli koşullardan biridir. Dolayısıyla RSSI'nin –90 dBm civarında ölçülmesi, sistemin normal çalıştığını ve alıcının sinyal işlemcisinin yeterli seviyede bir sinyal-gürültü oranı elde ettiğini göstermektedir. Ancak, GNSS sinyallerinin bu kırılğan yapısı, elektronik harp (EH) ortamlarında karıştırma (jamming) ve yanıltma (spoofing) tehditlerine karşı oldukça savunmasız olmasına neden olmaktadır. Özellikle insansız hava araçları (İHA), operasyonel görevlerde navigasyon kabiliyetini doğrudan GNSS alıcılarının güvenilirliğine dayandırdığından, güçlü karıştırıcıların varlığına görev başarısı riske girmektedir. Bu bağlamda, Controlled Reception Pattern Antenna (CRPA) yapısına sahip alıcılar, yönlü anten dizileri üzerinden uzaysal filtreleme (Adaptive Notch Filter) gerçekleştirerek girişim sinyallerini bastırma yeteneği kazandırmakta ve klasik patch anten tabanlı alıcılara kıyasla ciddi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, GNSS'in karıştırma bildirgeci durumlarda ataletsel seyrüsefer sistemleri (INS), jiroskop ve ivmeölçer verilerini kullanarak alternatif konumlama görevi görmektedir, ancak zamanla hataların logaritmik artması nedeniyle yalnız başına uzun süreli çözüm sunamamaktadır. Bu çalışmada, elektronik harp ortamında gerçekleştirilen bir deneysel uçuş senaryosu üzerinden CRPA yapısına sahip bir GNSS alıcısı ile patch anten tabanlı GNSS alıcısının performansları karşılaştırılmış ve INS entegrasyonunun katkısı incelenmiştir.

Deneyel senaryo, geniş spektrumlu bir GNSS karıştırıcısının etkin olduğu bir ortamda gerçekleştirilmiş olup, karıştırıcı cihaz 0–30 dBm aralığında ayarlanabilir güç seviyelerinde çalıştırılmıştır. Test edilen İHA, bir CRPA tabanlı GNSS alıcısı, bir patch anten tabanlı çift frekanslı GNSS alıcısı ve entegre ataletsel seyrüsefer sistemi ile donatılmıştır. Veri kaydı CRPA alıcısı için 100 ms aralıklarla, patch anten alıcısı için 200 ms aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Uçuşun başlangıcında 8,5 dakikalık bir süre boyunca herhangi bir karıştırma uygulanmamış ve her iki alıcının da uydulara kilitlenme süreci gözlemlenmiştir. Bu süreçte CRPA anten 27 uyduya, patch anten ise 14 uyduya kilitlenmiş, RSSI değeri ise –89 dBm civarında ölçülmüştür. 8:40–9:00 dakikaları arasında karıştırıcı 0–15 dBm gücünde çalıştırılmış ve İHA yaklaşık 30 m irtifaya dikey kalkış gerçekleştirmiştir. Bu aşamada CRPA anten uydusu sayısını 24 seviyesinde koruyabilmiş, HDOP değerleri 0.5–0.65 arasında değişmiş, yatay doğruluk (HACC) 0.43–1.02 m aralığında seyretmiş ve yatay hız ölçümü 0–0.47 m/s olarak kaydedilmiştir. RSSI değeri –89 dBm'den –70 dBm'e yükselmiştir ki bu durum karıştırıcı etkisinin sinyal seviyesini artırarak gürültüye katkıda bulunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, patch antenli alıcı yalnızca 10 saniye içinde 7 uyduya, 1 dakika içerisinde ise 0 uyduya düşmüş, HDOP değeri 0.83'ten 1.54'e yükselmiş, HACC değeri 3 m'den 20 m'ye bozulmuş ve yatay hızda sapmalar artmıştır. 9:00–9:30 dakikaları arasında İHA 100 m irtifada karıştırıcı üzerinde dairesel uçuş yapmış ve karıştırma gücü 15–25 dBm seviyelerine çıkarılmıştır. Bu aşamada CRPA anten 24 uyduya kilitlenmeye devam etmiş, HDOP 0.65–0.85 arasında, HACC 1.02–1.3 m aralığında ölçülmüş, RSSI değeri ortalama –70 dBm seviyesinde kalmıştır. Patch anten ise tamamen konum çözümünü kaybetmiş ve herhangi bir uyduya kilitlenememiştir. 9:30–10:00 dakikaları arasında karıştırma gücü 25–30 dBm seviyelerinde sabitlenmiş ve İHA 100 m irtifada 20 m/s hızla dairesel uçuşuna devam etmiştir. Bu koşullarda CRPA antenin 20–25 uyduyu görebildiği, HDOP'un 0.65–0.85 arasında sabit kaldığı, HACC'nin 1.5 m seviyesine yükseldiği ve yatay hızın airtspeed sensörüne göre 2 m/s daha yüksek ölçüldüğü raporlanmıştır. RSSI değerleri –65 dBm seviyesinde gözlenmiştir. Patch antenli alıcı ise herhangi bir çözüm üretememiştir. 10:00–10:30 dakikaları arasında İHA 100 m'den 150 m'ye yükselmiş, aynı zamanda 20 m/s hızda dairesel uçuşuna devam etmiştir. Karıştırıcı gücü yine 25–30 dBm seviyelerinde tutulmuş ve CRPA antenin performansı benzer şekilde korunmuştur. HDOP değerleri 0.65–0.85 aralığında, HACC değerleri ise 1–1.3 m aralığında kalmıştır. RSSI değeri –65 dBm civarında seyrederken patch antenli alıcı bu aşamada da herhangi bir uyduya kilitlenememiştir. 10:30 dakikasında karıştırma kesilmiş ve RSSI değeri tekrar –90 dBm seviyesine gerilemiştir. Bu noktada CRPA anten 28 uyduya kilitlenmiş, patch anten ise lineer bir artışla 14 uyduya ulaşabilmiştir. İki GNSS alıcısından ölçülen hız değerleri birbirine yakın görünmüş, airtspeed sensörüne kıyasla yaklaşık 2 m/s sapma tespit edilmiştir. Bu bulgular, CRPA antenin elektronik harp ortamında yüksek dayanıklılık gösterdiğini, patch anten tabanlı alıcının ise düşük güç seviyeli karışırtırmalarda dahi hızlı bir şekilde çözüm kaybına uğradığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen uçuş denemeleri CRPA anten tabanlı GNSS alıcısının jamming koşullarında önemli bir avantaj sağladığını açıkça göstermektedir. RSSI değerlerinde –90 dBm'den –65 dBm'e değişimler gözlenirse de, CRPA antenli alıcı konum çözümünü sürdürebilmiş, HDOP ve HACC değerleri kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Buna karşılık, patch anten tabanlı GNSS alıcısı düşük seviyeli karışırtırmalarda dahi hızlı bir şekilde çözüm kaybetmiş, HDOP ve HACC ölçümleri yapılamaz hâle gelmiş ve operasyonel anlamda işlevsiz kalmıştır. Ayrıca, uçuş boyunca INS'in GNSS boşluklarında alternatif konumlama görevi üstlendiği, ancak zamanla hata birikimi nedeniyle tek başına uzun süreli çözüm sağlayamadığı gözlenmiştir. Bu durum, GNSS alıcılarının karıştırma dayanıklılığının artırılmasının tek başına yeterli olmadığını, aynı zamanda INS ile entegrasyonun da kritik olduğunu ortaya

*Türkiye'nin GNSS Düzeltme Sistemi ve Uydu Görev Yüğü*

koymaktadır. Literatürde benzer çalışmalarda CRPA antenlerin 20–30 dB mertebesinde jamming bastırma kabiliyeti sunduğu raporlanmıştır. Bu deneysel bulgular, bu tür sistemlerin EH ortamında İHA görev güvenliği açısından vazgeçilmez olduğunu doğrulamaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı CRPA algoritmalarının (örneğin Minimum Variance Distortionless Response – MVDR veya Space-Time Adaptive Processing – STAP) karşılaştırılması, daha yüksek güçlü jammer senaryoları altında testler ve spoofing etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, Ardupilot'un GPS'siz uçuş algoritmalarının CRPA tabanlı GNSS çözümleri ile birlikte entegrasyonu da önemli bir araştırma alanı olarak görülmektedir. Böylece, jammer altında GNSS sinyallerinin kısmen korunabildiği durumlarda Ardupilot'un GPS kaybı senaryoları için geliştirilmiş sensör füzyonu yaklaşımları (IMU, barometre, optik flow, airspeed vb.) ile birlikte çalışması test edilerek, EH ortamlarında görev güvenliği daha da artırılabilir. Elde edilen bulgular, EH ortamında görev yapacak İHA'ların navigasyon altyapılarının tasarımında önemli çıkarımlar sunmaktadır: CRPA tabanlı GNSS alıcıları ile INS entegrasyonu, görev güvenliğini artıran kritik bir bileşen olarak değerlendirilmeli, tekli patch anten çözümlerinin ise bu tür senaryolarda yetersiz kalacağı dikkate alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler

GNSS, CRPA, Patch, Jamming

## Mobil Haritalama Sistemleri için Çok-Antenli GNSS Sisteminden Konum ve Dönüklük Bilgisi Elde Edilmesi

Hasan DİLMAÇ<sup>1</sup>, Veli İLÇİ<sup>1,\*</sup>, İbrahim Murat OZULU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun

<sup>2</sup>Hittit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, 19169, Çorum

### Anahtar Kelimeler

Mobil Haritalama, GNSS, Çoklu Anten Sistemleri, Konum ve Dönüklük Belirleme

Mobil haritalama sistemleri son teknoloji konumlama ve algılama sensörlerinin entegrasyonu ile oluşturulmakta, aracın hem konum ve dönüklüğünü hem de etrafın üç-boyutlu (3B) modelinin üretilmesini sağlamaktadırlar. Konum ve dönüklük bilgileri genellikle küresel konum belirleme uydusu sistemleri (GNSS) ile ataletsel ölçü birimleri (IMU) entegrasyonu ile sağlanmakta iken aracın etrafından toplanan veriler ise Light Detection and Ranging (LiDAR), RADAR veya kamera gibi sensörlerle sağlanmaktadır. Hassas konum ve dönüklük bilgisinin gerçek zamanlı olarak belirlenebilmesi bu sistemlerin temel bileşeni olarak gösterilmektedir. GNSS sistemleri ile gerçek zamanlı, cm seviyesinde 3B konum bilgisi elde edilebilirken IMU sensörleri ile yüksek frekanslı (400Hz) dönüklük bilgileri elde edilebilmektedir. Dönüklük bilgileri ise IMU içerisinde yer alan ivmeölçer, jiroskop ve manyetik sensörler kullanılarak elde edilmektedir. İvmeölçerler 3-boyutlu ivme verisini, jiroskop açısal hız verisini, manyetik sensör ise aracın manyetik kutba göre olan yön bilgisinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada geliştirilmiş olan mobil haritalama sistemi üzerinde konumlandırılmış olan iki navigasyon sisteminden biri olan üç antenli GNSS sistemi ile gerçekleştirilen ölçümler ve elde edilen sonuçların analizi verilmektedir. Bu sistemin seçilme nedeni yalnızca konum doğruluğunun test edilmesi değil, aynı zamanda üç antenli mimarisi sayesinde aracın pitch, roll ve heading gibi araca ait durum parametrelerini de doğrudan hesaplamaya imkân tanınmasıdır. Dolayısıyla, söz konusu sensör hem konum hassasiyetinin değerlendirilmesi hem de dönüklük belirleme kabiliyeti açısından bütüncül bir çözüm olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca bünyesinde IMU bulunmaması nedeniyle manyetik alan değişimlerinden de etkilenmeden üç boyutlu dönüklük bilgisi elde edilmesi imkânı sunmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmalar beş başlık altında verilmektedir:

- Konum belirleme ve dönüklük hesabı için kullanılacak sistem ve veri toplama
- Referans konum bilgisi elde edilmesi
- Uygulama alanı
- Verilerin işlenmesi
- Sonuçlar

Konum belirleme ve dönüklük hesabı için kullanılacak sistem ve veri toplama: Konum belirleme ve aracın dönüklük bilgilerinin hesaplanması amacıyla SimpleRTK2B-SBC alıcı-anten sistemi kullanılmıştır. Bu sistem yüksek hassasiyetli GNSS ölçümleri yapmak üzere tasarlanmış bir işlemcidir. RTK ve CORS sistemlerinden veri alabilmesi sayesinde cm seviyesinde doğruluk sağlar, araç veya robotik platformlarda gerçek zamanlı konum bilgisi sunar. Sistem, birden fazla GNSS anteni ile çalışabilir ve NMEA/UBX protokolleri üzerinden veri iletimi yapar. Python gibi programlama dilleri ile kolayca kontrol edilip veri kaydı yapılabilir. Küçük boyutu ve düşük güç tüketimi, hareketli uygulamalarda kullanımını kolaylaştırır. Üç adet Ublox ZED-F9P GNSS alıcı modülü kullanılan bu sistemde modüllerin Moving-Base (Hareketli Sabit, HS) özelliği sayesinde iki anten ile yön (heading) bilgisi üretilebilirken üçüncü antenin sisteme dahil edilmesiyle birlikte aracın tüm durum bilgisi (pitch, roll, heading) elde edilmektedir. Bu uygulamada üç antenin konum bilgilerini yüksek doğrulukta elde etmek için NTRIP modülü yardımıyla internet üzerinden GZG-CORS ağına bağlanılmıştır. Bu ağa bağlanmak için genellikle birkaç dakika yeterli olmaktadır.

Referans konum bilgisi elde edilmesi: Üç antenli GNSS sisteminden hesaplanan konum bilgisi doğruluğunun test edilmesi amacıyla referans konum verisi üretilmiştir. İlk olarak aracın hareketinin güzergâh boyunca takip edilebilmesi için çalışma alanını görece şekilde iki adet sabit referans istasyonu tesis edilmiştir. Bu noktaların 3B koordinatlarının elde edilmesi için statik GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiş ve gerekli ölçüm sonrası değerlendirme işlemleri yapılarak mm seviyesinde doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Aracın hareketi sırasında Robotik Total Station bu noktaya kurularak aracın güzergâh boyunca hareketi izlenmiştir. Bu işlem için Leica TS16 robotik total station kullanılmıştır. Kendisine özel 360° reflektörü sayesinde hareket halindeki bir platform üzerine yerleştirilen reflektör ile otomatik olarak ölçümler yapılabilmektedir. Bu cihaz sayesinde 1Hz ölçüm sıklığında aracın konumu sürekli ölçülmüş ve aracın 3B konumu cm seviyesinde belirlenmiştir.

Uygulama Alanı: Uygulama alanı olarak Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit kampüsünde yaklaşık 1 km uzunluğunda bir güzergâh seçilmiştir. Güzergâh seçiminde Robotik Total Station kurulacak nokta ile aracın güzergâhının kesintisiz olarak takip edilebilmesi önem arz etmektedir.

GNSS Verilerinin İşlenmesi: SimpleRTK2B-SBC sistemi bağımsız üç alıcı ve antenden oluşan konum belirleme sistemidir. Bu sistem her üç alıcıyla da RTK/CORS ağına bağlanma imkânı vermektedir. Bu sistem ile CORS ağına bağlanılmış ve her bir antenin koordinatları ITRF96 datumu – 2005.0 epoğunda üretilmiştir. Antenler ile gerçekleştirilen çözümlerin çoğunluğunda alıcı RTK Fix durumundadır. Ancak birkaç noktada *Float* çözüme düşülmüştür.

*Bildirinin Türkçe Başlığı*

SimpleRTK2B-SBC ile elde edilen konum ve yön bilgisini referans konum ile doğrudan karşılaştırabilmek için bir koordinat taşıma işlemi yapılması gerekmektedir. Çünkü referans veri platform üzerine yerleştirilen 360° reflektörün konumunu göstermektedir ancak SimpleRTK2B-SBC antenleri ise platformun köşelerinde bulunmaktadır. Bu antenlerden 360° reflektörün bulunduğu konuma koordinat taşıyabilmek için gerekli açı ve öteleme bilgileri laboratuvar ortamında lokal bir koordinat sisteminde Total Station ile ölçümler yapılarak hesaplanmıştır.

SimpleRTK2B-SBC'nin konum doğruluğunu test edebilmek için 1. antenin koordinatları referans güzergâhın elde edildiği konuma taşınmıştır. SimpleRTK2B-SBC'yi temsil eden taşınmış güzergâh ile referans güzergâh arasındaki farkların bulunması ve istatistiki olarak değerlendirilmesiyle bu sensörün konum doğruluk testleri gerçekleştirilmiştir.

GNSS sisteminden aracın dönüklük bilgilerinin (roll, pitch, heading) elde edilmesi için cm seviyesinde 3B konum bilgisi elde edilen üç antenin 3B koordinatları kullanılmıştır.

Sonuçlar: Üç antenli SimpleRTK2B-SBC geliştirme kartının konum doğruluğunun test edildiği ve dönüklük bilgisinin hesaplandığı bu çalışmada seçilen bir güzergâh üzerinde çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Referans güzergâh verisi Robotik Total Station ve aracın üzerine monte edilen 360° reflektör ile toplanmıştır. Eş zamanlı olarak çalıştırılan SimpleRTK2B-SBC ile 10 Hz frekansta ölçümler gerçekleştirilerek her bir anten için uydu gözlem verileri kaydedilmiştir. Ardından yapılan post-proses işlemlerle öncelikle her bir antenin global koordinatları bulunmuştur. Ardından sensörün konum doğruluğunu test edebilmek koordinat taşıma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hesaplamalar işlemler gerçekleştirilerek istatistiki sonuçlar elde edilmiştir.

Üç antenli SimpleRTK2B-SBC sensörünün referans güzergâh ile olan konum doğruluğu incelenmiştir. 2B'de ölçülen hatalar oldukça düşük olup, ortalama 2.1 cm ve medyan 1.7 cm olarak hesaplanmıştır; maksimum hata ise 7.3 cm'dir. Bu değerler, sensörün yatay doğruluk açısından yüksek hassasiyet sağladığını göstermektedir. Üç boyutlu konum dikkate alındığında, ortalama hata 5.4 cm ve medyan 5.3 cm olup, maksimum hata 11.5 cm'ye ulaşmaktadır. Bu, H ekseninin eklenmesiyle birlikte toplam konum hatasında bir miktar artış olduğunu ancak hataların hâlâ istikrarlı ve küçük sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır. H eksenindeki yükseklik farkları ise ortalama 4.7 cm, medyan 4.5 cm ve maksimum 10.3 cm olarak bulunmuştur. Standart sapmaların 2–2.3 cm civarında olması, ölçümlerin genel olarak dengeli dağıldığını ve aşırı sapmaların az olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, SimpleRTK2B-SBC sensörünün üç antenli konfigürasyon ile seçilen güzergâh üzerinde hem yatay hem de düşey doğruluk açısından güvenilir ve hassas ölçümler verdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca üç anten özelliği sayesinde aracın dönüklük bilgileri (roll-pitch ve heading) elde edilebilmektedir. Ayrıca genellikle yönelim bilgileri için kullanılan Ataletsel Yönelim Sensörlerinin (IMU) sensörlerinin manyetik alandan etkilendikleri bölgelerde yüksek yön hatası vermesi sorununa karşı alternatif bir çözüm sağlama potansiyeline de sahiptir.

# Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi

Bilal MUTLU<sup>1,\*</sup>, Serdar EROL<sup>1</sup>, Reha Metin ALKAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

## Özet

GNSS tekniği kullanılarak farklı yöntemlerle konum belirlemek mümkün olmakla birlikte, günümüzde Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning/PPP) yöntemi, pek çok avantajı ile ön plana çıkmaktadır. PPP yöntemi ile yalnız bir GNSS alıcısıyla toplanan verilerin hassas uydü yörünge, saat bilgileri ve diğer ürünler kullanılarak değerlendirilmeleri sonucunda santimetre ve hatta milimetre düzeyinde doğruluk elde edilebilmektedir. PPP yöntemi, hassas ürünlerin üretim zamanına bağlı olarak hem ölçme-sonrası (PP-PPP) hem de gerçek-zamanlı (RT-PPP) seçenekleriyle kullanılmaktadır. Bu çalışmada, İTÜ Ayazağa Kampüsü'nde yer alan bir stadyumda jeodezik bir GNSS alıcısı ile gerçekleştirilen kinematik ölçmeler kullanılmıştır. Ölçmelerde Ocak 2023'te sivil kullanıma açılan Galileo High Accuracy Service (HAS) servisi ile her bir ölçme epöğünün gerçek-zamanlı koordinatları belirlenmiş, eş zamanlı olarak da ham GNSS ölçüleri alıcıya kaydedilmiştir. Toplanan veriler CSRS-PPP web-tabanlı değerlendirme servisi ile ölçme sonrası PPP tekniği ile (PP-PPP) ve ayrıca PRIDE PPP-AR yazılımı ile hem ölçme sonrası (PP-PPP) hem de ölçme sonrası gerçek-zamanlı PPP tekniği (RT-PPP) ile replay modda (gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak ölçme sonrası değerlendirme yaklaşımı) değerlendirilmiştir. Veriler yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS kombinasyonu olarak değerlendirilmiş, böylelikle farklı uydü sistemlerinin doğruluğa olan etkisi de araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, Galileo+GPS konfigürasyonunun yalnız-GPS ve yalnız-Galileo çözümlerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. CSRS-PPP çözümlerinde yatayda yaklaşık 6 cm, yükseklikte ise 3 cm doğruluk (Karesel Ortalama Hata/KOH) elde edilmiştir. PRIDE PPP-AR yazılımı da oldukça benzer doğruluklar vermiştir. PRIDE PPP-AR RT-PPP çözümü, HAS-PPP'ye kıyasla daha yüksek doğruluk sunarken, HAS-PPP servisi birkaç desimetre seviyesinde doğruluk sağlamıştır. En düşük doğruluğun elde edildiği Galileo HAS servisinin jeodezik/GSM/internet altyapısı açısından kısırların olduğu bölgelerde gerçek-zamanlı konumlandırma çalışmaları için önemli bir alternatif olduğu görülmüştür.

## Anahtar Sözcükler

GNSS, Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning/PPP), Galileo Yüksek Doğruluk Servisi (Galileo High Accuracy Service-HAS), Gerçek-zamanlı PPP (Real-time PPP), Web-Tabanlı GNSS Değerlendirme Servisi

## 1. Giriş

Küresel Navigasyon Uydü Sistemleri (GNSS), günümüzde mühendislik projeleri, jeodezik çalışmalar, navigasyon, tarım ve ulaşım güvenliği gibi birçok alanda, kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. GNSS tekniği kullanılarak çok farklı yaklaşımlarla metrelere milimetreye varan farklı doğruluk seviyelerinde ölçme-sonrası veya gerçek-zamanlı olarak statik ve kinematik konumlama yapmak mümkündür. Yüksek doğruluk gereksinimleri için uzun yıllar boyunca klasik rölatif yöntem uygulanırsa da son zamanlarda iletişim ve uydü teknolojilerindeki ilerlemeler ile gelişmiş hesap ve analiz teknikleri sayesinde GNSS ile konum belirlemede bir paradigma değişimi yaşanmış ve Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning/PPP) adı verilen teknik en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi haline gelmiştir. PPP tekniğini kullanıcı açısından öne çıkaran en önemli avantajı yalnızca tek bir GNSS alıcısı ile toplanan veriler kullanarak santimetre-milimetre mertebesinde doğruluklarla konumlamaya imkân vermesidir. PPP tekniğinde, sahada toplanan GNSS ölçüleri, başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere farklı analiz merkezleri tarafından üretilen hassas uydü yörünge ve saat düzeltme bilgileri, atmosferik düzeltme parametreleri ve kod/faz sapma (bias) değerleri ile birlikte değerlendirilmekte ve sonuçta oldukça yüksek doğruluklarda 3-Boyutlu (3B) konum bilgisi üretmek mümkün olabilmektedir. PPP tekniği bu haliyle diferansiyel yöntemlerin aksine, bir referans istasyonu verisine olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta, saha çalışmalarının oldukça esnek bir şekilde yapılmasına imkân sağlamaktadır. IGS tarafından farklı GNSS sistemlerine ait hassas ürünlerin aynı datum ve zaman sisteminde elde edilmesi amacıyla Multi-GNSS Experiment (MGEX) projesi başlatılmış ve böylelikle çoklu-GNSS, çoklu-frekans verileriyle daha güvenilir ve daha yüksek doğrulukta konum belirleme imkânı ortaya çıkmıştır. 2000'li yıllardan itibaren yapılan çeşitli çalışmalar, PPP tekniğinin konumlama camiası açısından önemini ve uygulanabilirliğini vurgulamaktadır (Héroux ve Kouba, 2001; Choy vd., 2017; Kiliszek vd., 2018; DeSanto vd., 2019; Katsigianni vd., 2019; Dawidowicz, 2020; Erol vd., 2020; Facio ve Berber, 2020; Topal ve Akpınar, 2022; Hou vd., 2023; Özbey vd., 2025).

PPP tekniği, hem ölçme-sonrası değerlendirme (post-process/PP) hem de gerçek-zamanlı (real-time/RT) olarak uygulanabilmekte olup, bunun için geliştirilmiş birçok yazılım seçeneği ve platformu mevcuttur. PP-PPP koordinatlarını elde edebilmek için temelde üç farklı veri değerlendirme seçeneği bulunmaktadır. Bunlar: i-) bilimsel/akademik ve ticari yazılımlar (BERNESE, PRIDE PPP-AR, GrafNav vd.), ii-) açık kaynak kodlu yazılımlar (RTKLIB, PPPH vd.) ve iii-) web-tabanlı GNSS değerlendirme servisleridir (CSRS-PPP, magicGNSS, Trimble CenterPoint RTX Post-Processing

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 285 34 14  
E-posta: mutlubil@itu.edu.tr (Mutlu B.)

*Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi*

Service vd.). PPP koordinatları, bu platformlarda kullanılan algoritmalara bağlı olarak başlangıç tamsayı belirsizliği kesirli (float) veya tamsayı (ambiguity-fixed/AR) olacak şekilde belirlenebilmektedir. Bilimse/akademik ve ticari yazılımlar yüksek doğruluk sağlayan fakat lisans maliyeti gerektiren profesyonel çözümler sunmakla birlikte, açık kaynak kodlu yazılımlar araştırmacılara ücretsiz, esnek ve geliştirilebilir bir ortam sunmaktadırlar. Bunun yanı sıra, web-tabanlı servislerin en önemli avantajları arasında ücretsiz olmaları, yüksek doğruluk sağlamaları ve kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olmaları yer almaktadır. Ayrıca bu servisler, bilgisayarda ek bir yazılım kurulumu veya özel donanım gerektirmemekte; yalnızca tek bir GNSS alıcısına ait veri dosyasının servise yüklenmesi ve temel bazı parametrelerin seçilmesi (örneğin; veri işleme modu: statik/kinematik, alıcı anten tipi, referans koordinat sistemi gibi) ile kullanılabilir (Bahadır ve Üstün, 2014). Bu kapsamda en yaygın kullanılan web tabanlı PPP servislerinden biri, National Resources Canada (NRCan) tarafından işletilen Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning (CSRS-PPP) servisi. 2003 yılından bu yana çevrimiçi PPP hizmeti sunan CSRS-PPP (Klatt ve Johnson, 2017), 20 Ekim 2020 tarihinde yapılan güncelleme ile birlikte GPS uyduları için Ambiguity-Fixed (PPP-AR) çözümleri üretebilir hale gelmiştir. Bu yeni özellik, ilk kez Collins (2008) tarafından tanımlanan Decoupled Clock Model (DCM) yaklaşımına dayanmaktadır. Literatürde de vurgulandığı üzere, CSRS-PPP'nin bu güncelleme öncesinde sunduğu PPP-Float çözümleri ile güncelleme sonrasında sağlanan PPP-AR çözümleri kıyaslandığında, gözlem süresine bağlı olarak PPP-AR'ın doğruluk açısından belirgin bir üstünlük sağladığı ortaya konulmuştur (Mutlu vd., 2023). Ayrıca, Canadian Geodetic Survey (CGS) tarafından 14 Mayıs 2025 tarihinde gerçekleştirilen son güncelleme ile, CSRS-PPP servisi ilk kez Galileo uydu sistemi verileriyle PPP çözümü için Ambiguity Resolution (Galileo PPP-AR) desteğini de sağlamaya başlamıştır. Bu kapsamda, 27 Kasım 2022 tarihinden itibaren toplanan E1/E5a gözlemleri, Hızlı (Rapid) veya Final hassas ürünlerle birlikte değerlendirildiğinde Galileo PPP-AR çözümleri elde edilebilmektedir.

Gerçek-zamanlı uygulamalarda GNSS kullanımına bakıldığında, bunun için farklı yöntemlerin kullanıldığı, seçilen yönteme bağlı olarak da santimetre düzeyinden metre(ler) mertebesine kadar değişen doğruluk aralıklarında 3-Boyutlu (3B) gerçek zamanlı konumlama yapılabilirdiği görülmektedir. Yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda ise uzun süredir “Gerçek Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic/RTK)” ve “Ağ Gerçek Zamanlı Kinematik (Network Real-Time Kinematic/NRTK)” yöntemleri rutin olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, genellikle birkaç dakikalık kısa bir başlama (initialization) süresi sonrasında santimetre seviyesinde 3B gerçek zamanlı konumlandırma imkânı sunmaktadır. Ancak, RTK/NRTK yöntemlerinin uygulanabilmesi için konumu bilinen referans noktaları veya GNSS ağı gibi jeodezik bir altyapıya ayrıca, gezici alıcıya düzeltmelerin iletilebilmesi için radyo, GSM veya internet bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, sürekli gözlem yapan sabit GNSS referans istasyonlarının bulunmaması ya da yeterli sıklıkta olmaması gibi durumlarda; ayrıca düzeltme verilerinin iletmesinde karşılaşılan coğrafi/topografik engeller, iletişim kesintileri veya düzensiz internet bağlantısı gibi durumlarda bu yöntemlerin etkin kullanımı önemli ölçüde kısıtlanabilmektedir. Bu tür kısıtların ortadan kaldırılabilmesi için GNSS kullanıcılarına, jeodezik altyapıya bağımlı olmadan gerçek zamanlı konum belirleme olanağı sunan alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan WAAS/SBAS, GNSS kod ölçülerine dayalı düzeltmeler sağlayarak metre mertebesinde doğruluk sunabilmektedir. Ancak sağlanan doğruluk yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için yeterli olmadığından, faz ölçülerini de kullanan daha gelişmiş tekniklerin uygulanması zorunlu hale gelmiştir. Bu doğrultuda, International GNSS Service (IGS) tarafından 2013 yılında başlatılan Real-Time Service (IGS RTS) projesiyle, gerçek zamanlı hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri kullanıma sunulmuş ve PPP tekniğinin gerçek zamanlı uygulanabilirliği sağlanmıştır. Bu kapsamda, IGS MGEX bünyesinde yer alan çeşitli analiz merkezleri (örneğin Bundesamt für Kartographie und Geodäsie-BKG, Centre National d'Etudes Spatiales-CNES, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt-DLR, European Space Agency's Space Operations Centre-ESA/ESOC, Deutsches GeoForschungsZentrum-GFZ, GMV Aerospace and Defence-GMV, Natural Resources Canada-NRCan ve WuHan University-WHU gibi) çoklu-GNSS RT-PPP çözümleri için gerçek zamanlı düzeltmeler ve bias ürünlerini kullanıcılarına sunmaktadır. Böylece, RTK'nın yüksek doğruluğunu PPP'nin sabit bir GNSS referans istasyonu gerektirmeyen kullanım kolaylığı ile birleştiren “Gerçek Zamanlı PPP (RT-PPP)” yöntemi geliştirilmiştir (Li vd., 2022). Bununla birlikte, RT-PPP tekniği internet üzerinden kesintisiz ve hızlı veri aktarımı gerektirdiğinden, bağlantı sorunları veya GSM/internet kesintileri durumunda süreksizlikler ve kesiklikler ortaya çıkabilmektedir (Yang vd., 2024). Yine de IGS RTS kapsamında elde edilen başarılı sonuçlar, farklı kurum, kuruluş ve özel firmaların da RT-PPP tabanlı servislerin geliştirip, kullanıma sunulmasını teşvik etmiştir. Trimble RTX, Starfix, StarFire, TerraStar ve Atlas gibi uydu-bazlı GNSS düzeltme servisleri, küresel ölçekte homojen bir şekilde dağılmış sabit GNSS referans ağları üzerinden elde ettikleri verilerle gerçek zamanlı hassas ürünler üretmekte ve bu düzeltmeleri L-bant uyduları veya internet/GSM aracılığıyla kullanıcılara ulaştırılmaktadır (Alkan vd., 2020). Böylelikle, klasik RTK tekniklerinin aksine ek GNSS verisine ihtiyaç duymadan, hatta internet bağlantısı bulunmayan ortamlarda dahi homojen doğrulukta, 3B konumlama yapılabilir. Ancak, bu servislerin, genellikle daha pahalı donanımlar ve abonelik ücreti gerektirmesi ve ayrıca düzeltme alınan yer-sabit yörüngeli (geostationary) iletişim uydularının kutup bölgeleri gibi yüksek enlem bölgelerinde hizmet verememesi nedeniyle, kullanımı kısıtlıdır.

Bahsedilen gerçek zamanlı konumlama servislerinden farklı olarak, Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), BeiDou Navigation Satellite System (BDS) ve Galileo navigasyon uydu sistemleri, herhangi bir ek iletişim altyapısına ihtiyaç duymaksızın doğrudan kendi navigasyon uyduları üzerinden yayınladıkları ek düzeltme sinyallerini kullanan RT-PPP

servislerini kullanıma sunmuştur. Bu kapsamda, Japonya tarafından geliştirilen QZSS Centimeter Level Augmentation Service (CLAS), L6D sinyali aracılığıyla Japonya'da bölgesel ölçekte santimetre-desimetre doğruluk seviyelerinde konum belirleme imkânı sunmaktadır. CLAS, statik uygulamalarda 6/12 cm, kinematik uygulamalarda ise 12/24 cm (%95 güven aralığı) konum/yükseklik doğruluğu sağlamaktadır. Ayrıca GPS, Galileo ve QZSS uydu sistemlerini destekleyen CLAS, uydu tabanlı açık erişimli bir PPP-RTK servisi (Hao vd., 2020; Parra vd., 2023; Kan vd., 2024). Benzer bir yaklaşım, Çin tarafından işletilen BeiDou uydu sistemi (BDS-3) kapsamında da sunulmaktadır. BDS-3 uyduları, B2b sinyali aracılığıyla Çin ve çevresindeki bölgelerde GPS ve BDS-3 uyduları için bölgesel ölçekte RT-PPP konumlama hizmeti sunmaktadır. Bu sistemde, PPP-B2b ürünleri kullanılarak BDS+GPS uydu kombinasyonu ile 20 dakikanın altında bir yakınsama süresinde yatay konumda 20 cm'den daha iyi; yükseklikte ise 40 cm'den daha iyi bir doğruluk (%95 güven düzeyi) elde edilebilmektedir (Parra vd., 2023; Wu vd., 2023; Kan vd., 2024).

Bölgesel olarak hizmet veren bu servislerden farklı olarak, Avrupa Birliği tarafından geliştirilen Galileo High Accuracy Service (Galileo HAS), dünya çapında Galileo uydularının gözlemlenebildiği her noktada ek iletişim uydusuna gerek olmaksızın doğrudan Galileo'nun kendi sinyal içeriklerini kullanarak hizmet vermektedir. Bu çerçevede, "HA Initial Service (Phase 1)" 24 Ocak 2023 tarihinde ücretsiz ve açık erişimli bir servis olarak dünya çapında kullanıma sunulmuştur. Galileo HAS, hem Galileo hem de GPS uydularına ait uydu yörünge, saat düzeltmeleri ile birlikte kod ve faz bias değerlerini, Galileo uydularının E6 frekansı üzerinden kullanıcılara sunan küresel ölçekteki ilk RT-PPP servisi olma özelliğini taşımaktadır. HAS'ın sunduğu gerçek zamanlı düzeltmeler, Galileo I/NAV navigasyon mesajı ile Galileo E1/E5b/E5a/E6 sinyalleri ve GPS LNAV navigasyon mesajı ile GPS L1/L2C sinyalleri için geçerlidir. Bu düzeltmeler, Galileo E6 sinyali aracılığıyla Signal in Space (SiS) kapsamında yayınlanmakta, ayrıca Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) protokolü üzerinden internet aracılığıyla da kullanıcılara iletilmektedir. İlerleyen aşamalarda, Galileo E5 AltBOC ve GPS L5 sinyalleri için de düzeltme yayınlanması planlanmaktadır. Servisin ikinci aşaması olan "HA Full Service (Phase 2)" kapsamında ise, Faz 1'de sunulan uydu yörünge/saat düzeltmeleri ve kod/faz biaslarına ek olarak bölgesel atmosferik düzeltmeler de sağlanacaktır. Bu sayede özellikle Avrupa bölgesinde yakınsama süresinin 100 saniyenin altına düşürülmesi ve mutlak konumlamada daha yüksek güvenilirlik ve doğruluk elde edilmesi hedeflenmektedir. PPP tekniğinin geleneksel olarak onlarca dakikalık yakınsama süresi gerektirdiği göz önünde bulundurulduğunda, HAS'ın sunduğu birkaç dakikalık yakınsama süresi önemli bir avantaj teşkil etmektedir [URL1]. Galileo HAS tarafından sağlanan düzeltmeler, GNSS gözlemleriyle birlikte alıcıya ulaştığında, alıcı üzerinde çalışan HAS kod çözücü ve PPP algoritması tarafından işlenmekte ve böylece gerçek zamanlı konum hesaplamasında kullanılmaktadır [URL1]. Galileo HAS servisinde Galileo+GPS çoklu uydu kombinasyonu kullanılmasıyla, yaklaşık 300 saniyeden kısa bir yakınsama süresinde küresel ölçekte 20 cm'den daha iyi 2B konum doğruluğu ve 40 cm'den daha iyi yükseklik doğruluğu (%95 güven aralığı) elde edilebileceği açıklanmıştır [URL1].

Bu çalışmada, İTÜ Ayazağa kampüsünde gerçekleştirilen gerçek bir kinematik uygulama ile Galileo HAS RT-PPP servisinin performansı Türkiye'de ilk kez test edilmiştir. Aynı zamanda ölçme sonrası RT-PPP performansı, arşivlenmiş CNES CNT ürünleri kullanılarak replay (gerçek-zamanlı olarak servis edilen ürünler kullanılarak ölçme sonrası değerlendirme) modda gerçekleştirilmiş, test edilmiş ve HAS-PPP sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, ölçme sonrası kinematik PPP-AR çözümünün güncel performansı, hem Galileo uydu sistemini desteklemeye yeni başlayan çevrimiçi CSRS-PPP servisinin 5. sürümü ile hem de IGS tarafından önerilen PRIDE PPP-AR yazılımı ile iki farklı platform kullanılarak ortaya konulmuştur.

## 2. Yöntem ve Değerlendirme

Çalışmanın uygulama aşamasında Galileo+GPS çoklu uydu konfigürasyonu ile HAS modunda kinematik RT-PPP konumlandırma gerçekleştirilmiştir. Galileo HAS servisi kullanılarak gerçekleştirilen kinematik RT-PPP sırasında, aynı zamanda, HAS-PPP sonuçlarının ve gerçekleştirilecek diğer PPP çözümlerinin doğrulanması için alıcı içerisinde ham GNSS gözlem verileri depolanmıştır. Toplanan bu gözlem verileri, web tabanlı PPP servislerinden biri olan ve güncel olarak 5. sürümü ile Galileo uydu sistemini destekleyen CSRS-PPP kullanılarak, yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS olacak şekilde üç farklı senaryoda PP-PPP olarak çözdürülmüştür. Sonrasında aynı işlem CODE analiz merkezinin final ürünleri kullanılarak PRIDE PPP-AR yazılımıyla da yapılmıştır. Bunlara ek olarak, RT-PPP performansının test edilmesi amacıyla, depolanan ham veriler ve arşivlenmiş CNES RT ürünleri kullanılarak PRIDE PPP-AR yazılımının replay modunda yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS konfigürasyonları için RT-PPP çözümleri üretilmiştir. Çalışmada elde edilen PPP çözümlerin doğrulanması için gerekli olan bilinen koordinatlar ise ham verilerin ISTA referans istasyonundan rölatif konumlama yöntemi kullanılarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ve elde edilen bulgular, izleyen kısımlarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 2.1. Kinematik Ölçmeler ve Veri Değerlendirme

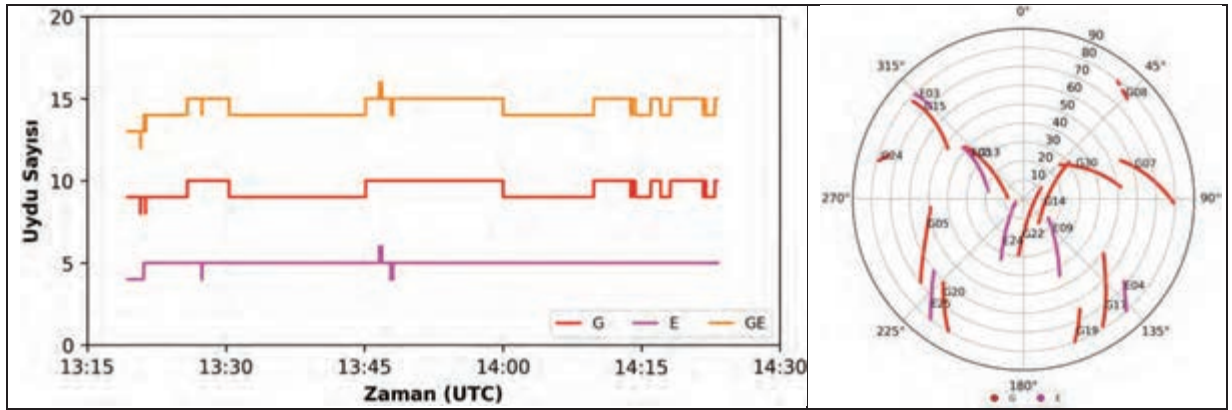
Çalışma kapsamında, gerçek bir kinematik uygulamada Galileo HAS RT-PPP özelliğine sahip jeodezik bir GNSS alıcısı kullanılarak Galileo+GPS çoklu uydu konfigürasyonunda kinematik test ölçmesi gerçekleştirilmiştir. Ölçmelerde

## Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi

kullanılan alıcı, üretici firması tarafından 2023 yılının ikinci yarısında geliştirilen beta-test sürümü PPP yazılımı ve HAS dekoderi ile donatılmıştır. Kinematik saha çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü içerisinde yer alan stadyumda, 03 Kasım 2023 tarihinde (Yılın 307. Günü, DOY 307) gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Ölçmeler sırasında  $10^\circ$  uydü yükseklik açısı eşik değeri olarak kabul edilmiş ve 1 saniyelik örnekleme aralığında veri toplanmıştır. Ölçmeler sırasında izlenen Galileo ve GPS uyduları Şekil 2’de verilmektedir. Ölçmeler süresince izlenen GPS uydularının sayısı Galileo uydularının sayısının iki katı olmuş ve toplamda ortalama 15 uydü gözlenmiştir.



Şekil 1: Kinematik test ölçmelerinin yapıldığı stadyum (sol) ve kinematik test ölçmeleri (sağ).



Şekil 2: Kinematik ölçmeler sırasında izlenen uydü sayıları ve uydü dağılım grafiği.

Ölçmelere başlanmadan önce gerçekleştirilen hazırlık aşamasında birkaç dakikalık bir süre geçmiş ve bu süreçte alıcıların hem HAS ölçmelerini hem de ham GNSS ölçmelerini (kod ve taşıyıcı faz) alabilir duruma gelmeleri sağlanmıştır. Bu kısa süreli statik beklemin ardından, normal yürüyüş hızında hareket edilerek ölçmelere başlanmış ve 1 saniyelik örnekleme aralığında yaklaşık 1 saat boyunca veri toplanmıştır. Test senaryosunda, E6 sinyali üzerinden alınan HAS düzeltmeleri kullanılmış ve Galileo+GPS sinyalleri için bu düzeltmeler uygulanarak gerçek zamanlı HAS-PPP koordinatları elde edilmiştir. Bu kinematik test çalışması, “Galileo High Accuracy (HA) Initial Service, Phase 1” kapsamında yapılmıştır. Bu aşamada düzeltmelerde faz biasları henüz bulunmadığından, AR çözüm üretilmemiştir. Bununla birlikte, kinematik PPP doğruluğunun güvenilir bir şekilde değerlendirilebilmesi için her bir ölçüm epöğuna karşılık gelen bilinen koordinatlara ihtiyaç duyulacağından, HAS ölçmeleriyle eş zamanlı olarak ham GNSS verileri (kod ve taşıyıcı faz) alıcının dahili hafızasında kaydedilmiştir. Alıcıda depolanan bu GNSS verileri, İSTA IGS istasyonu referans alınarak, rölatif yöntem ile değerlendirilmiş, güzergâh için bilinen nokta koordinatları hesaplanmış ve HAS-PPP tekniği ile elde edilen koordinatlar ile karşılaştırılarak servisin kinematik ölçme performansı ortaya konulmuştur. Galileo HAS ölçme süreci ve sonuçları ile ilgili daha detaylı bilgiler Alkan vd. (2024)’de verilmiştir.

Kinematik ölçme süresince toplanan ham GNSS verileri, ölçme sonrasında büroda gerçekleştirilen PP-PPP ve RT-PPP değerlendirmelerinde de kullanılmıştır. PP-PPP çözümleri için yakın zamanda Galileo desteği kazanan, GPS ve Galileo sinyalleri için AR çözümü sunan çevrimiçi CSRS-PPP servisi ve PRIDE PPP-AR yazılımı kullanılmıştır. RT-PPP çözümü için CNES gerçek-zamanlı arşivlenmiş CNT ürünleri kullanılmıştır. Kullanılan jeodezik alıcı çoklu-GNSS olarak mevcut tüm uydü sistemlerinden gözlem yapabilmekle birlikte, Galileo HAS servisinin sadece GPS ve Galileo uyduları için düzeltme yayımlıyor olması nedeniyle değerlendirmelerde sadece bu iki uydü sistemine ait gözlemler kullanılmıştır. Ayrıca farklı uydü sistemlerinin doğruluğa olan etkisini araştırabilmek için Galileo+GPS gözlemlerinden oluşan RINEX

dosyaları yalnız-GPS ve yalnız-Galileo uydu sinyallerini içeren RINEX dosyalarına GFZRNX yazılımı ile dönüştürülmüştür.

Çalışmada kullanılan Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) servisi, Natural Resources Canada (NRCan) tarafından 2003 yılından bu yana bilimsel ve ticari tüm kullanıcılara ücretsiz PPP çözümleri sunmaktadır (Klatt ve Johnson, 2017). Kullanıcı dostu arayüzü sayesinde karmaşık GNSS veri işleme adımlarını basitleştiren bu servis, statik veya kinematik modlarda tek ya da çift frekanslı GNSS verilerinden konum hesabı gerçekleştirmeye olanak tanımaktadır. Başlangıçta GPS ve GLONASS verilerini kullanan CSRS-PPP servisi, 20 Ekim 2020'ye kadar PPP-Float çözümler üretmekte iken, bu tarihten sonra PPP-AR tekniğine geçmiş, Decoupled Clock Model (DCM) temelli AR algoritmasıyla GPS faz belirsizliklerini çözerek, santimetre doğruluğu için gerekli yakınsama süresini kısaltmıştır (Banville vd., 2021; Atiz ve Kalayci, 2021). CSRS-PPP servisi, çözümlerini SPARK (Simon's PPP with Ambiguity Resolution using a Kalman filter) yazılımını kullanarak üretmektedir. Son olarak, 14 Mayıs 2025 tarihinde Canadian Geodetic Survey (CGS) tarafından yapılan güncelleme ile servis ilk kez Galileo PPP için AR çözümü sunmaya başlamış ve 27 Kasım 2022 tarihinden itibaren toplanan Galileo E1/E5a gözlemlerini, Rapid veya Final ürünler kullanılarak işleyebilir hale gelmiştir [URL2].

Çalışmada elde edilen Kinematik RINEX dosyası, CSRS-PPP servisi ile yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS uydu konfigürasyonları için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve her bir senaryo için konum çözümleri gerçekleştirilmiştir. Çözümler sonucunda elde edilen AR oranları Tablo 1'de verilmiştir. SPARK algoritmasının çalışma prensiplerine göre yalnız-Galileo konfigürasyonunun uydu sayısı yetersiz seviyede kalmış ve bu çözüm için AR çözüm elde edilememiştir.

Tablo 1: CSRS-PPP AR oranları.

Çözümler/Sistemler	GPS	Galileo
Yalnız-GPS	%81	-
Yalnız-Galileo	-	%0
Galileo+GPS	%91	%85

PRIDE PPP-AR, Wuhan Üniversitesi GNSS Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu bir yazılım paketidir ve özellikle gelişmiş AR teknikleriyle dikkat çekmektedir. Bu teknikler sayesinde GNSS sinyal işleme sürecinde tamsayı belirsizlikleri çözülerek konum doğruluğu artırılmakta, yakınsama süreleri önemli ölçüde kısaltılmakta ve hem statik hem de kinematik uygulamalarda yüksek hassasiyetli çözümler elde edilebilmektedir. Yazılım, iyonosferik hataları azaltmak amacıyla genellikle ionosphere-free kombinasyonları kullanmakta, tüm çift frekanslı GNSS sinyallerini işleyebilmekte ve çok yolluluk (multipath) kaynaklı cycle slip hatalarını tespit edebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde PRIDE PPP-AR, konumlandırma sonuçlarının doğruluğunu, güvenilirliğini artırmakta ve çeşitli GNSS uygulamaları için etkin bir araç olarak öne çıkmaktadır (Geng vd., 2019; Geng vd., 2021).

Çalışma kapsamında iki farklı senaryo için PRIDE PPP-AR yazılımından yararlanılmıştır. Birincisinde, IGS analiz merkezlerinden olan CODE'nin final ürünleri kullanılarak yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS uydu konfigürasyonları için PP-PPP koordinatları hesaplanmıştır. İkinci senaryoda ise IGS-RTS projesi kapsamında CNES tarafından üretilen ve arşivlenen gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak "replay" modunda yeniden işleme tabi tutulmuş ve benzer şekilde yalnız-GPS, yalnız-Galileo ve Galileo+GPS konfigürasyonları için RT-PPP koordinatları hesaplanmıştır. Bu aşamada, CNES RT ürünlerinde C1X, L1X, C5X ve L5X frekanslarına ait bias değerleri bulunmadığından dolayı yalnız-Galileo senaryosunda AR çözüm elde edilememiştir. Tüm senaryolar için elde edilen AR oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: PRIDE PPP-AR AR oranları.

	Çözümler/Sistemler	GPS	Galileo
PP-PPP	Yalnız-GPS	%100	-
	Yalnız-Galileo	-	%63
	Galileo+GPS	%100	%75
RT-PPP	Yalnız-GPS	%80	-
	Yalnız-Galileo	-	%0
	Galileo+GPS	%91	%0

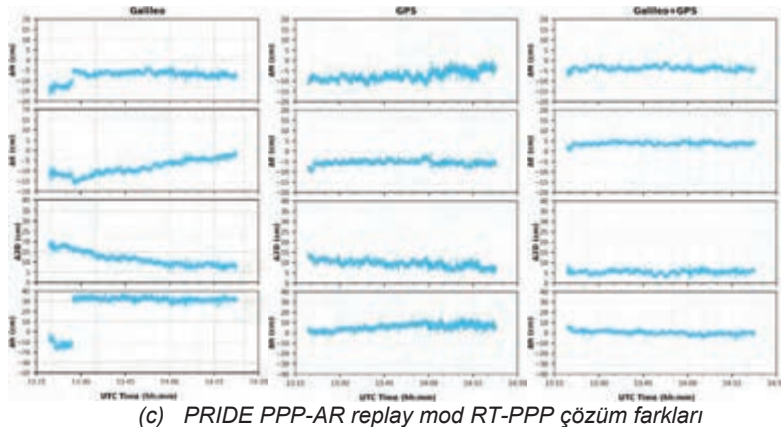
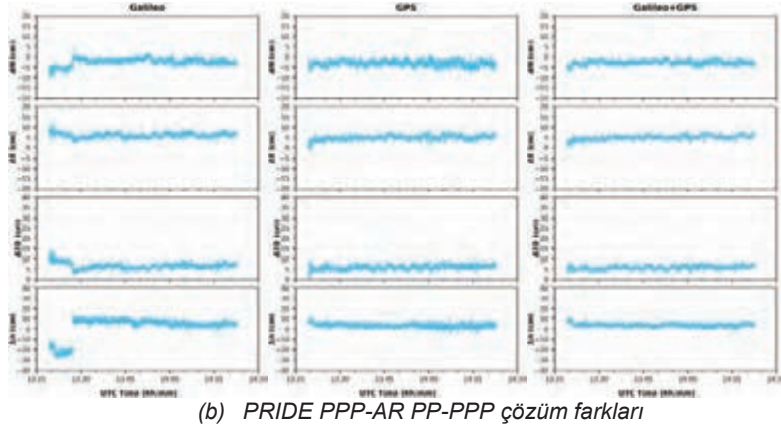
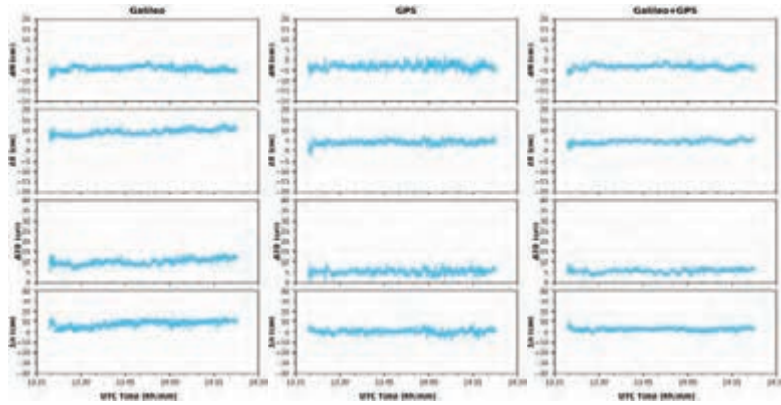
Tablo 1 ve Tablo 2 incelendiğinde yalnız-GPS ve Galileo+GPS PP-PPP çözümleri için PRIDE PPP-AR yazılımının AR çözüm oranının CSRS-PPP AR çözüm oranından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ek olarak, PRIDE PPP-AR, yalnız-Galileo için %63 AR çözüm üretirken, CSRS-PPP yalnız-Galileo için AR çözüm üretememiştir. RT-PPP çözümlerdeki

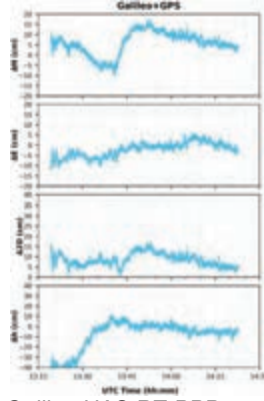
## Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi

AR oranları incelendiğinde, yalnız-Galileo için AR çözüm elde edilemediği, yalnız-GPS için PP-PPP çözümüne göre daha düşük AR oranı elde edildiği, Galileo+GPS kombinasyonu için ise PP-PPP ve RT-PPP AR oranlarının benzer olduğu görülmüştür.

## 3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışma süresince alıcıda kaydedilmiş olan ham GNSS verileri, çalışma alanından birkaç yüz metre uzaklıktaki IGS ISTA istasyonu (41°.104 K; 29°.019 D; 147.2 m) referans noktası olarak alınarak rölatif yöntemle taşıyıcı faz gözlemleri kullanılarak değerlendirilmiş, ambiguity-fix çözüm ile her bir ölçme epöğündeki nokta koordinatları yüksek doğrulukla elde edilmiştir. Baz çözümünde, Trimble Business Center (TBC) GNSS yazılımı kullanılmıştır. Her bir ölçme epöğü için hesaplanan bu koordinatlar bilinen olarak alınmış ve çalışma kapsamında uygulanan HAS-PPP, PP-PPP ve RT-PPP (replay mod) yöntemleriyle elde edilen PPP koordinatlarıyla, Yukarı, Sağa, 2B konum ve yükseklik bileşenleri için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bütün çözümler için elde edilen bütün farklar zaman serisi olarak Şekil 3'te verilmiştir.





(d) Galileo HAS RT-PPP çözüm farkları  
Şekil 3: Bilinen koordinatlar ile PPP çözüm farklarına ait çizimler.

Elde edilen farklar istatistiksel olarak da incelenmiş, Sağa, Yukarı, 2B konum ve yükseklik bileşenleri için minimum, maksimum, ortalama değerler ile bunlara karşılık gelen Standart Sapma (STD) ve Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3: Farklara ait istatistikler

a. CSRS-PPP PP-PPP												
	Yalnız-Galileo (Float Çözüm)				Yalnız-GPS				Galileo+GPS			
	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)
<i>Min.</i>	4	-9	5	-1	-2	-9	2	-7	1	-8	3	-2
<i>Maks.</i>	13	0	14	15	7	2	10	7	7	0	9	8
<i>Ort.</i>	9	-4	10	8	4	-3	5	0	4	-3	6	3
<i>STD</i>	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	1
<i>KOH</i>	9	4	10	8	4	3	5	2	4	3	6	3
b. PRIDE PPP-AR PP-PPP												
	Yalnız-Galileo				Yalnız-GPS				Galileo+GPS			
	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)
<i>Min.</i>	2	-9	3	-27	-1	-8	1	-3	1	-7	3	-3
<i>Maks.</i>	12	4	14	44	8	1	10	12	8	1	9	11
<i>Ort.</i>	6	-2	7	3	5	-3	6	3	5	-3	6	4
<i>STD</i>	1	2	1	10	1	1	1	2	1	1	1	1
<i>KOH</i>	6	3	7	10	5	3	6	4	5	3	6	4
c. PRIDE PPP-AR RT-PPP												
	Yalnız-Galileo (Float Çözüm)				Yalnız-GPS				Galileo+GPS			
	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)
<i>Min.</i>	-16	-17	5	-18	-10	-13	5	-3	0	-8	2	-7
<i>Maks.</i>	-1	-3	20	39	-1	0	14	15	6	0	8	7
<i>Ort.</i>	-8	-7	11	26	-6	-7	9	6	4	-4	5	0
<i>STD</i>	4	2	3	15	1	2	2	3	1	1	1	2
<i>KOH</i>	9	8	12	30	6	8	10	6	4	4	6	2
d. Galileo HAS-PPP												
	Galileo+GPS											
	Sağa (cm)	Yukarı (cm)	2B (cm)	Yük. (cm)								
<i>Min.</i>	-12	-9	1	-45								
<i>Maks.</i>	5	17	17	11								
<i>Ort.</i>	-2	6	9	-8								
<i>STD</i>	3	6	3	14								
<i>KOH</i>	4	8	9	16								

Şekil 3a ve b'de verilen PP-PPP grafikleri incelendiğinde, genel olarak çözümlerin belirli bir yakınsama süresinin ardından kararlı bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Özellikle Galileo+GPS çoklu uydu kombinasyonunun, yalnız-GPS ve yalnız-Galileo çözümlerine kıyasla daha stabil sonuçlar verdiği ve konum bileşenlerindeki hata seviyelerini belirgin ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Aynı durum PRIDE PPP-AR yazılımı ile replay modda gerçekleştirilen RT-

*Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi*

PPP çözümleri içinde geçerlidir (Şekil 3c). Galileo HAS sisteminin Galileo+GPS çoklu uydu kombinasyonu RT-PPP sonuçlarında dalgalanmalar olmakla birlikte 2B ve yükseklik farkları, bu sistem için EUSPA tarafından açıklanan doğruluk kriterlerine (yatayda 20 cm, düşeyde 40 cm) uygundur (Şekil 3d).

Tablo 3a'da verilen istatistiksel değerler incelendiğinde, CSRS-PPP PP-PPP sonuçlarına göre, yatay ve düşey RMS değerleri sırasıyla Galileo+GPS için 6 ve 3 cm iken, yalnız-Galileo için 10 ve 8 cm, yalnız-GPS için ise 5 ve 2 cm civarında bulunmuştur. CSRS-PPP servisiyle elde edilen en iyi çözüm yalnızca-GPS çözümdür. Fakat burada dikkat edilmesi gereken durum, yalnız-Galileo çözümün AR çözüm değil, Float çözüm olması ve aynı zamanda Galileo uydu sayısının GPS uydu sayısının yarısı kadar olmasıdır. Galileo+GPS kombinasyonunun 2B ve yükseklik farklarındaki maksimum ve minimum değerleri de iyileştirdiği göz önünde bulundurulduğunda, çoklu uydu konfigürasyonunun özellikle yalnız-Galileo senaryosuna kıyasla konum doğruluğunu anlamlı ölçüde artırdığı sonucuna varılmıştır.

PRIDE PPP-AR PP-PPP sonuçları da CSRS-PPP çözümlerine benzer bir eğilim sergilemektedir. Galileo+GPS kombinasyonu için 2B RMS değeri yaklaşık 6 cm iken, yükseklik için RMS değeri 4 cm olarak elde edilmiştir. Yalnız-GPS çözümü için 2B ve yükseklik RMS değerleri Galileo+GPS çözümüne benzerken (sırasıyla 6 cm ve 4 cm), yalnız-Galileo çözümünde aynı doğruluklar sırasıyla 7 cm ve 10 cm olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, Galileo+GPS kombinasyonunun 2B ve yükseklik farklarındaki maksimum ve minimum değerleri de iyileştirdiği görülmektedir. Bu durum, farklı PPP servislerinin/yazılımlarının benzer hata karakteristikleri gösterdiğini, ancak çoklu uydu kombinasyonlarının her koşulda tekli uydu sistemlerine göre daha güvenilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır (Tablo 3b). Burada dikkat çekici olan husus, CSRS-PPP'nin yalnız-Galileo Float çözümü ile PRIDE PPP-AR'ın yalnız-Galileo AR çözümlerinin benzer RMS değerleri üretmesidir. Hatta CSRS-PPP'nin yalnız-Galileo Float çözümü, PRIDE PPP-AR'ın yalnız-Galileo AR çözümüne göre daha stabil, kararlı (smooth) farklar vermektedir.

PRIDE PPP-AR replay RT-PPP sonuçları incelendiğinde, Galileo+GPS kombinasyonu, yalnız-GPS senaryosuna kıyasla doğruluk açısından hem yatay konumda hem de yükseklikte anlamlı iyileşmeler göstermiştir. RMS değerleri 2B için 10 cm' den 6 cm'ye, yükseklik için ise 6 cm'den 2 cm'ye düşmüştür (Tablo 3c). Aynı durum, yalnız-Galileo çözüm içinde geçerlidir. Burada, yalnız-GPS çözümleri, yalnız-Galileo çözümlerine göre oldukça başarılıdır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken durum, yalnız-Galileo çözümün AR çözüm değil, Float çözüm olması ve aynı zamanda Galileo uydu sayısının GPS uydu sayısının yarısı kadar olmasıdır. Sonuç olarak, çoklu uydu kullanımı gerçek zamanlı konumlama (RT-PPP) performansını PP-PPP çözümüne göre daha da belirgin biçimde etkilemektedir. Ek olarak, PRIDE PPP-AR yazılımı ile gerçekleştirilen PP-PPP ve RT-PPP sonuçları karşılaştırıldığında, çoklu sistem (Galileo+GPS) sonuçlarının benzer doğruluk verdiği fakat yalnız-GPS ve yalnız-Galileo sonuçlarında final uydu ürünlerinin (PP-PPP), gerçek-zamanlı ürünlere göre (RT-PPP), sonuçlara pozitif etkisinin olduğu açıkça görülmüştür.

Son olarak, HAS-PPP sonuçları incelendiğinde, Galileo HAS servisinin performansın PP-PPP ve RT-PPP'ye kıyasla daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle yükseklik bileşeninde RMS değeri 16 cm seviyesine ulaşırken, 2B konum doğruluğu 9 cm düzeyinde kalmıştır (Tablo 3d). Her ne kadar Galileo-HAS servisi Faz 1 aşamasında olup ve faz biasları henüz devrede olmasa da Faz 2 ile sadece yakınsama süresinin kısıllanacağı fakat doğruluk seviyelerinin değişmeyeceği deklare edilmektedir. Bu noktada, platformlar arası karşılaştırma şu şekilde özetlenebilir: CSRS-PPP, yalnız-GPS senaryosunda en düşük RMS değerlerini üreterek PP çözümleri arasında öne çıkarken, PRIDE PPP-AR PP-PPP ise benzer doğruluk seviyeleriyle rekabetçi bir performans ortaya koymuştur. Gerçek zamanlı çözümler kıyaslandığında, PRIDE PPP-AR RT-PPP, HAS-PPP'ye göre daha düşük RMS değerleriyle daha yüksek doğruluk sunarken; HAS-PPP internet/GSM/iletişim altyapısına ihtiyaç duymadan yalnızca uydu sinyalleri üzerinden düzeltme sağlanmasıyla öne çıkmış, altyapısız koşullar için güçlü bir alternatif olduğunu göstermiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada günümüzde standart konumlama yöntemi haline gelen PPP tekniği ele alınmış, gerçek bir kinematik uygulama ile gerçek-zamanlı ve ölçme-sonrası PPP çözümleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle Ocak 2023'te sivil kullanıma açılan Galileo High Accuracy Service (HAS) tekniğinin kinematik uygulamalardaki performansı test edilmiş, CSRS-PPP servisinin Galileo AR destekli yeni sürümünün ve IGS tarafından önerilen PRIDE PPP-AR yazılımının PP-PPP AR çözüm performansları ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak PRIDE PPP-AR yazılımıyla arşivlenmiş CNES RT ürünleri kullanılarak replay modda RT-PPP çözümü gerçekleştirilmiş, elde edilen gerçek-zamanlı çözümler, Galileo HAS sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen CSRS-PPP ve PRIDE PPP-AR çözümlerine göre, Galileo+GPS çoklu uydu konfigürasyonu, yalnız-Galileo ve yalnız-GPS çözümlerine kıyasla hem 2B konum hem de yükseklik bileşenlerinde anlamlı iyileşmeler sağlamaktadır. CSRS-PPP servisinde elde edilen çözümler ile PRIDE PPP-AR yazılımından elde edilen çözümler genel olarak benzerlik göstermektedir. Bunun yanı sıra en iyi PP-PPP çözümü CSRS-PPP servisinin yalnız-GPS konfigürasyonundan elde edilmiştir. Buna ek olarak, CSRS-PPP servisine getirilen yeni güncelleme ile çözümlerde

Galileo uydu sisteminin, konum doğruluğuna katkısı da araştırılmak istenmiş fakat çözümler sırasında Galileo PPP-AR çözümü elde edilememiştir. PP-PPP çözümler için PRIDE PPP-AR yazılımının AR oranları genel olarak CSRS-PPP AR oranlarından daha yüksek bulunmuştur. Benzer olarak PRIDE PPP-AR yazılımıyla gerçekleştirilen PP-PPP ve RT-PPP çözümlerinde, PP-PPP çözümlerinin AR oranları daha yüksek elde edilmiştir. CSRS-PPP servisinde yalnız-Galileo için AR çözüm elde edilememiştir. Benzer olarak PRIDE PPP-AR yazılımının RT-PPP çözümünde, yalnız-Galileo için AR çözüm elde edilememiştir. Ek olarak, Galileo+GPS kombinasyonu için PRIDE PPP-AR yazılımı ile gerçekleştirilen PP-PPP ve RT-PPP çözümlerinin doğrulukları benzer elde edilmiştir. Gerçek zamanlı çözümler kıyaslandığında, PRIDE PPP-AR RT-PPP çözümünün HAS-PPP'den daha iyi performans sunduğu görülmüştür. Öte yandan, HAS-PPP çözümü desimetre mertebesinde doğruluk sunmuş; ancak özellikle yükseklik bileşeninde hata büyüklüklerinin arttığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma hem Galileo HAS servisinin Türkiye'de performansının test edilmesi hem de Galileo destekli CSRS-PPP servisinin yeni sürümünün ve PRIDE PPP-AR yazılımının AR çözüm performanslarının karşılaştırmalı analizlerini içermesi açısından literatüre özgün bir katkı sunmuştur. Bulgular, Galileo+GPS çoklu uydu kombinasyonunun tekli uydu çözümlerine kıyasla daha kararlı farklar ürettiğini; CSRS-PPP'nin PP doğruluk açısından öne çıktığını; PRIDE PPP-AR'ın hem PP hem de RT modlarda güvenilir çözümler sunduğunu; HAS-PPP'nin ise özellikle jeodezik ve iletişim altyapısının kısıtlı veya yetersiz olduğu ölçme koşullarında kullanılabilirliğiyle güçlü bir alternatif oluşturduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, Galileo HAS servisinin Faz-2'ye geçişiyle AR çözüm sunması, bölgesel atmosferik modeller ile yakınsama sürelerinin 100 saniyenin altına düşmesi ve elde edilen doğrulukların daha da artması beklenmektedir.

## Teşekkür

Çalışmada kullanılan Galileo HAS özellikli GNSS alıcısını temin eden bölgesel firma yetkililerine; sağladığı çevrimiçi PPP hizmeti için CSRS-PPP servisine; PRIDE PPP-AR yazılımına ve çalışmada kullanılan hassas yörünge ve saat ürünleri için Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ve CODE, CNES analiz merkezlerine teşekkür ederiz. Bu çalışmada yer alan Galileo HAS servisi ile ilgili sonuçlar aynı yazarlar tarafından 11th Workshop on Satellite Navigation Technology (NAVITEC) isimli etkinlikte sunulan çalışmaya dayanmaktadır (Alkan vd., 2024).

## Kaynaklar

- Alkan R.M., Erol S., İlçi V., Ozulu İ.M. (2020) Comparative analysis of real-time kinematic and PPP techniques in dynamic environment. *Measurement* 163, 107995.
- Alkan R.M., Erol S., Mutlu B. (2024) Real-time absolute kinematic positioning using Galileo High Accuracy Service (HAS). *Proc. on 11th Workshop on Satellite Navigation Technology (NAVITEC)*, December 11-13, Noordwijk, Netherlands, 1-5.
- Atiz O.F., Kalaycı I. (2021) Performance assessment of PPP-AR positioning and zenith total delay estimation with modernized CSRS-PPP. *Artificial Satellites* 56(2), 18-34.
- Bahadır B., Üstün A. (2014) İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri. *Harita Dergisi* 152(2), 40-50.
- Banville S., Hassen E., Lamothe P., Farinaccio J., Donahue B., Mireault Y., Goudarzi M.A., Collins P., Ghoddousi-Fard R., Kamali O. (2021) Enabling ambiguity resolution in CSRS-PPP. *Journal of the Institute of Navigation* 68, 433-451.
- Choy S., Bisnath S., Rizos C. (2017) Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solutions* 21, 13-22.
- Collins, P. (2008) Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. *Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, January 28-30, San Diego, California, ABD, 720-732.
- Dawidowicz K. (2020) Sub-hourly precise point positioning accuracy analysis - case study for selected ASG-EUPOS stations. *Survey Review* 52(373), 341-351.
- DeSanto J.B., Chadwell C.D., Sandwell D.T. (2019). Kinematic post-processing of ship navigation data using Precise Point Positioning. *Journal of Navigation* 72(3), 795-804.
- Erol S., Alkan R.M., Ozulu İ.M., İlçi V. (2020) Performance analysis of real-time and post-mission kinematic precise point positioning in marine environments. *Geodesy and geodynamics* 11(6), 401-410.
- Facio Y., Berber M. (2020) Subsidence is determined in the heart of the Central Valley using post processed static and Precise Point Positioning techniques. *Journal of Applied Geodesy* 14(1), 113-118.

## Ölçme-Sonrası ve Gerçek-Zamanlı PPP-AR Çözümlerin Performans Analizi

- Geng J., Chen X., Pan Y., Mao S., Li C., Zhou J., Zhang K. (2019) PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions* 23(4), 91.
- Geng J., Yang S., Guo J. (2021). Assessing IGS GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 phase bias products with PRIDE PPP-AR. *Satellite Navigation* 2(1), 17.
- Hao M., Jiao W., Jia X., Tao Q. (2020) Precise point positioning performance evaluation of QZSS centimeter level augmentation service. In: Sun, J., Yang, C., Xie, J. (eds) *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020, Proceedings: Volume III. CSNC 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 652. Springer, Singapore, 78-88.
- Héroux P., Kouba J. (2001) GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26(68), 573-578.
- Hou P., Zha J., Liu T., Zhang B. (2023) Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK. *Measurement Science and Technology* 34(5), 051002.
- Kan H., Hu Z., Chen G., Liu X., Liu C., Zhao Q. (2024) Performance comparison of orbit and clock augmentation corrections from PPP-B2b, HAS and CLAS. *Advances in Space Research* 74(2), 668-681.
- Katsigianni G., Loyer S., Perosanz F. (2019) PPP and PPP-AR kinematic post-processed performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS. *Remote Sensing* 11(21), 2477.
- Kiliszek D., Szolucha M., Kroszczyński K. (2018) Accuracy of Precise Point Positioning (PPP) with the use of different International GNSS Service (IGS) Products and Stochastic Modelling. *Geodesy and Cartography* 67(2), 207-238.
- Klatt C., Johnson P. (2017) Estimating benefits to Canada and the world: the Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning Service. *Geomatica* 71(1), 37-44.
- Li X., Huang J., Li X., Shen Z., Han J., Li L., Wang B. (2022) Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities. *Satellite Navigation* 3, 28.
- Mutlu B., Erol S., Alkan R. M. (2023) The performance analysis of the post-mission web-based static and kinematic PPP-AR service. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 38(4), 103-116.
- Özbezy V., Mutlu B., Erol S., Selbesoğlu M.O., Yavaşoğlu H.H., Alkan R.M. (2025) Performance analysis of multi-GNSS PPP for accurate ship-borne positioning in Antarctic region. *International Journal of Engineering and Geosciences* 10(3), 428-439.
- Parra C., Schütz A., Hugentobler U., Pany T., Baumann S. (2023) The Galileo high-accuracy service: Evaluating the quality of the corrections and initial PPP performance. *Engineering Proceedings* 54(1), 14.
- Topal G.O., Akpınar B. (2022) High rate GNSS kinematic PPP method performance for monitoring the engineering structures: Shake table tests under different satellite configurations. *Measurement* 189, 110451.
- Wu P., Lou Y., Zhang W., Dousa J., He H., Chai J., Ouyang Y., Zhang Z., Zou X. (2023). Evaluation of Real-time Kinematic Positioning Performance of the BDS 3 PPP Service on B2b Signal. *GPS Solutions* 27(4), 192.
- Yang H., Ren X., Liu M., Zhang X. (2024) Dual-frequency to five-frequency real-time precise point positioning using new BDS-3 PPP-B2b service. *Earth, Planets and Space* 76(1), 82.
- [URL1] European GNSS Service Centre (GSC), Galileo High Accuracy Service (HAS), <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has> [Erişim 14.10.2025]
- [URL2] Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP), <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/data> [Erişim 14.10.2025]

## Büyük Ölçekli Harita Üretiminde Yer Kontrol Noktası Koordinatlarının Türkiye Ulusal Referans Ağı Çerçevesi (TUREF)'ne Dayalı Olarak Belirlenmesinde Türkiye Yatay Hız Alanının Etkisinin Araştırılması

Ali KILIÇOĞLU<sup>1,2\*</sup>, Mert Can GÜNENDİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Serbest Harita ve Kadastro Mühendislik Bürosu, Gölbaşı, Ankara.

<sup>2</sup>ATAY Mühendislik, Çankaya, Ankara.

### Genişletilmiş Özet

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY) kapsamında yer kontrol noktası (YKN) koordinatları Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi (Turkish Reference Frame – TUREF)'ne dayalı olarak belirlenir. TUREF; koordinatları International Terrestrial Reference Frame – 1996 (ITRF96) ile 2005.0 referans epoğunda çakışık ve koordinatlarının zamana göre doğrusal değişimi (hızları) ITRF96'nın Sıfır-Net-Dönüklüğüne (No-Net-Rotation) göre tanımlı dört boyutlu ulusal datumdur. BÖHHBÜY, YKN koordinatlarının Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı – Aktif Yapı (TUSAGA-Aktif) sistemiyle ya da yersel, uydu ve uzay, inersiyal, fotogrametrik teknikler kullanılarak elde edilmesini öngörmektedir.

Yönetmeliğe göre YKN koordinatlarının uygulanmasında genel olarak GNSS çiftli fark ölçüleriyle nokta konum belirleme tekniği uygulanması önerilmektedir. Buna göre; uygulama yapılan jeodezik ağda seçilen bazlarda çiftli fark ölçüleriyle bazvektör bileşenleri hesaplanır ve ağ dengelemesinde ölçü olarak alınır. Üst derece ağ noktalarının (TUSAGA-AKTİF, TUTGA vb.) ölçme anındaki TUREF koordinatları değişmez alınarak dengelenir. Bu aşamada Yer Kontrol Noktalarının ölçü epoğunda TUREF koordinatları belirlenmiş olur.

Yönetmelik kapsamında jeodezik çalışmalarda, her türlü uydu ve uzay tekniklerinin kullanılabilmesi öngörülmektedir. Bu durumda GNSS çiftli fark (double-difference) ölçüleriyle hesaplama yerine bir alıcı ile gerçekleştirilen GNSS ölçülerinden (zero-difference) Hassas Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning – PPP) yöntemi kullanılarak da YKN koordinatları belirlenebilir. Bu durumda YKN koordinatları ölçü epoğunda ve hesaplamada kullanılan yörünge ve yer dönme parametreleriyle aynı yersel referans çerçevesinde belirlenir. GNSS veri değerlendirme işleminde IGS sonuç ürünlerinin kullanılması durumunda YKN koordinatları International GNSS Service (IGS) tarafından tanımlanan IGB20 referans çerçevesinde ve ölçü epoğunda belirlenmiş olur. PPP ile elde edilen koordinatların TUREF'e dönüştürülmesi ve referans epoğuna kaydırılması gerekmektedir.

Teorik olarak GNSS çiftli fark ölçüleriyle değerlendirme işleminde de referans noktalarının kullanılan IGS ürünleri ile aynı referans çerçevesinde olması gerekir. Ancak belirli bir zorlamayla referans noktalarının TUREF koordinatlarına dayalı olarak çözüm yapılmaktadır. Her iki durumda da ölçü epoğunda belirlenen nokta koordinatlarının referans epokuna kaydırılması gerekmektedir. YKN koordinatlarının referans epoğuna kaydırılmasında TUSAGA-AKTİF/TUTGA noktalarından hesaplanan Türkiye yatay hız alanı kullanılmaktadır. Söz konusu yatay hız alanı ile herhangi bir nokta koordinatının hızı interpolasyon yöntemleriyle hesaplanabilmektedir.

Yönetmelik gereğince üretilen YKN koordinatlarını referans epoğuna (2005.0) kaydırmak amacıyla güncel TUTGA/TUSAGA-Aktif nokta hızlarından hız bilgisi hesaplanmaktadır. Bu kapsamda kullanıcıların doğrudan hız bilgisine ulaşabileceği standart bir hız alanı sunabilmek amacıyla “Türkiye Hız Alanının Belirlenmesi” projesi gerçekleştirilerek Harita Genel Müdürlüğü tarafından kullanıcılara sunulmuştur ( HGM; 2025, Kurt vd.; 2020) .

Bu çalışma kapsamında öncelikle Harita Genel Müdürlüğü'nün envanterindeki tarihsel GPS verileri yeniden değerlendirilmiş, zaman serileri incelenmiş ve uyumsuz olanlar ayıklanmıştır. Bu veri setinde, kullanıcıların yönetmeliğe göre hız kestiriminde kullanabildikleri TUTGA ve TUSAGA-Aktif noktalarına ilave olarak, nokta çözünürlüğünü artırmak amacıyla Harita Genel Müdürlüğü'nde mevcut jeodinamik, mareograf GPS noktaları ile bazı kurum ve belediyelerin istasyonları da yer almaktadır. Bu veri seti ile TUREF datumunda tüm noktaların hızları belirlenmiştir. Belirlenen nokta hızlarından yola çıkarak tüm noktalar istatistiksel olarak anlamlı 5 bölgeye ayrılmıştır. Çalışmada oluşturulan bölgelere göre TUREF hızları hesaplanarak kullanıcılara sunulmuştur. Türkiye hız alanı hesabında kullanılan noktalar (~2000 nokta) arasındaki uzunluklar verilmemiş olmakla birlikte sonuç hızlar kullanıcıya 6'x6' grid köşelerinde sunulmaktadır. Bu grid aralığı yaklaşık 10km'ye karşılık gelmektedir. Noktalar arası uzunluklar ve grid aralığı arasındaki ilişki hakkında açıklayıcı bir bilgi bulunmamaktadır. Sonuç olarak bu HGM tarafından sunulan “Türkiye Hız Alanı” kullanıcılar tarafından ölçü epokundaki koordinatların referans epokuna kaydırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada; hız alanının referans epokundaki koordinatlar üzerindeki etkileri de incelenmektedir.

YKN koordinatlarının hesaplanmasında önemli faktörler olarak üst derece ağ nokta koordinatlarının (X, Y, Z) tanımlandığı referans çerçevesi (TUREF, ITRF96, ITRF2020 vb.), referans epoku ( $t_0$ ), ölçü epoku ( $t_i$ ) ve doğrusal nokta koordinat hızları ( $v_x, v_y, v_z$ ) sayılabilir. Ölçü anı için kullanılan IGS yörüngesi bilgileri ve yer dönme parametreleri IGB20 referans çerçevesinde tanımlı iken değişmez veya sıkı koşullu alınan üst derece nokta koordinatları TUREF'e bağlıdır. Türkiye hız alanı Harita Genel Müdürlüğü tarafından mevcut TUTGA, TUSAGA-Aktif ve TUSAGA noktalarında yapılan tarihsel GNSS ölçüleriyle hesaplanmıştır. Özellikle fay zonlarında ve fayın iki tarafını da kapsayan uygulamalarda hız alanının interpolasyonundan kaynaklanan etkilerin belirlenmesi gerekir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0505) 588 26 02 Faks: (0312) 417 06 78

E-posta: ali.kilicoglu@gmail.com (Ali KILIÇOĞLU)

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

*Büyük Ölçekli Harita Üretiminde Yer Kontrol Noktası Koordinatlarının Türkiye Ulusal Referans Ağı Çerçevesi (TUREF)'ne Dayalı Olarak Belirlenmesinde Türkiye Yatay Hız Alanının Etkisinin Araştırılması*

TUSAGA-Aktif sistemi kullanılarak gerçekleştirilen YKN koordinatı üretiminde; TUSAGA-Aktif noktalarının TUREF referans çerçevesinde ve referans epoğundaki koordinatları değişmez alınmaktadır. Bu durumda da yatay hız alanının koordinat hesabı üzerinde bir etkisi bulunmaktadır.

Bu çalışmada YKN koordinatlarının çiftli fark veya PPP ile hesaplanması, referans nokta koordinatlarının referans çerçeve bilgileri, hız alanı kullanılarak referans epoğuna kaydırma işlemleri hakkında teorik ve uygulamalı sonuçların verilmesi hedeflenmektedir.

İlk aşamada referans noktası olarak kullanılacak TUSAGA-AKTİF noktalarının yayınlanan TUREF koordinatları ve hızları temin edilmiş ve bunlara dayalı olarak IGB20 referans çerçevesinde koordinatları da belirlenmiştir. Daha sonra uygulamada kullanılan noktalarda en az 2 saat süreli GNSS ölçüleri değerlendirilerek IGB20 ve TUREF'e dayalı ve ölçü epoğunda nokta koordinatları hesaplanmıştır. Daha sonra ölçü epoğundaki koordinatların referans epoğuna kaydırılması için uygulama yapılmıştır. Bu aşamada referans nokta koordinatlarının ölçü epoğunda veya referans epoğunda sıkı koşullu (sabit) alınması durumunda elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Referans epokunda zorlamalı dengeleme ile elde edilen sonuçlarla ölçü epoğundan hızlarla kaydırılan koordinatlar arasındaki farklar incelenmiştir. Halihazırda yapılan uygulamada TUSAGA-AKTİF referans noktalarının TUREF datumunda 2005.0 referans epoğundaki koordinatları TUSAGA-AKTİF gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic – RTK) ağ yazılımlarında (Network RTK) sabit olarak alınmakta ve gezici olarak çalışan kullanıcılarca doğrudan TUREF datumunda 2005.0 referans epoğunda koordinatlar sağlanmaktadır.

Bu amaçla; hız farklılıklarının görece en çok olduğu Kuzey Anadolu Fay (KAF) zonunu kesen ve yaklaşık olarak Ankara-Bartın hattında TUSAGA-Aktif ve TUTGA noktalarından oluşan bir ağda uygulamalar yapılmıştır. YKN koordinatlarının hesaplanmasında Bernese GNSS değerlendirme yazılımı, PRIDE-AR, Tersus Advanced Positioning (TAP), Tersus Geomatics Office -2 (TGO2) yazılımları kullanılmıştır.

Bu çalışmada; elde edilen veriler ve sonuçlar ışığında uygulamaya yönelik değerlendirmeler ile önerilerde bulunmaktadır.

#### **KAYNAKLAR :**

BÖHHBÜY (2018) : Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretimi Yönetmeliği (2018/11962). 26.06.2018 tarihli ve 30460 sayılı Resmi Gazete.

Kurt, A.İ., Cingöz, A., Özdemir, S., Peker, S., Özel, Ö., Simav, M. (2020) : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) Güncel Koordinat ve Hızlarının GNSS Verilerinin Yeniden Değerlendirilmesi Kapsamında Hesaplanması. Harita Dergisi, Sayı 164, sayfa: 1-17, Harita Genel Müdürlüğü, Ankara.

Harita Genel Müdürlüğü (2025) : Web sayfasında yayınlanan “TUREF 2020 Hız Alanı Bilgilendirme Dokümanı”, [https://turefhizalani.harita.gov.tr/assets/TUREF\\_HIZ\\_ALANI\\_2020\\_BilgilendirmeDokumani.pdf](https://turefhizalani.harita.gov.tr/assets/TUREF_HIZ_ALANI_2020_BilgilendirmeDokumani.pdf)

IGS (2025) : IGS web sayfası, <https://igs.org/data-products-overview/>

#### **Anahtar Kelimeler**

Jeodezi ve Konum Belirleme, TUREF, Epok, Türkiye Hız Alanı, Jeodezik Datum Tanımı, Jeodezik Ağ Dengelemesi

# GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümeleneşmesi

Ali Utku AKAR<sup>1,\*</sup>, Cevat İNAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya.

## Özet

Islak gecikmenin yüksek doğrulukta belirlenmesi, Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS)'nin yanı sıra atmosferik ve iklim araştırmalarında da önemli bir yere sahiptir. Islak gecikmenin tahmini için bugüne kadar pek çok farklı model ortaya atılmış ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Yakın zamanda makine öğrenmesindeki yeni gelişmeler, bu gecikme tahminlerine alternatif yeni yaklaşımlar sunmakta ve mevcut modellerin verimliliğinin artmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, yapısal algoritmaları bakımından farklı kümeleme tekniklerinin (Birleştirici Hiyerarşik Kümeleme, Spatially Constrained Multivariate Clustering ve Ordering Points To Identify the Clustering Structure) Zenit Islak Gecikme (ZWD)'lerdeki mekansal bağımlılığı ortaya çıkarıp çıkaramayacağını araştırılması amaçlanmıştır. İlgili kümeleme teknikleri kullanılarak, benzer/yakın meteorolojik özelliklere sahip GNSS istasyonlarının analiz edilmesi ve ZWD için bölgesel sınırların tespit edilmesi gerçekleştirilmiştir. Avrupa bölgesindeki 90 GNSS istasyonundan elde edilen 5 yıllık [2018-2022] meteorolojik ve ıslak gecikme verileri kullanılarak ay bazında değerlendirme yapılmıştır. Kümeleme çalışmaları, performans ölçütleri aracılığıyla hiperparametre ayarlamaları yapılarak gerçekleştirilmiş ve yöntem başarıları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ZWD'nin mekansal bağımlılığını açıklamada SCMC yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Özellikle, kümeleme çalışması yapılmadan doğrudan çalışma bölgesindeki istasyonların tamamı dikkate alındığında, bölgeyi yansıtacak ZWD değerlerinin GNSS istasyonlarındaki ölçümlerden uzaklaştığı sonucuna varılmıştır. Troposferdeki su buharı dağılımının düzensizliği nedeniyle model doğruluğunun sınırlı kalması, istasyonların atmosferik özelliklerinin önceden tanımlanmasını gerekli kalmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen kümeleme analizleri, modelleme sürecinin istikrarını artırabilir ve farklı bölgelerde en uygun ZWD tahmin modellerinin seçimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## Anahtar Sözcükler

GNSS, Zenit Islak Gecikme (ZWD), GNSS Uygulamalarında Kümeleme Analizi, SCMC, OPTICS, Hiyerarşik Kümeleme

## Abstract

Accurate prediction of the wet delay plays a crucial role not only in the Global Navigation Satellite System (GNSS) applications but also in atmospheric and climate research. Numerous models have been proposed and continuously improved for wet delay prediction. Recent advances in machine learning have introduced alternative approaches to enhance the efficiency and accuracy of existing models. This study aims to investigate whether different clustering techniques with distinct structural algorithms—Agglomerative Hierarchical Clustering, Spatially Constrained Multivariate Clustering (SCMC), and Ordering Points to Identify the Clustering Structure (OPTICS)—can reveal the spatial dependency of Zenith Wet Delay (ZWD). Using these clustering methods, GNSS stations with similar or proximate meteorological characteristics were analyzed to delineate regional boundaries for ZWD. The analysis was conducted on monthly datasets comprising five years [2018–2022] of meteorological and wet delay data from 90 GNSS stations across Europe. Clustering experiments were optimized through hyperparameter tuning based on performance metrics, and the results of different methods were comparatively evaluated. The findings demonstrated that the SCMC method outperformed the others in explaining the spatial dependency of ZWD. Notably, when all stations within the study area were considered without prior clustering, the resulting ZWD values deviated more significantly from actual GNSS observations, suggesting that regional variability was not properly captured. Due to the irregular distribution of water vapor in the troposphere, model accuracy remains limited, emphasizing the necessity of defining atmospheric characteristics of stations beforehand. Accordingly, the clustering analyses conducted within this study are expected to enhance the stability of modeling processes and contribute to the selection of the most suitable ZWD prediction models for different regions.

## Keywords

GNSS, Zenit Wet Delay (ZWD), Cluster Analysis in GNSS Applications, SCMC, OPTICS, Hierarchical Clustering

## 1. Giriş

Troposfer, atmosferin yeryüzüne en yakın tabakası olup küresel ölçekte meteorolojik olayların gerçekleştiği ve su buharı yoğunluğunun en fazla olduğu bölgedir. Troposferin kalınlığı ekvator bölgelerinde yaklaşık 17-18 km iken kutuplara doğru gidildikçe 7-8 km'ye kadar azalmaktadır. Bu farklılığın temel nedenleri arasında ekvatorial bölgelerde sıcaklığa bağlı olarak ısınan havanın yükselmesi ve dış kuvvetlerin etkisinin kutuplara kıyasla daha yoğun olması gösterilebilir. Troposferin bu dinamik yapısı, uydu tabanlı konum belirlemede önemli bir hata kaynağını oluşturmaktadır ve özellikle ölçme, haritalama ve yeryüzü gözlemleri gibi çeşitli jeodezik uygulamalarda göz ardı edilmemesi gereken bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Zheng vd., 2015). Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) sinyalleri troposferden geçen

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (332) 205 1844 Fax: +90 (332) 205 1844  
E-posta: auakar@ktun.edu.tr (Akar A. U.), cinal@ktun.edu.tr (İnal C.)

*GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelmesi*

kuru gaz ve su buharı molekülleri ile etkileşime girer, saçılma veya kırılmayla gecikmeye uğrar. Bu durum troposferik gecikme olarak tanımlanmaktadır (Yang vd., 2021). Hidrostatik bileşen atmosferdeki kuru gazların basınca dayalı etkisini yansıtır ve deneysel modellerle yüksek doğrulukta hesaplanabilmektedir. Buna karşın, su buharının düzensiz ve heterojen dağılımına bağlı olarak ıslak gecikme bileşeni, deneysel olarak modellenmesi en zor parametrelerden biridir. Bölgesel meteorolojik karakteristiklere göre ıslak gecikmenin belirlenmesi hem GNSS tabanlı uygulamalarda hem de iklimsel analizlerde doğruluğu artırabilmektedir. Günümüzde, atmosferdeki su buharının yüksek zamansal ve mekânsal değişkenliği nedeniyle, bölgesel düzeyde tek tip ampirik modeller çoğu zaman yetersiz kalmaktadır ve bu durum model doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Son yıllarda, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar ve istasyon kümelmesine dayalı yöntemler, ıslak gecikmenin bölgesel anlamda daha hassas bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır.

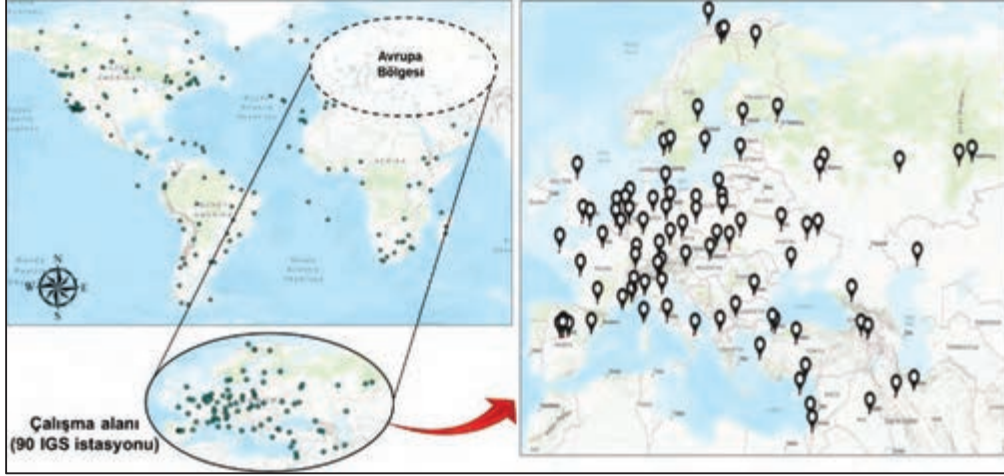
Literatürde, troposferik zenit ıslak gecikme (ZWD)'nin bölgesel modellemesi için birçok yöntem ve öğrenme modeli yaklaşımı kullanılmıştır (Crocetti vd., 2024). En yaygın kullanılan yöntem olan yapay sinir ağlarının (Selbesoglu, 2019; Konakoglu vd., 2023) yanı sıra, gradyan artırma modelleri (Dehvari vd., 2025), hibrit modeller (Wu vd., 2024) ile rastgele orman ve türevleri de (Chen vd., 2025) tercih edilmiştir. Bu çalışmaların tümünde, farklı enlem ve boylamlarda dağıtılmış GNSS istasyonlarını kapsayan seçili bir çalışma alanında ZWD tahminleri gerçekleştirilmiştir. Islak gecikmeye neden olan meteorolojik özelliklerin bölgeye özgü ve çok boyutlu değişkenliği göz önüne alındığında, her GNSS istasyonunun tahmin modellemesine etkisi farklı olabilir ve bu durum model performansını olumsuz etkileyebilir (Yang ve ark., 2023). Farklı mekânsal veya meteorolojik özelliklere sahip verilerin tek bir modelde işlenmesi, modelin genelleme yeteneğini ve tahmin doğruluğunu azaltabilir. Benzer meteorolojik özelliklere sahip GNSS istasyonlarının gruplandırılmasıyla oluşturulan homojen veri kümeleri, öğrenme algoritmalarının bölgesel atmosferik örtüntüleri daha doğru bir şekilde yakalamasına yardımcı olabilmektedir. Özellikle atmosferik değişkenliğin yüksek olduğu bölgelerde, bu strateji modelin hassasiyetini artırırken aşırı uyum (overfitting) riskini azaltabilir. Özetle, bölgesel ZWD modellemesi öncesinde gerçekleştirilen kümeleme analizinin, tahmin doğruluğunu artırabileceği ve fiziksel tutarlılığı sağlayabileceği düşünülmektedir. Kümeleme teknikleri, homojen özelliklere sahip veri alt gruplarını ortaya çıkararak hem büyük veri kümeleri arasındaki ilişkilerin açıklanmasına hem de mevcut modellerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Böylece, ıslak gecikmenin bölgesel kümelendirmesi hem konumlama doğruluğu açısından hem de atmosferik su buharı içeriğinin izlenmesi açısından kayda değer bir araştırma konusudur.

Bu çalışmada, farklı bölgelerdeki GNSS istasyonlarından elde edilen veriler aracılığıyla ZWD'nin bölgeselliğini ortaya çıkarmak için kümeleme tekniklerinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Uygulama için VMF (Vienna Mapping Function) veri sunucusundan elde edilen VMF1 troposferik ürünleri kullanılmıştır. Böylece hem güncel troposfer modellerinin sunduğu veriler değerlendirilmiş hem de kümeleme algoritmalarının bu veriler üzerindeki başarısı ölçülmüştür. Avrupa genelinde dağılım gösteren GNSS istasyonları temel alınarak, istasyonların atmosferik koşullara göre nasıl gruplanabileceği incelenmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan çalışma; ZWD tahmin modelleri üretilmeden önce benzer/yakın meteorolojik özelliklere sahip bölgelerin analiz edilerek belirlenmesi, troposferik gecikme tahmininde kullanılacak alt çalışma bölgelerinin oluşturulması ya da analiz sonucunda hangi bölge için hangi model daha uygun sorusuna cevap bulmak açısından özgün değere sahiptir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Avrupa'da GNSS ağına kapsadığı ve nispeten yumuşak bir rölyefle karakterize edilen bölgeyi kapsamaktadır. Avrupa bölgesi, küme tabanlı ZWD tahmininde bölgesel değişkenliği değerlendirmek için uygun bir alan görevi görebilir. Bu bölge, denizden karasal etkilere kadar önemli bir iklim çeşitliliği sergileyerek, değişen atmosfer koşulları altında küme tabanlı modellerin performansını değerlendirmek için uygun bir test ortamı sunmaktadır (Li vd. 2012). İstasyonların seçiminde, modelleme için yeterli verinin bulunması, verilerin doğruluğu ve güvenilirliği ve model doğrulaması yapabilme yeteneği gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Bölge genelinde verilerin temsiliyetini ve kalitesini değerlendirmek amacıyla, çalışma alanının çeşitli yerlerinden 90 GNSS referans istasyonu rastgele olarak seçilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Çalışma alanı (Uygulama kapsamında seçilmiş GNSS istasyonları)

## 2.2. Veri Kaynakları

Çalışma alanı belirlendikten sonra verilerin elde edilmesi aşamasına geçilmiştir. Burada, 2018-2019-2020-2021-2022 yılları olmak üzere 5 yıllık periyot ele alınmış ve çalışma alanındaki istasyonlara ilişkin veriler, açık erişimli veri portallarından temin edilmiştir. Bu veri portalları; Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF), VMF Data Server ve Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA)'nin oluşturduğu Sayısal Hava Tahmin (NWP) modelleridir.

Çalışma kapsamında seçilmiş istasyonlara ait meteorolojik parametreler (yüzey basıncı, sıcaklık, bağıl nem, jeopotansiyel değer vb.) Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF) tarafından üretilen “ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)” veri setinden elde edilmiştir. Ayrıca, ZWD değerleri ve istasyon konum bilgileri ise VMF Data Server’den alınmıştır. Buradaki, ıslak gecikmeler, GNSS gözlemlerinden türetilen istasyon bazlı değerlerdir. Eksik veriler ise diğer NWP modellerinden türetilmiştir.

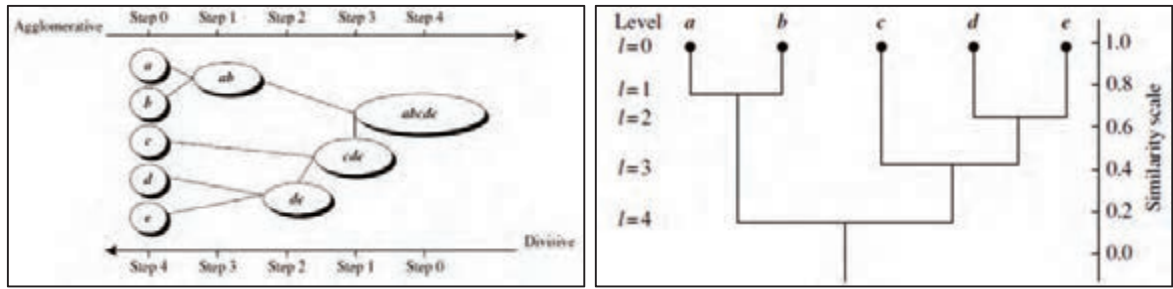
## 2.3. Kümeleme Analizi

Günümüzde büyük miktarda verinin yönetimi ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesi amacıyla veri madenciliği önemli bir alan haline gelmiştir. Veri madenciliği teknikleri arasında kümeleme, sınıflandırma ve modelleme yer almakta olup bu çalışmada kümeleme analizi ele alınmıştır. Bu analiz türü, verileri benzerlik veya uzaklık ölçütlerine göre kümeler ayırarak her bir küme içinde benzer, kümeler arasında ise farklı bir yapı oluşturmayı amaçlar (Everitt vd., 2011). Kümeleme analizinin amacı, sınıfı bilinmeyen bir veri grubunu anlamlı biçimde sınıflandırmaktır. Söz konusu analiz, veri matrisinin oluşturulması, benzerlik veya uzaklık matrislerinin hesaplanması, kümeleme yönteminin seçilmesi ve sonuçların yorumlanması olacak şekilde dört aşamada gerçekleştirilir. Veri matrisinin oluşturulmasında değişken seçimi ve aykırı değerlerin tespiti önemlidir (Anderberg, 2014). Benzerlik-uzaklık hesaplamalarının ardından uygun kümeleme yöntemi belirlenir (Doğan, 2008; Everitt vd., 2011). Son olarak, elde edilen kümelerin geçerliliği ve literatürle uyumu değerlendirilir (Kaufman & Rousseeuw, 2009). Bu çalışmada, Birleştirici (Agglomerative) Hiyerarşik Kümeleme, Spatially Constrained Multivariate Clustering (SCMC) ve Ordering Points To Identify the Clustering Structure (OPTICS) yaklaşımlarının GNSS gözlemlerindeki ıslak gecikmenin kümelenebilmesindeki başarısı araştırılmıştır.

### 2.3.1. Birleştirici (Agglomerative) Hiyerarşik Kümeleme

Hiyerarşik kümeleme, ayrıştırmanın aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya oluşturulup oluşturulmadığına bağlı olarak birleştirici veya bölümleyici olabilmektedir (Fernández & Gómez, 2008). Birleştirici olan yaklaşım aşağıdan yukarıya doğru bir strateji kullanır. Tipik olarak, her nesnenin kendi kümesini oluşturmasına izin vererek başlar ve tüm nesnelere tek bir kümede olana kadar kümeleri daha büyük kümeler halinde yinelenmeli olarak birleştirir (Davidson & Ravi, 2005). Birleştirme adımı için, birbirine en yakın iki kümeyi bulur ve ikisini birleştirerek tek bir küme oluşturur. Her kümenin en az bir nesne içerdiği her yinelemeye iki küme birleştirildiğinden, bir birleştirme yöntemi en fazla n yineleme gerektirir. Bölümleyici olan yaklaşım ise yukarıdan aşağıya bir strateji kullanır. Tüm nesnelere hiyerarşinin kökü olan tek bir kümeye yerleştirilerek başlar. Daha sonra kök kümeyi birkaç küçük alt kümeye böler ve bu kümeleri yinelenmeli olarak daha küçük kümelere böler. Şekil 2, beş nesneden (a, b, c, d, e) oluşan veri kümesinde aglomeratif yöntem olan AGNES'in (AGglomerative Nesting) ve bölümleyici yöntem olan DIANA'nın (DIVisive ANALysis) uygulamasını göstermektedir.

## GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelemesi



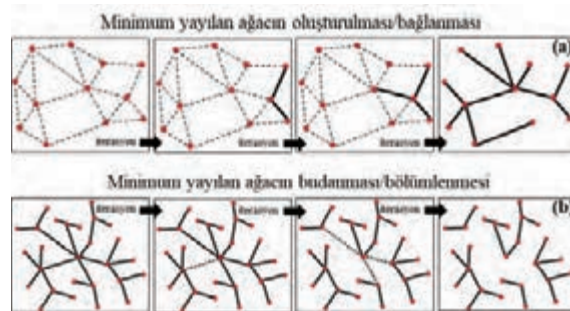
Şekil 2: Nesnelerin birleştirici/bölücü hiyerarşik kümelemesi ve dendrogram gösterimi (Han vd., 2022)

Hiyerarşik kümeleme sürecini temsil etmek için dendrogramlar kullanılır (Şekil 2). Burada,  $l = 0$ , beş nesneyi 0 düzeyinde tekil kümeler olarak gösterir.  $l = 1$ 'de, a ve b nesnelere ilk küme oluşturmak için birlikte gruplanır ve sonraki tüm seviyelerde bir arada kalırlar. Kümeler arasındaki benzerlik ölçөгünü göstermek için dikey bir eksen de kullanabilmektedir.

### 2.3.2. Spatially Constrained Multivariate Clustering (SCMC)

Son zamanlarda, birbirine benzer gözlemlerle kümelerin oluşturulmasının yanı sıra konumsal ilişkilerin de dikkate alındığı farklı bir yaklaşımın gerekliliği öne sürülmüştür. Buna yönelik, konumsal ve konumsal olmayan özellikleri birlikte kümeleme analizine dahil etmek için, Spatial 'K' luster Analysis by Tree Edge Removal (SKATER) algoritmasına dayalı Spatially Constrained Multivariate Clustering (SCMC) geliştirilmiştir (Assunção vd., 2006). SCMC, benzer kümeler oluşturmak için minimum yayılan bir ağacı büyütüp budayarak çalışır. Bir ağ yapısının düğüm ve kenarlardan meydana geldiği ve düğümlerin kenarlar ile birbirine bağlandığı varsayılarak minimum yayılan ağaç algoritması ile bir ağ yapısı içerisindeki düğüm noktalarının en düşük maliyet ile birbirine bağlanması istenmektedir (Sisman vd., 2022). Ağ yapısındaki kenar maliyetleri hesabı konumla ilişkili olarak düşünüldüğünde, ilgili özellik için söz konusu maliyet komşu bölgeler arasındaki farklılıkları değerlendirilerek hesaplanmaktadır. Minimum yayılan ağaç ile ağ yapılarının oluşturularak çözüme gidilmesinde ise Prim (Jungnickel, 1999), Kruskal (Kruskal, 1956) ve Boruvka (Sollin's) gibi algoritmalar tercih edilmektedir.

Küme üyeliğini bitişik veya yakın özelliklerle sınırlamak için, yöntem önce özellikler arasındaki komşuluk ilişkilerini temsil eden bir bağlantı grafiği oluşturur. Bağlanabilirlik grafiğinden hem konumsal ilişkilerini hem de veri benzerliğini özetleyen bir minimum yayılan ağaç tasarlanır (Şekil 3a). Özellikler, ağırlıklı kenarlarla bağlanan minimum yayılan ağaçta düğümler haline gelir. Her kenarın ağırlığı, bağlandığı nesnelerin benzerliği ile orantılıdır. Minimum yayılan ağaç oluşturulduktan sonra, ağaçtaki bir dal budanarak iki minimum yayılan ağaç oluşturulur. Budanacak kenar, yalnızca bir özelliğe sahip kümelerden kaçınırken, sonuçtaki kümelerdeki farklılığı en aza indirecek şekilde seçilir (Şekil 3b).

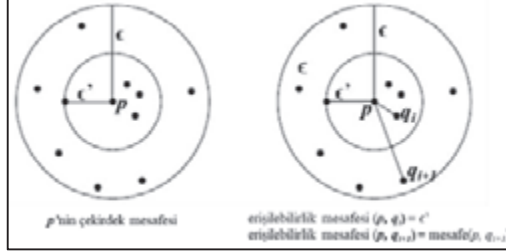


Şekil 3: Minimum yayılan ağacın (a) oluşturulması/bağlanması ve (b) budanması/bölünmesi

### 2.3.3. Ordering Points To Identify the Clustering Structure (OPTICS)

Ordering Points to Identify the Clustering Structure (OPTICS) algoritması, yoğunluk tabanlı kümeleme yöntemlerinin sınırlılıklarını aşmak amacıyla geliştirilmiş bir algoritmadır (Ankerst vd., 1999). DBSCAN algoritmasında olduğu gibi OPTICS de iki temel parametreye dayanır: maksimum komşuluk yarıçapı ( $\epsilon$ ) ve minimum komşu sayısı ( $MinPts$ ). Ancak DBSCAN, bu iki parametreye bağlı olarak kümeleri belirli bir yoğunluk eşiğiyle sınırlı biçimde tanımlarken, OPTICS bu parametreleri yalnızca referans olarak kullanır ve küme yapısını doğrudan oluşturmak yerine, verinin yoğunluk yapısını yansıtan bir sıralama üretir (Kriegel vd., 2011). Bu sıralama, veri noktalarının erişilebilirlik uzaklıkları (reachability distance) temelinde oluşturulur ve küme sınırlarının daha esnek bir biçimde gözlemlenebilmesine olanak tanır. Aynı anda

farklı kümelemeleri oluşturmak için nesnelere belirli bir sırayla işlenir. Bu sıra, en düşük  $\epsilon$  değerine göre yoğunluğa erişilebilen bir nesne seçer, böylece daha yüksek yoğunluğa sahip kümeler önce bitirilir. Bu fikre dayanarak, OPTICS nesne başına çekirdek ve erişilebilirlik mesafelerine ait bilgilere ihtiyaç duyar (Şekil 4).



Şekil 4: OPTICS terminolojisi (Ankerst vd., 1999)

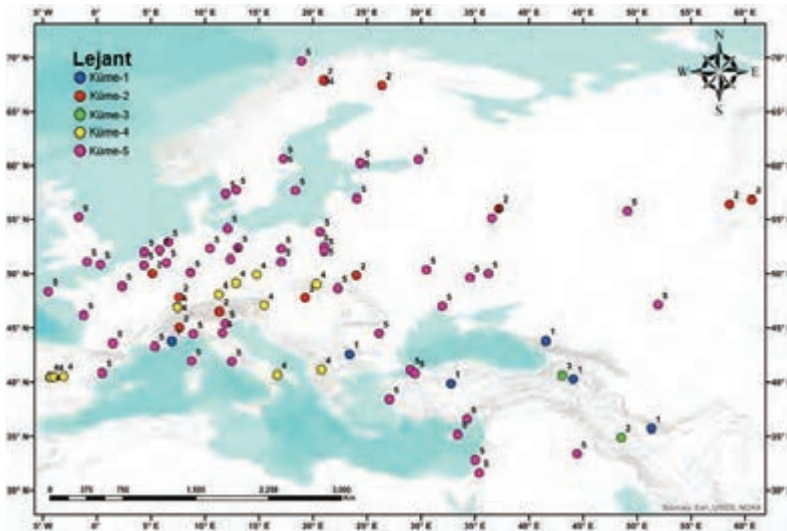
- Bir  $p$  nesnesinin çekirdek mesafesi,  $p$ 'nin  $\epsilon'$ -komşusu en az  $MinPts$  nesnesine sahip olacak şekilde en küçük  $\epsilon'$  değeridir. Yani  $\epsilon'$ ,  $p$ 'yi çekirdek nesne yapan minimum mesafe eşliğidir.  $\epsilon$  ve  $MinPts$ 'ye göre  $p$  bir çekirdek nesne değilse,  $p$ 'nin çekirdek mesafesi tanımsızdır.
- $p$  nesnesine  $q$ 'dan erişilebilirlik mesafesi,  $p$  yoğunluğunu  $q$ 'dan erişilebilir yapan minimum yarıçap değeridir. Yoğunluk-erişilebilirlik tanımına göre,  $q$  bir çekirdek nesne olmalı ve  $p$ ,  $q$ 'nın komşuluğunda olmalıdır. Bu nedenle,  $q$ 'dan  $p$ 'ye erişilebilirlik mesafesi  $\max(\text{çekirdek mesafesi}(q), \text{mesafe}(p, q))$  olur.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Hiyerarşik Yaklaşım ile GNSS İstasyonlarının Kümelemesi

Benzer meteorolojik özelliklere ve ZWD değerlerine sahip IGS (International GNSS Service) istasyonlarının belirlenmesi için aglomeratif hiyerarşik yaklaşım kullanılmıştır. Python v3.12 aracılığıyla ilk olarak uygulamaya NumPy, Pandas ve Matplotlib kütüphaneleri aktarılmıştır. Ayrıca, kümeleme analizi için Scikit-Learn ve SciPy kütüphanesi dahil edilmiştir. İlgili veri seti için dendrogram oluşturulurken, kümeleme yapmak için "Ward Bağlantı Yöntemi" kullanılmıştır. Kümeleme analizi, IGS istasyonlarına ait konum bilgileri ve meteorolojik parametreler kullanılarak uygulanmıştır.

Analiz sonucunda, Küme-1'de 6 GNSS istasyonu (mavi noktalar), Küme-2'de 11 istasyon (kırmızı noktalar), Küme-3'te 2 istasyon (yeşil noktalar), Küme-4'te 14 istasyon (sarı noktalar) ve Küme-5'te 57 istasyonun (mor noktalar) yer aldığı görülmüştür. Küme-1 olarak tanımlanan referans istasyonları ağırlıklı olarak Avrupa'nın doğusu ve güneyinde yer alan IGS istasyonlarıdır. Küme-2 olarak tanımlanan kümenin büyük çoğunluğunu Orta Avrupa bölgesinde yer alan istasyonlar oluşturmaktadır. Küme-3 sadece iki istasyonu kapsamaktadır. Küme 4'de, Küme-2'ye benzer şekilde Avrupa'nın ortasına doğru yerleşmiştir. Son olarak, Küme-5 ise çalışma alanının tamamına yayılmış bir küme grubudur (Şekil 5).



Şekil 5: Çalışma alanındaki IGS istasyonlarının hiyerarşik kümeleme sonuçları

## GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümeleneşmesi

Kümeleme sonucunda elde edilen gruplar üzerinde ZWD değerleri incelenmiştir. Her küme için, o kümeye ait IGS istasyonlarındaki ZWD değerlerinin ortalaması alınarak küme içi ortalama ıslak gecikme değeri hesaplanmıştır. Daha sonra, her bir istasyonun ölçüm/referans değerinden bu ortalama değeri çıkarılarak sapmalar belirlenmiş ve bu farklardan hareketle Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE) ve Root Mean Squared Error (RMSE) değerleri belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Hiyerarşik kümelemenin performans değerlendirme sonuçları

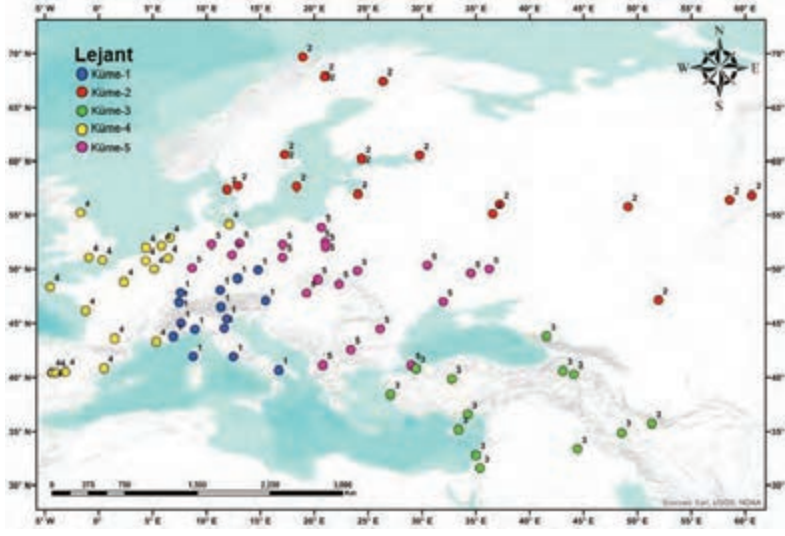
(cm biriminde)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
Küme-1	MAE	1.17	1.13	1.07	1.23	1.00	1.51	2.42	2.34	1.44	1.02	1.10	1.01
	MSE	15.57	14.21	12.61	19.29	17.49	27.63	72.35	65.66	32.73	14.27	16.61	12.71
	RMSE	1.25	1.19	1.12	1.39	1.32	1.66	2.69	2.56	1.81	1.19	1.29	1.13
Küme-2	MAE	1.03	1.79	1.09	0.99	1.25	2.16	2.22	2.17	2.76	1.42	1.70	1.61
	MSE	13.45	36.19	13.07	17.26	28.31	78.10	64.00	58.69	101.52	22.49	37.09	28.04
	RMSE	1.16	1.90	1.14	1.31	1.68	2.79	2.53	2.42	3.19	1.50	1.93	1.67
Küme-3	MAE	1.08	1.03	0.96	1.11	1.36	2.76	2.88	2.99	1.84	1.28	1.09	1.14
	MSE	11.59	10.56	9.29	12.31	18.56	76.43	82.95	89.60	33.94	16.43	11.89	12.9
	RMSE	1.08	1.03	0.96	1.11	1.36	2.76	2.88	2.99	1.84	1.28	1.09	1.14
Küme-4	MAE	1.02	1.09	1.03	1.37	1.18	1.76	2.35	2.00	1.14	1.10	1.04	1.03
	MSE	13.24	17.64	13.00	26.92	23.31	42.14	63.82	46.75	28.40	17.98	24.99	18.17
	RMSE	1.15	1.33	1.14	1.64	1.53	2.05	2.53	2.16	1.69	1.34	1.58	1.35
Küme-5	MAE	1.22	1.39	1.24	1.43	1.25	1.94	2.02	1.97	2.01	1.35	1.47	1.52
	MSE	20.59	27.29	21.74	29.45	23.54	57.62	57.28	55.00	63.06	29.34	34.21	31.63
	RMSE	1.43	1.65	1.47	1.72	1.53	2.40	2.39	2.35	2.51	1.71	1.85	1.78

Hiyerarşik kümelemenin elde edilen beş küme için hesaplanan MAE, MSE ve RMSE değerleri, kümeler arasındaki ZWD farklarının mevsimsel ve bölgesel değişimlere bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır (Tablo 1). Genel olarak, yılın ilk yarısında (Ocak–Haziran) hata değerleri görece düşük seyretmekte, yaz aylarında (özellikle Temmuz–Ağustos döneminde) belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu durum, yaz döneminde artan sıcaklık, nem ve atmosferik su buharı miktarının ZWD üzerindeki etkisinin daha değişken hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.

Kümeler arasında karşılaştırma yapıldığında, Küme-1 ve Küme-4'ün yıl genelinde en düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu kümelerdeki istasyonların meteorolojik koşullar bakımından daha homojen yapıya sahip olması, hata oranlarının düşük kalmasına neden olmuştur. Küme-2 ve Küme-3, özellikle yaz aylarında yüksek MSE ve RMSE değerleriyle öne çıkmaktadır; bu kümelerdeki istasyonlar, atmosferik koşullardaki ani değişimlere daha duyarlı bölgelerde yer almaktadır. Küme-5 ise yıl boyunca orta-yüksek seviyede hata değerleri göstermekte, özellikle yaz ve sonbahar aylarında RMSE'nin 2.5 cm civarına ulaşması, kümeye dahil istasyonların ZWD değişkenliği açısından daha heterojen olduğunu düşündürmektedir. Genel olarak, elde edilen hata ölçütleri, meteorolojik parametrelere göre yapılan kümelemenin ZWD değişimlerini büyük ölçüde tutarlı biçimde yansıttığını göstermektedir. Bununla birlikte, yaz döneminde artan atmosferik nem içeriği ve konvektif faaliyetlerin kümeler arası farkı artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

### 3.2. SCMC ile GNSS İstasyonlarının Kümeleneşmesi

Meteorolojik parametreler ve istasyon konum bilgileri birlikte değerlendirilerek SCMC analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz için CBS yazılımlarından birisi olan ArcGIS Pro kullanılmıştır. Bu yaklaşım hem istasyonlar arasındaki meteorolojik benzerliği hem de coğrafi yakınlığı dikkate alınarak, mekânsal olarak anlamlı kümeler elde edilmesini sağlamaktadır. Kümeleme analizine göre GNSS istasyonları beş farklı kümede toplanmıştır (Şekil 6). Küme-1, ağırlıklı olarak Orta ve Güney Avrupa'da yoğunlaşırken (16 istasyon), Küme-2 daha çok Kuzey ve Doğu Avrupa'da (19 istasyon), özellikle İskandinavya ile Rusya çevresinde yer almaktadır. Küme-3 ise Türkiye, Orta Doğu ve Kafkaslar civarındaki istasyonları kapsamaktadır (13 istasyon). Küme-4, Batı Avrupa'ya odaklanmış olup (20 istasyon), özellikle Fransa ve İspanya çevresinde yoğunluk göstermektedir. Son olarak, Küme-5 Orta Avrupa'dan başlayarak Karadeniz'in kuzeyine kadar uzanan bir dağılım sergilemektedir (22 istasyon).



Şekil 6: Çalışma alanındaki IGS istasyonlarının SCMC kümeleme sonuçları

Tablo 2’deki sonuçlar incelendiğinde, her kümenin ZWD açısından hata değerlerinde belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Küme-1’de MAE değerleri yıl boyunca 0.85–2.12 cm arasında değişmekte olup, özellikle yaz ve sonbahar aylarında (Temmuz–Eylül) artış göstermektedir. MSE ve RMSE değerleri de bu dönemde yükselerek maksimum değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, Küme-1 istasyonlarının yaz aylarında daha yüksek sapma olduğunu göstermektedir. Küme-2’de MAE genellikle 0.63–1.74 cm aralığında olup, haziran ayında belirgin bir artış gözlenmektedir. RMSE değerleri de 2.16 cm’ye kadar çıkmakta, bu da haziran ayında veri hassasiyetinin düştüğünü işaret etmektedir. Küme-3’te yıl boyunca MAE değerleri nispeten dengeli olup, 0.89–1.86 cm arasında değişmektedir. MSE ve RMSE değerlerindeki artışlar özellikle yaz aylarında görülmekte ve bu dönemlerde hata oranlarının yükseldiği anlaşılmaktadır. Küme-4’te MAE ve RMSE değerleri, temmuz ayında en yüksek seviyeye ulaşmış olup (MAE≈1.8 cm, RMSE≈2.48 cm), kış aylarında ise hatalar görece düşüktür. Bu durum, Küme-4 istasyonlarının mevsimsel olarak performans değişimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Küme-5’te ise MAE ve RMSE değerleri diğer kümelere göre genellikle daha düşük seviyelerdedir (MAE≈0.5–1.62 cm, RMSE≈0.59–1.89 cm). Bu, Küme-5 istasyonlarının yıl boyunca daha stabil ve yüksek doğrulukta sonuçlar sağladığını göstermektedir.

Tablo 2: SCMC kümelemenin performans değerlendirme sonuçları

(cm biriminde)		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Küme-1	MAE	0.89	0.91	0.85	1.43	1.76	1.62	1.74	1.73	2.12	1.75	1.74	1.07
	MSE	9.49	10.85	9.92	24.19	37.14	34.74	41.93	37.29	55.13	39.03	37.2	18.13
	RMSE	0.97	1.04	1	1.56	1.93	1.86	2.05	1.93	2.35	1.98	1.93	1.05
Küme-2	MAE	0.63	0.83	0.87	1.03	1.19	1.74	1.62	1.45	1.31	1.42	0.88	0.73
	MSE	5.34	8.42	9.27	15.72	23.56	46.76	38.47	35.12	26.19	23.56	11.89	8.07
	RMSE	0.73	0.92	0.96	1.25	1.53	2.16	1.96	1.87	1.62	1.53	1.09	0.9
Küme-3	MAE	0.89	0.97	0.96	0.89	1.05	1.76	1.71	1.56	1.76	1.86	1.62	1.8
	MSE	10.65	12.88	13.58	15.15	19.46	39.99	37.98	33.59	40.92	43.41	31.48	39.88
	RMSE	1.03	1.13	1.17	1.23	1.39	2	1.95	1.83	2.02	2.08	1.77	2
Küme-4	MAE	0.8	0.95	0.7	1.44	1.14	1.88	1.8	1.44	1.67	0.8	1.02	0.63
	MSE	7.73	13.51	7.5	26.9	23.79	54.37	61.28	41.69	43.8	12.52	14.87	6.4
	RMSE	0.88	1.16	0.87	1.64	1.54	2.33	2.48	2.04	2.09	1.12	1.22	0.8
Küme-5	MAE	0.59	0.74	0.5	0.6	0.96	1.62	1.13	1.06	1.07	0.95	0.64	0.84
	MSE	6.84	6.91	3.52	6.76	13.02	35.6	26.34	19.55	16.03	13.63	7.95	10.41
	RMSE	0.83	0.83	0.59	0.82	1.14	1.89	1.62	1.4	1.27	1.17	0.89	1.02

Genel olarak, hata metriklerine bakıldığında küme için doğruluğun hem mevsimsel değişimlere hem de istasyon kümelerine bağlı olarak farklılık gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Yaz aylarında özellikle Temmuz–Ağustos döneminde

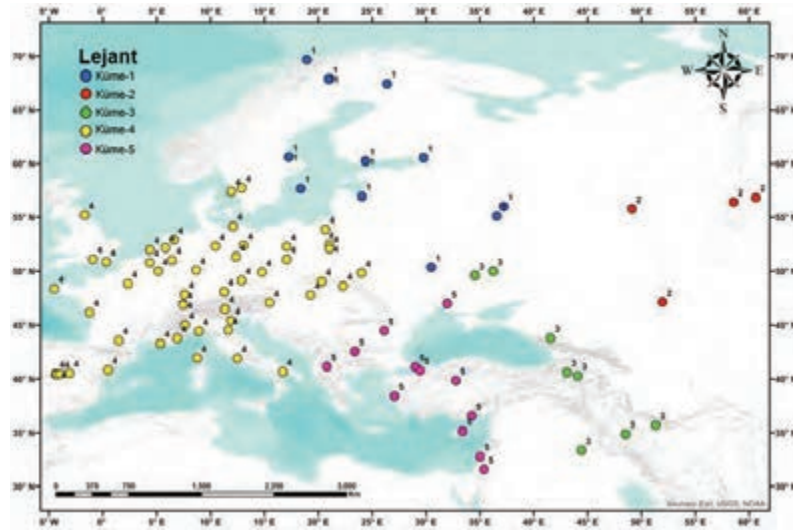
## GNSS Gözlemlerinden Türetilen Islak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelenmesi

çoğu kümede RMSE değerlerinde belirgin bir artış gözlenmekte, bu da meteorolojik koşulların GNSS gecikme değerlerine etkisini desteklemektedir. Ayrıca Küme-5'in diğer kümelere kıyasla daha düşük hata değerleri göstermesi, bu istasyon grubunun çevresel ve konumsal koşullar açısından daha elverişli olduğunu düşündürmektedir. Bu bulgular, GNSS veri analizinde kümeleme yaklaşımının istasyonların performansını anlamada ve hataların sistematik olarak değerlendirilmesinde önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

## 3.3. OPTICS algoritması ile GNSS İstasyonlarının Kümelenmesi

GNSS istasyonlarının kümesel dağılımları ve istasyonlar arasındaki hata karakteristikleri, yoğunluk temelli kümeleme olan OPTICS ile belirlenmiş ve verinin yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. İstasyonlar birbirinden farklı kümelere bölünmüş ve her kümenin hata metrikleri aylık bazda hesaplanmıştır. Öncelikle, komşular arası mesafe ve ulaşılabilirlik değerleri farklı yoğunluktaki kümeleri gürültüden ayırmak için belirlenmiştir. OPTICS, özellikle büyük arama mesafelerinde hesaplama yoğun olmasına rağmen, tespit edilen kümelerin hassas ayarlanmasında en fazla esnekliği sunmaktadır. Bu çalışmada OPTICS seçeneği için "search\_dist" parametresi olarak "max\_search\_dist" tercih edilmiştir. Küme olarak değerlendirilecek "Min\_features\_cluster", IGS istasyonlarının meteorolojik özelliklerinin ayırt edilebilirliğine göre "5" olarak seçilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, Küme-1'de 14 GNSS istasyonu, Küme-2'de 4 istasyon, Küme-3'te 8 istasyon, Küme-4'te 52 istasyon ve Küme-5'te 12 istasyonun yer aldığı görülmüştür. Küme-1 olarak tanımlanan referans istasyonları ağırlıklı olarak Kuzey Avrupa'da yer alan IGS istasyonlarıdır. Küme-2 olarak tanımlanan kümenin büyük çoğunluğunu Doğu Avrupa bölgesinde yer alan istasyonlar oluşturmaktadır. Küme-3, Türkiye'nin doğusunda yer alan istasyonları kapsamaktadır. Küme 4, Avrupa'nın ortasına ve batısına doğru yayılmaktadır. Son olarak, Küme-5 ise Türkiye ve İtalya'yı ağırlıklı olarak kapsayan bir küme grubudur (Şekil 7). Her küme için yılın tüm aylarını kapsayacak şekilde hata metrikleri Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 7: Çalışma alanındaki IGS istasyonlarının OPTICS kümeleme sonuçları

Tablo 3'e göre genel eğilim, ilkbahar ve yaz aylarında hata metriklerinde belirgin bir artış, sonbahar ve kış aylarında ise görece düşük hata değerlerinin görülmesi yönündedir. Özellikle Haziran–Ağustos döneminde tüm kümelere RMSE değerleri 2 cm'nin üzerine çıkmakta, bu da atmosferik değişkenliğin ve troposferik gecikmelerin GNSS ölçümlerinde hata büyüklüğünü artırdığını göstermektedir.

Küme-1, yılın ilk yarısında düşük hata değerleriyle öne çıkarken (Ocak RMSE = 1.16 cm), yaz aylarında hata 2.49 cm'ye ulaşmaktadır. Bu durum, istasyonların orta enlemlerde yoğunlaştığı bölgelerde mevsimsel nem değişimlerinden etkilenildiğini düşündürmektedir. Küme-2, özellikle Mayıs–Ağustos arasında yüksek MSE (63.97 cm'e kadar) ve RMSE (2.53 cm) değerleriyle dikkat çekmektedir. Bu kümede yer alan istasyonların çoğunun kuzey ve doğu bölgelerde bulunması, yaz aylarında artan iyonosferik aktivitenin ölçüm doğruluğunu etkilediğini işaret edebilir. Küme-3 için hata metriklerinin yıl boyunca değişken olduğu, özellikle Haziran'da RMSE'nin 2.99 cm'ye ulaştığı görülmektedir. Bu kümenin yüksek rakımlı ve farklı meteorolojik karaktere sahip istasyonlardan oluşması, hata seviyesindeki dalgalanmaları ifade edebilir. Küme-4, yıl genelinde en dengeli performansı göstermiştir. RMSE değerleri 1.14–2.54 cm aralığında seyretmekte olup, diğer kümelere kıyasla daha istikrarlı bir doğruluk düzeyi sergilemektedir. Bu durum, istasyonların

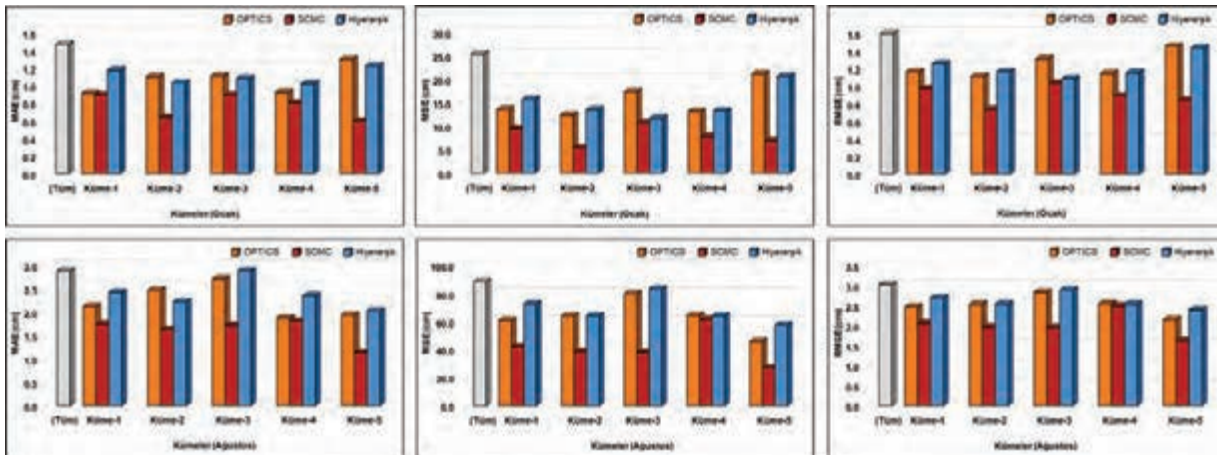
coğrafi olarak benzer koşullarda yer alması ve ölçüm yoğunluğunun dengeli olmasıyla ilişkilidir. Küme-5, özellikle yaz döneminde (Haziran = 2.55 cm) yüksek RMSE değerlerine ulaşmakla birlikte, yılın geri kalanında orta düzeyde hata değerleri göstermektedir. Bu kümenin, batı ve güney bölgelerde konumlanmış istasyonlardan oluştuğu ve mevsimsel atmosferik hareketlerden etkilendiği anlaşılmaktadır. Genel olarak OPTICS algoritması, GNSS istasyonlarının yoğunluk temelli dağılımlarını başarılı biçimde ayırt etmiş ve mevsimsel hata değişimlerini açıkça ortaya koymuştur.

Tablo 3: OPTICS kümelemenin performans değerlendirme sonuçları

(cm biriminde)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
Küme-1	MAE	0.91	0.95	1.03	1.1	1.51	2.15	2.12	2.08	1.14	1.25	1.02	0.94
	MSE	13.51	10.66	15.54	15.25	32.07	62.05	60.5	54.64	19.05	18.67	13.06	11.05
	RMSE	1.16	1.03	1.25	1.24	1.79	2.49	2.46	2.34	1.38	1.37	1.14	1.05
Küme-2	MAE	1.1	1	1.09	1.01	2	2.21	2.46	2.11	1.61	1.47	1.59	1.25
	MSE	12.31	13.34	13.16	14.65	56.85	49.25	63.97	61.02	29.48	22.15	33.9	16.22
	RMSE	1.11	1.15	1.15	1.21	2.38	2.22	2.53	2.47	1.72	1.49	1.84	1.27
Küme-3	MAE	1.11	1.1	1.04	1.14	1.67	2.43	2.71	2.21	1.68	1.14	1.06	1.23
	MSE	17.24	16.58	20.17	17.66	41.67	89.58	79.81	62.61	44.39	21.66	22.15	19.11
	RMSE	1.31	1.29	1.42	1.33	2.04	2.99	2.83	2.5	2.11	1.47	1.49	1.38
Küme-4	MAE	0.92	1.11	1.13	1.2	1.13	1.8	1.87	1.69	1.71	1.28	1.25	1.06
	MSE	13.1	18.71	16.51	21.36	22.36	47.38	64.27	46.93	47.91	25.59	27.83	16.72
	RMSE	1.14	1.37	1.28	1.46	1.5	2.18	2.54	2.17	2.19	1.6	1.67	1.29
Küme-5	MAE	1.3	1.13	1.33	1.16	1.39	2.33	1.94	1.78	1.48	1.54	1.13	1.29
	MSE	21.04	17.48	22.69	20.02	22.43	65.26	45.69	38.71	32.21	34.57	21.74	24.65
	RMSE	1.45	1.32	1.51	1.41	1.5	2.55	2.14	1.97	1.79	1.86	1.47	1.57

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, GNSS gözlemlerindeki ıslak gecikme ile bu gecikmeye etki eden meteorolojik parametrelerin farklı kümeleme teknikleri (SCMC, OPTICS ve Hiyerarşik Kümeleme) ile bölgesel olarak belirlenmesi için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Yöntem uygulaması sonucu küme hata metrikleri değerlendirildiğinde (aylar bakımından en büyük ve en küçük farkların olduğu Ocak ve Ağustos incelenmiştir), SCMC yönteminin diğer yöntemlere göre daha düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmüştür. SCMC yöntemine en yakın sonuçlar, nispeten OPTICS algoritması tarafından elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8: Farklı kümeleme performanslarının karşılaştırılması

Özellikle, kümeleme çalışması yapılmadan doğrudan çalışma bölgesindeki istasyonların tamamı dikkate alındığında, bölgeyi yansıtacak ZWD değerlerinin GNSS istasyonlarındaki ölçümlerden uzaklaştığı sonucuna varılabilir. Ancak, tüm istasyonları dahil etmek yerine bölgelere özgü sınırlar tespit edip bu bölge içerisinde yer alan GNSS istasyonları

## GNSS Gözlemlerinden Türetilen İslak Gecikmenin Farklı Tekniklerle Kümelenmesi

modelleme çalışmalarına dahil edilirse veri ya da gözlemlerdeki sapmaların azalmasından dolayı başarılarında artacağı söylenebilir.

GNSS gözlemlerinden türetilen ZWD'nin bölgeselliğini ortaya çıkarmak için kümeleme tekniklerinin kullanılması oldukça önem arz etmektedir. Troposferdeki su buharının dağılımı (bölgeden bölgeye, yüksekliğe, meteorolojik ve ani hava değişimleri vb.) düzensiz olduğundan ıslak gecikme modellerinde yeterli doğruluğa erişilememektedir. Modellerin istikrarlaştırılması amacıyla, modeller öncesi istasyonlardaki karakteristik özellikler (atmosferik parametreler) tanımlanmalıdır. Kümeleme çalışmalarının yapılması, modelleme sonuçlarını da olumlu etkileyecektir. Kümeleme analizleri sonucu tespit edilmiş çalışma bölgelerinde, hangi model (mevcut modellerde dahil) ile ZWD tahmininin daha başarılı olacağı öngörülebilir.

## Kaynaklar

- Anderberg, M. R. (2014). *Cluster analysis for applications: probability and mathematical statistics: a series of monographs and textbooks* (Vol. 19). Academic press.
- Ankerst, M., Breunig, M. M., Kriegel, H. P., Sander, J. (1999). OPTICS: Ordering points to identify the clustering structure. *ACM Sigmod record*, 28(2), 49-60.
- Assunção, R. M., Neves, M. C., Câmara, G., da Costa Freitas, C. (2006). Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 797-811.
- Chen, S., Jiang, C., Gao, X., Zhu, H., Wang, S., Liu, G. (2025). A zenith wet delay improved model in China based on GPT3 and random forest. *Geodesy and Geodynamics*.
- Crocetti, L., Schartner, M., Zus, F., Zhang, W., Moeller, G., Navarro, V., ..., Soja, B. (2024). Global, spatially explicit modelling of zenith wet delay with XGBoost. *Journal of Geodesy*, 98(4), 23.
- Davidson, I., Ravi, S. S. (2005). Agglomerative hierarchical clustering with constraints: Theoretical and empirical results. *In European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, pp. 59-70, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dehvari, M., Farzaneh, S., Forootan, E. (2025). Forecasting rainfall events based on zenith wet delay time series utilizing eXtreme gradient boosting (XGBoost). *Advances in Space Research*, 75(3), 2584-2598.
- Doğan, B. (2008). *Bankaların Gözetiminde Bir Araç Olarak Kümeleme Analizi: Türk Bankacılık Sektörü İçin Bir Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul.
- Everitt, B. S., Landau, S., Morven, L., Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*, 5th Edition John Wiley & Sons. West Sussex, United Kingdom.
- Fernández, A., Gómez, S. (2008). Solving non-uniqueness in agglomerative hierarchical clustering using multidendrograms. *Journal of Classification*, 25(1), 43-65.
- Han, J., Pei, J., Tong, H. (2022). *Data mining: concepts and techniques*. Morgan kaufmann.
- Jungnickel, D. (1999). The greedy algorithm. *In Graph, Networks and Algorithms*, pp. 129-153, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kaufman, L., Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. John Wiley & Sons, United States of America.
- Konakoglu, B., Onay, F. K., Aydemir, S. B. (2023). Tropospheric zenith wet delay prediction with a new hybrid ANN-Gorilla troops optimizer algorithm. *Advances in Space Research*, 71(11), 4739-4750.
- Kriegel, H. P., Kröger, P., Sander, J., Zimek, A. (2011). Density-based clustering. *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 1(3), 231-240.
- Kruskal, J. B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1), 48-50.
- Li W, Yuan Y, Ou J, Li H, Li Z (2012). A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. *Chinese science bulletin*, 57(17), 2132-2139.
- Selbesoglu, M. O. (2019). Spatial interpolation of GNSS troposphere wet delay by a newly designed artificial neural network model. *Applied Sciences*, 9(21), 4688.
- Sisman, S., Aydinoglu, A. C. (2022). Improving performance of mass real estate valuation through application of the dataset optimization and Spatially Constrained Multivariate Clustering Analysis. *Land Use Policy*, 119, 106167.
- Wu, Y., Huang, L., Feng, W., Tian, S. (2024). A Hybrid Deep Learning Algorithm for Tropospheric Zenith Wet Delay Modeling with the Spatiotemporal Variation Considered. *Atmosphere*, 15(1), 121.
- Yang, F., Meng, X., Guo, J., Yuan, D., Chen, M. (2021). Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models. *Satellite Navigation*, 2(1), 21.
- Zheng, D. Y., Hu, W. S., Wang, J., Zhu, M. C. (2015). Research on regional zenith tropospheric delay based on neural network technology. *Survey review*, 47(343), 286-295.



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# Bildiriler

## Teknik Oturum 5

### Coğrafi Bilgi Teknolojileri

**Oturum Başkanı:** Doç. Dr. Süleyman Sefa Bilgiliöğlü, *Aksaray Üniversitesi*

- 5.1. Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve Cesiumjs ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği  
(Tam Metin)  
(*Serdar Sakallı, Damla Su Beytekin, Nihal Yüksel, Berin Yomralıoğlu, Talha Ruscuk*)
- 5.2. Vektör Hücresel Otomat Temelli Kentsel Büyüme Modellemesinde Gamma Dağılımı ile Yerel Etki Mesafesinin Belirlenmesi: İstanbul, Berlin ve Madrid (Tam Metin)  
(*Ahmet Emir Yakup, İsmail Ercüment Ayazlı*)
- 5.3. Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler (Tam Metin)  
(*Halil İbrahim Şenol, Seçil Çokoğullu*)
- 5.4. Gönüllüler Haritası (Tam Metin)  
(*Fatih Sönmez, Özge Acar, Uğurcan Gül*)
- 5.5. Kitle Kaynaklı Doğrulama ve Yapay Öğrenme Araçları ile Uzamsal Veri İyileştirme (Bildiri Özet)  
(*Orkut Murat Yılmaz*)
- 5.6. CBS Tabanlı Doğalgaz Altyapı Yatırım Yönetimi: Gasnet Uygulaması ile Vatandaş Taleplerinin Yatırıma Dönüşme Süreci (Tam Metin)  
(*Emre Tunca, Fırat Kılıç*)

# Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve CesiumJS ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği

\*Serdar SAKALLI<sup>1</sup>, Nihal YÜKSEL<sup>1</sup>, Damla Su BEYTEKİN<sup>1</sup>, Berin YOMRALIOĞLU<sup>2</sup>, Talha RUSCUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

<sup>2</sup> BeeMAP, İstanbul. <https://beemap.io/>

## Özet

Akıllı kampüs yaklaşımı, üniversite kampüslerinin fiziksel, dijital ve operasyonel unsurlarını tek ve bütünlük bir ekosistem çatısı altında yönetmeyi amaçlayan, teknolojik ve disiplinler arası yenilikçi bir modeldir. Bu yaklaşım; hassas konumsal veri toplama, işleme ve çoklu boyutlu analiz yetenekleriyle öne çıkan gelişmiş Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), üç boyutlu modelleme ve dijital ikiz teknolojileriyle desteklenmektedir. Bu çalışma kapsamında, dijital ikiz temelli akıllı kampüs modeli İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü örneğinde geliştirilmiş ve CesiumJS platformu aracılığıyla web tabanlı olarak sunulmuştur. İnsansız hava araçlarıyla yapılan yüksek çözünürlüklü fotogrametri sayesinde elde edilen mekânsal veriler, QGIS tabanlı çok katmanlı veri modeli ile PostgreSQL/PostGIS altyapısında organize edilmiştir. Katmanlar, veri şemaları ve sembololoji standartlarına uygun şekilde yapılandırılmış, veri güncellemeleri otomasyon sayesinde hızlandırılmıştır. Kampüsteki binalara ait CAD tabanlı veriler BIM ortamına aktarılmış, IFC şemaları ile semantik bilgiler zenginleştirilmiştir. OGC 3D Tiles standardı ile üç boyutlu veriler paketlenerek CesiumJS üzerinden kullanıcıya sunulmuştur. Geliştirilen uygulama; mekânsal analiz, ölçüm, katman kontrolü ve görünürlük gibi çeşitli işlevleri desteklemektedir. Dronlarla elde edilen detaylı 3B modeller, kampüsün altyapısını yüksek doğrulukla yansıtmıştır. BIM ve CBS sisteminin entegrasyonu ise semantik sorguların yapılabilmesi ve acil durum senaryolarının test edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, disiplinler arası veri üretimi ve yönetimi sürdürülebilirlik ve operasyonel verimlilikte önemli kazanımlar sağlamış; dijital ikiz tabanlı akıllı kampüs modeli, üniversite yönetimi ve bilimsel araştırmalar için şeffaf, ölçeklenebilir ve bütünlük bir yapı sunmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Akıllı kampüs, Dijital ikiz, 3D Tiles, CesiumJS, CBS-BIM entegrasyonu, PostGIS, İTÜ

*The smart campus approach is an innovative technological and interdisciplinary model that aims to manage the physical, digital, and operational elements of university campuses under a single and integrated ecosystem. This approach is supported by advanced Geographic Information Systems (GIS), 3D modeling, and digital twin technologies that stand out with their precise spatial data collection, processing, and multi-dimensional analysis capabilities. Within the scope of this study, a digital twin-based smart campus model was developed using the Istanbul Technical University (ITU) Ayazağa Campus as an example and presented web-based via the CesiumJS platform. Spatial data obtained and high-resolution photogrammetry conducted with drones was organized with a QGIS-based multi-layered data model on a PostgreSQL/PostGIS infrastructure. Layers were structured in accordance with data schema and symbology standards, and data updates were accelerated through automation. CAD-based data of the buildings on the campus was transferred to the BIM environment, and semantic information was enriched with IFC schemas. 3D data was packaged using the OGC 3D Tiles standard and presented to the user via CesiumJS. The developed application; It supports a variety of functions, including spatial analysis, surveying, layer control, and visibility. Detailed 3D models obtained by drones have represented the campus infrastructure with high accuracy. The integration of BIM and GIS systems plays a critical role in enabling semantic queries and testing emergency scenarios. Ultimately, interdisciplinary data generation and management have yielded significant gains in sustainability and operational efficiency, and the digital twin-based smart campus model has provided a transparent, scalable, and integrated framework for university management and scientific research.*

**Keywords:** Smart campus, Digital twin, 3D Tiles, CesiumJS, GIS BIM integration, PostGIS, ITU

## 1 Giriş

Dijitalleşme ve bilgi teknolojilerindeki hızlı gelişim, eğitim kurumlarının yönetim ve operasyon süreçlerinde yenilikçi yaklaşımları zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün merkezinde, fiziksel ve dijital altyapıların bütünlük biçimde yönetimini hedefleyen akıllı kampüs kavramı yer almaktadır. Akıllı kampüsler; Nesnelerin İnterneti (IoT), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve yapay zekâ (YZ) gibi teknolojilerin bütünlük kullanımına dayalı, enerji verimliliği yüksek ve kullanıcı odaklı sistemlerdir. Silva ve arkadaşları (2018), bu tür akıllı altyapıların sensör ağları, veri analitiği ve sürdürülebilir şehircilik ilkeleriyle benzer biçimde kampüs ölçeğinde de uygulanabileceğini; bu sayede hem çevresel etkilerin azaltılabileceğini hem de kaynak kullanımının optimize edilebileceğini belirtmiştir. Bu sistemler, bina yönetimi, enerji tüketimi, güvenlik ve çevresel performans gibi kampüs bileşenlerinin mekânsal temsiller üzerinden bütüncül biçimde izlenmesini sağlar (Gritsenko et al., 2020).

Günümüzde akıllı kampüsler sadece veri toplama ve izleme ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda çeşitli sensörler ve otomasyon teknolojileriyle gerçek zamanlı karar destek sistemlerini de devreye almaktadır. IoT sensörleri sayesinde öğrenci ve personel hareketleri, ortam sıcaklığı, hava kalitesi, aydınlatma, su kullanımı ve atık yönetimi gibi pek çok

\* Sorumlu Yazar: Serdar SAKALLI

Tel: +90 (507) 895 37 39 E-posta: sakalli20@itu.edu.tr

parametre anlık olarak izlenebilmekte, bu veriler yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek optimum kaynak kullanımı sağlanmaktadır. Örneğin, binaların enerji tüketimi analiz edilerek gereksiz harcamalar önceden tespit edilip önlenilmekte, bakım ve onarım süreçleri ise arıza oluşmadan planlanabilmektedir. Ayrıca, akıllı güvenlik sistemleri ile kampüs genelinde acil durumlara hızlı müdahale edilebilmekte, kampüs sakinlerinin güvenliği daha etkin biçimde sağlanmaktadır.

Akıllı kampüslerin bir diğer önemli yararı ise sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunmasıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, su tasarrufu uygulamaları ve karbon ayak izinin azaltılması gibi çevresel öncelikler, dijital ikiz ve CBS-BIM entegrasyonu sayesinde daha verimli yönetilebilmektedir. Özellikle üniversite yönetimleri, elde edilen detaylı mekânsal ve operasyonel verilerle sürdürülebilirlik stratejileri geliştirerek hem maliyetleri azaltmakta hem de çevresel etkiyi minimize etmektedir. Tüm bu dijital dönüşüm süreçleri, öğrencilere ve akademik personele daha konforlu, güvenli ve yenilikçi bir öğrenme-yaşam ortamı sunmakta; kampüslerin geleceğe hazırlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sonuçta, dijitalleşmenin sunduğu imkânlar sayesinde eğitim kurumları, akıllı kampüs modelleriyle hem etkili yönetim ve operasyonel verimlilik elde etmekte hem de çevre dostu, sürdürülebilir ve kullanıcı odaklı bir kampüs vizyonuna doğru emin adımlarla ilerlemektedir. Bu dönüşüm, üniversitelerin sadece akademik araştırma ve eğitimde değil, aynı zamanda şehircilik ve toplumsal kalkınma süreçlerinde de öncü rol üstlenmesine olanak tanımaktadır.

Akıllı kampüslerin temel bileşenlerinden biri olan dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel varlıkların dijital ortamda modellenmesiyle karar destek süreçlerinin hızlanmasına ve kaynak kullanımının optimize edilmesine olanak tanır. Bu yaklaşım sayesinde kampüs sınırları içerisindeki binalar, altyapı ağları, yeşil alanlar ve diğer tüm varlıklar, gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve yönetilebilir hale gelir. Özellikle kampüs yönetimi, bakım planlaması ve güvenlik uygulamalarında dijital ikiz teknolojisi, yöneticilere anlık durum analizi ve öngörülse değerlendirme imkânı sunar. Silva vd. (2018), IoT tabanlı enerji yönetim sistemlerinin sensör verileri aracılığıyla tüketim kalıplarını analiz ettiğini, böylece enerji kullanımının optimize edilmesi ve karbon salınımının azaltılmasında önemli bir potansiyel sunduğunu belirtmektedir. Bu yaklaşım, kampüs ölçeğinde dijital ikiz modelleriyle birleştiğinde, olası arızaların veya kaynak israfının önceden tespit edilmesine ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik önlemlerin zamanında alınmasına olanak tanır. Enerji verimliliğini artırmak, çevresel etkileri azaltmak ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını sağlamak için dijital ikizlerin sunduğu veri odaklı analizlerden yararlanılmaktadır (Silva vd., 2018).

CBS tabanlı veri yönetimi, akıllı kampüslerin en önemli yapı taşlarından biridir (Yomralıoğlu, 2000). CBS'nin sunduğu konumsal/mekânsal analiz, katmanlı haritalama ve dinamik görselleştirme olanakları, kampüsün binalarını, yollarını, açık alanlarını ve altyapı ağlarını dijital ortamda detaylı olarak modellemeyi ve yönetmeyi mümkün kılar. Gritsenko vd. (2020), bu CBS platformlarının kampüs altyapısının dijital ikiz benzeri yapılarla bütünleşmesini destekleyerek mekânsal analiz süreçlerini optimize ettiğini ve altyapı planlamasından kaynak kullanımına kadar birçok unsuru gerçek zamanlı olarak entegre ettiğini göstermiştir. Abadia & Smarsly (2022) ise, CBS-IoT entegrasyonunun mekânsal planlama ve kullanıcı hareketlerinin izlenmesinde stratejik katkılar sunduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, IoT sensörlerinden toplanan anlık verilerin CBS ortamında işlenmesiyle kullanıcı yoğunluğu, enerji tüketimi, su kullanımı, aydınlatma ve güvenlik gibi birçok parametre eşzamanlı olarak izlenebilir. Ayrıca, acil durum senaryolarının test edilmesi, kaynak dağılımının optimizasyonu ve kampüs genelinde operasyonel verimliliğin artırılması için CBS ile entegre edilmiş dijital ikiz modeli kritik öneme sahiptir. Tüm bu teknolojik altyapı, yöneticilere veri odaklı karar alma süreçlerinde esneklik ve hız kazandırırken, kampüs sakinlerine de daha konforlu, güvenli ve sürdürülebilir bir yaşam alanı sunar.

Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen “Akıllı Kampüs Tasarımı ve Uygulaması: İTÜ Modeli” (MDA-2024-45565) kodlu BAP-DAP Projesi kapsamında İTÜ- Ayazağa Kampüsü'nün üstyapı bileşenlerine odaklanılarak CBS tabanlı bir sistem üzerinde üç boyutlu dijital ikiz modeli geliştirilmiştir. Mimari CAD çizimler, drone görüntüleri ve idari dokümanlardan elde edilen veriler coğrafi referanslama süreçleriyle 2B ve 3B ortamlarda modellenmiş; CesiumJS tabanlı WebCBS platformuna entegre edilerek kullanıcıların coğrafi verilere etkileşimli biçimde erişimi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, dijital ikiz yaklaşımının kampüs ölçeğinde CBS tabanlı veri yönetimiyle bütünleşik biçimde çalışabileceğini göstermekte ve gelecekteki akıllı kampüs uygulamaları için referans niteliğinde bir altyapı önermektedir.

## 2 Kavramsal Çerçeve

### 2.1 Akıllı Şehir Bağlamında Akıllı Kampüs Kavramları

Akıllı şehir kavramı, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kentlerin enerji verimliliği, güvenlik ve sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleşik biçimde kullanılmasını ifade eder (Silva vd., 2018). Bu yaklaşım, fiziksel altyapıların dijital olarak izlenmesi ve yönetilmesi sayesinde kentsel yaşam kalitesini artırmayı amaçlar. Akıllı şehirlerde, sensör ağları, bulut tabanlı veri yönetimi ve yapay zekâ ile desteklenen karar destek mekanizmaları, trafik yönetiminden çevre izlemeye, kamu güvenliğinden enerji kullanımına kadar birçok alanda etkin rol oynar. Bu bütünsel dijitalleşme, şehir sakinlerinin günlük yaşamını kolaylaştırırken, kaynakların daha etkin ve sürdürülebilir biçimde kullanılmasını sağlar.

Akıllı kampüs ise akıllı şehir vizyonunun daha küçük ölçekli, odaklanmış bir yansıması olarak üniversite yerleşkelerinde uygulanır (Li vd., 2023). Bu yaklaşım, IoT, yapay zekâ ve büyük veri analitiği aracılığıyla öğrenci ve personel deneyimini merkeze alan, dinamik olarak kendini optimize edebilen bir dijital altyapı ortaya koyar (Li vd., 2023).

Üniversiteler, bu kapsamda sadece akademik ve sosyal alanların yönetimiyle sınırlı kalmayıp, barınma, ulaşım, altyapı ve güvenlik gibi farklı süreçleri de kapsayan bir dijital ekosistem oluştururlar. Akıllı kampüsler, CBS ve IoT gibi teknolojiler aracılığıyla yapıların, açık alanların ve altyapı bileşenlerinin dijitalleştirilmesini sağlar (Gritsenko vd., 2020). Böylece, örneğin bir binanın enerji tüketimi anlık olarak izlenebilir, su ve atık yönetimi optimize edilebilir, kullanıcı yoğunluğu ve hareketliliği analiz edilebilir; aynı zamanda bu veriler yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek karar destek süreçleri geliştirilebilir (Li vd., 2023).

Bu sistemler, CBS tabanlı mekânsal analizlerle kampüsün mevcut durumunu haritalandırırken; IoT sensörlerinden gelen veriler sayesinde ortam sıcaklığı, hava kalitesi, aydınlatma ve güvenlik gibi parametreler gerçek zamanlı olarak izlenir. Bu veri altyapısı üzerinde yapılan analizler, yönetim süreçlerinin, enerji kullanımı ve kullanıcı deneyiminin bütüncül biçimde optimize edilmesine imkân tanır (Abadia vd., 2022). Akıllı kampüsler, aynı zamanda akıllı şehirlerin mikro ölçekteki laboratuvarları olarak değerlendirilir. Üniversite kampüsleri, teknolojik uygulamaların test edildiği ve yaygınlaştırılmadan önce olgunlaştırıldığı pilot alanlar olarak öne çıkar.

Özellikle dijital ikiz yaklaşımı ve CBS–BIM entegrasyonu ile birlikte, kampüsün üç boyutlu bir dijital modelinin oluşturulması, bakım ve onarım faaliyetlerinden acil durum senaryolarına kadar birçok sürecin daha verimli ve hızlı yönetilmesini sağlar. IoT sensörlerinden gelen verilerin CBS ortamında analiz edilmesi, kullanıcı yoğunluğu, enerji tüketimi ve güvenlik senaryoları gibi konularda öngörülse yönetim stratejileri geliştirilmesine imkân tanır. Bu sayede, kampüs yöneticileri kaynak kullanımını optimize edebilir, olası arızaları önceden tespit edebilir ve sürdürülebilirlik hedeflerine daha etkin şekilde ulaşabilirler.

Şekil 1’de gösterildiği gibi, İTÜ Akıllı Kampüs modelinde dijital ikiz teknolojisi, CBS–BIM entegrasyonu ve IoT tabanlı yönetim bileşenleri bir araya getirilerek kampüsün sürdürülebilirlik, güvenlik, enerji verimliliği ve kullanıcı deneyimi gibi temel amaçları desteklenmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, kampüsün hem operasyonel süreçlerinde hem de stratejik planlamada veri odaklı karar alma imkânı sunar. Sonuçta akıllı kampüsler, veri odaklı yönetişimin ve dijital ikiz yaklaşımının uygulanabilirliğini gösteren bir test ortamı niteliğindedir ve akıllı şehir uygulamalarına yol gösterici bir örnek teşkil eder.



Şekil 1: İTÜ Akıllı Kampüs Kapsam ve Amaçları

## 2.2 Dijital İkiz ve CBS–BIM Entegrasyonu ile Akıllı Kampüs Yönetimi

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel varlıkların çok kaynaklı verilerle dijital ortama aktarılmasını ve bu dijital temsiller üzerinden çeşitli analizlerin yapılmasını sağlayan yenilikçi bir yaklaşımdır. Özellikle kampüs ölçeğinde, IoT sensörlerinden gelen gerçek zamanlı verilerin CBS katmanlarıyla entegre edilmesi, binalar, altyapı ağları, yeşil alanlar ve çevresel parametrelerin eşzamanlı yönetimini mümkün kılar. Gritsenko vd. (2020) bu entegrasyonun kampüs içi karar destek sistemlerinde zamanlı analiz ve simülasyon olanağı yarattığını ve yöneticilere operasyonel süreçlerde öngörücü yönetim imkânı sunduğunu göstermektedir. Dijital ikizlerin etkinliğini artırmak için CBS ve BIM entegrasyonu kritik bir öneme sahiptir. CBS, konumsal analiz ve görselleştirme imkânı sunarken; BIM ise nesne tabanlı modelleme ile yapısal detayların yönetimini sağlar.

CBS ve BIM teknolojilerinin bütünleşmesi, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin ortak bir altyapıda toplanarak kampüsün üç boyutlu dijital ikizinin oluşturulmasına imkân tanır. Bu sayede, enerji planlama süreçleri, bakım faaliyetleri, acil durum senaryoları ve kaynak yönetimi gibi operasyonel süreçler bütüncül biçimde izlenebilir ve optimize edilebilir.

*Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve CesiumJS ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği*

Silva vd. (2018), bu tür veri entegrasyonlarının enerji tüketimini azaltma, karbon ayak izini düşürme ve kaynak kullanım verimliliğini artırma konularında önemli katkılar sunduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, kampüsün fiziksel ve dijital altyapısı arasında sürekli veri akışı sağlanarak olası arızalar ve kaynak israfı erken aşamada tespit edilebilir. Böylece, yöneticiler sürdürülebilirlik hedeflerine daha etkin biçimde ulaşırken, kullanıcı deneyimi de konfor, güvenlik ve çevresel farkındalık açısından sürekli iyileştirilebilir.

Ayrıca, IoT sensörlerinden gelen hassas veriler (örneğin hareketlilik, enerji kullanımı, su tüketimi) CBS katmanlarına entegre edilerek kampüs içindeki binaların, yolların, açık alanların ve otoparkların dijital haritaları otomatik olarak güncellenmektedir. Gritsenko vd. (2020) bu sistemin kampüs yönetim süreçlerinde koordinasyon, bakım planlaması ve kullanıcı yoğunluğu analizinde etkin bir platform sunduğunu doğrulamaktadır. IoT tabanlı sensör ağlarından elde edilen anlık veriler, kullanıcı yoğunluğu, enerji tüketimi ve çevresel koşulların sürekli izlenmesini sağlar. Abadia vd. (2022) bu verilerin operasyonel süreçlerde veri odaklı karar desteği sunduğunu belirtirken, Silva vd. (2018) enerji tüketiminin optimizasyonu, güvenlik izleme sistemlerinin geliştirilmesi ve iç mekân konforunun artırılmasında IoT'nin kritik bir rol oynadığını vurgulamıştır. Böylece, kampüs genelinde hem kullanıcı deneyimi hem de enerji verimliliği açısından sürdürülebilir bir yönetim modeli oluşturulabilir. Ancak, bu teknolojik entegrasyonlarda veri güvenliği, mahremiyet ve ölçeklenebilirlik gibi zorluklar öne çıkmaktadır (Gharaibeh vd., 2017). Bu nedenle, OGC SensorThings API gibi açık standartlara dayalı veri mimarileri ve uçtan uca şifreleme mekanizmalarının kullanılması önerilmektedir (Abadia vd., 2022).

### 2.3 Sürdürülebilirlik ve Akıllı Kampüs Uygulamaları

Sürdürülebilirlik, akıllı kampüs uygulamalarında çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların bir arada ele alınmasını öngören kapsamlı ve bütüncül bir hedeftir. Bu yaklaşım, kampüslerin yalnızca enerji ve kaynak kullanımını optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda toplumsal refahı ve ekonomik verimliliği de gözetmesini sağlar. Çevresel sürdürülebilirlik kapsamında, IoT tabanlı enerji yönetimi sistemleri binaların ve altyapının enerji tüketim kalıplarını detaylı şekilde analiz edebilmektedir. Bu analizler sayesinde, gereksiz enerji kullanımı önlenirken, karbon ayak izinin azaltılması yönünde somut adımlar atılmaktadır. Ayrıca, kampüslerde yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin güneş panelleri veya jeotermal sistemler) entegrasyonu kolaylaşmakta; enerji üretimi ve tüketimi gerçek zamanlı izlenerek sürdürülebilir enerji yönetimi sağlanmaktadır (Silva vd., 2018). Bunun yanı sıra, su ve atık yönetiminde IoT sensörlerinin kullanımı, kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sunar. Abadia vd (2022) tarafından ortaya konduğu üzere, sensörler sayesinde su kaçakları anında tespit edilebilir, atık toplama ve bertaraf süreçleri optimize edilerek çevre üzerindeki olumsuz etkiler en aza indirgenir. Böylece, kampüs ölçeğinde doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilir kullanımının sağlanması mümkün olmaktadır.

Akıllı kampüslerin sosyal sürdürülebilirlik boyutu, yalnızca çevresel ve ekonomik göstergelerle değil, kullanıcı refahı ve kapsayıcılıkla da ilgilidir. Angelidou (2016), akıllı şehir stratejilerinde bireylerin yaşam kalitesini artıran sosyal politikaların teknolojik çözümlerle desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım doğrultusunda, kampüslerde erişilebilirlik, kullanıcı katılımı ve açık alanların etkin kullanımı, dijital teknolojiler aracılığıyla sosyal refahı güçlendiren temel unsurlar hâline gelmiştir. Özellikle engelli bireylerin kampüs içinde rahatça hareket edebilmeleri, derslik ve sosyal alanlara kolayca erişebilmeleri için dijital çözümler devreye alınmakta; bu uygulamalar, kullanıcıların kampüs yaşamına aktif katılımını teşvik ederek daha kapsayıcı ve insan merkezli bir öğrenme ortamı oluşturmaktadır (Angelidou, 2016).

Ekonomik sürdürülebilirlik açısından, kampüslerde dijitalleşme ve IoT tabanlı otomasyon sistemleri operasyonel maliyetlerin azalmasına doğrudan katkıda bulunur. Gharaibeh vd. (2017), akıllı şehirlerde sensör tabanlı veri yönetimi ve otomasyon sistemlerinin enerji, su ve bakım giderlerini önemli ölçüde düşürdüğünü, bu sayede elde edilen kaynakların eğitim ve araştırma faaliyetlerine yönlendirilebildiğini vurgulamıştır. Bununla birlikte, aynı çalışma IoT tabanlı veri toplama süreçlerinde kişisel verilerin korunması, güvenlik açıklarının giderilmesi ve güvenilir veri yönetimi altyapılarının oluşturulmasının kritik önemine dikkat çekmektedir. Bu yaklaşım, yalnızca ekonomik verimlilik sağlamamakta; aynı zamanda dijital kampüs ortamlarında veri gizliliğini güvence altına alarak sürdürülebilir ve güvenilir bir yönetim modeli geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Gharaibeh vd., 2017).

Tüm bunların neticesinde sürdürülebilir akıllı kampüs modelleri, yalnızca çevreye duyarlı uygulamalarla sınırlı kalmayıp; toplumsal kapsayıcılığı güçlendiren, kullanıcı deneyimini iyileştiren ve ekonomik açıdan uzun vadeli dengeyi sağlayan bütünlük sistemleri olarak konumlanmaktadır. Bu çok boyutlu yaklaşım, üniversite kampüslerinin gelecekte daha yaşanabilir, verimli ve dirençli alanlar haline gelmesine öncülük etmektedir. Ayrıca, yenilikçi dijital çözümler ve teknolojik entegrasyonlar sayesinde kampüsler hem çevresel hem de sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği bir arada sağlayarak, tüm paydaşlar için daha güvenli, erişilebilir ve kaliteli bir yaşam ortamı sunma potansiyeline ulaşmaktadır.

## 3 Dijital İkiz Altılığının Oluşturulması Uygulaması: İTÜ- Ayazağa Kampüs örneği

### 3.1 Çalışma Alanı ve Veri Mimarisi Tasarımı

CBS tabanlı dijital ikiz uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi'nin ana yerleşkesi olan Ayazağa Kampüsü'nde gerçekleştirilmiştir. İstanbul ili Sarıyer ilçesinde yer alan ve yaklaşık 1.200 dekarlık alana yayılan kampüs; çok işlevli yapısı, farklı dönemlerde inşa edilmiş binaları ve karmaşık altyapı ağıyla bu çalışmanın uygulanması için uygun bir örnek alandır. Farklı dönemlerde inşa edilen yapıların çeşitliliği, mekânsal veri yönetiminde tutarsızlıklar ve üç boyutlu

görselleştirme sınırlılıkları gibi sorunları beraberinde getirmektedir ve bu durum kampüs yönetiminde bütüncül bir dijital çözüm ihtiyacını doğurmaktadır. Bu nedenle, üstyapı (bina, yol, açık alan vb.) ve altyapı (elektrik, su, doğalgaz, fiber, kanalizasyon vb.) verileri toplanarak CBS tabanlı bir sistemde bütünleştirilmiş ve üç boyutlu bir dijital ikiz modeli oluşturulmuştur. Böylece, kampüs genelinde bakım, enerji planlama ve acil durum yönetimi gibi operasyonel süreçlerin daha etkin ve hızlı bir şekilde yürütülmesi sağlanmıştır.

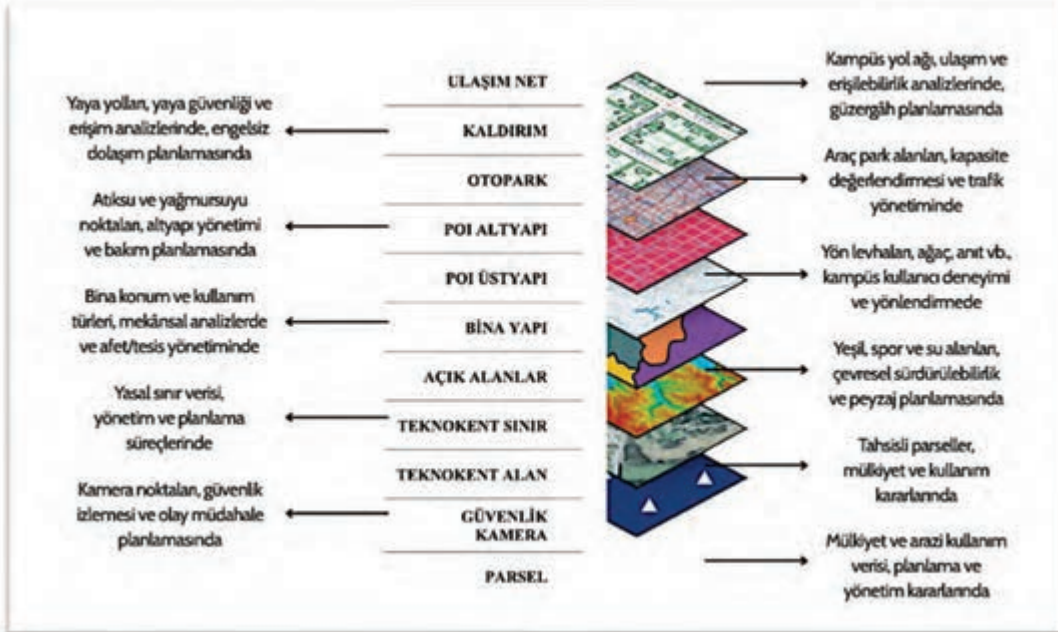
Akıllı kampüs projelerinde mekânsal verilerin bütüncül biçimde yönetilmesi gereklidir. Bu kapsamda, veri bütünlüğünü ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla PostgreSQL tabanlı bir veritabanı kurulmuş, mekânsal işlemler için PostGIS uzantısı kullanılmış ve QGIS yazılımı ile entegrasyon sağlanmıştır. Mekânsal veri setleri, İTÜ Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı arşivleri, saha çalışmaları ve OpenStreetMap gibi açık veri kaynaklarından elde edilmiştir. Ön işleme sürecinde veriler temizlenmiş, standartlaştırılmış ve “altyapı” ile “üstyapı” olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Bu ayrım, kampüs bileşenlerinin yönetim ve görselleştirme süreçlerinde bütünlük ve şeffaflık sağlamıştır. Tüm coğrafi veri üretimi ve yönetimi, ulusal standartlara uygun şekilde Türkiye Ulusal Referans Sistemi TUREF/TM30 (EPSG:5254) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Kampüsün topografyasının dijitalleştirilmesi amacıyla, DJI Mavic 2 Pro İHA ile fotogrametrik çekimler yapılmıştır. 79 yer kontrol noktası tesis edilerek TUREF (EPSG:5254) sisteminde ölçülmüş, uçuşlar 60 m yükseklik ve %80-%60 bindirme oranlarıyla yürütülmüştür. Yaklaşık 4.000 görüntü DJI Terra yazılımında işlenmiş ve “Structure from Motion (SfM)” algoritmasıyla yoğun nokta bulutu, sayısal yükseklik modeli (SYM) ve ortofoto üretilmiştir. Ürün doğruluk analizleri yatay  $\pm 4$  cm, düşey  $\pm 10$  cm değerleriyle yüksek konumsal hassasiyet sağlamıştır. Elde edilen 6 cm çözünürlüklü ortofoto ve 11 cm çözünürlüklü SYM, kampüs modelinde temel altlık verisi olarak kullanılmıştır.

### 3.2 Coğrafi Veritabanı Tasarımı ve Veri Katmanlarının Modellenmesi

Kampüsün dijital ikiz altyapısını destekleyecek mekânsal veritabanı, katmanların semantik tutarlılığını ve analiz yeteneğini koruyacak biçimde modellenmiştir. Çalışmada oluşturulan veritabanı şeması; konum, geometri tipi, tematik kategori ve ilişkilendirme özniteliklerine dayalı bir yapı üzerine kurulmuştur. Bu yapıda her katman, kendi geometrik niteliğine uygun olarak nokta, çizgi veya poligon formunda tanımlanmış, tüm öznitelik alanları Türkçe karakter desteği, uzunluk birimleri ve tip kısıtlamaları açısından standartlaştırılmıştır. Kampüs bileşenlerinin hem mekânsal hem anlamsal bütünlüğü korunmuş, sorgulama performansı ve veri bütünlüğü optimize edilmiştir.

Veritabanı, kampüsün işlevsel yapısını yansıtan 18 tematik katmandan oluşmaktadır (**Şekil 2**). Üstyapı katmanları; bina türü, kullanım amacı, inşaa yılı, kat sayısı ve yapı malzemesi gibi öznitelikleri içeren bina katmanını; zemin kaplaması, bitki örtüsü ve işlev sınıfı bilgilerini barındıran açık alan katmanını; otopark kapasitesi ve tür bilgilerini içeren otopark katmanını; yapı, anıt, durak, güvenlik noktası gibi odakları temsil eden üstyapı noktaları ve güvenlik kamerası katmanlarını kapsamaktadır (Sakallı vd., 2025). Altyapı katmanları ise elektrik, fiber, doğalgaz, ısıtma, sulama, atık su, yağmur suyu ve içme suyu ağlarının güzergâhlarını, çap, malzeme, bağlantı türü, debi kapasitesi ve işletim durumu gibi teknik özniteliklerle tanımlanmaktadır. Ayrıca ulaşım ve kaldırım katmanları, güzergâh genişliği, malzeme türü, yön bilgisi ve kullanım sınıfı gibi verilerle zenginleştirilmiştir. Bu bütünlük yapı 2B/3B analizlerde kullanılacak bir temel veri mimarisi oluşturmuş; görselleştirme, sorgulama ve entegrasyon süreçleri için sürdürülebilir bir altlık sağlamıştır.



Şekil 2: Proje Kapsamında Oluşturulan Öne Çıkan Coğrafi Veri Katmanları

*Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve CesiumJS ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüs Örneği*

#### 4 Dijital İkiz Altlığının Web Ortamında Sunumu

Geliştirilen sistem, İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü'nün dijital ikizinin web ortamında etkileşimli biçimde sunulmasını sağlamaktadır. Mimari yapı; 3B model görselleştirme, 2B/3B veri yönetimi ve sorgulama ile BIM-CBS bütünleşmesine dayalı semantik filtreleme olmak üzere üç ana modül üzerine kurulmuştur. Sistem; PostgreSQL/PostGIS veritabanı, FME tabanlı veri dönüştürme akışları ve CesiumJS-React arayüzü arasında kurulan bütünlük bir veri iletişimi mimarisi ile çalışmaktadır. Bu sayede, kampüs verileri hem geometrik hem de anlamsal katmanlarıyla erişilebilir hâle getirilmiş, kullanıcılar tarafından tarayıcı üzerinden üç boyutlu olarak incelenebilir, analiz edilebilir ve sorgulanabilir bir yapıya dönüştürülmüştür.

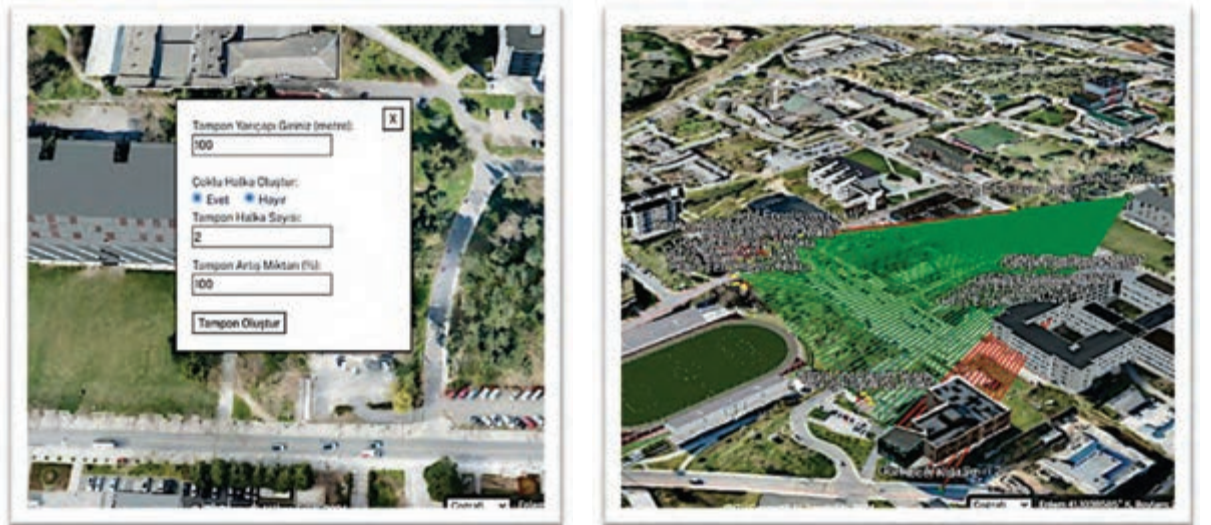
##### 4.1 3B Model Görselleştirme ve Analiz Modülü

Bu modül, kampüsün “.fbx” formatındaki bina modellerinin 3D Tiles formatına dönüştürülmesi ve CesiumJS tabanlı arayüzde dinamik olarak görüntülenmesini sağlamaktadır (**Şekil 3**). Her model, saydamlık ve görünürlük ayarları kullanıcı tarafından kontrol edilebilir şekilde tasarlanmış, katman bazlı şeffaflık yönetimi ile üstyapı ve altyapı bileşenlerinin birlikte görüntülenmesi mümkün kılınmıştır.



Şekil 3: Yapı Modellerinin 3D Tiles Formatında WebCBS Ortamında Sunumu

Arayüz üzerinde görüş hattı (Line of Sight), görüş alanı (Viewshed) ve tampon bölge (Buffer) (**Şekil 4**) analizleri gerçekleştirilebilmekte; bu analizler kampüs güvenliği, yapılaşma planlaması ve erişilebilirlik değerlendirmelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca ölçüm araçları sayesinde kullanıcılar mesafe, alan ve yükseklik değerlerini doğrudan 3B model üzerinden hesaplayabilmektedir. Bu araçlar, sahne üzerindeki objelerin seçimiyle aktifleşmekte ve sonuçlar hem görsel hem sayısal çıktı olarak gösterilmektedir. Bu modül, dijital ikiz modelini yalnızca bir görselleştirme ortamı olmaktan çıkarıp, mekânsal analiz ve karar destek platformu hâline getirmektedir.



Şekil 4: Tampon Bölge ve Görüş Alanı Coğrafi Analiz Fonksiyonları

## 4.2 2B/3B Veri Yönetimi ve Sorgulama Arayüzü

Kampüsün iki ve üç boyutlu verileri PostGIS veritabanında tematik katmanlar hâlinde organize edilmiştir. Bu katmanlar, REST API aracılığıyla React/CesiumJS arayüzüne dinamik olarak aktarılmakta; kullanıcılar bu arayüzde yer alan katman paneli üzerinden görünürlük, öznetelik ve renk seçeneklerini kontrol edebilmektedir (**Şekil 5**). Her katman, geometri türüne göre (nokta, çizgi, poligon) sınıflandırılmış ve veri bütünlüğü korunarak PostgreSQL tarafında yönetilmektedir.

Sorgulama paneli, kullanıcıların doğrudan veritabanı üzerinde öznetelik tabanlı filtreleme yapmasını mümkün kılar. Örneğin, kampüsteki binalar kat sayısına, kullanım amacına veya enerji altyapısı türüne; açık alan olarak tanımlanan bölgeler ise yüzölçümlerine göre sorgulanabilir (**Şekil 6**), bu sorguların sonuçları harita üzerinde vurgulanmış bir şekilde gösterilir. Arayüzdeki sorgu ve katman modülleri birlikte çalışarak, kullanıcıya yüksek etkileşimli bir veri inceleme deneyimi sunmaktadır. Bu yapı, klasik CBS uygulamalarından farklı olarak, 2B tematik haritaların 3B sahneyle bütünleşmesini ve analizlerin doğrudan tarayıcı tabanlı yürütülmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 5: Kampüs Coğrafi Veri Katmanlarının Öznetelikleriyle Birlikte WebCBS Ortamında Sunumu



Şekil 6: Coğrafi Verilerin Sorgu Butonları Aracılığıyla Filtrelenmesi

## 4.3 BIM-CBS Entegrasyonu Pilot Uygulaması

İTÜ Ayazağa Kampüsü'nde yer alan bir lojman binası, BIM-CBS entegrasyonunun test edilmesi için örnek alınmıştır (Güler, 2022; Öztürk vd., 2025). Bu çalışma kapsamında seçilen lojman binası hem üstyapı hem de altyapı bileşenlerinin bütüncül olarak modellenmesi ve analiz edilmesi açısından pilot uygulama olarak değerlendirilmiştir. Binaya ait IFC 2x3 modeli, FME Workbench ortamında hassas koordinatlarla jeoreferanslanmış, mimari ve yapısal özneteliklerin uyumlu

*Dijital İkiz Temelli Akıllı Kampüs Modelinin Geliştirilmesi ve CesiumJS ile Sunumu: İTÜ-Ayazağa Kampüsü Örneği*

şekilde düzenlenmesi sağlanmış, ardından 3D Tiles formatına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sürecinde, IFC modelinin katmanları ve öznitelikleri kaybolmadan korunmuş; geometrik detayların yanı sıra semantik ilişkiler de modelde tutulmuştur. Böylece, sadece görsel bir 3B temsil değil, aynı zamanda veri tabanlı analizlere olanak tanıyan zenginleştirilmiş bir dijital ikiz elde edilmiştir (Guler vd., 2022).

Elde edilen model, CesiumJS tabanlı web arayüzüne entegre edilerek, kullanıcıların farklı semantik düzeylerde sorgulama ve filtreleme yapabilmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Kullanıcılar, arayüzde yer alan paneller üzerinden IFC standardına uygun BuildingElement (yapı elemanı), Storey (kat), Zone (bölge) gibi özniteliklere göre detaylı sorgulamalar gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, TUCBS Tapu Kadastro Veri Teması ile uyumlu TR\_PropertySet alanları da sisteme entegre edilmiştir (**Şekil 7**); böylece kullanıcılar hem ulusal hem de uluslararası standartlara uygun veri temaları üzerinden arama yapabilmekte, tapu ve kadastroya ilişkin öznitelikler ile bina öğeleri arasındaki ilişkileri görselleştirebilmektedir (Sakallı vd., 2025).

Arayüzdeki bu semantik filtreleme ve sorgulama özellikleri, kampüs yönetiminde karar destek süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Örneğin, bina katlarının kullanım amaçlarına, bağımsız bölümlerin enerji altyapısı türlerine veya tapu bilgilerinin güncelliğine göre tematik analizler yapılabilmektedir. Böylece, geometrik temsilin ötesinde, yapı bileşenleri arasındaki anlamsal ilişkiler standartlara dayalı biçimde görünür hâle getirilmiş; ulusal standartlarca tanımlanmış veri temalarıyla uyumlu, sürdürülebilir ve genişletilebilir bir BIM-CBS entegrasyonu hayata geçirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, kampüs ölçeğinde veri bütünlüğü korunmuş, birlikte çalışabilirlik artırılmış ve dijital ikiz tabanlı yönetim süreçlerinde yeni bir sayfa açılmıştır.



**Şekil 7:** IFC2x3 Bina Modelinin Farklı Özniteliklere Göre WebCBS Ortamında Filtrelenmesi

## 5 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü örneğinde dijital ikiz tabanlı akıllı kampüs modeli tasarlanmış, coğrafi veri yönetimi, üç boyutlu modelleme ve semantik bütünleşme süreçleri disiplinler arası bir yaklaşımla bütünleştirilmiştir. Kampüs yönetiminde sıklıkla karşılaşılan dağınık veri yapıları, manuel süreçler ve düşük birlikte çalışabilirlik düzeyleri, bu çalışmada geliştirilen CBS-BIM entegrasyonlu veri mimarisi sayesinde önemli ölçüde sadeleştirilmiş ve optimize edilmiştir. Geliştirilen model, yüksek çözünürlüklü drone fotogrametrisi, CAD-BIM veri dönüşümü, QGIS tabanlı çok katmanlı veri modeli ve PostgreSQL/PostGIS altyapısı üzerinde inşa edilmiştir. Bu yapı, hem üstyapı hem altyapı bileşenlerinin geometrik ve semantik düzeyde bütüncül yönetimini mümkün kılmıştır.

CesiumJS tabanlı web arayüzü ile geliştirilen sistem, üç boyutlu veri görselleştirmesinin ötesinde, karar destek, semantik sorgulama ve etkileşimli analiz işlevleriyle kampüs yönetimine yeni bir boyut kazandırmıştır. Görüş hattı, tampon bölge, yükseklik ölçümü gibi mekânsal analiz araçları, kullanıcıların kampüs altyapısına ilişkin karar alma süreçlerini doğrudan desteklemiştir. Ayrıca BIM tabanlı IFC modellerinin CBS ortamında jeoreferanslanmasıyla, binalara ait kat, bölüm, kullanım amacı ve mülkiyet ilişkileri gibi öznitelikler semantik düzeyde analiz edilebilir hale getirilmiştir. Böylelikle, yalnızca geometrik temsiller değil, anlamsal ilişkiler de yönetilebilir bir veri yapısı içinde sunulmuştur. Bu yaklaşım, kampüs ölçeğinde sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, güvenlik ve operasyonel performansın bütünlük biçimde izlenmesine olanak tanıyan bir dijital ikiz mimarisi oluşturmuştur. Sistem; açık standartlara (OGC, IFC, TUCBS) uyumlu, modüler ve genişletilebilir yapısı sayesinde gerçek zamanlı IoT sensör verileri, enerji izleme sistemleri ve yapay zekâ destekli tahminsel analiz modülleriyle geliştirilmeye uygundur. Bu durum, yalnızca mekânsal yönetim açısından değil, veri güdümlü yönetim ve dijital sürdürülebilirlik açısından da yenilikçi bir örnek teşkil etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma dijital ikiz teknolojisinin üniversite kampüsleri gibi karmaşık mekânsal sistemlerde uygulanabilirliğini ortaya koymuş; akademik ve idari süreçlerde veri temelli karar destek sistemlerinin oluşturulması için güçlü bir çerçeve sunmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmaların, sistemin gerçek zamanlı veri akışlarıyla entegrasyonu, enerji ve çevresel modelleme modüllerinin geliştirilmesi, yapay zekâ tabanlı kestirimci analizlerin eklenmesi gibi yönlerde ilerlemesi beklenmektedir. Böylelikle dijital ikiz temelli akıllı kampüs yaklaşımı, sürdürülebilir kentsel sistemlerin mikro ölçekteki öncülü olarak, mekânsal bilişim ve yönetim alanında stratejik bir paradigma değişimini temsil edecektir.

## 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) Birimi’ne ve proje yöneticisi Prof. Dr. Tahsin Yomralıoğlu’na teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Abadía, J. J. P., & Smarsly, K. (2022). *Internet of Things frameworks for smart city applications—A systematic review*. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2021. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Abadía, J. J. P., Walther, C., Osman, A., & Smarsly, K. (2022). *A systematic survey of Internet of Things frameworks for smart city applications*. **Sustainable Cities and Society**, 83, 103949.
- Angelidou, M. (2016). *Four European smart city strategies*. **International Journal of Social Science Studies**, 4(4), 18–30.
- Gharaibeh, A., Salahuddin, M. A., Hussini, S. J., Khreishah, A., Khalil, I., Guizani, M., & Al-Fuqaha, A. (2017). *Smart cities: A survey on data management, security, and enabling technologies*. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 19(4), 2456–2501.
- Gritsenko, Y. B., Senchenko, P. V., & Kalentiev, K. A. (2020). *Development of a geographic information system for managing university campus*. **2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)**, 1–6
- Guler, D., van Oosterom, P., & Yomralioğlu, 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.
- Güler, D., (2022), *Düşey Mülkiyet Haklarının 3-Boyutlu Yönetimi için Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)-Tabanlı Bütünleşik bir Modelin Geliştirilmesi ve Üç-Parçalı Döngü Yaklaşımı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği ABD, s.1-283, İstanbul.
- Li, N., Palaoag, T. D., Du, H., & Guo, T. (2023). *Design and optimization of smart campus framework based on artificial intelligence*. **Journal of Information Systems Engineering and Management**, 8(3), 23086.
- Öztürk, İ. A., Keleşoğlu, E. A., Tuncer, A., (2025). *BIM-Based Smart Campus Design and Implementation: Case Study of İTÜ Ayazağa 3D-Campus*, İstanbul Technical University, Geomatics Eng, İstanbul, Türkiye.
- Sakallı, S., Yüksel, N., Beytekin, D. S., (2025). *GIS-Based Smart Campus Design And Implementation: Case Study of İTÜ Ayazağa 3D-Campus*, İstanbul Technical University, Geomatics Eng, İstanbul, Türkiye.
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). *Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities*. **Sustainable Cities and Society**, 38, 697–713.
- Yomralıoğlu, T. (2000). *Coğrafi Bilgi Sistemleri: Temel Kavramlar ve Uygulamalar*. 7.Baskı (2015), s.480, ISBN 975-97369-0-X, İber Ofset, İstanbul.



# Vektör Hücresel Otomat Temelli Kentsel Büyüme Modellemesinde Gamma Dağılımı ile Yerel Etki Mesafesinin Belirlenmesi: İstanbul, Berlin ve Madrid

Ahmet Emir YAKUP<sup>1</sup>, İsmail Ercüment AYAZLI<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Hitit Üniversitesi, Osmancık Ömer Derindere Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 19500, Çorum.

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 5800, Sivas.

## Özet

Vektör hücresel otomat algoritması, düzensiz ve heterojen kent formlarını daha gerçekçi şekilde modelleme imkânı sunmaktadır. Bu çalışmada, vektör hücresel otomat modeli çerçevesinde büyüme vektörleri ismini verdiğimiz bir yaklaşımla dinamik komşuluk ilişkileri modellenmiş ve Gamma dağılımı tabanlı yerel etki mesafesi yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, CORINE arazi örtüsü/kullanımı verileri kullanılarak İstanbul, Berlin, Madrid çalışma alanlarında test edilmiştir. Gamma dağılımlı yerel etki mesafesi yaklaşımı, sabit komşuluk yarıçaplarının yerine yerel alana özgü değerlerin kullanılmasına imkân tanımaktadır. Analizler, büyüme vektörleri baz uzunluğu histogramlarının Gamma dağılımına yüksek uyum sağladığını göstermiştir. Elde edilen etki mesafeleri İstanbul için 4299 m, Berlin için 2361 m ve Madrid için 3365 m olarak hesaplanmıştır. Bu farklı değerler, yöntemin ölçeklenebilir ve farklı çalışma alanlarında uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, önerilen yaklaşım kentsel büyüme simülasyonlarında daha gerçekçi uzamsal etkileşimlerin modellenmesine katkı sunmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

Gamma Olasılık Dağılımı, Vektör Hücresel Otomat, Kentsel Büyüme, Mekânsal İstatistik, Coğrafi Bilgi Sistemleri

## Determination of Local Influence Distance Using Gamma Distribution in Vector Cellular Automata-Based Urban Growth Modeling: Istanbul, Berlin, and Madrid

## Abstract

The vector cellular automata algorithm offers the enable to model irregular and heterogeneous urban forms more realistically. In this study, within the framework of the vector cellular automata model, a new approach called growth vectors was developed to model dynamic neighborhood relationships, and a local influence distance method based on the Gamma distribution was introduced. The method was tested in the study areas of Istanbul, Berlin, and Madrid using CORINE land cover/use data. The Gamma-distributed local influence distance approach allows for the use of area-specific values instead of fixed neighborhood radius. The findings show that the histograms of the base lengths of growth vectors highly conform to the Gamma distribution. The calculated influence distances were 4,299 meters for Istanbul, 2,361 meters for Berlin, and 3,365 meters for Madrid. These different values indicate that the method is scalable and applicable across various study areas. In conclusion, the proposed approach contributes to more realistic modeling of spatial interactions in urban growth simulations.

## Keywords

Gamma Distribution, Vector Cellular Automata, Urban Growth, Spatial Statistics, Geographic Information Systems

## 1. Giriş

Kentsel büyüme; nüfus artışı, ekonomik gelişme ve mekânsal planlama dinamiklerinin keşiminde ortaya çıkan karmaşık bir süreçtir. Günümüzde sürdürülebilir şehirleşmenin sağlanabilmesi için, bu sürecin güvenilir bir biçimde tahmin edilmesi ve modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda hücresel otomat (HO) modelleri, farklı uzamsal ve zamansal ölçeklerde kentsel büyümeyi simüle etmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır (Batty, 2007). Özellikle raster tabanlı HO modelleri, piksellerin hücre olarak tanımlanması ve düzenli komşuluk yapıları aracılığıyla dönüşüm kurallarının uygulanması esasına dayanır. Ancak bu yaklaşımlar, düzensiz kent formları ile heterojen arazi örtüsü/kullanım desenlerini temsil etmede çeşitli sınırlılıklar içermektedir (Barreira-González vd., 2015).

Vektör Hücresel Otomat (VHO) modellerinde ise hücreler; kentsel gelişim, planlama ve arazi politikalarının temel birimleri olarak ele alınır. Kentsel büyüme, bu hücrelerin dönüşümleri üzerinden modellenir (Yao vd., 2021). Her bir hücrenin özgün geometrisi olması, geçiş kurallarında komşuluk ilişkilerinin daha esnek ve yerel koşullara uygun şekilde tanımlanmasına olanak tanımaktadır.

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (346) 487 41 28

E-posta: emiryakup@hitit.edu.tr (Ahmet Emir YAKUP), eayazli@cumhuriyet.edu.tr (İsmail Ercüment AYAZLI)

*Vektör Hücresel Otomat Temelli Kentsel Büyüme Modellemesinde Gamma Dağılımı ile Yerel Etki Mesafesinin Belirlenmesi: İstanbul, Berlin ve Madrid*

Son otuz yılda geliştirilen birçok raster tabanlı HO modeli, belirli başarılar sağlamış olsa da, düzensiz geometriler, parsel temelli farklılıklar ve sosyo-ekonomik çeşitlilik karşısında sınırlı kalmıştır. Sabit yarıçaplı komşuluk tanımları, bu tür mekânsal heterojenliği yansıtmakta yetersiz kalmakta ve modelin farklı kentlerdeki performansını düşürmektedir (Moreno vd., 2009). Bu bağlamda yeni ve esnek komşuluk yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Düzensiz coğrafi varlıkların daha gerçekçi temsil edilmesini sağlamak amacıyla, raster yerine vektör tabanlı verilerin kullanılması VHO modellerini ön plana çıkarmıştır. Bu yeni yapı, komşuluk ilişkilerinin daha dinamik şekilde modellenmesini zorunlu kılmaktadır. VHO kapsamında önerilen komşuluk yapılarına örnek olarak Delaunay üçgenlemesi, graflar ve Voronoi poligonları verilebilir (Barreira-González vd., 2019; Moreno vd., 2008; Semboloni, 2000; Shi & Pang, 2000).

Bu çalışmanın amacı, VHO modeli çerçevesinde Gamma dağılımı tabanlı bir yerel etki mesafesi yöntemi geliştirerek, bu yöntemi İstanbul (Türkiye), Madrid (İspanya) ve Berlin (Almanya) şehirlerinde test etmektir. VHO modeli, raster tabanlı modellere kıyasla mekânsal birimleri düzensiz poligonlar olarak tanımlayarak, kent morfolojisinin daha gerçekçi biçimde modellenmesini sağlar. Bu kapsamda geliştirilen büyüme vektörleri (BV) kavramı, arazi örtüsü/kullanımının geometrik temsili üzerinden dinamik komşuluk ilişkilerinin modellenmesini mümkün kılar.

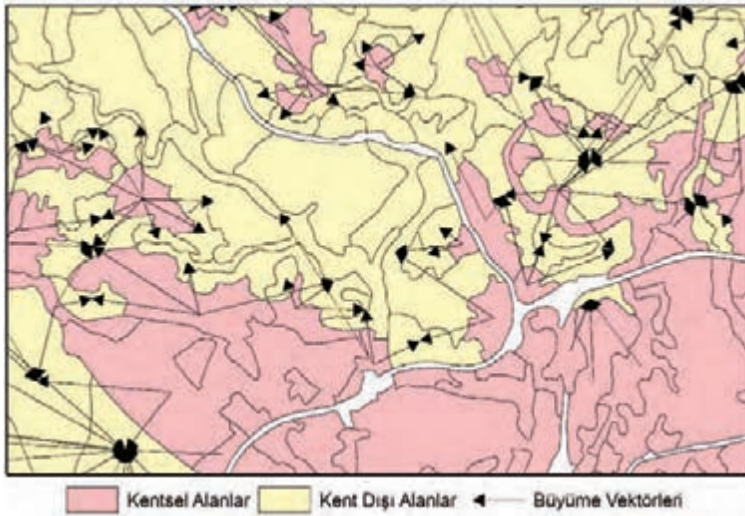
Modelin geçerliliğini test etmek amacıyla seçilen üç Avrupa şehri, hem mekânsal yapı hem de nüfus dinamikleri bakımından farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, geliştirilen yaklaşımın genellenebilirliğini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Çalışmada kullanılan girdi verileri şu şekildedir: CORINE 1. seviye arazi örtüsü verileri (1990, 2000, 2006, 2012, 2018); erişilebilirlik verisi olarak OpenStreetMap (OSM); topografik uygunluk için ise Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu'nun (USGS) EarthExplorer servisi üzerinden temin edilen Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılmıştır (EEA, 2024; OSM, 2025).

Bu çalışmanın özgün katkısı, geçmiş kentleşme süreçlerinde oluşan BV uzunluklarının istatistiksel olarak analiz edilmesi ve bu verilerin Gamma dağılımı ile modellenmesi sayesinde, her bir kente özgü maksimum yerel etki mesafesi değerinin belirlenmesidir. Böylece sabit ve genellenmiş komşuluk yarıçapları yerine, kentin kendi büyüme dinamiklerinden türetilmiş olasılıksal bir mesafe yaklaşımı önerilmektedir.

## 2. Veri ve Yöntem

Çalışmada 1990, 2000, 2006, 2012 ve 2018 yılları için Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından belirlenen standartlar doğrultusunda üretilmiş vektör yapıda CORINE arazi örtüsü/kullanımı verisi kullanılmıştır (EEA, 2016). CORINE veri setinin kapsamlı ve güncel yapısı, bu çalışmanın dayandığı önemli bir veri kaynağını oluşturmaktadır. Arazi örtüsü verisi birinci seviyeden kullanılmakta olup, beş farklı arazi örtüsü tipini içermektedir. Bunlar; kentsel alan, tarım, orman, sulak arazi ve su kütleleridir. 1990 yılına ait CORINE arazi örtüsü verisi modelde çekirdek (başlangıç) yılı temsil etmektedir. 2000, 2006, 2012 ve 2018 yılları modelde kontrol yıllarını oluşturmaktadır.



Şekil 1: Büyüme Vektörleri

Erişebilirlik verileri Open Street Map (OSM) web servisi ve uydu görüntülerinden elde edilmiştir. Erişim verisinde birincil derecede öneme sahip il yolları, devlet yolları ve uluslararası yolların orta çizgisi göz önünde bulundurulmuştur. Topografik uygunluk için ihtiyaç duyulan sayısal yükseklik modeli (SYM) olarak Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar (USGS) kurumunun EarthExplorer web servisinde ücretsiz olarak sunulan SRTM verileri kullanılmıştır.

BV'ler, kentsel büyümeyi simüle eden ve vektör verileri iki boyutlu bir uzaya temsil eden matematiksel araçlardır (Şekil 1). BV'ler, hücre adı verilen çokgenlerin nokta-düğüm yapısına dönüştürülmesiyle oluşturulur. Her düğüm kendi özneliklerini taşır ve komşu düğümler arasında kenarlar oluşturularak bir ağ yapısı oluşturulur. Bu kenarlar, bağlı düğümlerden öznelik bilgilerini ve hesaplanan kenar-etki değerini taşır. Çalışma kapsamında önce her kent için kentleşmeye katkıda bulunan büyüme vektörleri (BV) elde edilmiştir. BV'lerin öklid uzunlukları hesaplanmış ve bu değerler istatistiksel analiz için kullanılmıştır.

Gamma dağılımı, sürekli olasılık dağılımlarından biri olup özellikle pozitif ve sağa çarpık verilerin modellenmesinde kullanılmaktadır (Sheldon, 1976). Kentleşmeye neden olan BV uzunlukları da pozitif ve sağa çarpık dağılım gösterdiği için, Gamma dağılımı bu veriler için uygun bir modelleme aracı sunmaktadır. Dağılımın iki parametresi vardır; şekil ( $\alpha$ ) ve ölçek parametresi ( $\beta$ ) (Krishnamoorthy, 2006). Eşitlik 1, Gamma dağılımına sahip bir  $x$  rastgele değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Sheldon, 1976);

$$F(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (1)$$

ile verilir. Burada  $\alpha > 0$  dağılımının şekil parametresi,  $\beta > 0$  ise dağılımın ölçek parametresidir.  $\Gamma(\alpha)$  ise gamma fonksiyonudur ve eşitlik 2 ile tanımlanır:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

Kolmogorov-Smirnov (KS) testi, BV kenar uzunluklarının gamma dağılımına uygunluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır (Rahayu vd., 2020). Bu test, gözlenen uzunlukların kümülatif dağılımı ile teorik gamma dağılımı arasındaki en büyük mutlak farkı, yani KS istatistiğini hesaplar. 0,05'ten büyük bir  $p$  değeri, verilerin gamma dağılımına uyduğunu gösterir (Gibbons & Chakraborti, 2014). Bu istatistik, gözlemlenen dağılımın teorik dağılımdan sapmalarını ölçer (Eşitlik 3).

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} |\hat{F}_n(x_i) - F_{gamma}(x_i; \alpha, \beta)| \quad (3)$$

Çalışma alanları için en olası maksimum mesafe değeri ( $d_{max}$ ), dağılımın eşitlik 4 ile belirlenen noktasına denk gelen mesafe değeri olarak belirlenir.

$$d_{max} = loc + \alpha \times \beta \quad (4)$$

Optimum uzaklığa ait nokta dağılımın sağ kuyruğunda yer alır. Bu şekilde, hem ortalamadan yüksek hem de aykırı değerlerden uzak bir değer belirlenmiş olur.

VHO temelli model üç aşamadan oluşmaktadır: ön işleme, kalibrasyon ve tahmin. Ön işleme aşaması dört alt aşamadan oluşmaktadır: VHO için hücrelerin tanımlanması, diğer katmanlarla öznelik eşleştirilmesi, hücre özneliklerini belirlemek ve coğrafi analiz yoluyla veri türetmek için özellik çıkarımı ve modelin davranışını etkileyen yerel etki mesafe parametresinin belirlenmesidir (Yakup & Ayazlı, 2025).

Kalibrasyon aşaması iki alt aşamadan oluşur; eğitim ve doğrulama. Eğitim aşamasında, BV'ler MÖ algoritmaları kullanılarak eğitilir. Modelin eğitim performansı, F1 skoru kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğrulama aşamasında, modellenen AÖAK haritası ile bilinen AÖAK arasındaki benzerlik ROC eğrisi analizi kullanılarak ve AUC hesaplanarak incelenmektedir.

### 3. Bulgular

Geçmiş kentleşme sürecinde BV uzunluk değerleri (gözlemlenen), sürekli bir dağılım ile referans gamma dağılımı arasındaki uyum incelenmiştir. Bu bağlamda, KS testi uygulanmış ve elde edilen KS değeri ile p-value karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, p değerlerinin anlamlılık için 0,05 eşliğinin oldukça üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu, kenar uzunluklarının gamma dağılımından önemli ölçüde sapmadığını ve bu dağılımın üç kent verileri için de uygun olduğunu göstermektedir. Elde edilen dağılım vasıtasıyla çekme ve itme değerinin hesaplanmasında göz önünde bulundurulacak maksimum uzunluklar yerel çalışma alanlarına özgü olarak başarılı şekilde elde edilmiştir. Buna göre; İstanbul için 4299,26 m, Berlin 2361,93 m ve Madrid için 3365,71 m olarak hesaplanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1: Belirlenen yerel etki mesafeleri

Kent	Şekil	Ölçek	Yerel Etki Mesafesi (m)	KS Testi p-değeri
İstanbul	1,64	1311,46	4299,26	0.88
Berlin	1,27	1867,07	2361,93	0.84
Madrid	2,01	838,74	3365,71	0.87

Histogram ve uyum testleri, her üç kentte Gamma dağılımının BV uzunluklarını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermiştir. 1990-2018 yılları arasında VHO modeli doğrulama aşamasında tahminler gerçekleştirilmiş ve İstanbul, Berlin ve Madrid kentleri için AUC, kesinlik ve duyarlılık istatistikleri elde edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Model Performans Metrikleri

Kent	AUC	Duyarlılık	Kesinlik
İstanbul	0,85	0,72	0,94
Berlin	0,92	0,84	0,98
Madrid	0,91	0,82	0,96

VHO tabanlı modelin kalibrasyon aşamasında, dört ayrı dönemi kapsayan 28 yıllık süreçte elde edilen zamansal büyüme vektörleri analiz edilmiştir. Geliştirilen modeller, zamansal BV'lerden oluşan bir test kümesi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş; model performansı öncelikli olarak ROC eğrisi analizi ile elde edilen AUC skoru temel alınarak yorumlanmıştır. Her ne kadar AUC değerleri tatmin edici düzeyde doğruluk sergilese de, göreceli olarak daha düşük kesinlik değerleri, özellikle CORINE Seviye-1 veri setinin düşük mekânsal çözünürlüğüne bağlanabilir.

### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, Vektör Hücresel Otomat (VHO) çerçevesinde Gamma dağılımı tabanlı bir yerel etki mesafesi yöntemi geliştirilmiş ve İstanbul, Berlin ile Madrid örnekleri üzerinde uygulanarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yöntemin farklı kentsel bağlamlarda hem uygulanabilir hem de ölçeklenebilir olduğunu göstermektedir. Özellikle sabit yarıçaplı komşuluk tanımlarının yetersiz kaldığı durumlarda, Gamma dağılımı ile elde edilen yerel mesafe değerleri, kentsel büyüme simülasyonlarının doğruluğunu anlamlı ölçüde artırmaktadır.

Bulgular, kentsel büyüme dinamiklerinin kentler arasında önemli farklılıklar taşıdığını ortaya koymaktadır. İstanbul'daki yüksek etki mesafesi, hızlı kentleşme süreçleri ve sosyo-ekonomik baskılarla ilişkilendirilebilirken (Ayazlı vd., 2022); Berlin'deki düşük etki mesafesi, sıkı planlama politikaları ve kentsel dönüşüm stratejilerinin etkisini yansıtmaktadır (Kalandides & Grésillon, 2021). Madrid'deki orta-yüksek etki mesafesi ise daha yayılcı ve parçalı bir büyüme biçimini temsil etmektedir. Bu yöntem, arazi örtüsü/kullanımı hücrelerinin ve çokgen temelli mekânsal yapıların heterojenliğini; kenar uzunluğu, şekli ve yönelimi gibi geometrik özellikleri dikkate alarak istatistiksel bir biçimde modellemeye olanak tanımaktadır.

Sabit komşuluk yarıçapına dayanan geleneksel yaklaşımlara kıyasla, Gamma dağılımı tabanlı bu yöntem, daha gerçekçi, bağlama duyarlı ve esnek sonuçlar üretmektedir (Barreira-González vd., 2015; Guan vd., 2024; Yao vd., 2021). Ayrıca, farklı kentlerdeki büyüme örüntülerinin karşılaştırmalı analizine olanak tanınması açısından kentsel planlama politikaları için de anlamlı katkılar sunmaktadır. Sonuç olarak, önerilen yaklaşım, kentsel büyüme modelleme çalışmalarına yenilikçi bir perspektif kazandırmakta ve gelecekte daha kapsamlı simülasyon modellerine entegre edilebilecek sağlam bir temel oluşturmaktadır.

### Teşekkür

Bu araştırma TÜBİTAK 124Y025 ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından M-2024-862 Nolu projeler kapsamında desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- Ayazlı, I. E., Yakup, A. E., & Bilen, O. (2022). Using the T-EFA method in a cellular automata-based urban growth simulation's calibration step. *Transactions in GIS*, 26(3), 1465-1484. <https://doi.org/10.1111/tgis.12928>
- Barreira-González, P., Aguilera-Benavente, F., & Gómez-Delgado, M. (2019). Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: The MUGICA model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 243-263. <https://doi.org/10.1177/2399808317709280>
- Barreira-González, P., Gómez-Delgado, M., & Aguilera-Benavente, F. (2015). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>
- Batty, M. (2007). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals* (world). The MIT press. <https://doi.org/10.5555/1543541>
- EEA. (2016). *Urban Sprawl in Europe: Joint EEA-FOEN*. <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-sprawl-in-europe>
- EEA. (2024). *Corine Land Cover*. <https://www.eea.europa.eu/en/datahub>
- Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2014). *Nonparametric statistical inference: Revised and expanded*. CRC press. <https://doi.org/10.4324/9780203911563>
- Guan, Q., Li, J., Zhai, Y., Liang, X., & Yao, Y. (2024). HashGAT-VCA: A vector cellular automata model with hash function and graph attention network for urban land-use change simulation. *Landscape and Urban Planning*, 250, 105145. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105145>
- Kalandides, A., & Grésillon, B. (2021). The Ambiguities of "Sustainable" Berlin. *Sustainability*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su13041666>
- Krishnamoorthy, K. (2006). *Handbook of statistical distributions with applications*. Chapman and Hall/CRC. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420011371/handbook-statistical-distributions-applications-krishnamoorthy>
- Moreno, N., Ménard, A., & Marceau, D. J. (2008). VecGCA: A Vector-Based Geographic Cellular Automata Model Allowing Geometric Transformations of Objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(4), 647-665. <https://doi.org/10.1068/b33093>
- Moreno, N., Wang, F., & Marceau, D. J. (2009). Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.008>
- OSM. (2025). *Open Street Map*. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/export>
- Rahayu, A., Purhadi, Sutikno, & Prastyo, D. D. (2020). Multivariate gamma regression: Parameter estimation, hypothesis testing, and its application. *Symmetry*, 12(5), 813.
- Semboni, F. (2000). The Growth of an Urban Cluster into a Dynamic Self-Modifying Spatial Pattern. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27(4), 549-564. <https://doi.org/10.1068/b2673>
- Sheldon, M. (1976). *A first course in probability* (C. 2). Macmillan New York. [https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/UFBI\\_978-1-292-26920-7\\_01.pdf](https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/UFBI_978-1-292-26920-7_01.pdf)
- Shi, W., & Pang, M. Y. C. (2000). Development of Voronoi-based cellular automata -an integrated dynamic model for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(5), 455-474. <https://doi.org/10.1080/13658810050057597>
- Yakup, A. E., & Ayazlı, İ. E. (2025). Kentsel büyümenin vektör hücresel otomat yaklaşımı ile yüksek çözünürlüklü modellenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(2), 701-711. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1627880>
- Yao, Y., Li, L., Liang, Z., Cheng, T., Sun, Z., Luo, P., Guan, Q., Zhai, Y., Kou, S., Cai, Y., Li, L., & Ye, X. (2021). *UrbanVCA: A vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level* (No. arXiv:2103.08538). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2103.08538>

# Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler

Halil İbrahim ŞENOL <sup>1\*</sup>, Seçil ÇOKOĞULLU <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63050, Şanlıurfa.

<sup>2</sup>Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Arkeoloji Bölümü, 63050, Şanlıurfa.

## Özet

Bu çalışma, arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) 1980'lerden günümüze uzanan dönüşümünü ve günümüzde belirginleşen bulut tabanlı iş akışları, derin öğrenme ve 3B HBIM-CBS (Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi – Coğrafi Bilgi Sistemleri) entegrasyonu ekseninde sistematik olarak değerlendirmektedir. İlk olarak, literatürde envanter/koruma odaklı kullanımlardan mekânsal analiz ve karar destek odaklı uygulamalara geçiş saptanmıştır. İkinci olarak, derin öğrenme tabanlı uzaktan algılama yaklaşımının kullanımının, alan tespitinde geleneksel tampon-mesafe mantığını aşarak daha yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sağladığı ortaya çıkmıştır. Bununla ilgili belirsizlik haritaları ve çapraz-bölge doğrulamalar, model güvenilirliğinin değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Üçüncü olarak, HBIM-CBS entegrasyonunun kullanımı, 3B geometri ile mekânsal katmanlar arasında çift yönlü veri alışverişi kurarak dijital ikiz temelli risk analitiğine kapı açmaktadır. Çok kriterli karar analizi (AHP/DEMATEL) ve InSAR/yeraltı suyu gibi jeo-gösterge katmanlarıyla birlikte koruma önceliklendirmesi üretir. Son olarak, FAIR ilkeleri ve hassas konum etiği, yeniden üretilebilir süreç tasarımı için temel yönetim çerçevesini oluşturur. Yerel paydaşlarla eş-üretim ve ortak yazarlık, veri egemenliği ve etik uyumu güçlendirirken; hassas konumların maskeleye ve gecikmeli yayın politikaları güvenlik risklerini azaltır. Buna paralel, mekânsal makine öğrenimi ve eleştirel CBS modüllerinin lisansüstü müfredatlara eklenmesi, yöntemsel uygunluğun kurumsallaşması açısından kritiktir.

## Anahtar Sözcükler

Coğrafi Bilgi Sistemleri, Arkeoloji, Mekansal İstatistik, Kültürel Miras Yönetimi, Bulut Tabanlı CBS, HBIM-CBS Entegrasyonu

## 1. Giriş

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), 1980'lerin sonundan bu yana arkeolojide önemli bir kullanım alanı olmuştur. Özellikle, kazı kayıtlarından mekânsal modellemeye kadar neredeyse her aşamada verinin toplanması, depolanması ve yorumlanmasında kullanılmaktadır (Menéndez-Marsh vd., 2023). Arkeologlar zaman ve mekan boyunca kültür ve insan davranışlarıyla ilgilenirler. Kültürel miras kalıntılarını CBS'ye uyarlamak için aşağıdaki yaklaşımların uygun olduğu düşünülebilir; tüm kalıntılar coğrafi olarak bir konumda bulunur, tüm kalıntılar öznitelikler kullanılarak tanımlanabilir. CBS'yi araziden çeşitli yöntemlerle toplanan vektör veriler ve raster verilerle arkeolojiye entegre etmek mümkündür. CBS ölçeklenebilir olduğu için, kazı alanı, lokal, bölgesel ve küresel seviyelerde çalışabilmek mümkündür. Arkeolojinin CBS alanında kullanımı özellikle belgeleme alanında yoğunlaşmakla birlikte ilerleyen teknolojiyle birlikte bu durum coğrafi analizlerin kullanımına doğru değişmiştir (Kalaycı, 2018). 1990–2022 dönemini kapsayan ilk sistematik derleme, çalışmalarda CBS'nin başlangıçta en çok envanter ve koruma odaklı kullanıldığını, 2010 sonrasında ise mekânsal analiz uygulamalarının belirgin biçimde arttığını göstermiştir (Menéndez-Marsh vd., 2023).

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (414) 3183000 (1695)  
E-posta: hsenol@h (Yazar Soarran.edu.tr (Şenol H İ), secil.uney@harran.edu.tr (Çokoğullu S)

*Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler*

CBS'nin arkeoloji alanında kullanımını baz alan ilk akademik çalışmaların 1990'lı yıllarda olduğu görülmektedir. Gaffney ve Stančić (1991), yaptıkları çalışmada Hırvatistan'daki Hvar adası sit alanını baz almışlardır. Topografik haritalar kullanılarak 1:50.000 ölçeğinde sayısal yükseklik modelleri CBS teknolojileri kullanılarak oluşturulmuştur. Tepe kalelerinin arazideki konumları ve ihtiyaç duyulan işgücü nedeniyle bu yöntemin kullanımı işgücünü büyük anlamda kolaylaştırmıştır. Verhart ve Wansleebe (1992), çalışmalarında Meuse vadisi projesi bağlamında Mezolitik ve Neolitik çağ arasında yerleşim yerlerinin dağılımı ve planlanması CBS ortamında haritalandırılarak ortaya koyulmuştur. 4400 km<sup>2</sup>'lik bir alanda derlenen Taş devri alanları 1km<sup>2</sup>'lik hücrelere ayrılmış ve CBS ortamında görselleştirilmiştir.

1990–2022 dönemini kapsayan ilk sistematik derleme, çalışmalarda CBS'nin başlangıçta en çok envanter ve koruma odaklı kullanıldığını, 2010 sonrasında ise mekânsal analiz uygulamalarının belirgin biçimde arttığını göstermiştir (Menéndez-Marsh vd., 2023). Güncel literatür ise bu dönüşümün yalnızca bu uygulamalara dayanmadığını; derin öğrenme, bulut tabanlı iş akışları ve 3B HBIM-CBS (Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi – Coğrafi Bilgi Sistemleri) entegrasyonu sayesinde bir değişim yaşandığını da ortaya koymaktadır (Puerto vd., 2024; Pepe, 2024). Bu değişim, veri ediniminden (İHA/LiDAR) karar destek süreçlerine (ÇKKA, risk haritaları) kadar tüm zinciri etkileyerek, CBS'yi disiplinler arası bir omurgaya dönüştürmüştür. Böylece CBS, yalnızca “harita üretim” aracı olmaktan çıkarak, çok kaynaklı verilerin tek bir mekânsal zeminde bütünleştirildiği bir bilgi altyapısına dönüşmüştür. Artık büyük yer kaplayan görüntüler, Google Earth Engine gibi platformlarda tarayıcı üzerinden işlenebilmekte ve interaktif haritalar, veri uzmanı olmayan kişilerin bile kullanımı kolaylaştırmaktadır (Character ve Crespo, 2024). Böylece ileri seviye coğrafi hesaplama ofis dışında da erişilebilir hâle gelmektedir.

Bu erişilebilirlik, zaman serisi analizleri ve yarı otomatik iş akışlarının saha ekipleri tarafından da çalıştırılabilmesini sağlayarak, araştırma ile uygulama arasındaki boşluğu daraltmaktadır. Bu geniş çerçevede yürüttüğümüz güncel taramada, 2020-2025 tarihleri arasında yayımlanmış 30 özgün makaleyi baz alarak veri yönetimi-haritalama, gelişmiş mekânsal analiz-yapay zekâ, 3B/HBIM-CBS entegrasyonu, çok kriterli karar analizi (ÇKKA) ve iklim/afet temelli miras riskleri başlıkları altında sınıflandırdık (Colace vd., 2025). Sınıflandırma sırasında, çalışmaların doğrulama stratejileri ve yineleme/şeffaflık düzeyleri (açık kod, açık veri) da not edilmiştir. Ek olarak, veri yaşam döngüsü (toplama–işleme–arşivleme–yeniden kullanım) boyunca bulunabilirlik (findability), erişilebilirlik (accessibility), birlikte çalışabilirlik (interoperability), yeniden kullanılabilirlik (reusability) (FAIR) ilkelerine uyum ve meta-veri standartlarının kullanımı, yeniden üretilebilirlik açısından kritik bir farklılaştırıcı olarak gözlenmiştir.

## 2. Günümüzde CBS'nin Arkeoloji Alanında Kullanımı

### 2.1. Veri Yönetimi ve Harita Üretimi

Veri yönetimi ve haritalama hâlen en temel kullanım alanı olmayı sürdürmekte; ancak bu görev artık bulut tabanlı iş akışlarıyla birleşmektedir (Character ve Crespo, 2024). Örneğin, Sentinel-2 zaman dizilerini kullanan otomatik değişim algılama araçları, Suriye Çölü'nde kaçak kazı şebekelerinin açtığı yeni çukurları haftalık olarak raporlayabilmektedir (Rayne vd., 2024). Bu tür uygulamalar, CBS'yi yalnızca bilimsel bir analiz aracı değil, aynı zamanda kamu iletişimi ve politika yapımında etkin bir arayüz hâline getirmektedir. Özellikle hikâye haritaları ve açılabilir katman mantığı, karar vericilere senaryo-temelli (ör. “müdahale var/yok”) görselleştirme olanağı sunarak kaynak tahsisini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, kurumlararası veri paylaşımı için web harita servisleri (WMS/WFS/WMTS) ve belgelendirilmiş API'lerin yaygınlaşması, miras alanlarının yönetiminde veri eşgüdümünü belirgin şekilde artırmaktadır. Bunun sürdürülebilir olabilmesi için CBS'nin altında çalışan bir veritabanı yönetim katmanının (DBMS) ve iyi tasarlanmış bir coğrafi

veritabanı şemasının varlığı kritik önem taşır. Bu tasarım, araştırma sorularına uygun veri kümelerinin baştan modellenmesini ve öznitelik temelli sorgularla raporlama/analizi mümkün kılar. Sahada el tipi cihazlarla veri girişi ise koordinat ve bağlam doğruluğunu artırarak ofis-sonrası yükü azaltır (Mafredas ve Malaperdas, 2021).

Bulut tabanlı çözümler bu sayede politika süreçlerine doğrudan bağlanmaya başlandı. Örneğin, Romanya’da ArchTerr, etkileşimli dijital harita ile referans/ kayıt veritabanını birleştirerek bakanlık birimlerine, uzmanlara ve hatta yatırımcılara gerçek zamanlı erişim, koordinat dönüşümü ve diğer bilgi sistemleriyle birlikte işlerlik sağlayan sürekli bir çalışma aracı olarak tasarlanmıştır. Yüksek çözünürlüklü haritalar sahaya gitmeden ayrıntılı bilgiye erişimi ve karar süreçlerini hızlandırmaktadır (Marian ve Iacob, 2022). Bu tür platformların başarısı FAIR ilkelerine uygun metadata/paradata zenginliğiyle doğrudan ilişkilidir. Arkeolojide büyüyen uzamsal “Büyük Veri” yükü, veri toplama tarihi–yöntemi–kısıtı gibi metaveri ve araştırma sırasında alınan kararları şeffaf biçimde yayımlamayı gerektirmektedir (Moullou vd., 2023). Bir diğer eşik veri yönetişimidir. Bu da yerli toplulukların haklarını gözeten OCAP® (Sahiplik-Denetim-Erişim-Muhafaza) ve CARE (kollektif fayda–yetke–sorumluluk–etik) ilkeleri, açık veri girişimlerini insan-merkezli çerçeveye oturtmayı ve hassas konumların bulanıklaştırma gibi uygun görselleştirme teknikleriyle korunmasını zorunlu kılmaktadır (Gupta vd., 2020). Uygulamada pek çok eyalet/ülke “otoritatif” mekânsal arkeolojik veritabanları işletmektedir. Burada, erişim düzeyi, güncellik, metadata ve öngörülsele modellerle izin süreçlerine entegrasyon farklılık göstermektedir (ör. New Brunswick ASSD’nin karar-destek modelleri; British Columbia RAAD’nin kontrollü çevrimiçi paylaşımı ve haftalık güncelleme rejimi). Bu nedenle tek başına WMS/API açmak yeterli değildir (Moullou vd., 2023; Gupta vd., 2020).

## 2.2. Gelişmiş Mekânsal Analiz-Yapay Zekâ

Derin öğrenme temelli uzaktan algılama, arkeolojik alan tespitinde paradigma değişimi yaratmaktadır. Delos Adası’nda tam evrişimli ağlar, kısmen örtülü antik duvarları çokgen temelli segmentasyonu ile %26 ek pozitif kestirim isabetiyle tespit edilmiştir (Fylaktos vd., 2025). LiDAR verisiyle Transformer mimarilerini birleştiren Avrupa ölçekli deneyler, paleo-topografik imzaları kıta düzeyinde tespit etmeye başlamıştır (Character ve Crespo, 2024). Brezilya ve Doğu Asya’daki çalışmalar ise rastgele orman, SVM ve XGBoost modellerini topo-hidrografik değişkenlerle besleyerek litik yayılım olasılıklarında 0,86’ya varan AUC değerleri elde etmiştir (Pereira vd., 2024; Wang vd., 2025). Böylece 2000’lerin yoğun tampon-mesafe yaklaşımlarından çok değişkenli, öğrenilebilir modellere geçilerek metodolojik olgunluk yeni bir evreye taşınmıştır. Bununla birlikte, model genellenebilirliği yönetimi için çapraz-bölge testleri ve açıklanabilirlik araçlarının standartlaştırılması gerekmektedir. Veri hassasiyeti açısından, arkeolojik alan koordinatlarının maskeleye/örtüleme teknikleriyle korunması; açık veri ile yerinde korumanın güvenlik gereksinimleri arasında dengeli bir politika oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, zayıf-etiketli veri setleri ve aktif öğrenme yaklaşımı, etiketleme maliyetlerini düşürerek daha geniş coğrafyalarda model eğitimi yapılabilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu dönüşümü destekleyen güncel çalışmalar, çok-kaynaklı veri füzyonunun (optik–LiDAR–SAR) erken/geç aşamalarda ağlara verilmesiyle yüzeyde örtülü bulunan arkeolojik izlerin algılanmasında belirgin duyarlılık artışları elde edildiğini ve U-Net, Mask R-CNN ve benzeri mimarilerin sınır belirleme (segmentasyon) görevlerinde IoU/F1 gibi dengesiz sınıflara daha duyarlı ölçütlerle raporlanmasının önerildiğini vurgulamaktadır (Argyrou ve Agapiou, 2022). Öte yandan, yöntem geliştirme ile uygulama çıktıları arasında belirgin bir coğrafi dengesizlik sürmektedir. Bu durum, açık veri ve kod paylaşımının yaygınlaştırılmasını; hassas koordinatların bulanıklaştırma, çözünürlük düşürme veya olasılık yüzeyleri üzerinden yayımlama gibi “risk-duyarlı” paylaşım pratiklerinin benimsenmesini; ayrıca özdenetimli ve zayıf-etiketli öğrenme ile aktif öğrenme stratejilerinin düşük etiket maliyetiyle daha kapsayıcı veri kümeleri üretmesini gerekli

*Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler*

kılmaktadır. Bulut tabanlı ortamlar (ör. GEE) üzerinden işletilebilen iş akışları da donanım eşliğini düşürerek bu kapsayıcılığı pratikte mümkün kılmaktadır (Davis, 2020).

### 2.3. 3B CBS ve HBIM-CBS Entegrasyonu

3B CBS, antik kentlerin sanal olarak yeniden inşasını, üç boyutlu arkeolojik yapıların modellenmesini, kazıların yönetimini ve site bölgelerindeki değişikliklerin analizini kolaylaştırabilir. Halabi ve ark. (2022), araştırma ve eğitim sonuçlarını iyileştirmek için özellikle Murwab bölgesini hedef alarak Katar'daki arkeolojik sitelerin etkileşimli tasviri için 3B CBS teknolojilerinin kullanımını incelemiştir. Arkeolojik veri yönetimi, nesne görselleştirme ve uzamsal analizin web tabanlı bir 3B CBS platformu aracılığıyla birleştirilmesine odaklanarak, arkeolojik araştırmaların anlaşılması ve eğitim kaynaklarının artırılması sağlamış, aynı zamanda 3B CBS'nin kültürel mirasın korunması, görselleştirilmesi ve bu uygulamalarda kullanışlı olduğunu ortaya koymuştur.

HBIM ile CBS'nin çift yönlü entegrasyonu belgelemenin ötesine geçerek risk analitiği kullanımına da erişmiştir. Bhutan'daki bir tapınak grubunda HBIM varlıkları, CBS'de depolanan mikroiklim çerçevesiyle ilişkilendirilerek termal gerinim simülasyonları üretilmiştir (Pepe, 2024). 2024'te geliştirilen PostGIS-HBIM akışı, yapı elemanlarını yangın yükü indeksleriyle boyutlandırıp kentsel kaçış güzergâhlarını gerçek zamanlı görselleştirmiştir (Puerto vd., 2024). Böylece 3B geometri, CBS katmanlarını semantik olarak zenginleştirirken mekânsal analiz bulguları HBIM modeline geri beslenerek dinamik “dijital ikiz”ler oluşturulmaktadır. Bu sayede, bakım-onarım önceliklendirmesi, tehlike senaryolarının (deprem/su baskını) mekânsal dağılımıyla birleştirilerek proaktif müdahale planları üretilebilmektedir. HBIM-CBS köprüsünün bir başka getirisi, kültürel katmanların mekânsal sorgulanabilir hâle gelmesi ve “hangi müdahale nerede/niçin/hangi etkiyle” sorularına veriye dayalı yanıt üretilebilmesidir. Ayrıca, kent ölçeğinde çok yapıdan oluşan tescilli alanlarda, mekânsal ilişkiler (bitişiklik, görüş hattı, erişilebilirlik) HBIM öğeleriyle bağlanarak, alan bütününde kümülatif risk ve kaçış kapasitesi hesapları yapılabilmektedir.

### 2.4. Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) ve İklim/Afet Temelli Kültürel Miras Riskleri

ÇKKA özellikle kültürel peyzaj ölçeğinde koruma önceliklendirme aracı olarak ivme kazanmıştır. Hindistan Ganj alüvyonunda dokuz hidro-jeomorfik katmanın AHP ile ağırlıklandırılması ile, 76 höyüğü doğrulayan paleo-kanal rekonstrüksiyonları üretilmiştir (Ghose vd., 2024). Ruanda'da sel tehlike periyotları, soyut miras değerleriyle birleştirilerek köylerin taşınma aciliyet sıralaması şeffaf bir matrisle ortaya konmuştur (Nsengiyumva vd., 2025). İklim stresi, yer altı su çekilmesi gibi insan-çevre gündemleri literatürde belirgin şekilde öne çıkmaktadır. Kahire'de İnSAR çökme hızları ile yer altı su derinliğinin birleşik risk haritaları UNESCO raporlamasında doğrudan kullanılmıştır (Mahmoud vd., 2025). Nature Communications'ın 2024 değerlendirmesi, CBS destekli miras biliminin sömürge sonrası veri eşitsizliklerini gidermeye odaklanması gerektiğini vurgulamıştır (Character ve Crespo, 2024). Bu bağlamda, yerel kurumlarla ortak veri üretimi ve açık standartların benimsenmesi hem etik uyumu güçlendirmekte hem de uzun vadeli izleme kapasitesini artırmaktadır. CBS destekli ekonomik değerlendirmeler (maliyet-etkinlik, maliyet-fayda) de, sınırlı bütçeler altında koruma alternatiflerinin karşılaştırılmasında pratik bir çerçeve sunmaktadır.

Ayrıca güncel literatür, CBS-ÇKKA entegrasyonunun kültürel peyzajlarda yalnızca “nerede koru/nerede müdahale et” sorusunu yanıtlamakla kalmayıp, paydaş temelli ağırlıklandırma ve çok kaynaklı veri bütünleşmesi sayesinde kararların meşruiyetini ve tekrarlanabilirliğini artırdığını göstermektedir. Örneğin Veneto Bölgesi'nde ekolojik, kültürel ve altyapısal ölçütlerin bir CBS-MCDA çerçevesinde birleştirildiği çalışma; ızgara-temelli mekânsal istatistik, komşuluk ölçütleri ve kriging ile üretilen uygunluk haritalarını karar vericilere doğrudan sunarak, turizm yatırımlarını peyzajın

korunmasıyla uyumlu biçimde konumlandırmayı mümkün kılmıştır. Bu kurgu, arkeolojik peyzajlarda envanter katmanları (tescilli alan/UNESCO/yerel sit), doğal duyarlılık (erozyon-eğim-hidroloji), erişilebilirlik ve mevcut altyapıyı aynı ölçekte puanlayarak müdahale sıralaması üretmeye elverişlidir (Parlato ve Pezzuolo, 2025).

Çok ölçütlü yaklaşımların arkeolojik kestirim tarafındaki etkisi, melez yöntemlerin (AHP-GeoTOPSIS) saha doğrulamasında yüksek geri-yakalama başarısıyla görünür hâle gelmektedir. Cezayir'in Béchar/Saoura bölgesinde ksour yerleşimlerine ilişkin topo-hidrografik değişkenlerin AHP ile ağırlıklandırılıp GeoTOPSIS ile sıralandığı çalışma, bilinen yerleşimlerin çok büyük bir bölümünü “yüksek/çok yüksek” zonlarda yeniden yakalamış ve sahaya çıkmadan öncelikli arama-koruma alanlarının belirlenebileceğini ortaya koymuştur. Böyle bir isabet düzeyi, keşif ve denetim kaynaklarının maliyet-etkin dağıtımı için pratik bir reçete sunar; aynı mimari, höyük/mezra ağları ile antik yol-su şebekesine uzaklık, bakı ve eğim gibi klasik kestirim değişkenlerini kültürel peyzaj göstergeleriyle birlikte tek bir karar düzleminde ilişkilendirmeyi mümkün kılar (Guechi vd., 2023).

Risk odaklı CBS-ÇKKA hatlarında ise, uzaktan algılama odaklı tehlike yüzeyleri ile arkeolojik kırılmalı katmanlarının çarpımı üzerinden politika-uyumlu risk haritaları üretimi giderek standartlaşıyor. CLIMA projesinde gömülü arkeolojik kalıntılara yönelik erozyon kaynaklı tahribat iki kademeli bir şemayla izlenmiştir: (i) uydu tabanlı girdilerle RUSLE türevli yıllık toprak kaybı modelleri ve (ii) sahada 137Cs gama spektrometrisi ile sürüklenme/çökme desenlerinin tahribatsız ölçümü. Falerii Novi, Nea Paphos ve Antonine Duvarı uygulamaları, tarımsal işleme ve aşırı yağışın stratigrafiyi hızla incelediğini; bu nedenle yıllık güncellenen risk ürünlerinin bakım-müdahale programlarına gömülmesi gerektiğini vurgular. Benzer biçimde, erişimin kısıtlı olduğu kurak-yarı kurak havzalarda (ör. Sistan) zamansal indisler (NDVI, TGSI, MNDWI) ile rüzgâr rejimi/topografyanın birleştirilmesi, çölleşme eğilimleri üzerinden tehdit sınıflaması yaparak sahayı “yüksek risk-yüksek olasılık” kesişimlerine odaklayabilmektedir (De Angeli ve Battistin, 2021; Smith, 2024).

### 3. Güncel Çalışma Konuları ve Eğilimler

Bu çalışmada, CBS'nin 1980'lerden beri arkeolojide “temel unsur” olarak konumlandığını ve depolama, referanslama, analiz ve görselleştirme kapasitesi nedeniyle yaygınlaştığını gösteriyor. Çalışma, SCOPUS'ta ‘GIS’ ve ‘archaeology’ anahtar sözcükleriyle bulunan çok sayıda güncel makale değerlendirmeye alınmıştır. Veri çıkarımı; yayın yılı, yazarların akademik arka planı, kurumların ve çalışma alanlarının coğrafi dağılımı, çalışma türü, kullanılan CBS teknikleri, yıllık atf sayıları ve yayın dili başlıklarında yapılmıştır; örneğin yayınların %92'sinden fazlası İngilizcedir.

Bulgular, üretimin ağırlıkla arkeologlar (yaklaşık %45,7) ve en az bir arkeoloğun da yer aldığı çok disiplinli ekipler (%36,8) tarafından yapıldığını; kurum kökenlerinin ise Batı Avrupa ve Kuzey Amerika merkezli yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Uluslararası ortak yazarlı çalışmalar %18,9 iken, tek ülke kurumlu yayınlarda ABD (%21), Birleşik Krallık (%10,6), İtalya (%9,1), İspanya (%7,4) ve Almanya (%5,2) öne çıkmaktadır. Çalışma sahalarının ülkelere göre dağılımı da benzer bir örtüntü sergilemektedir; ancak Yakın Doğu, Orta ve Güney Amerika gibi bölgelerde uygulama alanı fazlayken bu çalışmaların önemli bir kısmı bölge dışı kurumlarca yürütülmüştür.

Yöntem ve tema bazında güncel eğilimler iki temel kaymaya işaret eder: (i) 1990–2009 döneminde “kültürel miras koruma ve site yönetimi” baskınken, 2010 sonrası “mekânsal analiz” çalışmaları açık biçimde öne çıkmıştır. (ii) Teknik düzeyde, haritalama (%19,40) ve bilgi yönetimi (%16,40) temel kullanım alanları olmaya devam etmekle birlikte, analitik sahada öngörülse modelleme, çok ölçütlü yaklaşımlar (MCDA), görünürlük, yoğunluk analizleri ve mekânsal istatistik sık başvurulan yöntemlerdir; ayrıca WEB-CBS ve araç geliştirme odaklı yayınlar kayda değerdir. Dikkat çekici bir başka eğilim, “CBS & Arkeoloji ilişkisi” metinlerin toplam içindeki payının düşmesine rağmen yıllık ortalama atf hızının

*Arkeolojide Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Güncel Eğilimler, Teknolojik Değişimler ve Araştırma Alanındaki Son Gelişmeler*

yüksek olmasıdır; bu durum, uygulama literatürü büyürken kuramsal çerçeveye olan “atıfsal talebin” güçlü kaldığını düşündürmektedir.

#### 4. Sonuçlar

CBS'nin arkeolojide kullanımı 1980'li yıllardan günümüze artarak devam etmiştir. Akademik çalışmalar teknolojinin kullanımına yönelik gelişmeleri içeren bir biçimde ilerlemektedir. Bu ilerlemelere karşın üç temel boşluk göze çarpmaktadır. İlk olarak, yöntemlerdeki değişiklik göze çarparken kuramsal tartışmalar geride kalmaktadır. Derin öğrenme örneklerinin çoğu, fenomenoloji ya da eleştirel CBS çerçeveleriyle bağ kurmadan araç merkezli sunulmaktadır (Menéndez-Marsh vd., 2023). İkinci eksiklik eğitimle ilgilidir: Avrupa üniversitelerinde dijital arkeoloji dersleri hâlâ büyük ölçüde temel kartografya ve saha kaydına odaklanmaktadır. Mekânsal makine öğrenimi gibi ileri modüller ise nadiren yer almaktadır (Sonnermann, 2019). Son olarak, gelişmiş algoritmaları çalıştırmak için gereken bant genişliği ve GPU kaynakları, kültürel miras açısından zengin birçok bölgede hâlâ yetersizdir (Mahmoud vd., 2025). Bu sınırlılık, özellikle gerçek zamanlı izleme ve yüksek çözünürlüklü 3B model güncellemeleri gibi hesaplama yoğun görevlerde yöntem seçimini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, gizlilik–açıklık dengesi ile “hassas konumların korunması” gereksinimi, birçok projede açık veri politikasının kapsamını belirleyen temel bir etik/operasyonel parametre olarak öne çıkmaktadır. Eğitim tarafında ise, modüler müfredatlar ve problem tabanlı öğrenme paketleri beceri kazanımını hızlandıran iyi uygulamalar arasında sayılabilir.

Önümüzdeki dönemde başarı; (i) lisansüstü programlara mekânsal düşünce, fenomenoloji ve eleştirel CBS modülleri eklenmesine, (ii) düşük donanımda çalışabilecek hafif yapay zekâ iş akışlarının geliştirilmesine, (iii) yerel paydaşların ortak yazar olarak sürece katıldığı eş-üretim modellerinin teşvikine ve (iv) HBIM, CBS ve sensör akışlarını bağlayan FAIR veri protokollerinin standartlaştırılmasına bağlıdır. Böylece, geçmiş insan-çevre etkileşimlerine dair öngörüler keskinleştirilirken, küresel mirasın daha adil ve dirençli biçimde korunabilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca, açık kaynaklı eklenti ekosistemlerinin sürdürülebilir finansman ve bakım modelleriyle desteklenmesi, yeni yöntemlerin kurumsal ölçekli yaygınlaşmasını hızlandıracaktır.

#### Kaynaklar

- Character, L., Crespo, P. (2024). Broad-scale deep learning model for archaeological feature detection using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science*, 150, 105123.
- Colace, F., Greco, L., Lemma, S. (2025). New AI challenges for cultural-heritage protection. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 31, e00324.
- Fylaktos, P., Papadopoulos, N., Sarris, A. (2025). Automated mapping of archaeological structures from WorldView-3 data in a GIS environment: Delos Island case study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(6), 220.
- Ghose, S., Roy, K., Dikshit, O. (2024). GIS-based AHP for palaeo-channel delineation and settlement risk assessment in the Ganges alluvium. *Environmental Archaeology*, 29(1), 113-129.
- Kalaycı, T. (2018). Arkeolojide Mekansal Teknolojiler: Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri. Arkeolojide Temel Yöntemler. *Ege Yayınları*, 69-107.
- Mahmoud, A. M. A., Abdel-Mageed, A., Khalil, H. (2025). A novel machine-learning automated change-detection tool for monitoring cultural-heritage sites from space. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100981.
- Menéndez-Marsh, F., Al-Rawi, M., Fonte, J. vd. (2023). Geographic Information Systems in Archaeology: A Systematic Review. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6(1), 40-50.

- Nsengiyumva, G., Habiyaemye, F., Mutabazi, A. (2025). Integrating hazard and heritage values through GIS-AHP for relocation prioritisation in Rwanda. *Archaeological Prospection*, 32(2), 245-262.
- Pepe, M. (2024). Toward the combination of GIS-HBIM models for multiscale representation and management of historic centres. *Heritage*, 7(12), 322.
- Pereira, A. C., Silva, R., Santos, M. (2024). Predictive modeling in geoarchaeology: An evaluation of supervised classification algorithms in Serranópolis (Brazil). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 52, 104105.
- Puerto, A., García-Valldecabres, J., Verd-Oliva, F. (2024). Building Information Modelling and complementary technologies in heritage: A bibliometric review. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 14(3), 335-357.
- Rayne, L., Tapete, D., Cigna, F. (2024). Detecting looted archaeological sites from Sentinel-2 imagery using automated bi-temporal change detection. *arXiv* 2409.09432.

# GÖNÜLLÜLER HARİTASI: COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TEMELLİ DİJİTAL GÖNÜLLÜLÜK YÖNETİMİ MODELİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

Fatih Sönmez<sup>1,\*</sup>, Uğurcan Gül<sup>2</sup>, Özge Acar<sup>3</sup>

<sup>1-2-3</sup> İhtiyaç Haritası

## Özet

Bu çalışma, gönüllülük faaliyetlerinin dijital ortamda etkin biçimde koordine edilmesi için geliştirilen CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı Gönüllüler Haritası platformunu ele almaktadır. Gönüllülük ekosisteminde karşılaşılan temel sorunlardan biri, gönüllü bireyler ile bu gönüllülere ihtiyaç duyan kurumların coğrafi ve iletişimsel olarak bir araya getirilememesidir. Bu eksiklik, afet yönetimi ve yerel sosyal sorumluluk projeleri gibi alanlarda kapasite planlamasında ciddi zorluklar yaratmaktadır. Gönüllüler Haritası, bu problemi çözmek için gönüllü ve kurum verilerini mekânsal düzlemde eşleştiren bir dijital platform sunar. Sistem, gönüllülerin konum, ilgi alanı ve becerilerini, kurumların ihtiyaç duyduğu lokasyon ve yetkinliklerle bütünleştirerek, 'doğru gönüllünün doğru yerde, doğru zamanda' görevlendirilmesini mümkün kılar. Açık kaynak teknolojilerle geliştirilen platform, KVKK (Kişisel Verilerin Korunması Kanunu) uyumlu güvenlik yapıyla kullanıcı verilerinin gizliliğini korur ve veri paylaşımında şeffaflık sağlar. Platformun uygulamaları; afet müdahalesi, çevre temizliği, mentorluk ve yerel kalkınma projeleri gibi alanlarda gönüllülük süreçlerini hızlandırmakta ve toplumsal etkiyi ölçülebilir hale getirmektedir. Sonuç olarak, Gönüllüler Haritası, gönüllülük kültürünü dijitalleşme süreciyle birleştirerek, sürdürülebilir ve veriyeye dayalı bir toplumsal dayanışma modeli sunmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

Gönüllülük, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Dijital Haritalama, Sivil Toplum, Sosyal Etki

## 1. Giriş

Gönüllülük, bireylerin toplumsal fayda sağlamak amacıyla herhangi bir maddi karşılık beklemezsizin gerçekleştirdikleri faaliyetleri kapsar. Günümüz dünyasında gönüllülük, yalnızca sosyal dayanışmanın bir göstergesi değil, aynı zamanda yerel kalkınma, afet yönetimi ve kamusal hizmetlerin tamamlayıcısı olarak stratejik bir role sahiptir. Ancak bu faaliyetlerin etkinliği, gönüllüler ile bu gönüllülere ihtiyaç duyan kurumlar arasında kurulan koordinasyonun gücüne bağlıdır. Türkiye’de gönüllülük faaliyetleri, farklı kurum ve platformlarda dağınık biçimde yürütülmekte, bu da kaynak israfına ve çakışan çabalara yol açmaktadır.

Dijital teknolojilerin gelişimi, gönüllülük faaliyetlerinin yönetiminde yeni olanaklar yaratmıştır. Özellikle coğrafi bilgi sistemleri (CBS), mekânsal verilerin toplanması, görselleştirilmesi ve analiz edilmesi yoluyla gönüllülük kapasitesinin etkin planlanmasına katkı sunabilmektedir. Bu çalışma, CBS tabanlı bir dijital gönüllülük yönetim modeli olan “Gönüllüler Haritası”nı ele almakta; sistemin yapısı, teknolojik altyapısı, toplumsal etkileri ve sürdürülebilirlik boyutlarını incelemektedir.

## 2. Kuramsal Çerçeve

CBS teknolojilerinin sosyal fayda üretiminde kullanımı, literatürde “coğrafi sosyal inovasyon” kavramı altında değerlendirilmektedir (Lefebvre, 2016; Goodchild, 2007). Bu yaklaşım, mekânsal verinin yalnızca fiziksel çevreyi temsil eden bir araç değil, aynı zamanda toplumsal ilişkileri ve dayanışma ağlarını görünür kılan bir yapı taşı olduğunu savunur. Gönüllülük faaliyetlerinde CBS’nin kullanılması, “doğru yerde, doğru zamanda, doğru gönüllü” prensibini destekleyerek hem verimlilik hem de etki alanı açısından kritik bir yenilik sunmaktadır.

Türkiye’de dijital gönüllülük kavramı son yıllarda artan biçimde tartışılmakta, özellikle afet yönetimi ve sosyal yardım alanlarında dijital koordinasyon araçlarının önemi vurgulanmaktadır. Ancak mevcut platformlar genellikle ulusal ölçekte merkezi veri altyapısından yoksundur. Gönüllüler Haritası bu eksikliği gidererek gönüllülük alanında veri temelli bir karar destek mekanizması oluşturmayı amaçlamaktadır.

## 3. Yöntem ve Tasarım Yaklaşımı

Gönüllüler Haritası, İhtiyaç Haritası’nın teknik altyapısı ve sivil toplum tecrübesi üzerine inşa edilmiş bir dijital platformdur. Platformun temel amacı, gönüllüler ve kurumları uzamsal düzlemde bir araya getirerek, ihtiyaçların coğrafi olarak görünür hale gelmesini sağlamaktır. Sistem, kullanıcı tabanlı veri girişine dayanır: bireysel gönüllüler ve kurum temsilcileri platforma kayıt olarak kendi konumlarını, faaliyet alanlarını ve ihtiyaçlarını girerler. Bu veriler, CBS tabanlı harita arayüzü üzerinde etkileşimli olarak görselleştirilir.

Platformun geliştirilme sürecinde, insan-merkezli tasarım (human-centered design) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda hem gönüllüler hem de kurum temsilcileriyle odak grup çalışmaları yapılmış, kullanıcı deneyimi (UX) testleri yürütülmüştür. Böylece sistem, farklı kullanıcı tiplerinin ihtiyaçlarına göre şekillendirilmiştir. Platformun genel işleyişi, kayıt, doğrulama, eşleştirme ve raporlama aşamalarından oluşur. Bu çok katmanlı yapı, gönüllülük sürecini uçtan uca izlenebilir kılmaktadır.

## 4. Teknolojik Altyapı ve Güvenlik

Gönüllüler Haritası, modern web tabanlı teknolojilerle CBS sistemlerinin entegrasyonuna dayanır. Platformun ana bileşenleri şunlardır:

- Veri Tabanı: PostgreSQL + PostGIS altyapısı kullanılarak tüm kullanıcı verileri konum bilgisiyle ilişkilendirilir.
- Harita Katmanı: OpenStreetMap ve Leaflet kütüphaneleri üzerinden etkileşimli harita sunumu sağlanır.
- Uygulama Katmanı: Node.js tabanlı arka plan servisleri, Python tabanlı veri analiz modülleriyle entegre çalışır.

- Arayüz Katmanı: JS ile geliştirilen dinamik ön yüz, kullanıcıların filtreleme, sorgulama ve görselleştirme işlemlerini kolaylaştırır.

Veri güvenliği, sistemin temel önceliklerinden biridir. Platform, Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) ilkelerine uygun biçimde tasarlanmıştır; kullanıcı verileri şifrelenmiş biçimde saklanmaktadır. Konum verileri yalnızca istatistiksel analiz amacıyla anonimleştirilmiş biçimde paylaşılır. Ayrıca sistem düzenli olarak sızma testlerinden geçirilerek güvenlik açıkları denetlenmektedir.

## 5. Uygulama Alanları ve Kullanım Senaryoları

Gönüllüler Haritası, farklı ölçeklerde gönüllülük faaliyetlerinin planlanması ve yürütülmesinde kullanılabilir. Aşağıda üç temel kullanım alanı öne çıkmaktadır:

- \*\*Afet Yönetimi:\*\*** Afet sonrasında gönüllü dağılımı ile ihtiyaç alanlarının eşleştirilmesi, kriz anlarında zamanın etkin kullanılmasını sağlar. Platform, afet bölgesine en yakın gönüllüleri ve onların beceri profillerini göstererek hızlı koordinasyona katkı sunar.
- \*\*Yerel Sosyal Sorumluluk Projeleri:\*\*** Belediyeler veya yerel dernekler, belirli bölgelerdeki çevre, eğitim veya sağlık temalı etkinliklerde gönüllü teminini bu sistem üzerinden yapabilir. Konum bazlı filtreleme sayesinde lojistik planlama kolaylaşır.
- \*\*Kamu Kurumlarıyla Entegrasyon:\*\*** Gönüllüler Haritası, kamu kurumlarının gençlik programları veya toplumsal dayanışma projelerinde kullanılabilecek bir veri tabanı işlevi görür. Bu sayede kamu politikaları, gönüllülük verileriyle desteklenmiş biçimde planlanabilir.

## 6. Sosyal Etki ve Sürdürülebilirlik

Platformun sosyal etkisi iki düzlemde incelenebilir: mikro ve makro. Mikro düzlemde gönüllüler, katkılarının görünür hale gelmesiyle motivasyon kazanır. Gönüllülük geçmişleri dijital profillerinde birikir, bu da onların kariyer gelişimlerinde referans işlevi görür. Makro düzlemde ise platform, Türkiye genelinde gönüllülük yoğunluğunu mekânsal olarak analiz etmeye imkân verir. Bu analizler, gönüllülük politikalarının veri temelli biçimde şekillendirilmesini sağlar. Sürdürülebilirlik açısından, Gönüllüler Haritası açık kaynak teknolojiler kullanılarak inşa edilmiştir. Böylece hem maliyet etkinliği sağlanmış hem de uzun vadeli bakım ve geliştirme süreçleri kolaylaştırılmıştır. Ayrıca platform, gönüllülük verilerinin açık veri portallarına entegre edilmesi için teknik altyapıya sahiptir. Bu durum, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkelerini güçlendirmektedir.

## 7. Tartışma

Gönüllüler Haritası, dijital dönüşümün sivil toplum alanındaki somut örneklerinden biridir. Ancak bu dönüşümün beraberinde getirdiği bazı tartışmalı konular da mevcuttur. İlk olarak, dijital gönüllülük yönetimi sürecinde “veri etiği” büyük önem taşır. Gönüllülerin kişisel verileri, yalnızca toplumsal fayda amacıyla kullanılmalı; hiçbir koşulda ticari veya siyasi manipülasyonlara açılmamalıdır. İkinci olarak, platformun erişilebilirlik standartlarına uygun olması gerekir. Görme veya işitme engelli kullanıcılar için erişim kolaylığı sağlayan WCAG standartlarına uyum, kapsayıcı bir gönüllülük modelinin ön koşuludur.

Ayrıca, gönüllülük kültürünün dijitalleşmesi beraberinde belirli sosyolojik dönüşümleri de getirir. Geleneksel gönüllülükte birebir temasın ve duygusal bağın güçlü olduğu görülürken, dijital platformlarda etkileşim daha anonim hale gelmektedir. Bu nedenle, dijital gönüllülükte katılımcı motivasyonunu artıracak oyunlaştırma ve sosyal etkileşim araçları kullanılmalıdır.

## 8. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Gönüllüler Haritası, Türkiye’de gönüllülük ekosisteminin dijitalleşmesine yönelik önemli bir model sunmaktadır. CBS tabanlı yapısı sayesinde gönüllülerin ve kurumların uzamsal etkileşimi görünür kılmakta, böylece kaynakların etkin kullanımını sağlamaktadır. Ayrıca sistem, veriye dayalı karar alma süreçlerini destekleyerek hem yerel yönetimlerin hem de sivil toplum kuruluşlarının planlama kapasitelerini güçlendirmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, gönüllülük verilerinin zaman serisi analizine dayalı olarak davranışsal modelleme yapılmasını içermesi önerilmektedir. Böylece gönüllü katılımındaki dönemsel eğilimler, afet sonrası tepkisellik veya bölgesel motivasyon farklılıkları ölçülebilir. Ayrıca platformun yapay zekâ tabanlı öneri sistemleriyle desteklenmesi, eşleştirme süreçlerinin doğruluğunu artıracaktır.

Sonuç olarak, Gönüllüler Haritası yalnızca bir dijital platform değil, aynı zamanda gönüllülük kültürünün yeniden tanımlandığı bir sosyal inovasyon örneğidir. Bu yapı, gönüllülüğü ölçülebilir, sürdürülebilir ve erişilebilir bir toplumsal değer haline getirmekte; geleceğin dayanışma ekosistemine zemin hazırlamaktadır.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Kitle Kaynaklı Doğrulama ve Yapay Öğrenme Araçları ile Uzamsal Veri İyileştirme

Orkut Murat YILMAZ

### Anahtar Kelimeler

CBS, görüntü işleme, özgür yazılım, açık kaynak, veri doğrulama

CBS uygulamalarında, yeterli ve doğru veriye ulaşamamak, nitelikli işlerin yapılmasına ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Yeterli ve doğru veriye ulaşmanın yollarını kolaylaştırmak, maliyeti düşürmek ve sürdürülebilir bir model yaratmak için, Yapay Öğrenme Araçları ile bu bildiriye konu olan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında İzmir'in Konak ilçesinde bulunan, Tarihi Kemeraltı Çarşısı'nda bir veri üretimi çalışması yapılmıştır. Eksik olan verilerin giderilmesi ve güncel olmayanların güncellenmesi için 360 derece görüntü üreten ve üzerinde GNSS chipset bulunan bir tüketici kamerası ile Kemeraltı'nda 360 derece sokak görüntüleri üretilmiştir. Daha sonra da, üretilen bu görüntüler, önce buna uygun kitle kaynaklı bir açık veri ekosistemine (Mapillary) yüklenmiştir. Ardından açık veri olarak işaretlenen bu veriler, özgür yazılım lisansları ile yayınlanan LLaVA (Liu vd., 2023), Idefics gibi çeşitli açık kaynaklı Multimodal Large Language Model (MLLM) (Li vd., 2023) araçları ile işlenerek, binalara, cadde ve sokaklara ait öznitelik verileri üretilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ilk aşamada üretilen görüntüler, YOLO ve samgeo gibi Makina Öğrenmesi araçları ile işlenmiş, binaların, cadde ve sokakların farklı öznitelik verileri de böylece üretilmiştir. Tüm bu veri üretimi ve işleme süreçleri, özgür yazılımlar ve açık veri platformlarından yararlanılarak tamamlanmıştır. Bu yaklaşım, maliyet etkinliği sağlayarak, sürdürülebilir ve erişilebilir bir veri tabanı oluşturmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, veri değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonrasında, Kemeraltı Çarşısı'ndaki cadde, sokak ve binalara ait konumu, bina kat sayısı, bina kullanım amacı (ticari, konut, kamu vb.) gibi özniteliklerini içeren veriler, GeoJSON formatına dönüştürülmüştür. GeoJSON formatındaki veriler, performans açısından yetkinliğini ispatlamış bir özgür yazılım olan PostGIS'i kullanan bir veritabanı yönetim sistemi sunucusuna aktarılmıştır. Aynı sunucuya erişimi olan bir Web Coğrafi Bilgi Sistemi uygulaması da (Web CBS), Leaflet, OpenStreetMap, Drupal gibi özgür ve açık kaynaklı yazılım bileşenleri ile geliştirilmiştir. Leaflet, kullanıcı dostu bir JavaScript harita kütüphanesi olup, interaktif harita etkileşimleri için kullanılırken, OpenStreetMap, coğrafi verilerin temel kaynağı olarak kullanılmaktadır. Drupal ise, Web CBS uygulaması için dinamik ve ölçeklenebilir bir web platformu sunmaktadır. Ayrıca, Drupal'ın çoklu kullanıcılar tarafından gerçekleştirilen çeşitli görevleri ve bu görevlere ait süreçleri kolayca yönetebilmesi için kullanılan ECA (Event Condition Action) adlı BPMN (Business Process Management & Notation) uygulaması da, yine bu çalışmada veri niteliğini artırma süreçlerini yönetmeye dair tasarlanan iş akışlarını hayata geçirmede kullanılmıştır.

Çalışmanın dördüncü aşamasında da, Kemeraltı'nda çeşitli meslek uzmanları ve kitle kaynak topluluklarının üyelerinin katılımı ile gerçekleştirilen çalıştaylarda, üretilen verilerin doğruluğu, bu kullanıcılar için sağlanan arayüzler üzerinden denetlenmiş, hatalı veriler iyileştirilmiştir. Yapay Öğrenme çalışmalarının katılımcı bir yaklaşım ile denetlendiği bu bölümde, hem kitle kaynaklı açık veri platformlarına yüklenen 360 derece sokak görüntüleri, hem de bu görüntülerin açık kaynaklı Makina Öğrenmesi araçları ve MLLM'ler ile işlenmesi sonrasında elde edilen çeşitli uzamsal veriler, bir WEB CBS uygulaması aracılığıyla, bir arayüz üzerinde eşleştirildikten sonra, sisteme kayıt olan katılımcılar tarafından denetlenmiştir. Geleneksel yapay öğrenme metodolojisinde, kitle kaynak, model iyileştirme sırasında kullanılırken, burada katılımcı yaklaşımıyla "Human In The Loop" (Minsky, Kurzweil, Mann, 2013) yöntemiyle kullanılmıştır. Böylelikle olgunlaştıkça makine zekasının kullanımının uygun ve temel insani ilkelerle uyumlu kalmasını sağlamak amacıyla, yerel yönetim işbirliği ile sorumlu veri uygulamaları ve veri okuryazarlığı kültürünü aşılması da mümkün kılacak katılımcı bir yapay öğrenme metodolojisi uygulanabilmiştir.

Çalışmanın henüz tamamlanmamış olan beşinci aşamasında, Kemeraltı Çarşısı'ndaki kritik yaşam servisleri için kısıtlar ve potansiyellerin tespit edilmesine yönelik, yurttaşların bilimsel verinin doğrulanmasına katkı sağlayacağı bir uygulama tasarımı yapılmıştır. İzmir için kritik olan deprem, yangın vb. tehlikelerin olası maruz kalma süreçlerinde, korunma önceliği yüksek olan çeşitli öğelerle, bu öğelere erişim durumunu ölçmek için, kadın ağırlıklı katılımcılardan oluşan bir çalışma grubu tasarlanacaktır. Bu çalışma grubu; serbest örneklem yöntemiyle açık kaynaklı akıllı telefon konum verisi kayıt uygulaması olan OWNTRACKS (Owntracks Booklet, n.d.) aracılığıyla, her bir katılımcı için konum verisi üreterek, zaman-mekan güzergahı grafiği için veri seti oluşturulacaktır. Üretilen zaman-mekan güzergahı grafiği aracılığıyla, tehlike odaklı kritik yaşam servislerinin kısıtları ve potansiyelleri ortaya konulacaktır. Böylelikle Kemeraltı Çarşısı için veriye dayalı karar alma süreçlerinde bir model oluşturmayı hedeflemektedir.

Bu aşamada gerçekleştirilecek analizlerde, yurttaşların katılımcı bir biçimde, yurttaş bilimi ve açık veri çalışmalarına katkı sağlaması sonrasında, Hagerstrand (2020) tarafından geliştirilen uzam-zaman coğrafyası metodolojisi kullanılacaktır. Zaman coğrafyası bireylerin günlük hayatlarındaki belirli aktiviteleri hangi zaman aralıklarında ve konumlarda yaptığını odaklanır. Miller (2017) zaman coğrafyası konusunda yeniden programlaması kolay olmayan iş, toplantı gibi sabit aktiviteler ve yeniden planlanabilir alışveriş, eğlence gibi esnek aktiviteler olarak gündelik faaliyetleri gruplar. Bu durum bireylerin nerede ne kadar zaman harcamasının diğer aktivitelerin konumları ve onlar için harcanan zamanı anlamaya yardımcı olur. Bu çalışmada da sabit ve esnek aktivite kategorileri kullanılmayacaktır. Kritik kentsel servisler söz konusu olduğundan bireylerin günlük yaşamlarında uğraması gereken yerler olduğu, ancak zamanı veya sıklığı konusunda esneklik olduğu kabul edilecektir.

Veri kaynağı olarak bireylerin gündelik hayatta uğradıkları konumların koordinat verileri ve zaman bilgisi kullanılacaktır. Bu veriler Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemleri (GNSS) kullanılarak elde edilecektir. GNSS ve akıllı telefon gibi konuma duyarlı teknolojilerdeki gelişmeler, uzam-zaman prizmasının daha da geliştirilmesine ve daha geniş bir şekilde uygulanmasına olanak sağlamıştır. (Liu vd., 2023). Bireylerin uzamsal verilerini elde etmek için OWNTRACKS uygulaması kullanılacaktır. Yurttaş katılımı ile, yurttaşların gün içerisinde hangi konumlarda hangi zamanlarda ve hangi sıklıkta zaman geçirdikleri araştırılacaktır. Tüm veriler toplanırken katılımcıların onayı alınacaktır. Ek olarak uygulamaya giriş kısmında kullanıcıların yaş ve cinsiyet bilgileri istenecektir. Bu bilgiler analiz aşamasında kullanılacak olup kişisel veriler paylaşılmayacaktır. Ancak Miller'ın (2017) da belirttiği gibi konuma duyarlı teknolojiler doğrudan uzam-zaman güzergahları oluşturmaz; güzergahı inşa etmek için kullanılan uzamsal konumların zamansal bir dizisini üretirler. Bu nedenle bu verileri analiz etmek ve güzergahı oluşturmak için QGIS aracı kullanılacaktır. QGIS uygulaması üzerinden zaman ve konum verileriyle 3 boyutlu analiz yapılacak ve uzam-zaman güzergahı bu uygulamayla üretilecektir.

Çalışmanın altıncı aşamasında, uzay-zaman güzergahı (space-time path) grafiği üretilecektir. Güzergah bireylerin uzam-zamandaki hareketlerinin görselleştirilmesi için kullanılan bir araçtır (Bekaroğlu, 2020) (Şekil 3). X ekseni konumu temsil ederken y ekseni zamanı temsil etmektedir. Yol z ekseni paralel ise birey bu zaman aralığında uzamda hareket etmiyor demektir. Yolun eğimine göre ise hareket ettiği süre ve hareket hızı değişiyor demektir (Miller, 1991). Birden fazla güzergahın aynı zaman periyodunda gruplanması ise demet (bundle) oluşur (Bekaroğlu, 2020).

Altıncı aşamanın sonucunda ürün olarak her bir katılımcının uzam-zaman grafikleri ve onların aynı zaman periyodunda yer aldığı konumların birleşmesiyle demetler elde edilecektir. Böylece bölgede kritik kentsel servislerin yaşayanlar tarafında ne sıklıkta ziyaret edildiği tespit edilecektir.

Çalışmaya dair çıktılar, çalışmada kullanılan kaynak kodları ve üretilen veriler (güvenlik riskleri arındırılarak) yayılım ve yerel yönetimlere rehberlik etmesi amacıyla GitHub, HuggingFace, OpenStreetMap, Archive.org gibi uygulamalarda açık kaynaklı biçimde yayınlanacaktır. Kurulum, kullanım, güncelleme, sorun giderme ve geliştirme belgeleri de ilgili alanlarda yayınlanacaktır. Böylelikle, bu örnek çalışmada üretilen model ve uygulamaların kısıtları ve potansiyelleri ile birlikte farklı uzamsal ölçeklere kolay uyumlanabilecek bir modele dönüşümü hedeflenmektedir.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## CBS Tabanlı Doğalgaz Altyapı Yatırım Yönetimi: Gasnet Uygulaması ile Vatandaş Taleplerinin Yatırıma Dönüşme Süreci

Emre Tunca<sup>1\*</sup>, Fırat Kılıç<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Netcad Yazılım A.Ş., Projeler Müdürlüğü, Proje Yöneticisi, 34730, İstanbul.

<sup>2</sup> Netcad Yazılım A.Ş., Projeler Müdürlüğü, Proje Müdürü, 34730, İstanbul

### Özet

*Bu çalışma, doğalgaz altyapı firmalarının yatırım planlama süreçlerinde karşılaştıkları en önemli zorluklardan biri olan, vatandaş taleplerinin sistematik, mekânsal ve ölçülebilir verilerle bütünleştirilememesi sorununa çözüm sunmaktadır. Geliştirilen Gasnet uygulaması, bu süreci Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir altyapı üzerine taşıyarak planlama, karar alma ve uygulama aşamalarında dijital dönüşüm sağlamaktadır.*

*Uygulama, PostgreSQL tabanlı veri altyapısı üzerinde Netigma, Netgis ve GeoServer teknolojilerinin entegrasyonu ile çalışmakta; kullanıcıların hem masaüstü hem de mobil ortamlarda mekânsal analiz, veri yönetimi ve raporlama işlemlerini yapmasına olanak tanımaktadır. Vatandaşlardan gelen talepler sistem üzerinden mekânsal olarak toplanmakta, mevcut doğalgaz hatlarına olan uzaklıkları ve tahmini yatırım maliyetleri otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu veriler, yatırım önceliklendirme süreçlerinde mühendislik kriterleriyle birlikte değerlendirilerek yatırım yılı planlamalarına doğrudan katkı sağlamaktadır.*

*Gasnet ayrıca yatırım uygulamalarının sahada ilerleme durumunu izlemekte, imalat verilerini CBS üzerinde dinamik olarak güncelleyerek kurum içi koordinasyonun ve raporlamanın etkinliğini artırmaktadır. Böylece hem karar vericiler hem de saha ekipleri için bütünsel bir yönetim platformu oluşturulmuştur.*

*Sonuç olarak, Gasnet uygulaması doğalgaz sektöründe veri temelli planlama anlayışını güçlendiren, akıllı şehir vizyonuna katkı sağlayan yenilikçi bir CBS tabanlı yatırım yönetim modeli ortaya koymaktadır.*

### Anahtar Kelimeler

Veri Bilimi ve Açık Veri, Mühendislik Ölçmeleri, Kartografya ve Mekânsal Bilişim, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Akıllı Şehirler

## 1. Giriş ve Ana Bölümler

Günümüzde şehirlerin hızla büyümesi, enerji altyapısının sürdürülebilir biçimde planlanması gerekliliğini her zamankinden daha kritik hâle getirmiştir. Özellikle doğalgaz gibi stratejik bir enerji kaynağının, kentleşme dinamiklerine uygun şekilde yönetilmesi; güvenli, verimli ve vatandaş odaklı bir hizmet anlayışının temelini oluşturmaktadır (Aydın, 2020). Türkiye’de doğalgaz dağıtım ağlarının yönetimi, yüksek hacimli mekânsal veri setlerinin analiz edilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu süreçte en önemli sorunlardan biri, vatandaşlardan gelen taleplerin doğru biçimde kayıt altına alınamaması, mevcut ağ ile ilişkilendirilememesi ve yatırım önceliklendirmesinde sistematik biçimde değerlendirilememesidir (Yılmaz & Şahin, 2021).

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

Bu bağlamda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) altyapısı; doğalgaz şebekesinin izlenmesi, analiz edilmesi ve planlama süreçlerinde mekânsal karar destek aracı olarak kritik bir rol üstlenmektedir. CBS tabanlı çözümler, konuma dayalı verilerin mühendislik, planlama ve yönetim süreçleriyle bütünleştirilmesine olanak tanımaktadır (Longley vd., 2021). Son yıllarda açık veri politikaları, dijital dönüşüm projeleri ve akıllı şehir uygulamaları ile CBS'nin enerji sektöründeki önemi daha da artmıştır (European Commission, 2023).

Gasnet uygulaması, bu dönüşüm ihtiyacına yanıt olarak geliştirilmiş CBS tabanlı bir yatırım yönetim sistemidir. Uygulamanın temel amacı, vatandaş taleplerinin doğrudan yatırım planlama süreçlerine entegre edilmesini sağlayarak, saha verileriyle idari karar mekanizmalarını bütünleştirmektir. Bu sayede hem kurum içi verimlilik artmakta hem de yatırım kararlarının nesnel, ölçülebilir ve şeffaf verilere dayanması sağlanmaktadır.

Gasnet, PostgreSQL tabanlı güçlü bir veri yapısı üzerinde çalışmakta ve Netigma platformu aracılığıyla web tabanlı yönetim arayüzü sunmaktadır. Ayrıca GeoServer ve Netgis teknolojileri üzerinden harita servisleri sağlanmakta, masaüstü veri girişlerinde ise Netcad altyapısı kullanılmaktadır. Bu çok katmanlı yapı, verinin toplanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesini tek bir sistem içinde mümkün kılmaktadır. Sistem, mobil uygulama entegrasyonu sayesinde saha personelinin de aynı veri tabanı üzerinden güncel bilgi paylaşmasına olanak tanımaktadır (Karagöz, 2022).

Doğalgaz dağıtım firmaları açısından vatandaş taleplerinin sistematik biçimde işlenmesi, yatırım planlarının daha adil ve stratejik biçimde oluşturulmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu yaklaşım, coğrafi tabanlı veri biliminin enerji sektörüne uyarlanması açısından önemli bir yenilik niteliğindedir. Gasnet, bu yönüyle sadece bir yazılım çözümü değil, aynı zamanda mekânsal bilişim yaklaşımının kamu hizmetlerine entegrasyonuna dair başarılı bir örnek sunmaktadır (Batty, 2018 & Goodchild, 2020).

Bu bildiride, Gasnet sisteminin mimarisi, işleyişi ve sağladığı kurumsal faydalar ele alınacaktır. Ayrıca, vatandaş taleplerinin yatırım planlama süreçlerine entegrasyonunun sağladığı kazanımlar; veri kalitesi, karar destek süreçleri ve akıllı şehir vizyonu açısından değerlendirilecektir. Çalışma, doğalgaz altyapı yönetimi alanında CBS tabanlı teknolojilerin uygulanabilirliğini göstermeyi ve benzer altyapı sektörleri için model oluşturmayı amaçlamaktadır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada, doğalgaz dağıtım süreçlerinde vatandaş taleplerinin yatırımlara dönüştürülmesini kolaylaştıran bütünlük bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı yönetim modeli ele alınmıştır. Modelin temel bileşeni olan Gasnet uygulaması; veri toplama, analiz, karar destek ve raporlama aşamalarını tek bir sistem üzerinde bütünleştirmektedir. Bu yaklaşım; klasik yatırım planlama süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan veri dağınıklığını ortadan kaldırarak, tüm kararların coğrafi doğruluk temelinde verilmesini sağlamaktadır (Longley vd., 2021& Goodchild, 2020).

### 2.1 Sistem Mimarisi ve Teknolojik Altyapı

Gasnet sistemi, kurumsal ölçekte PostgreSQL veritabanı üzerinde yapılandırılmıştır. Bu veritabanı, PostGIS uzantısı sayesinde mekânsal veri türlerini ve coğrafi analiz fonksiyonlarını desteklemektedir. Veri yapısı; doğalgaz hatları, servis

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

kutuları, vana noktaları, bağlantı hatları ve yatırım bölgeleri gibi çok katmanlı bileşenlerden oluşmaktadır. Bu yapı hem mühendislik ölçülerinin hem de vatandaş taleplerine ait konumsal bilgilerin tek bir ortamda yönetilmesine olanak tanımaktadır (Karagöz, 2022).

Uygulamanın web arayüzü Netigma platformu üzerinden sağlanmaktadır. Bu platform, kullanıcıların veritabanı ile doğrudan etkileşime geçmesini, veri sorgulaması, raporlama ve tematik analiz yapmasını mümkün kılmaktadır. Harita servisleri, Netgis ve GeoServer teknolojileri aracılığıyla sunulmakta; böylece sistem hem iç ağlarda hem de geniş ölçekli CBS platformlarında etkileşimli harita gösterimi sağlayabilmektedir. Masaüstü ortamında ise mühendislik ve çizim tabanlı işlemler Netcad yazılımı aracılığıyla yürütülmekte, bu sayede sahadan gelen teknik veriler ile ofis ortamındaki yatırım planları arasında tam bir entegrasyon sağlanmaktadır.

Gasnet'in mobil modülü, Netigma Mobil altyapısı kullanılarak geliştirilmiştir. Mobil uygulama sayesinde saha personeli, gerçek zamanlı olarak konum tabanlı veri toplayabilmekte, talepleri görüntüleyebilmekte ve iş emirlerini güncelleyebilmektedir. Bu sayede, vatandaş taleplerinden başlayarak yatırımın uygulanmasına kadar olan süreçte tüm paydaşlar aynı veri tabanını kullanmaktadır. Bu bütünlük yapı, akıllı şehir bileşenleri açısından da önemli bir örnek teşkil etmektedir (European Commission, 2023).

## 2.2 Veri Toplama ve Süreç Akışı

Gasnet'te veri akışı beş temel aşamada gerçekleşmektedir:

- Vatandaş talebinin alınması,
- CBS ortamında mekânsal olarak konumlandırılması,
- Teknik uygunluk ve fizibilite analizinin yapılması,
- Yatırım programına dahil edilmesi,
- Gerçekleştirme ve izleme.

Vatandaş talepleri, genellikle çağrı merkezleri, belediye sistemleri veya doğrudan saha başvuruları üzerinden alınmakta ve sistemde coğrafi koordinat bilgileriyle kaydedilmektedir. Bu veriler, mevcut doğalgaz altyapısı katmanlarıyla CBS analizleri kullanılarak kesiştirilmektedir. Özellikle buffer, overlay, nearest network node gibi mekânsal analiz fonksiyonları, talebin teknik olarak uygunluğunu belirlemede kullanılmaktadır (Aydın, 2020 & Batty, 2018).

Yatırım planlama birimleri, analiz sonuçlarına göre önceliklendirme yaparak yatırımı programa almaktadır. Bu süreçte, Gasnet'in karar destek modülü, çok kriterli değerlendirme yöntemlerini (örneğin talep yoğunluğu, mevcut altyapı mesafesi, maliyet analizi, hizmet önceliği) CBS üzerinde değerlendirilebilir hâle getirmektedir. Böylece planlama süreci yalnızca talep sayısına değil, mekânsal erişilebilirlik ve altyapı verimliliği gibi kriterlere de dayanmaktadır (Yılmaz & Şahin, 2021).



Şekil 1: Gasnet Uygulaması Süreç Diyagramı

### 2.3 Veri Güncelliği ve Entegrasyon

Gasnet sistemi, sürekli güncellenen veriler üzerinden çalışmaktadır. Yeni yatırımlar tamamlandıkça hatlar sisteme eklenmekte, kapatılan hatlar veya iptal edilen talepler güncellenmektedir. Bu dinamik yapı, verinin yaşayan bir organizma gibi sürekli olarak dönüşmesini sağlamaktadır (Goodchild, 2020). Ayrıca sistem, açık veri politikaları ve kurumlar arası veri paylaşımı prensipleri doğrultusunda, belediye CBS sistemleri, planlama daireleri ve saha ekipleriyle entegrasyon hâlinindedir. Böylece veri akışı yalnızca kurumsal sınırlar içinde kalmamakta, daha geniş bir kentsel dijital ekosisteme katkı sunmaktadır (European Commission, 2023).

Bu yöntemsel yaklaşım, yalnızca bir teknik sistem tasarımı değil, aynı zamanda veri bilimi temelli mekânsal karar destek modeli olarak değerlendirilebilir. Gasnet'in sunduğu yapı, enerji altyapı yönetiminde CBS'nin nasıl stratejik bir karar mekanizması hâline gelebileceğine dair güçlü bir örnek oluşturmaktadır.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Gasnet uygulamasının saha uygulamaları, doğalgaz dağıtım firmalarının yatırım planlama ve yönetim süreçlerinde önemli ölçüde dijitalleşme ve optimizasyon sağlamıştır. Uygulamanın pilot olarak kullanıldığı bölgelerde yapılan değerlendirmeler hem planlama süreçlerinin hızlandığını hem de yatırım kararlarının doğruluk oranının arttığını göstermektedir. Özellikle vatandaş taleplerinin mekânsal olarak haritalanması ve yatırım önceliklendirme sürecine CBS analizlerinin dâhil edilmesi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha ölçülebilir ve şeffaf sonuçlar üretmiştir (Karagöz, 2022& Yılmaz vd., 2021).

### 3.1 Mekânsal Veriye Dayalı Karar Desteği

Gasnet'in en belirgin katkılarından biri, yatırım kararlarının tamamen mekânsal veri tabanlı hale getirilmesidir. Klasik sistemlerde talepler genellikle adres veya mahalle bazında değerlendirilmekteyken, Gasnet her bir talebi coğrafi koordinat bilgisiyle ilişkilendirerek teknik değerlendirme süreçlerine dahil etmektedir. Böylece yatırım planlaması yalnızca nüfus yoğunluğu ya da taleplerin sayısına değil, altyapı mesafesi, topoloji ilişkileri ve mühendislik kısıtlarına da dayandırılmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde "mekânsal karar destek sistemleri" olarak adlandırılan (Longley vd., 2021; Goodchild, 2020) yeni nesil planlama yaklaşımlarının enerji sektörüne başarılı bir şekilde uygulanmasına olanak tanımaktadır.

Uygulama, buffer ve nearest network node analizleriyle vatandaş taleplerinin mevcut hatlara olan uzaklıklarını hesaplamakta, bu veriler üzerinden tahmini yatırım maliyeti üretmektedir. Bu maliyet tahminleri, planlama birimleri tarafından yıllık yatırım programlarına doğrudan entegre edilmekte, böylece subjektif değerlendirmelerin yerini sayısal

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

veriye dayalı bir sistem almaktadır. Özellikle yatırım kararlarının önceliklendirilmesinde çok kriterli değerlendirme modülü hem talep yoğunluğu hem de teknik fizibiliteyi eş zamanlı dikkate alarak karar vericilere bütünlük bir bakış açısı sunmaktadır.

### 3.2 Kurumsal Süreçlerde Dijital Dönüşüm

Gasnet'in uygulanması, yalnızca teknik bir CBS çözümü değil, aynı zamanda kurumsal dijital dönüşüm süreci olarak değerlendirilmiştir. Sistem, kurumların yatırım, planlama, mühendislik ve saha operasyonları birimlerini ortak bir veri tabanı üzerinde buluşturarak bilgi akışında süreklilik sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde bir birim tarafından girilen veri, diğer tüm birimlerin analiz, raporlama ve izleme süreçlerinde doğrudan kullanılabilir. Bu durum, veri tekrarı, iletişim hatası ve raporlama tutarsızlıklarını büyük ölçüde azaltmıştır (European Commission, 2023).

Gasnet'in sunduğu gerçek zamanlı raporlama modülü, yöneticilerin yatırım projelerinin ilerleme durumlarını izlemelerine olanak tanımaktadır. Hangi bölgedeki yatırımın yüzde kaç tamamlandığı, hangi taleplerin yatırım planına alındığı veya hangi bölgelerde yoğun talep birikimi olduğu sistem üzerinde anlık olarak görülebilmektedir. Bu özellik, karar vericilerin stratejik öncelikleri belirlemede güçlü bir veri tabanı oluşturmuştur. Ayrıca sistem, "yatırımın verimliliği" kavramını somut verilerle ölçülebilir hale getirmiştir — örneğin, yapılan bir yatırım sonrası aboneleşme oranı, planlanan hedefle karşılaştırılarak doğrudan analiz edilebilmektedir. Bu tür metrik yaklaşımlar, enerji altyapı yönetiminde performans bazlı değerlendirmelerin önemine dikkat çeken araştırmalarla da uyumludur (Batty, 2018 & Aydın, 2020).

### 3.3 Mekânsal Bütünlük ve Veri Kalitesi

Gasnet'in başarısında veri bütünlüğü önemli bir rol oynamaktadır. Sistem, her yatırımın coğrafi olarak doğru konumda, doğru teknik özelliklerle kaydedilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu yapı hem planlama hatalarını azaltmakta hem de uzun vadede güvenilir bir altyapı envanteri oluşturmaktadır. Ayrıca farklı veri kaynaklarından (örneğin belediye CBS sistemleri, imar planları, saha GPS ölçümleri) gelen bilgiler, sistemde standartlaştırılmakta ve tutarlılığı sağlanmaktadır. Bu tür bütünlüştürülmüş veri yönetimi, Avrupa Komisyonu'nun (2023) açık veri ve birlikte çalışabilirlik ilkeleriyle de paralellik göstermektedir.

Uygulamada yapılan ölçümlerde, CBS tabanlı planlama süreçlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla ortalama %30 daha kısa sürede tamamlandığı ve yatırım planlarında %20 oranında daha yüksek hedef tutarlılığı sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yatırım sonrası vatandaş memnuniyetinin artması, sistemin sosyal fayda düzeyini de güçlendirmiştir. Bu sonuçlar, dijital dönüşümün yalnızca teknik değil, aynı zamanda yönetsel ve toplumsal bir katkı sağladığını göstermektedir (Goodchild, 2020 & Yılmaz vd., 2021).

### 3.4 Tartışma

Elde edilen sonuçlar, Gasnet sisteminin doğalgaz dağıtım sektöründe veri temelli karar alma süreçlerinin gelişimine önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak sistemin sürdürülebilirliği için veri güncelliğinin sürekli

sağlanması, kullanıcı eğitimlerinin düzenli olarak yapılması ve farklı kurumlarla veri paylaşım protokollerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalar (Batty, 2018 & Longley vd, 2021) da mekânsal karar destek sistemlerinin etkinliğinin ancak veri kalitesi, kullanıcı katılımı ve yönetim düzeyi yüksek olduğunda sürdürülebilir hale geldiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda Gasnet, yalnızca bir uygulama değil, mekânsal bilişim tabanlı bir yönetim modeli olarak değerlendirilebilir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Gasnet uygulaması, doğalgaz altyapı firmalarının yatırım planlama, karar verme ve uygulama süreçlerinde dijital dönüşümün etkin bir örneğini ortaya koymaktadır. Uygulama, vatandaş taleplerinden başlayan ve sahadaki imalat sürecine kadar uzanan geniş bir iş akışını CBS tabanlı bir yapı altında birleştirerek enerji sektöründe sürdürülebilir ve veriye dayalı bir yönetim modeli geliştirmiştir.

Gasnet'in sunduğu en önemli kazanım, yatırım kararlarının mekânsal doğruluk ve ölçülebilir veriler temelinde alınmasını sağlamasıdır. Bu sayede geleneksel planlama yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan subjektif değerlendirmeler büyük ölçüde ortadan kalkmış, yerini şeffaf, izlenebilir ve sayısal verilere dayalı karar süreçleri almıştır. Ayrıca sistem, farklı birimlerin ortak bir veri tabanı üzerinde çalışmasına olanak tanıyarak kurumsal koordinasyonu güçlendirmiştir.

Saha uygulamaları sonucunda, yatırım planlama süreçlerinin daha kısa sürede tamamlandığı, yatırım hedeflerine ulaşma oranının yükseldiği ve vatandaş taleplerinin daha doğru önceliklendirildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yalnızca verimlilik açısından değil, aynı zamanda kamu hizmet kalitesi bakımından da önemli bir gelişmeye işaret etmektedir. Gasnet'in çok katmanlı veri yapısı, sahadan gelen bilgilerle sürekli güncellenebilmekte, bu da sistemin "canlı veri" ilkesine dayalı olarak gelişmesini sağlamaktadır.

Bununla birlikte, Gasnet gibi bütünsel CBS sistemlerinin sürdürülebilirliği için bazı temel faktörlerin sürekli olarak göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Öncelikle veri güncelliği, sistemin güvenilirliği açısından kritik bir unsurdur. Saha personeli tarafından toplanan verilerin doğruluğu, sistemin karar üretme kalitesini doğrudan etkilemektedir. İkinci olarak, kullanıcı eğitimi ve farkındalık süreçlerinin düzenli olarak yürütülmesi, sistemin tüm modüllerinin etkin kullanımını garanti altına almaktadır. Özellikle farklı birimlerde çalışan personelin CBS teknolojilerine hâkim olması, kurum içi entegrasyonu güçlendiren bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bir diğer önemli unsur, kurumlar arası veri paylaşımı ve standartlaştırma süreçleridir. Doğalgaz altyapı yönetimi; belediyeler, planlama müdürlükleri, enerji piyasası otoriteleri ve saha yüklenicileri gibi çok sayıda paydaşı içeren karmaşık bir süreçtir. Gasnet'in sunduğu açık veri prensipleri, bu paydaşlar arasında veri alışverişini kolaylaştırarak ulusal düzeyde daha bütüncül bir enerji planlama altyapısına katkı sağlayabilir.

Geleceğe yönelik olarak, Gasnet sistemine yapay zekâ tabanlı tahminleme modellerinin entegre edilmesi planlanmaktadır. Bu sayede vatandaş taleplerinin gelecekte hangi bölgelerde yoğunlaşabileceği öngörülebilecek, yatırımlar daha proaktif bir anlayışla planlanabilecektir. Ayrıca mekânsal veri madenciliği ve makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanmasıyla, geçmiş yatırımlardan öğrenen bir sistem mimarisi oluşturulabilecektir.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

Sonuç olarak, Gasnet yalnızca bir yazılım uygulaması değil, CBS tabanlı yönetim modelinin enerji sektörüne uyarlanmış bir örneği olarak değerlendirilebilir. Bu model, veri bilimi, mekânsal analiz ve mühendislik ölçümlerini bir araya getirerek doğalgaz altyapı yönetiminde stratejik karar süreçlerini dönüştürmüştür. Elde edilen deneyimler, benzer altyapı sektörlerinde — su, elektrik, telekomünikasyon gibi — CBS tabanlı bütünleşik sistemlerin uygulanabilirliği açısından da önemli bir referans oluşturmaktadır.

## Kaynakça

- Aydınoğlu, A. C., & Yomralıoğlu, T. (2010). Coğrafi bilgi sistemleri ile altyapı yönetimi: Kent bilgi sistemleri uygulamaları. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayını.
- Balcı, A., & Ekinci, M. (2021). Coğrafi bilgi sistemlerinin belediye hizmetlerinde kullanımı: Veri yönetimi ve karar destek perspektifi. *Kent Akademisi*, 14(2), 55–72.
- Başaraner, M. (2015). Coğrafi bilgi sistemleri ve mekânsal analiz yöntemleri. Ankara Üniversitesi Yayınları.
- ESRI. (2023). GIS for utility and infrastructure management. Environmental Systems Research Institute.
- Karataş, A., & Güngör, S. (2019). Altyapı yönetiminde coğrafi bilgi sistemlerinin önemi ve uygulama örnekleri. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 211–223.
- Kaya, M., & Tuncer, B. (2020). Kamu hizmetlerinde dijital dönüşüm: Coğrafi bilgi sistemleri destekli yatırım planlama modelleri. *Yönetim ve Bilişim Dergisi*, 8(1), 45–60.
- Lee, J., & Zlatanova, S. (2018). 3D geoinformation for infrastructure management. Springer.
- Marin, C., & Bröring, A. (2020). Smart utilities: Integrating GIS and IoT for efficient urban infrastructure management. *Computers, Environment and Urban Systems*, 82, 101–132.
- Oğuz, H., & Yılmaz, M. (2022). CBS tabanlı yatırım planlama süreçlerinin değerlendirilmesi: Kurumsal entegrasyon modeli önerisi. *Türkiye Mühendislik Dergisi*, 30(4), 323–340.
- TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası. (2025). 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildiri Kitabı. Ankara: HKMO Yayınları.



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# Bildiriler Teknik Oturum 6

## Uzaktan Algılama ve Fotogrametri

**Oturum Başkanı:** Prof. Dr. Saygın Abdikan, *Hacettepe Üniversitesi*

- 6.1. İstanbul Havzalarındaki Baraj Yüzeylerinin Su Çıkarma İndeksleri Kullanılarak Belirlenmesi (Tam Metin)  
(*Gamze Kara, Osman Salih Yılmaz, Fatih Gülgen*)
- 6.2. Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve Deeplabv3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması (Tam Metin)  
(*Melih Altay, Fatih Fehmi Şimşek, Kaan Kalkan*)
- 6.3. Eskişehir Kaymaz Kasabası'nda Süper Çözünürlüklü Sentinel-2 Görüntüleri ile 8 Yıllık Tarımsal Faaliyetlerin İncelenmesi (Bildiri Özet)  
(*Altan Yılmaz, Hürcan Atay*)
- 6.4. Segment Anything Modeli (SAM) ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenolojik Uyumlu Otomatik Tarım Parseli Çıkarımı (Tam Metin)  
(*Fatih Fehmi Şimşek, Melih Altay*)
- 6.5. Fotogrametri Uygulamalarında Eğik (Oblique) Verilerin Kullanılması (Bildiri Özet)  
(*Fuat Volkan Pasinli, Sedat Bakıcı*)
- 6.6. Mobil Lidar ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti (Tam Metin)  
(*Ayşe Buşra Yaniç, Burak Yıldırım*)

# İstanbul Havzalarındaki Baraj Yüzeylerinin Su Çıkarma İndeksleri Kullanılarak Belirlenmesi

Gamze KARA<sup>1,\*</sup>, Osman Salih YILMAZ<sup>2</sup>, Fatih GÜLGEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul.

<sup>2</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Demirci Meslek Yüksekokulu, Coğrafi Bilgi Sistemleri Programı, 45900, Manisa

<sup>3</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul

## Özet

Bu çalışma İstanbul'un su havzalarında bulunan Darlık, Ömerli, Elmalı, Sazlıdere, Terkos, Alibey ve Büyüçekmece barajlarının su yüzey değişimlerini tespit etmek için kullanılan su çıkarma indekslerinin başarı düzeylerini ortaya koymayı hedeflemektedir. Her bir baraj yüzeyinin zamansal değişimi Sentinel 2 görüntüleri işlenerek Google Earth Engine (GEE) platformunda elde edilmiştir. Uydu platformundan elde edilen çeşitli raster görüntü bantları kullanılarak normalleştirilmiş fark su indeksi (Normalized Difference Water Index-NDWI), değiştirilmiş normalleştirilmiş fark su indeksi (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI), gölgeli görüntüler üzerinden otomatik su çıkarma indeksi (Automated Water Extraction Index Shadow - AWEI<sub>sh</sub>) ve gölgesiz görüntüler üzerinden otomatik su çıkarma indeksi (Automated Water Extraction Index Non-Shadow-AWEI<sub>nsh</sub>) veri setleri hesaplanmıştır. Su çıkarma indekslerinin doğruluk bilgileri, Google Earth Pro'nun QuickBird, WorldView ve GeoEye görüntüleri referans kabul edilerek hesaplanmıştır. Hata matrisi kullanılarak her bir indeks için genel doğruluk (OA), Kappa (K) istatistiği ve F1-skor değerleri hesaplanmıştır. Ardından her bir barajın Otsu eşik belirleme yöntemiyle türetilen sınırları ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nden sağlanan 1:5000 ölçekli ortofoto haritalar üzerinden sayısallaştırılan baraj sınırları arasında yakınlık analizleri yapılarak indekslerin sınır tespitindeki başarısı değerlendirilmiştir. Karesel ortalama hata formülü kullanılarak yapılan değerlendirmeler, farklı özelliklere sahip yerlerde baraj su yüzeyi sınırlarının belirlenmesinde kullanılan indekslerin başarısını ölçen metodolojik bir çerçeve sunmuştur. Test işlemlerinin gerçekleştirildiği Ömerli, Darlık, Elmalı, Terkos ve Büyüçekmece barajlarında AWEI<sub>sh</sub> en iyi sonuç üreten indeks olarak ön plana çıkmıştır. Diğer taraftan, birçok akademik çalışmada sıklıkla kullanılan NDWI, hesaplanan yüksek Kappa ve OA değerleri ile etkin bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. MNDWI ve AWEI<sub>nsh</sub> indeksleri ise İstanbul genelinde diğer indekslere göre daha düşük performans sergilemiştir.

## Anahtar Sözcükler

Otsu Eşik Yöntemi, NDWI, MNDW, AWEI<sub>sh</sub>, AWEI<sub>nsh</sub>

## 1. Giriş

Baraj su miktarlarının belirlenmesi ve su seviyelerindeki değişimlerin ölçülmesi, su yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerinin daha iyi anlaşılması açısından bir gerekliliktir (Lee vd., 2021). Baraj su seviyeleri, nehir ağzlarına, köprülerin ve savakların yakınlarına kurulan yerinde ölçüm istasyonları ile ölçülür. Yerinde ölçüm istasyonlarının kurulu olmadığı yerlerde su seviyesi bilgisinin doğrudan elde edilmesi mümkün değildir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde su seviyesinin hiç ölçülmediği çok sayıda uzak göl ve rezervuar mevcuttur (Duan ve Bastiaanssen, 2013). Bu su kütlelerinin hacim tespitinde son yıllarda uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) araçlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır.

UA görüntülerinden su kütlelerini çıkarmak için tek bant yoğunluğu dilimleme, spektral su indeksleri (Du vd., 2016), su ve su dışı ayrımı yapmak için eşik belirleme (Sekertekin, 2021), çeşitli makine öğrenme algoritmaları ve sınıflandırma teknikleri (Yılmaz, 2023) dahil olmak üzere farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bir görüntüdeki su ve kara ayrımı bu yüzeylerin elektromanyetik spektruma verdiği tepkilerden faydalanılarak hesaplanabilir. Farklı spektral bant kombinasyonları kullanılarak su yüzeyinin ön plana çıkarılmasını sağlayan çeşitli matematiksel formüller su çıkarma indeksleri olarak adlandırılmaktadır (Yılmaz, 2023). Karasal bitki ve toprak özelliklerini bastırarak su yüzeyini belirgin hale getiren normalleştirilmiş fark su indeksi (Normalized Difference Water Index-NDWI) yeşil ve yakın kızılötesi (near infrared-NIR) bant değerlerinin matematiksel kombinasyonuna dayanır (McFeeters, 1996). NDWI kentel alanlarda su değerlerini yeterince iyi yansıtmadığı için yakın kızılötesi bant yerine kısa dalga kızıl ötesi (short-wave infrared-SWIR) bantı kullanılarak değiştirilmiş NDWI (Modified NDWI-MNDWI) geliştirilmiştir (Xu, 2006). Suyun gölge ve koyu renk yüzeylerden ayırt edilebilmesi için otomatik su çıkarma indeksi (Automated Water Extraction Index Shadow - AWEI) öne çıkan bir diğer indekstir. Bu indeks gölgeli alanlar için AWEI<sub>sh</sub> ve gölgesiz alanlar için ise AWEI<sub>nsh</sub> olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanmıştır (Feyisa vd., 2014).

Bu çalışma, İstanbul'un barajlarındaki su yüzey değişimlerini izlemek için kullanılabilecek su çıkarma indekslerinin (NDWI, MNDWI, AWEI<sub>sh</sub>, AWEI<sub>nsh</sub>) başarı performanslarını ortaya koymayı hedeflemiştir. Dört ayrı indeks kullanılarak elde edilen raster görüntüler Otsu yöntemiyle baraj sınırlarına dönüştürüldükten sonra 1:5000 ölçekli ortofotolardan çıkarılan yüksek doğruluklu sınırlar ile karşılaştırılmıştır.

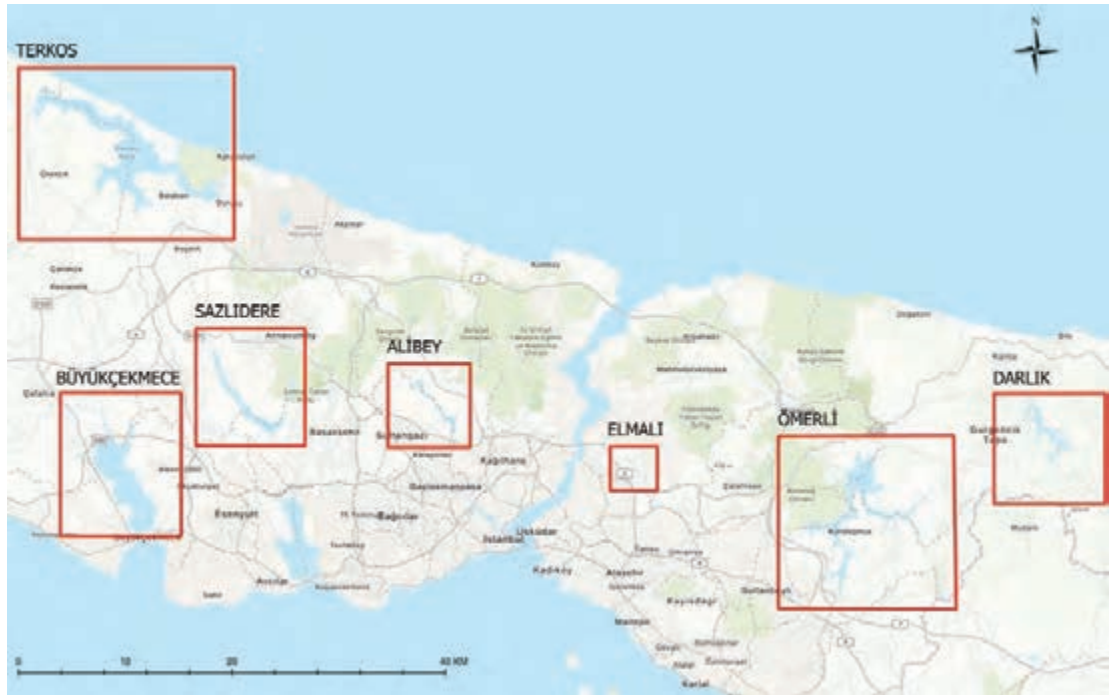
\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (545) 3696784

E-posta: gamze.kara1@std.yildiz.edu.tr (Kara G.), osmansalih.yilmaz@cbu.edu.tr (Yılmaz O.), fgulgen@yildiz.edu.tr (Gülgen F.)

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada İstanbul'un Anadolu yakasında bulunan Darlık, Ömerli ve Elmalı barajları ile Avrupa yakasında bulunan Sazlıdere, Terkos, Alibey ve Büyükçekmece barajları incelenmiştir (Şekil). 1985–1989 yılları arasında Darlık Deresi üzerinde inşa edilen Darlık Barajı, İstanbul'un su ihtiyacının % 15'ini karşılamaktadır (Gaygusuz vd., 2017). 41°08' ile 40°50' kuzey enlemleri ile 29°30' ile 29°42' doğu boylamları arasında yer alan Darlık Barajı'na toplanan sular 207 km<sup>2</sup>'lik havza alanından toplanmaktadır ve baraj gölü yüzey alanı 6 km<sup>2</sup> alana sahiptir (Tilav ve Gülbaz, 2024). Ömerli Barajı, 1968-1972 yılları arasında Çayağz Deresi üzerinde, içme suyu temini amacıyla inşa edilmiştir (Gözübenli, 2024). Şehrin su ihtiyacının %23'ünü karşılar (Şenol, 2013). 23,1 km<sup>2</sup>'lik bir alanda 2,2x106 m<sup>3</sup> su tutma kapasitesine sahip bir barajdır (Güvensel, 2006). Sultanbeyli, Kurtköy, Samandıra, Paşaköy, Alemdağ, Sarıgazi ve Yenidoğan yerleşmeleri çevrilidir (Şenol, 2013). İstanbul'a su sağlayan kaynaklar arasında en küçük paya sahip olmasına rağmen Elmalı Barajı, kente yakınlığı sebebiyle düşük maliyetli su kaynaklarından biridir (Özonat, 2017). İstanbul'a içme suyu temini amacıyla Sazlıdere Çayı üzerine inşa edilen Sazlıdere Barajı, Terkos Gölü'nün (Durusu) güneydoğusunda ve Küçükçekmece Gölü'nün kuzeydoğusunda yer almaktadır (Yılmaz, 2018). Barajın drenaj alanı 165 km<sup>2</sup>'dir ve şehre yılda 55 milyon m<sup>3</sup> su sağlamaktadır (Özdemir, 2010). Alibey Barajı İstanbul'un şehir merkezine 25 km uzaklıkta kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda bir konuma sahiptir (Özdemir vd., 2009). 1975-1983 yılları arasında inşa edilen baraj, 30 m yüksekliğinde, ve 2 hm<sup>3</sup> hacme sahip kaya dolgu baraj olarak yapılmış, normal su kotunda baraj haznesi 67 hm<sup>3</sup> ve göl alanı 5 km<sup>2</sup>'dir (Elçi vd., 2017). Terkos Barajı, Karadeniz'e yakın bir konumda İstanbul'un kuzeyinde yer almaktadır (Karatoy, 2004). İstanbul'un 40° 19' kuzey ve 28° 32' doğu enlemlerinde yer alan baraj 12 km uzunluk ve 5 km genişliğe sahiptir (Yılmaz vd., 2012). 10 km<sup>2</sup> yüzölçüme sahip olan Büyükçekmece Gölü denizin kara içerisine doğru yaptığı girintidir (Biricik, 1998). 162 milyon m<sup>3</sup> hacme sahiptir (Alp, 1996).



Şekil 1: Test işlemlerinin gerçekleştirildiği barajlar

### 2.2. Kullanılan Veri Kaynakları

Bu çalışmada baraj yüzeyleri, su kalitesi izleme ve doğal afet yönetimi gibi hizmetleri destekleyen ve 10 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel 2 görüntüleri kullanılarak belirlenmiştir. Javascript, Python gibi yazılım dillerini desteklemesi, birçok ücretsiz uydu platformuna erişim sağlaması ve büyük verileri hızlıca analiz edebilmesi sebebiyle Sentinel 2 görüntüleri Google Earth Engine (GEE) platformunda işlenmiştir. Bu sayede elde edilen indekslere ait raster veri setleri bir bulut platform olan Google Drive'da depolanabilmektedir. Su çıkarma indekslerinin doğrulukları Terkos, Alibey, Sazlıdere, Büyükçekmece ve Darlık barajları için 08.2021 tarihli 10 m çözünürlüklü QuickBird, WorldView ve GeoEye görüntüleri, Ömerli ve Elmalı barajları için 10.2022 tarihli 10 m çözünürlüklü QuickBird, WorldView ve GeoEye görüntüleri referans kabul edilerek değerlendirilmiştir (Tablo 1). Ayrıca, analiz sonucu belirlenen baraj yüzeylerinin

doğruluklarını değerlendirmek için baraj sınırlarını gösteren referans bir veri seti elde etmek adına İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB)'nin 1:5000 ölçekli 20 adet ortofoto görüntüsü ArcGIS Pro yazılımı üzerinde sayısallaştırılmıştır (Tablo 2). Çalışmada kullanılan Sentinel görüntülerinin alınma tarihi ile sayısallaştırılan ortofotoların tarihlerinin birbiri ile uyumlu olmasına dikkat edilmiştir.

Tablo 1: Doğruluk değerlendirmesi için kullanılan görüntülerin özellikleri

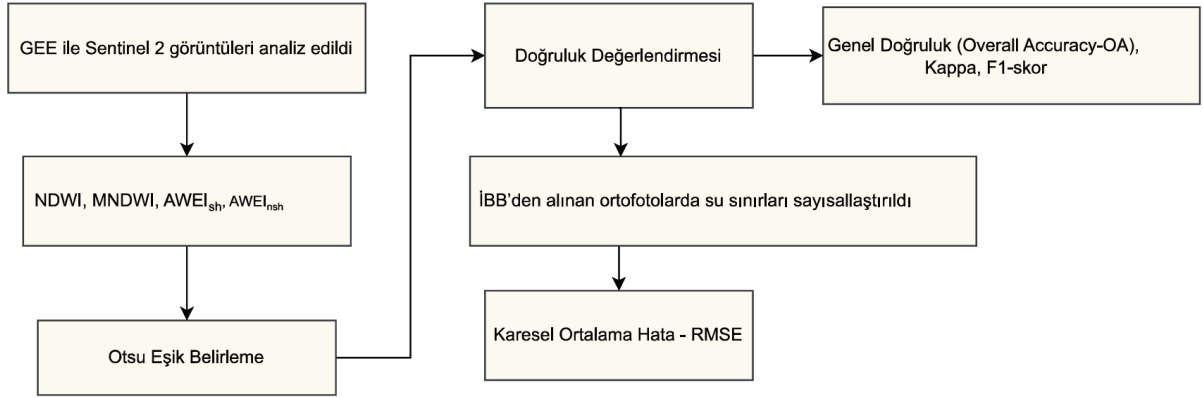
BARAJ	UYDU	MEKANSAL ÇÖZÜNÜRLÜK (m)	TARİH
Terkos, Alibey, Sazlıdere, Büyükçekmece ve Darlık	QuickBird, WorldView, GeoEye	10	08.2021
Ömerli ve Elmalı	QuickBird, WorldView, GeoEye	10	10.2022

Tablo 2: Kullanılan görüntülerin tarihleri

Pafta Adı	Ortofoto Üretim Tarihi	Sentinel Görüntü Tarihi
F21A16B	07.08.2021-08.08.2021	05.08.2021-11.08.2021
F21A18A	07.08.2021-08.08.2021	05.08.2021-11.08.2021
F21A22A	07.08.2021-09.08.2021	05.08.2021-11.08.2021
F21C14A	05.07.2021-09.07.2021	05.07.2021-15.07.2021
F21C14D	05.07.2021-09.07.2021	05.07.2021-15.07.2021
F21D14B	05.07.2021-09.07.2021	05.07.2021-15.07.2021
F21D14C	05.07.2021-09.07.2021	05.07.2021-15.07.2021
F21D15D	05.07.2021-09.07.2021	05.07.2021-15.07.2021
F21D16C	16.09.2021-17.09.2021	15.09.2021-20.09.2021
F21D17A	05.07.2021-09.07.2021	02.07.2021-12.07.2021
F21D22A	18.09.2021-19.09.2021	15.09.2021-20.09.2021
F22C18C	07.09.2022-10.09.2022	07.09.2022-10.09.2022
F22C22C	07.09.2022-10.09.2022	07.09.2022-10.09.2022
F22C23A	07.09.2022-10.09.2022	07.09.2022-10.09.2022
F22D18A	07.09.2022-10.09.2022	07.09.2022-10.09.2022
F22D18B	04.11.2021	20.10.2021-19.11.2021
F22D18D	07.09.2022-10.09.2022	07.09.2022-10.09.2022
F23D12D	03.08.2021-04.08.2021	02.08.2021-04.08.2021
F23D17B	03.08.2021-04.08.2021	02.08.2021-04.08.2021
F23D17C	29.06.2021-04.07.2021	13.06.2021-04.07.2021

### 2.3. Metodoloji

Çalışmada uygulanan iş akışı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: İş akış diyagramı

Darlık, Ömerli, Elmalı, Sazlıdere, Terkos, Alibey ve Büyükçekmece barajlarının İBB ortofoto görüntü tarihi ile uyumlu uydu görüntüleri GEE platformunda işlenerek sırası ile NDWI (1), MNDWI (2), AWEI<sub>sh</sub> (3) ve AWEI<sub>nsh</sub> (4) su çıkarma indeksi veri setleri türetilmiştir.

$$NDWI = \frac{YEŞİL - NIR}{YEŞİL + NIR} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{YEŞİL - SWIR}{YEŞİL + SWIR} \quad (2)$$

$$AWEI_{sh} = MAVİ + 2.5 \times YEŞİL - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (3)$$

$$AWEI_{nsh} = 4x(YEŞİL - SWIR1) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR2) \quad (4)$$

Hesaplanan indekslerden su ve kara yüzeylerinin birbirinden ayrılabilmesi adına sıklıkla tercih edilen eşik belirleme yöntemi olan Otsu eşik belirleme yöntemi kullanılmıştır (Donchyts vd., 2016).

$$p(i) = \frac{n(i)}{N}, \quad p(i) \geq 0, \quad \sum_{i=0}^{L-1} p(i) = 1 \quad (5)$$

Otsu eşik belirleme yöntemi için öncelikle Eşitlik (5) ile her gri seviye değeri için olasılık hesaplanır. Burada n(i) i.gri seviyedeki piksel sayısını, N toplam piksel sayısını, L ise gri seviye sayısını temsil eder (Sekertekin, 2021).

$$\omega(t) = \sum_{i=0}^t p(i) \quad (6)$$

$$\mu(t) = \sum_{i=0}^t i x p(i) \quad (7)$$

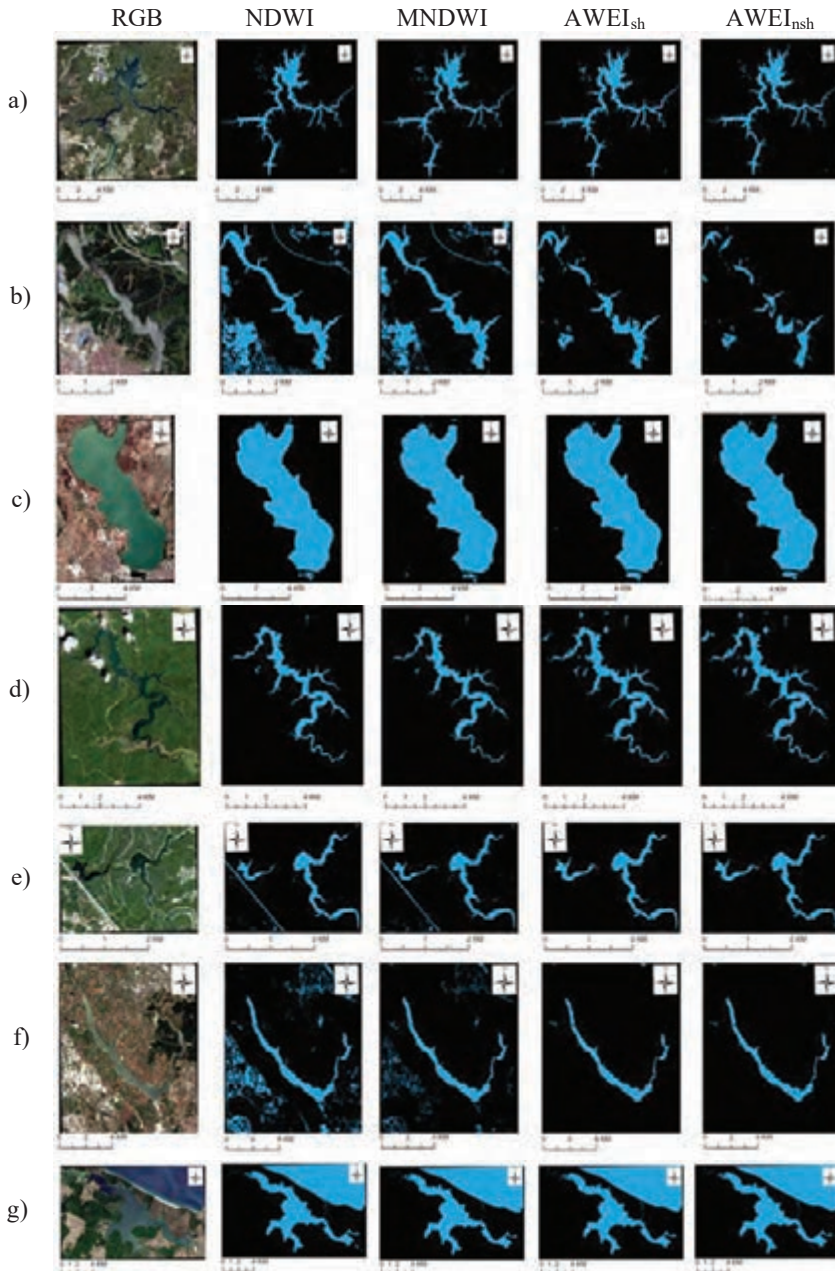
$$\mu T = \sum_{i=0}^{L-1} i x p(i) \quad (8)$$

Görüntünün ortalama gri değer seviyesi  $\mu T$ , Eşitlik (6-7) ile yani sırası ile histogramın sıfırıncı  $\omega(t)$  ve  $t$ 'inci seviyeye kadar olan birinci dereceden kümülatif momentleri  $\mu(t)$  elde edilir (Yılmaz, 2023).

$$\vartheta_B^2(t) = \frac{[\mu T \omega(t) - \mu(t)]^2}{\omega(t)[1 - \omega(t)]} \quad (9)$$

$$t^* = \max_{t \in G} t \vartheta_B^2(t) \quad (10)$$

En uygun eşik belirleme yöntemi olan  $t^*$  değeri Eşitlik 9'un Eşitlik 10'da yerine koyulmasıyla hesaplanır. Buna göre her bir indekse bağlı olarak Otsu yöntemiyle belirlenen baraj sınırları Şekil 3'te görünmektedir.



Şekil 3: İndeksler kullanılarak belirlenen baraj yüzeyleri

*İstanbul'daki Barajların Su Yüzeylerinin Uzaktan Algılama Teknikleri ile Tespitinde Uygun Su Çıkarma İndekslerinin Belirlenmesi*

Doğruluk değerlendirmesi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Google Earth Pro'dan sağlanan Tablo 1'de detayları verilen görüntüler kullanılmıştır. Barajların büyüklüklerine göre rastgele noktalar atılmış ve bu noktalar su olanlar 1 ve su olmayanlar 0 olarak etiketlenmiştir. Bu etiketlemelerin sonucunda her bir baraj için hata matrisleri bulunmuş ve OA (11), Kappa istatistiği (12) ve F1-skor (13) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 3: Hata matrisi

	SU	SU OLMAYAN
SU	Gerçek Pozitif (GP)	Yanlış Negatif (YN)
SU OLMAYAN	Yanlış Pozitif (YP)	Gerçek Negatif (GN)

$$\text{Genel Doğruluk (OA)} = \frac{GP + GN}{N} \quad (11)$$

Eşitlik 11'de N değeri toplam değeri ifade eder.

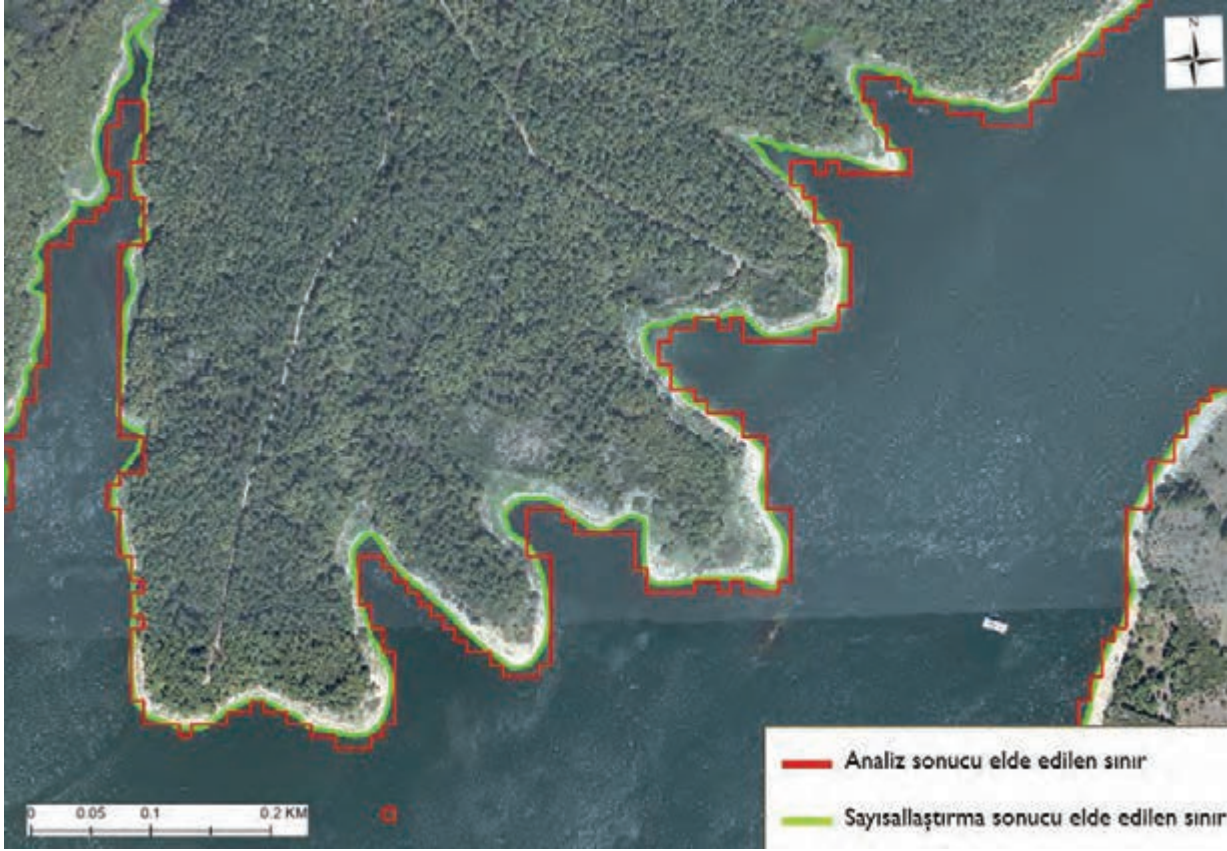
$$\text{Kappa} = \frac{\frac{GP}{GP + YP} - \frac{(GP + YP) * (GP + YN) + (YN + GN) * (YP + GN)}{N^2}}{1 - \frac{(GP + YP) * (GP + YN) + (YN + GN) * (YP + GN)}{N^2}} \quad (12)$$

$$\text{F1 - skor} = \frac{2 * GP}{(2 * GP + YP + YN)} \quad (13)$$

Doğruluk değerlendirmesinin ikinci aşamasında da İBB'den alınan ortofotolar ArcGIS Pro programında manuel olarak sayısallaştırılarak indeks hesaplaması sonucu bulunan su sınırları arasında yakınlık analizi yapılmıştır (Şekil 4). Ardından her bir baraj için indeks sonuçlarının referans veriye göre karesel ortalama hata değerleri hesaplanmıştır (14).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (14)$$

Bu eşitlikte yer alan d değeri yatay konum farkını, n değeri ise toplam ölçü nokta sayısını temsil etmektedir (Gökgöz vd., 2019).



Şekil 4: Elde edilen iki sınır arasındaki fark

### 3. Bulgular

Tablo 4’te her bir baraj için hesaplanan doğruluk göstergeleri verilmiştir. Buna göre  $AWEI_{sh}$  diğer indekslere göre daha fazla ön plana çıkmıştır. Genel olarak bu indekste barajlarda hesaplanan OA değerleri %94,68’in üzerinde bulunmuştur. Başarılı kabul edilen bu OA değerleri için RMSE değerleri de çok düşük seviyelerdedir. Özellikle Ömerli, Darlık, Elmalı, Terkos ve Büyükçekmece Barajı’nda  $AWEI_{sh}$  indeksinin başarısı oldukça yüksektir.  $AWEI_{sh}$  indeksinin gölge etkisi altındaki yüzeylerde bile su varlığını başarıyla ayırt edebildiği ve özellikle karmaşık ve yansımaya açık alanlarda bu indeksin tercih edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. %97’nin üzerindeki OA ve %90’lar seviyesindeki Kappa değerleri ile dikkat çeken NDWI da Ömerli, Alibey ve Darlık barajlarında yüksek bir performans göstermiştir. Bu bulgular, NDWI indeksinin geniş su yüzeylerinin bulunduğu ve bitki örtüsünün az olduğu alanlarda halen geçerli ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Diğer indekslere göre daha düşük OA, Kappa ve F1-skor değerleri ve daha yüksek RMSE değerleri ile MNDWI ve  $AWEI_{nsh}$  daha düşük performans göstermiştir. MNDWI, özellikle yansımali yüzeylerde yalancı pozitif sonuçlara neden olmuş;  $AWEI_{nsh}$  ise teorik olarak gölgesiz alanlar için optimize edilmiş olmasına rağmen, analiz edilen barajlarda düşük F1-skor değerleri sebebiyle performans açısından geride kalmıştır.

*İstanbul'daki Barajların Su Yüzeylerinin Uzaktan Algılama Teknikleri ile Tespitinde Uygun Su Çıkarma İndekslerinin Belirlenmesi*

Tablo 4: Barajlara ait doğruluk analizi

BARAJ	İNDEKS	RMSE	OA (%)	K	F1-SKOR (%)
ÖMERLİ	NDWI	21,67	97,38	0,910	92,53
	MNDWI	32,03	93,48	0,772	81,12
	AWEI <sub>sh</sub>	13,46	97,00	0,898	91,58
	AWEI <sub>nsh</sub>	21,56	96,42	0,875	89,69
DARLIK	NDWI	19,17	97,97	0,914	92,53
	MNDWI	28,93	97,63	0,898	91,18
	AWEI <sub>sh</sub>	12,91	97,07	0,882	89,86
	AWEI <sub>nsh</sub>	32,57	96,50	0,859	87,94
ELMALI	NDWI	25,74	95,59	0,816	84,14
	MNDWI	20,06	93,54	0,731	76,83
	AWEI <sub>sh</sub>	17,39	97,34	0,886	90,15
	AWEI <sub>nsh</sub>	32,61	95,94	0,821	84,45
SAZLIDERE	NDWI	7,57	89,07	0,535	58,64
	MNDWI	5,93	95,55	0,753	77,64
	AWEI <sub>sh</sub>	10,04	99,12	0,940	94,46
	AWEI <sub>nsh</sub>	11,65	99,15	0,942	94,66
TERKOS	NDWI	56,81	98,29	0,965	98,06
	MNDWI	56,69	98,88	0,977	98,71
	AWEI <sub>sh</sub>	55,21	99,25	0,985	99,14
	AWEI <sub>nsh</sub>	55,66	99,09	0,981	98,95
ALİBEY	NDWI	6,42	91,42	0,738	78,86
	MNDWI	8,79	91,57	0,736	78,73
	AWEI <sub>sh</sub>	30,45	94,68	0,792	82,34
	AWEI <sub>nsh</sub>	54,32	91,15	0,612	65,87
BÜYÜKÇEKMECE	NDWI	45,58	98,64	0,969	97,86
	MNDWI	50,60	98,51	0,965	97,64
	AWEI <sub>sh</sub>	43,83	98,82	0,973	98,16
	AWEI <sub>nsh</sub>	44,50	98,61	0,968	97,83

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Su yüzeylerindeki değişimlerin takip edilmesi artan nüfus ve iklim değişikliği nedeniyle büyük önem arz etmektedir. Her baraj çevresel, spektral ve fiziksel olarak farklı özelliklere sahiptir. Bitki yoğunluğu, şehirleşme ve zemin tipi bu özelliklere örnek olarak verilebilir. Bu nedenle herhangi bir su çıkarma indeksinin tüm barajlarda çok iyi sonuç vermesi beklenemez. Bu çalışma, farklı barajların farklı çevresel koşullarda su indekslerinin performanslarına dair karşılaştırmalı bir bakış açısı sunmaktadır. Elde edilen bulgulara göre:

- Tek indeks kullanımı yerine, çoklu indeks değerlendirmesi yapılarak daha doğru kararlar verilebilir.
- AWEI<sub>sh</sub> indeksi, bu çalışmada en başarılı performansı vermiştir.
- NDWI, geniş yüzey kaplayan, belirgin coğrafi yapıya sahip barajlarda daha etkindir.
- İndeks seçimi çalışma alanının karakteristik özellikleri dikkate alınarak yapılmalıdır.

## Kaynaklar

- Alp, M. (1996). *İstanbul'un su kaynakları ve Büyük Melen sistemi'nin değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Biricik, A. S. (1998). İstanbul şehri ve su. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (2), 11-32.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4), 354.
- Duan, Z., & Bastiaanssen, W. G. M. (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 134, 403-416.
- Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., & van de Giesen, N. (2016). A 30 m resolution surfacewater mask including estimation of positional and thematic differences using landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A case study in the Murray-Darling basin, Australia. *Remote Sensing*, 8(5), 386. doi: 10.3390/rs8050386.
- Elçi, Ş., Tayfur, G., Haltas, İ., & Kocaman, B. (2017). Baraj yıkılması sonrası iki boyutlu taşkın yayılımının yerleşim bölgeleri için modellenmesi. *Teknik Dergi*, 28(3), 7955-7975.
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 140, 23-35.
- Gaygusuz, Ö., Gaygusuz, Ç. G., & Dorak, Z. (2017). Darlık deresi ve kollarının (Şile-İstanbul) balık türü çeşitliliği. *Turkish Journal of Bioscience and Collections*, 1(1), 29-37.
- Gökgöz, T., Erdoğan, M., Seyrek, K., & Ozulu, İ. M. (2019). Batı Akdeniz Havzası Sınırlarının Yüksek Doğrulukla Belirlenmesi. *Teknik Dergi*, 30(3), 9073-9105.
- Gözübenli, R. (2024). Ömerli barajı olası kırıma durumunda oluşturacak taşkın yayılım haritalarının elde edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Güvensel, T. (2006). Ömerli Baraj Gölü su kalitesinin araştırılması. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karatoy, E. (2004). *Durusu (Terkos) Gölü Çapak Balıkları (Abramis) Brama Linnaes, 1758)'nin Metazoan Parazitleri*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Lee, Y. K., Hong, S. H., & Kim, S. W. (2021). Monitoring of water level change in a dam from high-resolution sar data. *Remote Sensing*, 13(18), 3641.
- 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.
- Özdemir, A. C. (2010). İstanbul içme suyu havzalarında arazi kullanımlarının su kalitesine olan etkisinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Özdemir Y., & Akar İ. (2009) Çok zamnalı uydu görüntüleri ve CBS ile Alibeyköy Barajı ve yakın çevresinin arazi kullanımı özelliklerinin belirlenmesi. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2009*, 02-06 Kasım, İzmir.
- Özonat Ç. (2017) Arazi Kullanım Değişiklerinin İçme Suyu Havzaları Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi: Elmalı Baraj. Uzmanlık Tezi, Ankara, Türkiye.
- Sekertekin, A. (2021). A Survey on Global Thresholding Methods for Mapping Open Water Body Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Normalized Difference Water Index. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3).
- Şenol, C. İstanbul'un içme suyu havzalarının ekolojik sorunları. *III. Ulusal Jeomorfoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı 2012*.
- Tilav, E. S., & Gülbaz, S. (2024). Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkının İncelenmesi: Darlık Barajı Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 49-67.
- 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.
- Yılmaz, N. (2018). Assesment of seasonal variation of phytoplankton and related water quality parameters of Sazlidere Dam Lake (İstanbul, Turkey). *Desalination and Water Treatment*, 131, 107-113.

---

*İstanbul'daki Barajların Su Yüzeylerinin Uzaktan Algılama Teknikleri ile Tespitinde Uygun Su Çıkarma İndekslerinin Belirlenmesi*

---

Yılmaz, N., & Güleçal, Y. (2012). Phytoplankton community of Terkos Lake and its influent streams, Istanbul, Turkey. *Pak. J. Bot*, 44(3), 1135-1140.

Yılmaz, O. S. (2023). Uzaktan algılama teknikleri ile su yüzeylerinin tespit edilmesinde kullanılan su çıkarma indekslerinin performans analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 4(2), 242-261.

# Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve DeepLabV3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması

**Melih ALTAY<sup>1,\*</sup>, Fatih Fehmi ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Kaan KALKAN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

<sup>2</sup>TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

<sup>3</sup>TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

## Özet

Uydu görüntülerinden su yüzeyinin belirlenmesi, çevresel izleme, taşkın yönetimi ve sürdürülebilir su kaynakları planlaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Sentinel-2 uydu verileri kullanılarak otomatik su yüzeyi bölütleme (segmentasyon) işlemi için U-Net ve DeepLabV3+ mimarilerinin başarımı karşılaştırılmıştır. Modelin eğitim ve değerlendirilmesi için, 10 metre mekansal çözünürlüğe sahip ve küresel ölçekte seçilmiş 95 sahnedan oluşan Earth Surface Water Dataset kullanılmıştır. Her iki modelde de 6 bantlı giriş verisi, 8'lik yığın (batch) boyutu, 50 dönem (epoch) ve 0,001 öğrenme oranı ile Adam eniyileyicisi (optimizer) parametreleri uygulanmıştır. Sınıf dengesizliğini azaltmak amacıyla İkili Çapraz Entropi (BCE) kaybı, Dice Kayıp Fonksiyonu ile birleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, U-Net+ResNet18 modeli doğrulama kümesinde %97,3 piksel doğruluğu, 0,974 IoU (kesişim-birleşim) puanı ve 0,974 Dice katsayısı elde etmiş; doğrulama kaybı ise 0,014 olmuştur. DeepLabV3+ResNet18 modeli ise %98,4 piksel doğruluğu, 0,982 IoU ve 0,982 Dice katsayısı ile daha yüksek başarımler sergileyerek doğrulama kaybını 0,012'ye düşürmüştür. DeepLabV3 mimarisinde yer alan aralık evrişim (atrous convolution) ve Atrous Mekansal Piramit Havuzlama (ASPP) modülü, U-Net'e kıyasla %1,1 oranında piksel doğruluğu artışı (%97,3'ten %98,4'e) ve 0,008 puanlık IoU artışı (0,974'ten 0,982'ye) sağlamış; özellikle karmaşık su kütlelerinin sınırlarının ayrıntılı biçimde belirlenmesinde üstünlük göstermiştir. Her iki model de aşırı uyum (overfitting) göstermeden su yüzeylerinin tayfsal özelliklerini etkili şekilde işlemiştir. Elde edilen bulgular, U-Net mimarisinin gerçek zamanlı uygulamalar için yüksek hesaplama verimliliği sağladığını, buna karşın DeepLabV3 mimarisinin yüksek doğruluk gerektiren kritik uzaktan algılama uygulamalarında daha üstün bölütleme kalitesi sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, çevresel izleme ve iklim değişikliğinin etkilerinin değerlendirilmesinde otomatik su yüzeyi haritalamanın geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

## Anahtar Kelimeler

Su yüzeyi algılama, Derin öğrenme, Sentinel-2, U-Net, DeepLabV3, Uzaktan algılama, Anlamsal segmentasyon

## 1. Giriş

Doğal su kaynakları, ekosistem sürdürülebilirliği, iklim değişikliğinin etkilerinin izlenmesi ve afet yönetimi açısından stratejik öneme sahiptir. Yeryüzü su kaynaklarının mekansal ve zamansal değişimlerinin doğru biçimde izlenmesi, harita mühendisliği alanında mekansal planlama, taşkın yönetimi, tarımsal sulama ve doğal afet analizleri gibi kritik uygulamalarda merkezi bir rol üstlenmektedir. Ancak, geleneksel görüntü işleme yöntemleri, özellikle sınırları karmaşık ve parçalı yapıya sahip su kütlelerinde yetersiz kalmakta; bu nedenle son yıllarda derin öğrenme (deep learning) temelli yaklaşımlar giderek daha yaygın şekilde tercih edilmektedir (Zhang vd., 2023; Li vd., 2022; Wang vd., 2021; Zhao vd., 2017; Ronneberger vd., 2015).

Derin öğrenme tabanlı anlamsal bölütleme (semantic segmentation) mimarileri arasında U-Net ve DeepLabV3+ öne çıkmaktadır. U-Net'in simetrik kodlayıcı-çözücü (encoder-decoder) yapısı ve çoklu ölçeklerdeki özellik haritalarını birleştirme yeteneği, modelin özellikle küçük ve ince detaylara sahip nesnelerin bölütlenmesinde etkili olmasını sağlamaktadır (Ronneberger vd., 2015). Bu mimarinin farklı türevleri, uydu görüntülerinden su kütlelerinin tespitinde başarılı sonuçlar üretmiş; ayrıca dikkat mekanizmaları (attention mechanisms) ile geliştirilmiş U-Net varyantlarının sınır doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir (Zhao vd., 2025). Benzer şekilde, AER U-Net gibi gelişmiş modellerin su kütleleri bölütlenmesinde yüksek genelleme kabiliyeti sunduğu raporlanmıştır (Zhao vd., 2024).

Öte yandan, DeepLabV3+, boşluklu evrişim (atrous convolution) yapısı ve çok ölçekli özellik çıkarımı (multi-scale feature extraction) sayesinde özellikle karmaşık su alanlarının bölütlenmesinde öne çıkmakta; bazı çalışmalarda ortalama IoU (intersection over union) açısından U-Net'e kıyasla yaklaşık %3'lük bir üstünlük sağladığı belirtilmektedir (Zhou vd., 2023). Bu bağlamda mevcut çalışmada, U-Net+ResNet18 ve DeepLabV3+ResNet18 mimarilerinin Earth Surface Water Dataset (Luo vd., 2021) kullanılarak su yüzeylerinin tespitindeki performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, iki mimarinin doğruluk düzeylerini nesnel performans ölçütleriyle ortaya koymak ve harita mühendisliği uygulamaları bağlamında örneğin taşkın yönetimi, ekosistem takibi ve sulama planlaması açısından en uygun yaklaşımı tartışmaktır.

## 2. Veri ve Materyal

Çalışmada kullanılan Earth Surface Water Dataset, Sentinel-2 uyudusuna ait 95 sahadan oluşmakta ve dünyanın farklı bölgelerinde yer almaktadır (Luo vd., 2021). Veri seti, farklı iklim ve arazi örtüsü tiplerine sahip bölgelerde su yüzeylerinin çeşitliliğini yansıtmakta ve böylece farklı çevresel koşullarda model performansının test edilebilmesine imkân tanımaktadır (Şekil 1). Her sahada 10 m mekansal çözünürlüğe sahip Sentinel-2 bantları ve bunlara karşılık gelen yer doğrulamalı su yüzeyi maskeleri bulunmaktadır. Özellikle B2 (Mavi, 490 nm), B3 (Yeşil, 560 nm), B4 (Kırmızı, 665 nm) ve B8 (Yakın Kırmızı, 842 nm) bantları su kütlelerinin tespitinde kritik öneme sahiptir (Du vd., 2016, Pekel vd., 2016, Vanhellemont vd., 2019). Bu bantlar, su yüzeylerinin bitki örtüsü ve diğer kara örtüsü

\* Sorumlu Yazar: Tel: 545 275 13 40

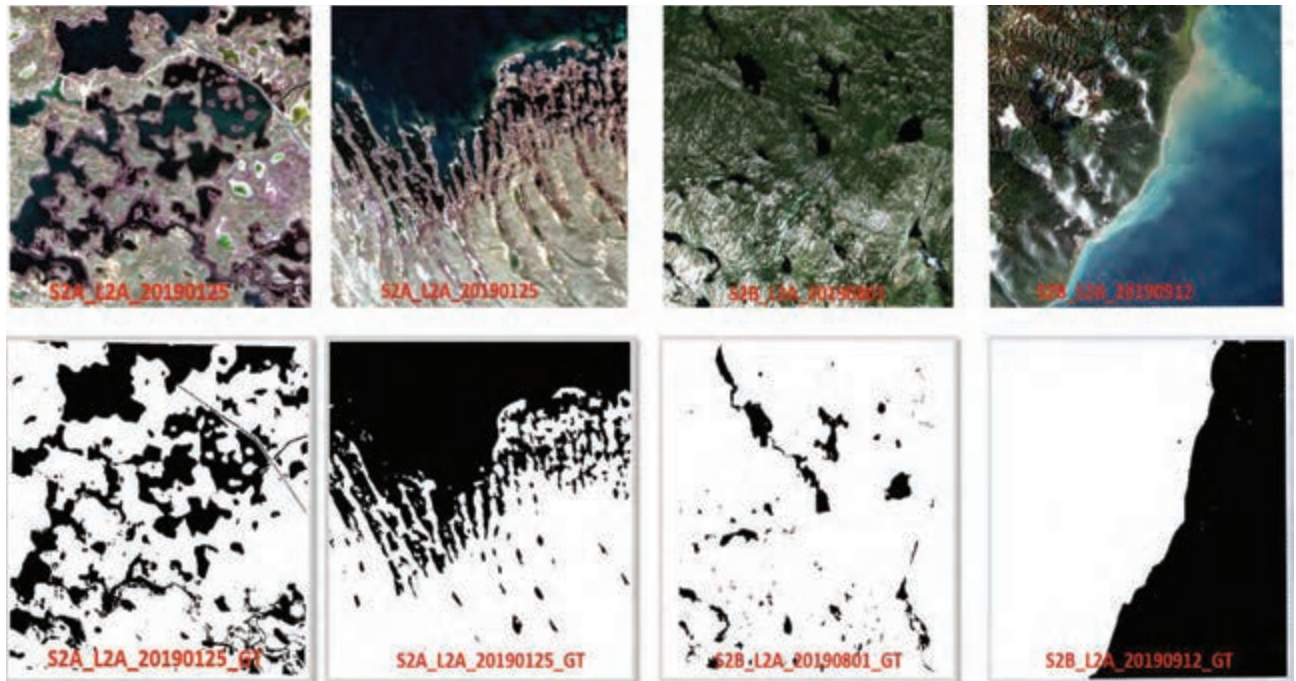
E-posta: melihaltay17@hacettepe.edu.tr (Melih ALTAY)

## Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve DeepLabV3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması

tiplerinden ayrıştırılmasına olanak sağlamakta; aynı zamanda NDWI (Normalized Difference Water Index) gibi spektral indekslerin türetilmesine imkân vererek derin öğrenme tabanlı sınıflandırma ve segmentasyon modellerinde ayırt edici özellikler sunmaktadır. Veri setinin küresel kapsamı ve spektral çeşitliliği, derin öğrenme yöntemlerinin genellenebilirliğini ve aktarılabiliğini artıran önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, her sahaya ait su maskeleri de veri setinde sağlanmış olup, model çıktılarının doğruluk değerlendirmesinde referans veri olarak kullanılmaktadır (Şekil 2). Veri setinin detaylı kompozisyonu incelendiğinde, 95 sahneden 512×512 piksel boyutunda ve 256 piksel kaydırma değeri kullanılarak toplam 147,652 adet yama üretilmiştir. Bu yamaların %78,3'ü (115,712 yama) eğitim seti, %10'u (14,765 yama) doğrulama seti ve %11,7'si (17,175 yama) test seti için ayrılmıştır. Veri setindeki sınıf dağılımı analiz edildiğinde, su piksellerinin toplam piksellere oranı %23,7 olarak hesaplanmış, bu da orta düzeyde bir sınıf dengesizliği durumunu işaret etmektedir. Farklı coğrafi bölgelerden alınan sahnelerin %31'i Avrupa, %28'i Kuzey Amerika, %22'si Asya ve %19'u diğer kıtalardan seçilmiş olup, bu dağılım modelin küresel genellenebilirliğini desteklemektedir.



Şekil 1. Earth Surface Water Dataset kapsamındaki Sentinel-2 sahalarının küresel dağılımı.



Şekil 2. Earth Surface Water Dataset kapsamında Sentinel-2 görüntülerine karşılık gelen yer doğrulamalı (ground truth) su yüzeyi maskesi örnekleri.

### 3. Yöntem

Çalışmanın metodoloji akışı (Şekil 3), çalışmanın omurgasını oluşturmakta ve beş ana adımdan meydana gelmektedir: İlk olarak, Sentinel-2 uydu görüntüleri temin edilerek çalışma alanına ilişkin ham veri seti oluşturulmuştur. Sonrasında temin edilen verilere atmosfere indirgeme/normalize etme ve bant hizalama ön işlemleri uygulanmıştır. Üçüncü adım olarak, model eğitime uygun olacak şekilde görüntüler yama üretimi ile sabit boyutlu örneklerle dönüştürülerek, eğitim/doğrulama veri setlerinin ayrımı yapılmıştır. Dördüncü aşamada model eğitimi gerçekleştirilmiş olup, bu süreçte iki farklı dal izlenmiştir: U-Net+ResNet18 ve DeepLabV3+ResNet18 mimarileri, aynı eğitim protokolü (örneğin BCE + Dice kaybı, benzer öğrenme oranı ve veri artırma stratejileri) kullanılarak eğitilmiştir. Son olarak, model değerlendirme ve karşılaştırma adımında IoU, Dice (F1) ve piksel doğruluğu metrikleri üzerinden performans analizi yapılarak mimarilerin güçlü ve zayıf yönleri istatistiksel ve görsel çıktılarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, Sentinel-2 uydu görüntülerinden yüzey sularının otomatik olarak çıkarılabilmesi amacıyla, U-Net ve DeepLabV3 mimarileri, her iki modelin ResNet18 omurgası kullanılarak karşılaştırılmıştır.

U-Net mimarisi, encoder-decoder yapısı sayesinde hem düşük seviyeli detay bilgilerini hem de yüksek seviyeli semantik bilgileri aynı anda öğrenebilmektedir (Ronneberger vd., 2015). Çalışmada U-Net'in encoder kısmı, önceden ImageNet veri kümesinde eğitilmiş ResNet18 ağı ile güçlendirilmiştir olup, böylece, sınırlı eğitim verisine rağmen güçlü özellik çıkarımı sağlanmış ve transfer öğrenmenin avantajlarından yararlanılmıştır. Decoder aşamasında ise "skip connection" kullanılarak erken katmanlardan gelen ince detay bilgileri yeniden yapılandırma sürecine entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle dar ve doğrusal yapıya sahip nehir veya kanal gibi su yüzeylerinin daha başarılı biçimde tespit edilmesine katkı sağlamaktadır.

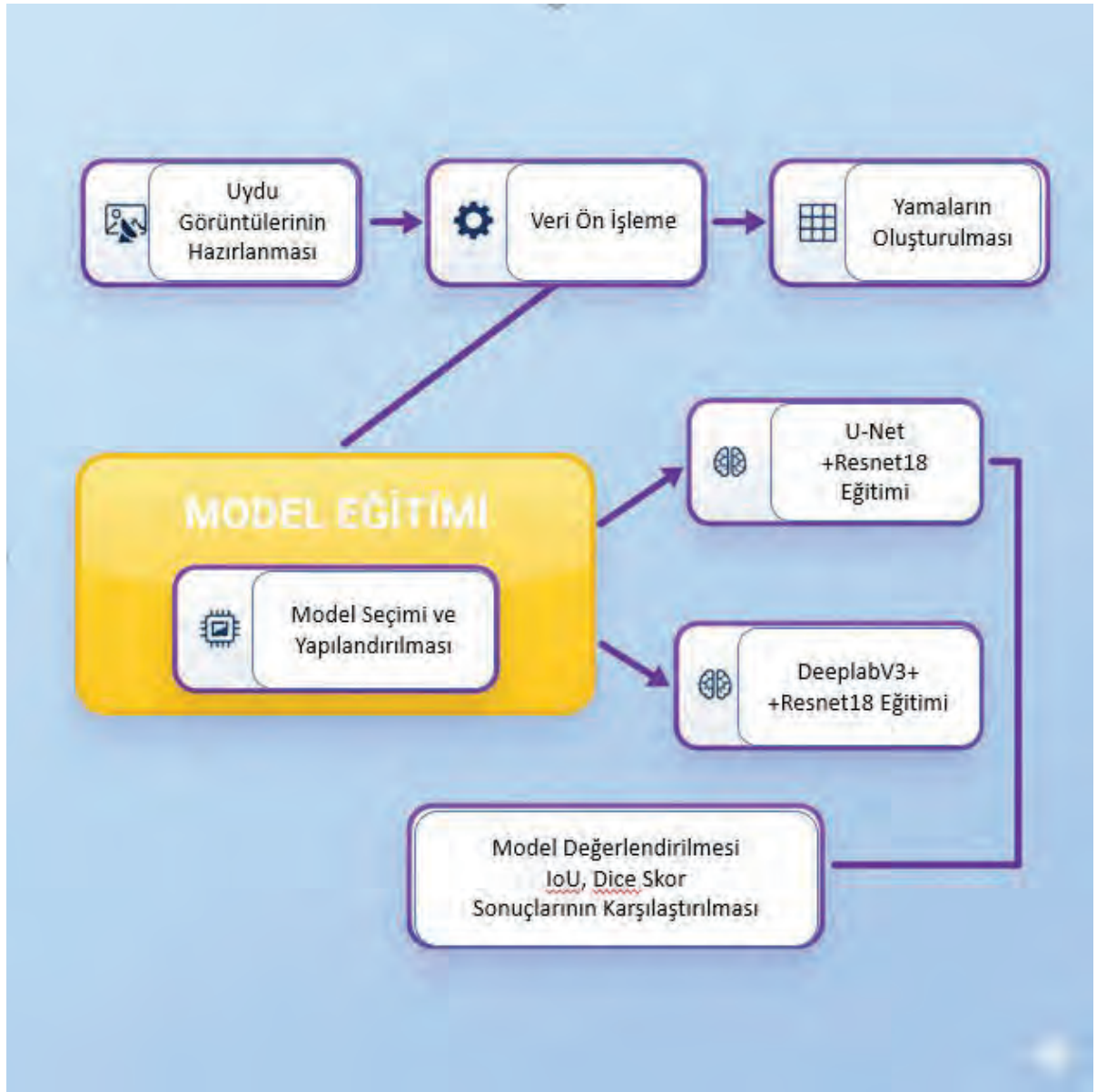
DeepLabV3 mimarisi, segmentasyon görevlerinde Dilated (atrous) Convolution ve Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) yapısı sayesinde çok ölçekli mekânsal özellikleri yakalayabilmektedir (Chen vd., 2018). Bu, farklı boyutlardaki göl, nehir veya su birikintilerinin aynı anda doğru şekilde segmentasyonuna imkân vermektedir. Çalışmada ResNet18 encoder kullanılarak hem hesaplama maliyeti düşürülmüş hem de daha derin özellik çıkarımı sağlanmıştır. Özellikle ASPP katmanı, su yüzeylerinin kenar bölgelerinde farklı ölçekli filtrelemeler yaparak daha hassas sınır belirleme olanağı sunmuştur.

Sentinel-2 görüntüleri, veri setinde sağlanan yüzey suyu maskeleriyle birlikte kullanılmıştır. Görseller, model girişine uygun olacak şekilde 512×512 piksel boyutunda yama bloklarına ayrılmış, bu işlem hem bellek kullanımını optimize etmiş hem de modelin daha fazla örnek üzerinden öğrenmesini sağlamıştır. Model eğitimi için Geoai kütüphanesi kullanılmıştır. Uydu görüntüleri ve maske verileri öncelikle 512×512 piksel boyutunda yamalara bölünmüş, yama üretiminde 256 piksel kaydırma değeri tercih edilmiştir. Bu sayede hem mekânsal çeşitlilik artırılmış hem de sınırlı görüntü sayısına rağmen eğitim için daha zengin bir veri seti elde edilmiş olup, eğitim sürecinde her iki model de ortak parametrelerle çalıştırılmıştır (Tablo 1).

Model eğitimi için TorchGeo ve segmentation\_models.pytorch kütüphaneleri kullanılmıştır. TorchGeo (versiyon 0.5.x), coğrafi ve uzaktan algılama verileriyle çalışmak için optimize edilmiş PyTorch tabanlı bir kütüphane olup, özellikle uydu görüntülerinin işlenmesi ve analizinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Segmentation\_models.pytorch kütüphanesi ise, U-Net, DeepLabV3+, FPN gibi modern semantik segmentasyon mimarilerinin önceden eğitilmiş ağırlıklarıyla birlikte kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Eğitim sürecinde veri artırma (data augmentation) teknikleri uygulanmamıştır; görüntüler yalnızca normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Normalizasyon aşamasında, piksel değerleri [0, 1] aralığına ölçeklenmiş ve ardından ImageNet veri setinden elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak standartlaştırma gerçekleştirilmiştir.

Modelin eğitimi sırasında erken durdurma (early stopping) mekanizması kullanılmamış, tüm modeller sabit bir eğitim rejimi altında 50 epoch boyunca eğitilmiştir. Bu yaklaşım, modellerin öğrenme kapasitesini tam olarak kullanmasını sağlamak ve farklı deney koşulları arasında adil bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla benimsenmiştir. Eğitim sürecinde, her epoch sonunda doğrulama veri seti üzerinde model performansı kaydedilmiş ve en düşük doğrulama kaybına sahip model ağırlıkları saklanmıştır.



Şekil 3. İş Akışı

Tablo 1. Model Eğitim Parametreleri

Parametre	Değer
Mimari	U-Net + ResNet18 / DeeplabV3+ResNet18
Encoder Ağırlıkları	ImageNet
Kanal Sayısı	6
Sınıf Sayısı	2
Yığın Boyutu	8
Epok(Dönem) Sayısı	50
Öğrenme Oranı	0.001
Optimizasyon Algoritması	Adam
Doğrulama Oranı	%10

Eğitim sürecinde kullanılan veri dağılımı detayları aşağıda sunulmaktadır (Tablo 2). Veri setinin büyük ölçeği ve çeşitliliği, modellerin farklı su kütlesi tiplerini (göl, nehir, tarımsal sulama kanalları, geçici su birikintileri) öğrenmesine imkân sağlamıştır. Yama üretim

sürecinde, su içeren yama oranının dengeli dağılımı için tabakalı örnekleme yaklaşımı benimsenmiş, böylece her yığımda su/kara dengesinin korunması hedeflenmiştir.

**Tablo 2.** Veri Dağılım Detayları

Parametre	Değer
Toplam Yama Sayısı	147,652
Eğitim Seti	115,712 (%78,3)
Doğrulama Seti	14,765 (%10,0)
Test Seti	17,175 (%11,7)
Su Piksel Oranı	%23,7
Kara Piksel Oranı	%76,3
Yama Boyutu	512×512
Kaydırma Değeri	256

Veri kümesi rastgele karıştırılarak eğitim-doğrulama ayrımı yapılmış ve modelin doğrulama kayıp değeri üzerinden başarımı izlenmiştir. Kayıp işlevi olarak BCE ile Dice Kayıp birleşimi tercih edilmiştir. Bu tercih, özellikle su-kara sınıfı dengesizliğini azaltarak küçük su alanlarının doğru biçimde belirlenmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca eğitim sürecinde modelin başarımı; kayıp değeri, piksel tabanlı doğruluk, Kesişim Bölümü Birleşim (IoU) ve Dice katsayısı gibi ölçütler üzerinden sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Bu ölçütler hem eğitim hem de doğrulama kümelerinde izlenerek, modelin genel bölütleme başarısı ve sınıf dengesine duyarlılığı nesnel bir biçimde ortaya konmuştur.

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Derin öğrenme tabanlı modellerin performansını objektif olarak değerlendirmek amacıyla, yaygın kullanılan geleneksel su indeksi yöntemleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Bu kapsamda Normalized Difference Water Index (NDWI) (McFeeters, 1996), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) (Xu, 2006) ve Automated Water Extraction Index (AWEI) (Feyisa vd., 2014) hesaplanarak optimal eşik değerleri Otsu algoritması ile belirlenmiştir.  $NDWI = (Yeşil - NIR) / (Yeşil + NIR)$ ,  $MNDWI = (Yeşil - SWIR) / (Yeşil + SWIR)$  formülleri kullanılarak tüm test seti üzerinden geleneksel segmentasyon sonuçları elde edilmiş ve derin öğrenme modellerinin üstünlüğü kantitatif olarak ortaya konmuştur.

Geleneksel su indeksi yöntemleriyle karşılaştırma sonuçları Tablo 3'te sunulmaktadır. Geleneksel su indeksi yöntemlerinin test edilmesi için, test setinde yer alan 17,175 yama üzerinde NDWI, MNDWI ve AWEI indeksleri hesaplanmıştır. Her bir indeks için optimal eşik değeri, Otsu (1979) algoritması ile otomatik olarak belirlenmiş ve ikili (binary) su maskeleri üretilmiştir. Üretilen maskeler, yer doğrulamalı (ground truth) maskeler ile piksel-bazlı karşılaştırılarak doğruluk, IoU ve Dice metrikleri hesaplanmıştır. NDWI için optimal eşik değeri 0,18; MNDWI için 0,21; AWEI için 0,15 olarak belirlenmiştir.

Derin öğrenme tabanlı yaklaşımların geleneksel yöntemlere göre belirgin üstünlüğü görülmektedir. Özellikle karmaşık su kütleleri ve gölgeli alanlarda geleneksel indekslerin başarısızlık gösterdiği durumlarda, CNN tabanlı modeller tutarlı performans sergilemiştir.

**Tablo 3.** Temel Yöntemlerle Performans Karşılaştırması

YÖNTEM	DOĞRULUK (%)	IOU	DİCE
NDWI + OTSU	87.2	0.731	0.845
MNDWI + OTSU	89.6	0.768	0.869
AWEI + OTSU	88.9	0.751	0.857
U-NET+RESNET18	97.3	0.974	0.974
DEEPLABV3+RESNET18	98.4	0.982	0.982

Modelin eğitim ve doğrulama sürecine ilişkin başarımlar ölçütleri, U-Net tabanlı yapının su yüzeyi bölütlemesi için oldukça başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Doğrulama kümesindeki piksel tabanlı doğruluk oranı %97,3 olarak elde edilmiş olup, bu değer modelin genel olarak su ve kara alanlarını yüksek duyarlılıkla ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır. Kesişim-Birleşim Oranı (IoU) değeri 0,974 ve Örtüşme Katsayısı (Dice/F1 skoru) 0,974 olarak hesaplanmış, bu da modelin su alanlarını doğru biçimde saptamada ve sınıf sınırlarını hassas bir şekilde belirlemede etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, doğrulama kayıp değeri 0,014 olarak bulunmuş ve bu düşük değer, modelin aşırı uyum (overfitting) göstermeden kararlı bir öğrenme süreci yürüttüğünü ortaya koymaktadır.

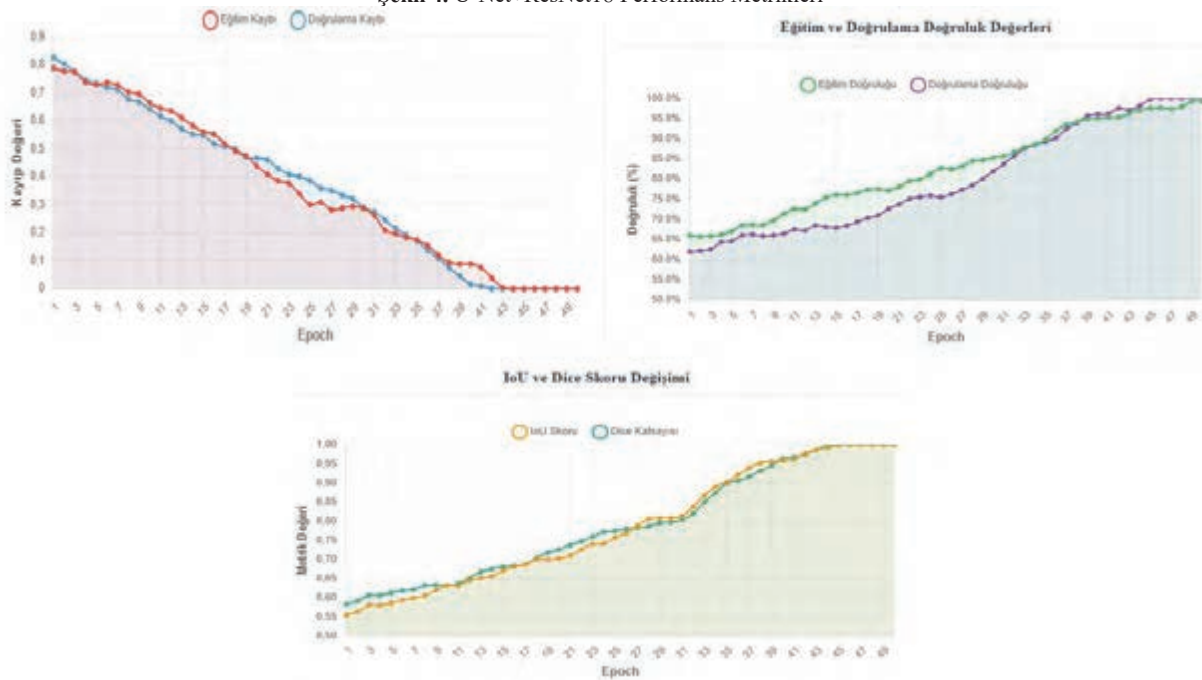
Bu bulgular, özellikle küçük su birikintileri ya da dar akarsu kesitlerinin bölütlenmesinde U-Net+ResNet18 yapısının yüksek doğruluk sağladığını işaret etmektedir. Ayrıca modelin, sınıf dengesizliği içeren veri kümelerinde ve karmaşık yapısal özelliklere sahip bölgelerde de etkili bir başarımlar sunduğu söylenebilir. Bununla birlikte kullanılan BCE + Örtüşme Kayıp (Dice Loss) birleşimi, modelin küçük ölçekli su alanlarını göz ardı etmeden sınıf dengesizliklerini azaltmasında kritik bir rol oynamıştır.

Çalışmada U-Net+ResNet18 yapısı için elde edilen doğruluk ölçütleri ayrıntılı olarak sunulmaktadır (Şekil 4). Modelin eğitim ve doğrulama sürecine ilişkin kayıp ve doğruluk eğrileri verilmiş olup, öğrenme sürecinin kararlı bir şekilde ilerlediği gözlenmektedir (Şekil 5). Ayrıca farklı örnek alanlardan elde edilen görsel çıktılar, U-Net+ResNet18 yapısının su alanlarını başarılı biçimde ayırt edebildiğini görsel olarak ortaya koymaktadır (Şekil 6).

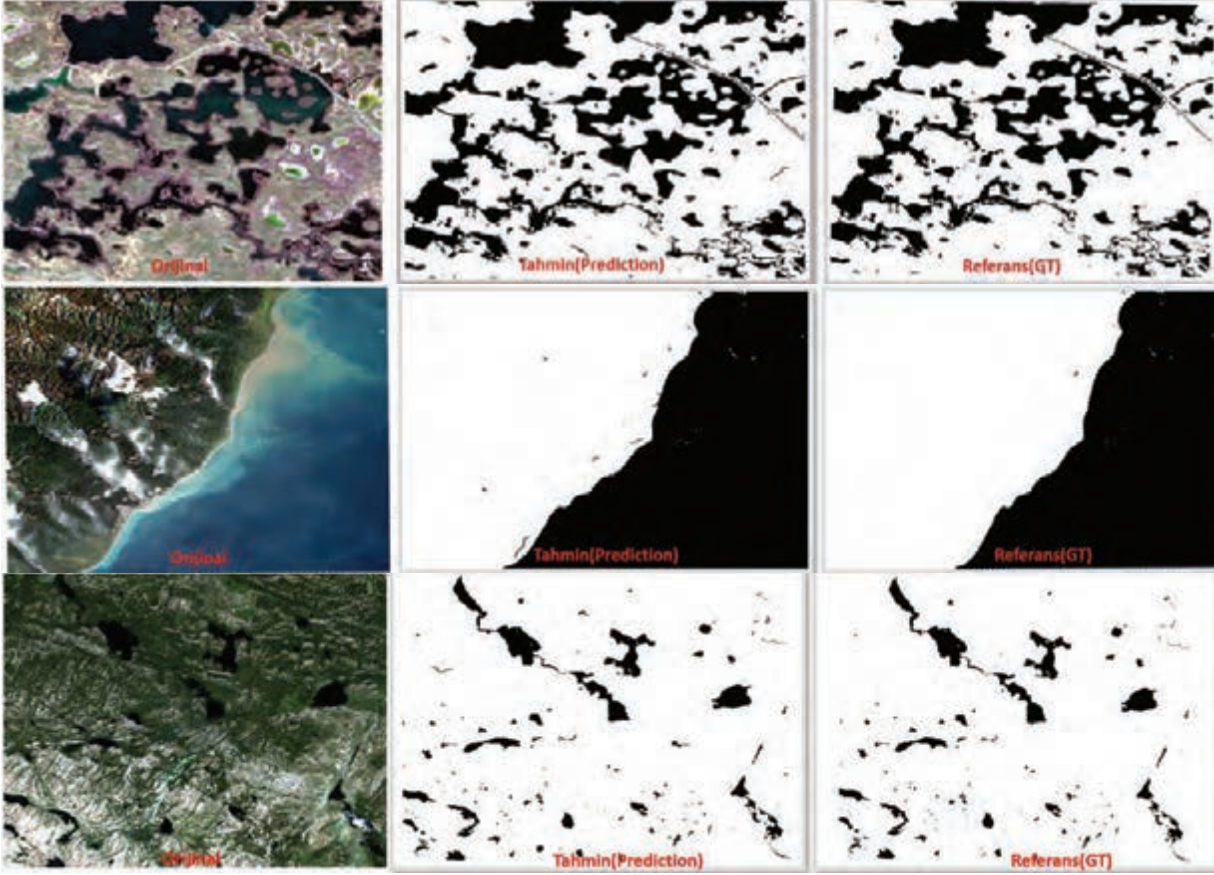
Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve DeepLabV3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması



Şekil 4. U-Net+ResNet18 Performans Metrikleri



Şekil 5. U-Net+ResNet18 Performans Grafikleri



Şekil 6.U-Net+ResNet18 mimarisi ile elde edilen su yüzeyi segmentasyon sonucu

Bu sonuçlar, özellikle küçük su birikintileri veya dar akarsu kesitlerinin bölütlenmesinde U-Net+ResNet18 yapısının yüksek duyarlılık sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda, modelin hem sınıf dengesizliği olan veri kümelerinde hem de karmaşık morfolojik yapıya sahip alanlarda etkili bir başarımla sunduğu söylenebilir. Ayrıca kullanılan BCE + Örtüşme Kayıp (Dice Loss) birleşimi, modelin küçük su alanlarını göz ardı etmeden sınıf dengesizliklerini azaltmada kritik bir rol oynamıştır.

Modelin eğitim ve doğrulama sürecine ilişkin ölçütler, DeepLabV3+ tabanlı yapının su yüzeyi bölütlemesi için oldukça başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Doğrulama kümesindeki piksel tabanlı doğruluk oranı %98,4 olarak elde edilmiş olup, bu değer U-Net+ResNet18'e kıyasla hafif bir artış göstermektedir. Kesişim-Birleşim Oranı (IoU) 0,982 ve Örtüşme Katsayısı (Dice/F1 skoru) 0,982 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelin su alanlarını doğru biçimde belirlemede ve sınıf sınırlarını hassas bir şekilde saptamada yüksek etkinliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, doğrulama kayıp değeri 0,012 olarak bulunmuş ve bu düşük değer, modelin aşırı uyum (overfitting) göstermeden kararlı bir öğrenme süreci yürüttüğünü göstermektedir.

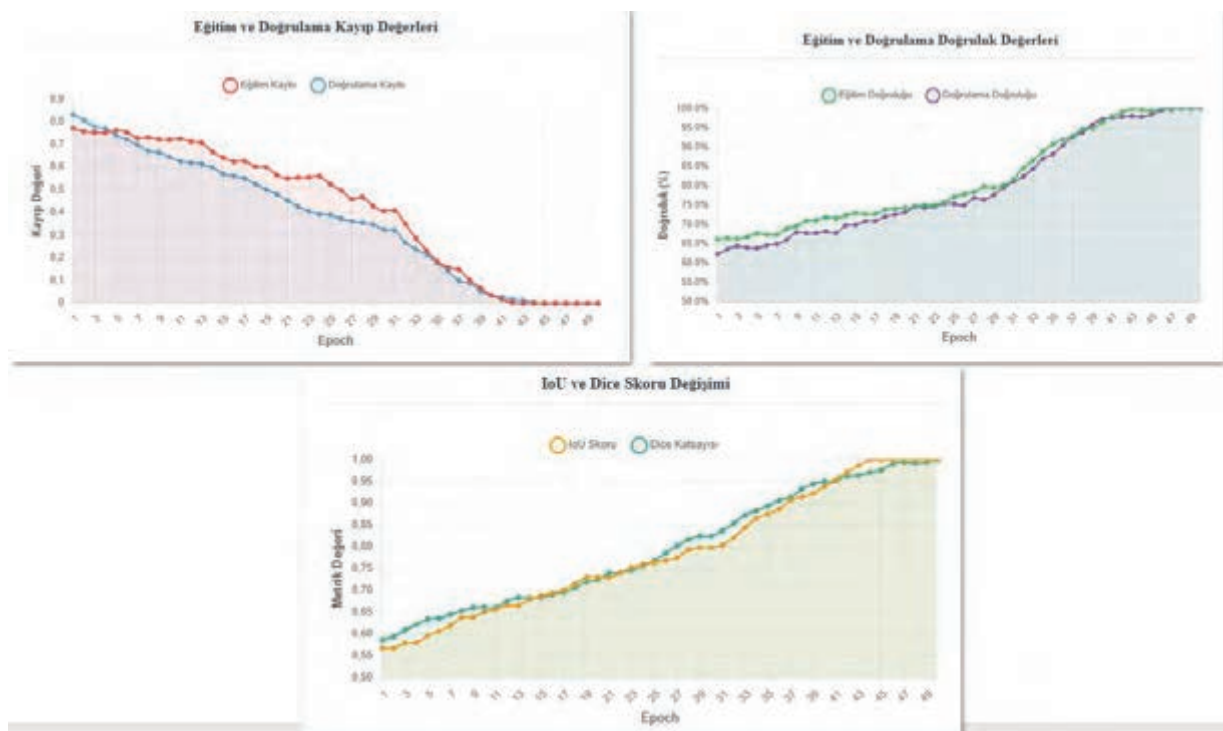
Elde edilen bulgular, özellikle karmaşık yapısal özelliklere sahip su yüzeylerinin bölütlenmesinde DeepLabV3+ yapısının yüksek doğruluk sağladığını ve küçük ölçekli su alanlarını dahi doğru biçimde saptayabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca BCE + Örtüşme Kayıp birleşimi, modelin sınıf dengesizliklerini azaltmada ve küçük ölçekli su alanlarını göz ardı etmeden bölütleme doğruluğunu artırmada kritik bir rol üstlenmiştir.

Çalışmada DeepLabV3+ResNet18 yapısı için elde edilen doğruluk ölçütleri ayrıntılı olarak Şekil 7'de sunulmaktadır. Modelin eğitim ve doğrulama sürecine ilişkin kayıp ve doğruluk eğrileri ise Şekil 8'de verilmiş olup, öğrenme sürecinin dengeli bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ayrıca, farklı örnek alanlardan seçilmiş görsel çıktılar, DeepLabV3+ yapısının su alanlarını başarılı biçimde ayırt edebildiğini görsel olarak ortaya koymaktadır (Şekil 9).

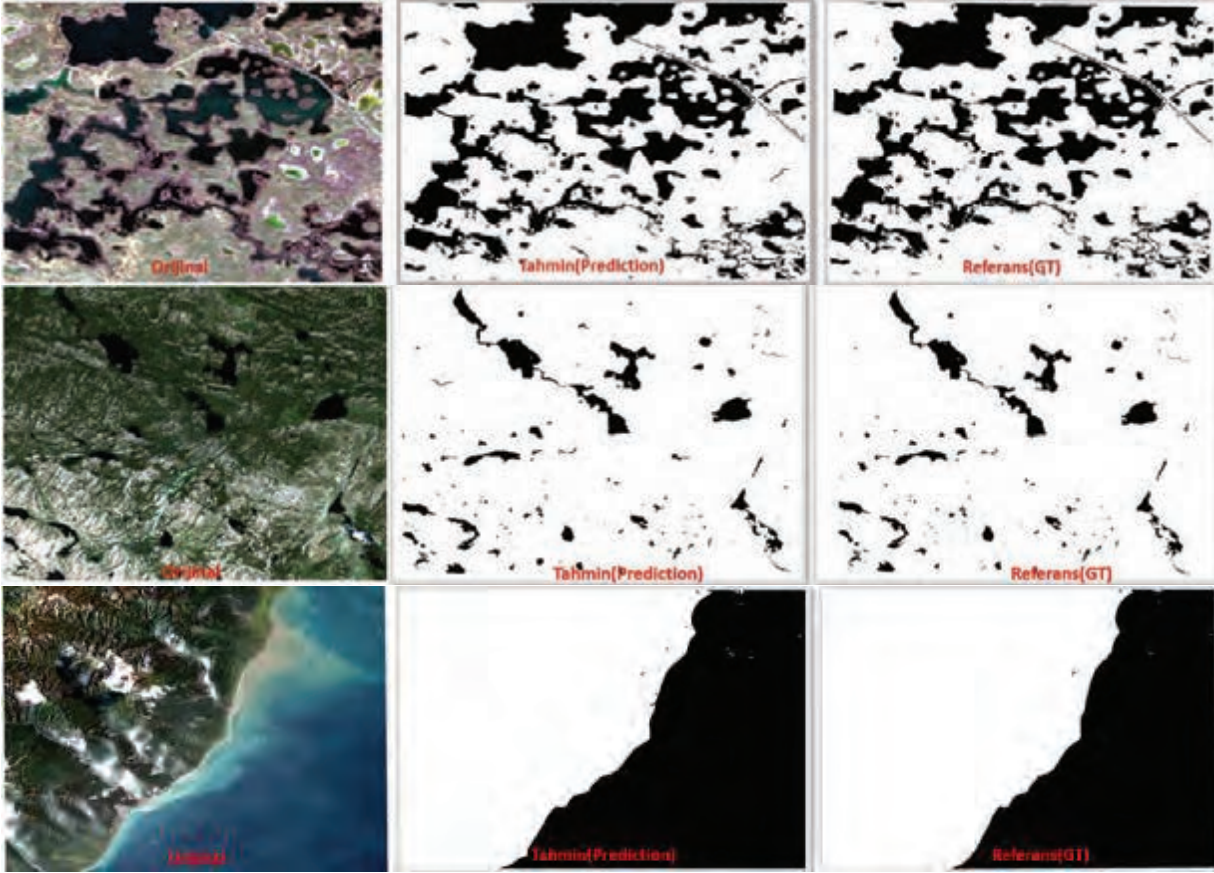
Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve DeepLabV3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması



Şekil 7. DeeplabV3+ResNet18 Performans Metrikleri



Şekil 8. Deeplabv3+ResNet18 Performans Grafikleri



Şekil 9. DeeplabV3+ResNet18 mimarisi ile elde edilen su yüzeyi segmentasyon sonucu

50 dönemlik (epok) eğitim süreci boyunca her iki model de su yüzeyi bölütleme görevinde yüksek başarımlar sergilemiştir. U-Net+ResNet18 yapısı, %97,2 doğrulama doğruluk oranı, 0,965 Kesişim-Birleşim Oranı (IoU) ve 0,971 Örtüşme Katsayısı (Dice) ile güçlü bir performans göstermiştir. DeepLabV3+ResNet18 yapısı ise %98,1 doğrulama doğruluk oranı, 0,981 Kesişim-Birleşim Oranı ve 0,984 Örtüşme Katsayısı ile daha üstün sonuçlar elde etmiştir. DeepLabV3'ün seyrek (atrous) evrişim yapısı ve Atrous Mekansal Piramit Havuzlama (ASPP) modülü sayesinde çok ölçekli özellik çıkarımı gerçekleştirmesi, su alanlarının kesin sınırlarının belirlenmesinde U-Net'e kıyasla %0,9 oranında daha başarılı olmasını sağlamıştır. Buna karşılık, U-Net'in kodlayıcı-çözücü (encoder-decoder) yapısı daha hızlı yakınsama göstermiş ve eğitim sürecinin ilk 20 döneminde DeepLabV3'e yakın bir başarımlar sergilemiştir.

Her iki modelde de eğitim ve doğrulama kayıpları arasında sağlıklı bir yakınsama gözlenmiş, aşırı uyum (overfitting) belirtileri tespit edilmemiştir. DeepLabV3 modelinin doğrulama kaybı 0,012 seviyesinde kararlılık kazanırken, U-Net modeli 0,014 seviyesinde dengeye ulaşmıştır. Bu durum, DeepLabV3'ün daha karmaşık mimari yapısının, su yüzeyi bölütlemesi gibi anlamsal bölütleme görevlerinde avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Model başarımının hesaplama maliyeti açısından ayrıntılı değerlendirmesi sunulmaktadır (Tablo 4). Tüm denemeler Google Colab ortamında sağlanan NVIDIA Tesla T4 GPU (16 GB VRAM) üzerinde gerçekleştirilmiştir. U-Net+ResNet18 yapısı 23,4 milyon parametre ile daha sade bir yapıya sahipken, DeepLabV3+ResNet18 yapısı 42,1 milyon parametre içermektedir. Çıkarım (inference) süreleri açısından U-Net modeli yığın başına ortalama 0,187 saniye, DeepLabV3 modeli ise 0,312 saniye sürmektedir. Bellek kullanımı bakımından U-Net 2,8 GB, DeepLabV3 ise 4,6 GB VRAM tüketmiştir. Eğitim süresi karşılaştırmasında ise U-Net'in 50 dönemlik eğitim için toplam 4,2 saat, DeepLabV3'ün ise 6,8 saat sürdüğü belirlenmiştir. Doğruluk-hız dengesi dikkate alındığında, gerçek zamanlı uygulamalar için U-Net'in 1,67 kat daha hızlı olması önemli bir avantaj sağlarken, DeepLabV3'ün %1,1'lik doğruluk artışı ise yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır.

Tablo 4. U-Net+ResNet18 ve DeepLabV3+ResNet18 Modellerinin Hesaplama Maliyeti Karşılaştırması

Metrik	U-Net+ResNet18	DeepLabV3+ResNet18
Parametre Sayısı (M)	23.4	42.1
Çıkarım süresi (s/yığın)	0.187	0.312
VRAM Kullanımı (GB)	2.8	4.6
Eğitim Süresi (saat)	4.2	6.8
Model Boyutu (MB)	94.7	171.2

*Sentinel-2 Verileriyle Su Yüzeylerinin Belirlenmesinde U-Net ve DeepLabV3 Mimari Tabanlı Modellerin Performans Karşılaştırması*

Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada U-Net+ResNet18 modeliyle elde edilen %97.3 doğruluk oranı, Zhao vd. (2024) tarafından AER U-Net ile bildirilen %96.8'lik performansı aşmaktadır. Benzer şekilde, DeepLabV3+ResNet18'in %98.4'lük başarımı, Zhou vd. (2023) tarafından multispektral uydu görüntülerinde DeepLabV3 ile elde edilen %97.9'lük sonuçtan üstündür. Bu üstünlüğün temel nedeni, çalışmada kullanılan hibrit kayıp fonksiyonunun (BCE + Dice) sınıf dengesizliği sorununu daha etkili şekilde çözmesi olarak değerlendirilebilir.

**5. Sonuç**

Bu çalışma, derin öğrenme tabanlı görüntü bölütleme modellerinin, uzaktan algılama verileri kullanılarak su alanlarının otomatik olarak belirlenmesindeki başarısını ortaya koymuştur. Araştırma bulguları, modern evrimsel sinir ağı (ESA) mimarilerinin Sentinel-2 çok bantlı uydu verilerini işlemede yüksek doğruluk sağladığını ve operasyonel su haritalama uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın temel katkısı, farklı bölütleme yaklaşımlarının su alanı tespitindeki başarımlarının kapsamlı biçimde karşılaştırılması ve her bir yöntemin güçlü yönlerinin ortaya konulmasıdır. Bu sonuçlar, uzaktan algılama alanındaki araştırmacılara ve uygulayıcılara model seçimi konusunda yol gösterici niteliktedir. Yöntemsel açıdan, aktarım öğrenmesi yaklaşımının sınırlı eğitim verisiyle dahi yüksek doğruluk elde edilmesindeki kritik rolü özellikle vurgulanmıştır. Bu durum, veri temininin güç olduğu uzaktan algılama uygulamaları için önemli bir çözüm sunmaktadır.

Çevresel izleme ve su kaynakları yönetimi açısından, otomatik su bölütlemenin pratik kullanıma uygun olduğu kanıtlanmıştır. Bu teknolojinin iklim değişikliğinin etkilerinin izlenmesi, taşkın riski değerlendirmesi ve su kaynaklarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesi gibi kritik alanlarda uygulanabilirliği ortaya konmuştur.

Gelecek çalışmalarda, farklı iklim bölgelerinden ve coğrafi alanlardan elde edilecek daha geniş veri kümelerinin kullanılması, zamansal değişimlerin izlenmesi ve hibrit modellerin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı bilişim ortamlarında çalışabilecek hafif model sürümlerinin tasarlanması, bu teknolojinin yaygın biçimde benimsenmesine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma yapay zekâ destekli uzaktan algılama uygulamalarının çevresel izleme alanındaki potansiyelini ortaya koymakta ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için güçlü bir teknolojik altyapı sunmaktadır.

**6. Referanslar**

- Chen, L. C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., & Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 801-818.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770-778.R
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Luo, C., Meng, S., Hu, X., Wang, X., Zhong, Y., & Zhang, L. (2021). HydroSat: A global dataset for surface water detection from Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102549. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102549>
- 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>
- 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>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, 234-241.

Vanhellemont, Q. (2019). Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Sentinel-2 satellite. Optics Express, 27(20), A1372-A1399. <https://doi.org/10.1364/OE.27.0A1372>

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>

Zhao, H., Chen, X., Wang, T., Zhang, B., & Wang, C. (2017). A deep learning approach for water body extraction from satellite images. Remote Sensing, 9(5), 478.

Zhao, S., Wang, P., Li, C., Jiang, H., Guo, W., & Chen, S. (2024). AER U-Net: Attention-enhanced residual U-Net for water body segmentation in remote sensing images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-13.

Zhao, X., Liu, Y., Chen, D., Tang, S., Wang, H., & Zhang, Q. (2025). Enhanced U-Net with attention mechanisms for accurate water body detection in satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 46(2), 234-251.

Zhou, M., Yang, L., Wang, F., Chen, K., Li, J., & Wu, P. (2023). Comparative analysis of deep learning architectures for water surface segmentation using multispectral satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 287, 113-126.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Eskişehir Kaymaz Kasabası'nda Süper Çözünürlüklü Sentinel-2 Görüntüleri ile 8 Yıllık Tarımsal Faaliyetlerin İncelenmesi

Altan YILMAZ\*, Hürcan ATAY

Atay Mühendislik Teknik İşlemler San. ve Tic. Ltd. Şti., 34469, Ankara.

### Genişletilmiş Özet

Bu çalışma, sekiz yıllık (2018-2025) yüksek çözünürlüklü Sentinel-2 uydu görüntülerini kullanarak Türkiye'nin Eskişehir iline bağlı Kaymaz köyündeki tarımsal örüntülerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Çok spektrumlu verilerin, bitki örtüsü endekslerinin ve meteorolojik kayıtların sistematik olarak incelenmesi yoluyla bu araştırma, bu yarı kurak tarım bölgesinde tarım uygulamaları, iklimsel değişkenlik ve arazi kullanım dinamikleri arasındaki karmaşık ilişkileri araştırmaktadır. Analiz, ekim-nadas döngülerinin, ürün rotasyon modellerinin ve bunların yerel yağış modelleriyle korelasyonunun tanımlanması ve karakterizasyonuna odaklanmaktadır.

Tarım, Türkiye'deki kırsal ekonomilerin bel kemiği olmaya devam etmekte ve ülkenin farklı iklim bölgeleri çok çeşitli tarımsal uygulamaları desteklemektedir. İç Anadolu bölgesinde yer alan Eskişehir ili, karasal ve Akdeniz iklim etkileri arasında bir geçiş bölgesini temsil etmekte ve tarımsal kalkınma için benzersiz zorluklar ve fırsatlar yaratmaktadır. Bu bağlamda Kaymaz köyü, yerel çiftçi topluluklarının tarımsal uygulamalarını çevresel kısıtlamalara ve iklimsel değişkenliğe nasıl uyarladıklarını anlamak için örnek bir vaka çalışması olarak hizmet etmektedir.

Kaymaz Köyü, yaklaşık 850–950 metre rakım arasında, İç Anadolu'nun geçiş iklimi etkisindedir. Ortalama yıllık yağış 350–400 mm olup, en yoğun yağış Kasım-Nisan döneminde gerçekleşmektedir. Tarımsal üretim genellikle buğday, arpa gibi tahıllara dayalı olup nadas uygulamaları oldukça yaygındır. Genellikle 5–100 dönüm büyüklüğünde parsellerden oluşan, yaklaşık 1.600 hektarlık tarım alanı, çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bölgedeki tarım faaliyetleri büyük oranda yağmura bağlı, sulama sistemleri ise oldukça sınırlıdır.

Özellikle Avrupa Uzay Ajansı'nın Copernicus programı ve Sentinel-2 misyonu aracılığıyla yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin ortaya çıkması, tarımsal izleme yeteneklerinde devrim yaratmıştır. 2015 yılında fırlatılan Sentinel-2A ve ardından 2017 yılında Sentinel-2B, beş günlük tekrar ziyaret süresi ve temel spektral bantlar için 10 metreye ulaşan uzamsal çözünürlüğü ile multispektral görüntüleme benzeri görülmemiş bir erişim sağlamaktadır (Drusch vd., 2012).

Meyveci ve ark. (2005) tarafından, Orta Anadolu Bölgesi'nde nadasın tamamen kaldırılamadığı alanlarda nadas yılını dört yılda bire düşürmeyi hedefleyen uygun bir ekim nöbeti sistemi (nadas yılı-nadas sonrası tahıl yılı-alternatif ürün yılı-alternatif ürün sonrası tahıl yılı) bulmak amacıyla 2000-2002 yıllarına ait üç yıllık sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırma, yarı taban ve kıraç tarla koşullarında yürütülmüş, dört yıllık ekim nöbetinde alternatif ürün olarak kışlık mercimek, yazlık mercimek, ayçiçeği ve buğday olmak üzere beş farklı değişken incelenmiştir. Elde edilen bulgular, yarı taban koşullarda nadas-tahıl-yazlık mercimek-tahıl ekim nöbeti sisteminin verim açısından nadas-tahıl-nadas-tahıl sistemine en yakın, hatta onun üzerinde verim sağladığını ve yapılan ekonomik analizlerde de çiftçi için en ekonomik ürün dizisi olduğunu göstermektedir.

Çin'in kuzeyindeki çiftçilik-mera ekotonunda nadasa bırakılmış tarlaları haritalamayı amaçlayan Wuyun ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Sentinel-1 ve Sentinel-2 arşivleri kullanılarak Google Earth Engine ile bir yöntem geliştirilmiştir. Bölgedeki ekilebilir alanlar, çevresel faktörler ve sosyoekonomik durumlar nedeniyle kararsızdır ve bu durum çok sayıda nadas tarlasının varlığına yol açmaktadır. Makale, nadas tarlalarının haritalanmasının çevresel etkileri ve gıda güvenliğini değerlendirmeye yardımcı olduğunu vurgulamaktadır. Geliştirilen yöntemde, tarlaları sınıflandırmak için çok metrikli bir veri kümesi ve Random Forest sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Sonuçlar, yöntemin nadas tarlalarını yüksek doğrulukla haritaladığını ve Sentinel arşivlerinin tarım arazilerinin yönetim modellerinin izlenmesi için etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, 2018-2025 yılları arasında 15 Mayıs civarında alınmış Sentinel-2 görüntüleri ile aynı görüntülerden Gamma Earth firması tarafından üretilen süper çözünürlük (1 metre) Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. 16 km<sup>2</sup> büyüklüğünde bir alan seçilmiştir. Analiz çalışmasında NV5 ENVI yazılımı kullanılmıştır. Bu makalede, ENVI Modeler'ı kullanarak Sentinel-2 görüntülerinden oluşturulan bitki örtüsü indeksi görüntülerinin zaman serisini oluşturulmuştur. Model, yüzey yansımaya verilerini elde etmek için atmosferik düzeltme ve piksel değerlerinin ölçeklendirilmesini gerçekleştirmektedir. Model, her bir girdi görüntüsü için bitki örtüsü indeksini hesaplamakta ve görüntülerden bir zaman serisi oluşturmaktadır. Zaman serisi profilini görüntülemeyi ve bitki örtüsü indeksi değerlerinin ISODATA sınıflandırmasını kullanarak yedi yıllık bir dönemde tarla ekim eğilimleri incelenmiştir.

10 bantlı Sentinel-2 10 metre ve 1 metre çözünürlüklü görüntüler ayrı ayrı NV5 ENVI yazılımına alınarak modeller ile aşağıdaki sıra ile belirtilen uygulamalar gerçekleştirilmiştir:

- Quick Atmospheric Correction (QUAC),
- Apply Gain and Offset,
- Spectral Indices,
- Build Raster Series,
- Extract Rasters from Raster Series,
- Build Layer Stack,
- IsoData Classification,

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0312) 212 22 11 Faks: (0312) 212 22 75  
E-posta: altanyilmaz@ataymuhendislik.com.tr (Altan YILMAZ)

- Class Statistics.

Bu sekiz yıllık analizin sonuçları, Kaymaz'daki çiftçilerin yarı kurak tarımın zorluklarıyla başa çıkmak için sofistike adaptasyon stratejileri geliştirdiklerine dair açık kanıtlar sunmaktadır. Ürün-nadas rotasyon sistemlerinin baskınlığı, bölgenin karakteristik nem sınırlamalarına ve iklim değişkenliğine verilen rasyonel bir yanıtı yansıtmaktadır.

Nadasa dayalı sistemlerin kuraklığa dayanıklılık sağlamadaki etkinliği, kurak alan tarımının yerleşik ilkeleriyle uyumludur. Nadas dönemleri toprak neminin birikmesine, toprak yapısının iyileşmesine ve toprak organik maddesinin restorasyonuna olanak tanır ve bunların tümü sonraki ekim yıllarında su kullanım verimliliğinin artmasına katkıda bulunur (Nielsen & Vigil, 2010). 2021 kuraklık yılında ekim-nadas rotasyonundaki tarlalarda bitki örtüsü aktivitesinde sürekli ekime kıyasla daha az azalma olması, bu geleneksel yönetim yaklaşımının pratik faydalarını göstermektedir.

Bununla birlikte, tarımın yoğunlaştırılmasıyla ilişkili ekonomik baskılar, özellikle yüksek kaliteli topraklarda sürekli ekim sistemlerinin artmasına neden olmuştur. Uygun yıllarda sürekli ekilen tarlaların daha yüksek verimliliği, kuraklık yıllarındaki ilgili risklere rağmen nadas dönemlerinin terk edilmesi için ekonomik teşvikler sağlar.

Sentinel-2 görüntülerinin yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğü, bu yarı kurak ortamda tarımsal sistemlerin izlenmesi için son derece değerli olduğunu kanıtlamıştır. 5 günlük tekrar ziyaret süresi, kritik büyüme dönemlerinde hızlı bitki örtüsü değişikliklerinin yakalanmasını sağlarken, 10 metrelik uzamsal çözünürlük, bireysel tarlalardaki farklı yönetim uygulamalarını ayırt etmek için tarla sınırlarını tam olarak göstermese de yeterli ayrıntı sağlamıştır. Süper çözünürlük Sentinel-2 ise tarla sınırları, yollar ve binaların çok daha iyi ayırt edilmesini sağlamıştır.

Bu çalışmanın bulguları, Türkiye'de ve benzer yarı kurak bölgelerde tarım politikalarının geliştirilmesi açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır:

**Geleneksel Uygulamalara Destek:** Ekim-nadas rotasyon sistemlerinin kanıtlanmış dayanıklılığı ve verimliliği, politikaların bu geleneksel yönetim yaklaşımlarını caydırmak yerine desteklemesi gerektiğini göstermektedir. Mevcut tarımsal yoğunlaştırma teşvikleri, istemeden de olsa daha az sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik edebilir.

**İklim Uyum Planlaması:** İlkbahar yağışları ile tarımsal başarı arasındaki güçlü ilişki, iklime dayalı erken uyarı sistemleri ve uyarlanabilir yönetim stratejileri geliştirmek için bir temel sağlar.

**Arazi Kullanım Planlaması:** Yönetim sisteminin benimsenmesindeki açık mekânsal modeller, arazi kullanım planlamasının tarımsal kalkınma stratejilerini teşvik ederken toprak kalitesi, topografya ve altyapı erişimi gibi sahaya özgü faktörleri dikkate alması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bazı kısıtlamaları gelecekteki araştırmalar için yol göstermektedir:

**Yer Gerçeği Verileri:** Uydudan elde edilen bitki örtüsü endeksleri mükemmel bir zamansal kapsam sağlamış olsa da gerçek mahsul verimi, toprak koşulları ve belirli yönetim uygulamaları hakkında daha ayrıntılı yer gerçeği verileri, gözlemlenen modellerin yorumlanmasını geliştirecektir.

**Ekonomik Analiz:** Gelecekteki araştırmalar, farklı yönetim sistemlerinde verimlilik, karlılık ve sürdürülebilirlik arasındaki dengeleri daha iyi anlamak için ekonomik verileri entegre etmelidir.

**İklim Projeksiyonları:** İklim değişikliği projeksiyonlarının hava durumu ve tarım arasındaki gözlemlenen ilişkilerle bütünleştirilmesi, gelecekteki tarımsal adaptasyon ihtiyaçları hakkında değerli bilgiler sağlayabilir.

**Genişletilmiş Coğrafi Kapsam:** Benzer analiz yöntemlerinin Türkiye'deki diğer tarım bölgelerine ve daha geniş Akdeniz havzasına uygulanması, bulguların genellenebilirliğini test edecek ve iklim-tarım ilişkilerindeki bölgesel farklılıkları belirleyecektir.

**Daha Yüksek Çözünürlüklü Analiz:** Gelecekteki çalışmalar, tarla içi değişkenliğin ve hassas tarım uygulamalarının ayrıntılı analizi için daha yüksek uzamsal çözünürlüklü görüntülerin (metre altı) entegrasyonundan faydalanabilir.

Bu çalışma, yarı kurak bölgelerdeki iklim-tarım etkileşimleri üzerine giderek artan araştırmalara katkıda bulunmakta ve tarımsal sistem dinamiklerini anlamak için uzun vadeli uydudan izlemenin değerini ortaya koymaktadır. Burada geliştirilen metodolojik yaklaşımlar diğer bölgelerdeki benzer çalışmalar için bir çerçeve sağlarken, spesifik bulgular kurak alan tarımsal adaptasyon stratejilerinin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Bitki örtüsü endeksleri ve yağış modelleri arasında tespit edilen güçlü ilişkiler, tarımsal izlemeye yönelik uzaktan algılama yaklaşımları için doğrulama sağlamakta ve operasyonel tarımsal izleme sistemlerinin geliştirilmesini desteklemektedir. Çok yıllık zamansal kapsam, tarımsal sistemlerde kısa vadeli değişkenlik ve uzun vadeli eğilimler arasında ayırım yapmak için uzun vadeli izlemenin önemini göstermektedir.

Sentinel-2 uydudan görüntülerinin yinelenme sıklığı ve spektral çözünürlüğü tarımsal alanların incelenmesi açısından oldukça önemli bir kaynak oluşturmaktadır. 10 metre konumsal çözünürlükten iler gelen dezavantaj ise süper çözünürlük (1 metre) Sentinel-2 görüntüleriyle giderilmekte; tarla sınırları yollar ve binalar gibi diğer detaylar daha iyi bir şekilde ayırt edilebilmektedir. NDVI veya RENDVI

indeksleri ekili alanların tespitinde önemli bir yöntem sağlamaktadır. Isodata vb. sınıflandırma yöntemleri ile farklı ekim eğilimlerine sahip tarlalar ortaya çıkarılmaktadır. NV5 ENVI gibi uzaktan algılama yazılımları da yapılacak işlem adımlarını otomatikleştirmekte ve kullanıcılara yorumlama için istatistiksel veriler sunmaktadır.

#### Kaynaklar

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA'nın GMES operasyonel hizmetleri için optik yüksek çözünürlüklü görevi. *Çevre Uzaktan Algılama*, 120, 25-36.

Meyveci, K., Avcı, M., Karaçam, M., Sürek, D., vd. (2005). Orta Anadolu Bölgesinde Ekim Nöbeti Araştırmaları Dörtlü Ekim Nöbeti. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 14(1-2), 1-22.

Nielsen, D. C., & Vigil, M. F. (2010). Buğday-nadas sistemlerinde nadas sırasında yağış depolama etkinliği. *Agronomy Journal*, 102(2), 537-543.

Wuyun, D., Sun, L., Sun, Z., Chen, Z., Hou, A., Teixeira Crusiol, L. G., ... Zhao, H. (2022). Mapping fallow fields using Sentinel-1 and Sentinel-2 archives over farming-pastoral ecotone of Northern China with Google Earth Engine. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 333-353.

#### Anahtar Kelimeler

Süper Çözünürlük, Sentinel-2, Tarımsal İzleme, NDVI, Sınıflandırma, Ürün Rotasyonu, Yağış Modelleri, Hassas Tarım

# Segment Anything Modeli (SAM) ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenolojik Uyumlu Otomatik Tarım Parseli Çıkarımı

**Fatih Fehmi Şimşek<sup>1,\*</sup>, Melih ALTAY<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye. fehmi.simsek@tubitak.gov.tr

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. melihaltay17@hacettepe.edu.tr

## Abstract

Tarım parsel sınırlarının doğru bir şekilde belirlenmesi, sürdürülebilir tarım yönetimi, arazi kullanım planlaması ve dijital tarım uygulamaları açısından kritik bir rol oynamaktadır. Segment Anything Model (SAM), son yıllarda yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden otomatik tarım parsel çıkarımı için umut verici bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, SAM'in sıfır atışlı (zero-shot) segmentasyon yeteneği ile Sentinel-2 verilerinden türetilen NDVI zaman serileri birleştirilmiş ve fenolojik ayrışım esas alınarak en uygun üç tarih (25 Mayıs, 19 Temmuz ve 22 Eylül 2022) belirlenmiştir. Bu tarihlere ait PlanetScope görüntülerinden türetilen NDVI verilerinden multitemporal bir görüntü oluşturulmuş ve SAM modeline giriş olarak kullanılarak çok zamanlı segmentasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Segmentasyon öncesinde uygulanan görüntü iyileştirme teknikleri ile spektral ayrım gücü artırılmış, segmentasyon sonrası ise post-processing yöntemleri ile tarım parselleri saf bir şekilde ayrıştırılmıştır. Çok zamanlı NDVI görüntüleri ile yapılan segmentasyon sonucu (IoU: 0.89; F1: 0.93) elde edilmiştir. Geometrik segmentasyon hataları ise düşük seviyelerde kalmış olup (GOSE: 0.12; GUSE: 0.13), bu da segmentasyon işleminin yüksek doğrulukta gerçekleştiğini göstermektedir. Bu bulgular, fenolojiye duyarlı görüntü seçiminin segmentasyon başarısını anlamlı biçimde artırdığını ve SAM modelinin eğitim verisine ihtiyaç duymadan, pre- ve post-processing yöntemleriyle tarım parsellerine ait sınırların tespitinde etkili ve operasyonel bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır

## Anahtar Kelimeler

Tarım Parsel Segmentasyonu, Tarımsal Ürün İzleme, Segment Anything Model (SAM), Fenolojik Evre Analizi, PlanetScope Uydu Verileri

## 1. Giriş

Tarımsal parsel sınırlarının doğru ve hassas belirlenmesi, sürdürülebilir tarım yönetimi, gıda güvenliği ve arazi planlaması için kritik öneme sahiptir (Campbell, 2011; Garcia-Pedrero et al., 2018). Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri (örn. PlanetScope) sayesinde parsel düzeyinde detaylı analizler yapılmakta ve bu sınırlar karar destek sistemlerinde temel mekânsal bileşen olarak kullanılmaktadır (North et al., 2018; Weiss et al., 2020). Ancak, otomatik sınır çıkarımı bağlamsal, spektral ve uzamsal çok katmanlı veri değerlendirmesini gerektiren karmaşık bir segmentasyon sürecidir (Crommelinck et al., 2017; Watkins & Van Niekerk, 2019). Meta AI tarafından geliştirilen Segment Anything Model (SAM), yeniden eğitim gerektirmeden sıfır atış (zero-shot) segmentasyon yapabilen ViT tabanlı güçlü bir modeldir (Kirillov et al., 2023). Bu çalışmada, SAM algoritması, fenolojik evrelere dayalı çok zamanlı NDVI verileri kullanılarak, yüksek çözünürlüklü PlanetScope (PSB.SD) görüntüleri üzerinde test edilmiştir. Sentinel-2 NDVI zaman serilerinden belirlenen fenolojik olarak en uygun üç tarih seçilerek, bu tarihlere ait çok zamanlı PlanetScope NDVI görüntüleriyle segmentasyon uygulanmıştır. Görüntü iyileştirme teknikleri ile spektral kontrast artırılmış ve model performansı optimize edilmiştir. Sonuçlar, çok zamanlı NDVI tabanlı segmentasyonun, tek tarihli analizlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük geometrik hata ile parsel sınırlarını çıkarmada etkili olduğunu göstermiştir. Bu yöntem, geniş ölçekli eğitim verisine ihtiyaç duymadan, operasyonel düzeyde yüksek doğrulukta tarımsal sınır çıkarımı için uygun ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır (Tripathy et al., 2024; Huang et al., 2025). Bu yaklaşım sayesinde SAM'in fenolojik duyarlılığı ve zamansal-spektral çeşitlilik koşullarındaki başarımı kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

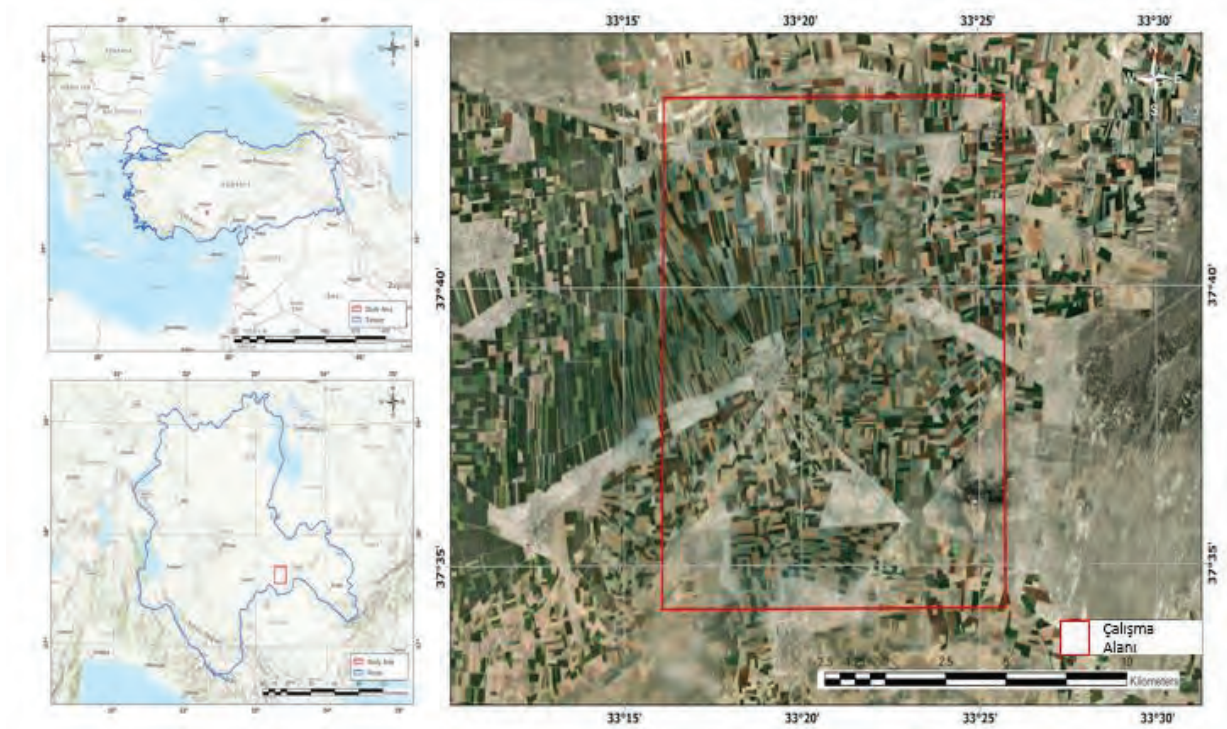
## 2. Çalışma Alanı ve Veriler

Çalışma alanı Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Konya ili Karapınar ilçesine bağlı Hotamış mevkiini kapsamaktadır. Yaklaşık olarak 37°30'N – 37°50'N enlemleri ile 33°15'E – 33°27'E boylamları arasında konumlanan çalışma alanı, yaklaşık 250 km<sup>2</sup> büyüklüğündedir (Şekil. 1). Yarı kurak iklim koşullarına sahip bölgede buğday, arpa, mısır gibi ürünlerin yetiştirildiği geniş ve düzenli tarım parselleri bulunmaktadır. Toplu taşıma sonrası oluşan bu geometrik yapılar, uydu görüntülerine dayalı segmentasyon çalışmalarını desteklemektedir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: 0530 870 26 13

E-posta: fehmi.simsek@tubitak.gov.tr (Fatih Fehmi Şimşek)

*Segment Anything Modeli ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenoloji Uyumlu Tarımsal Sınır Çıkarımı (Sıfır Çekim Öğrenme Yaklaşımı)*



Şekil 1. Çalışma Alanı

### 2.1 Uydu Verileri

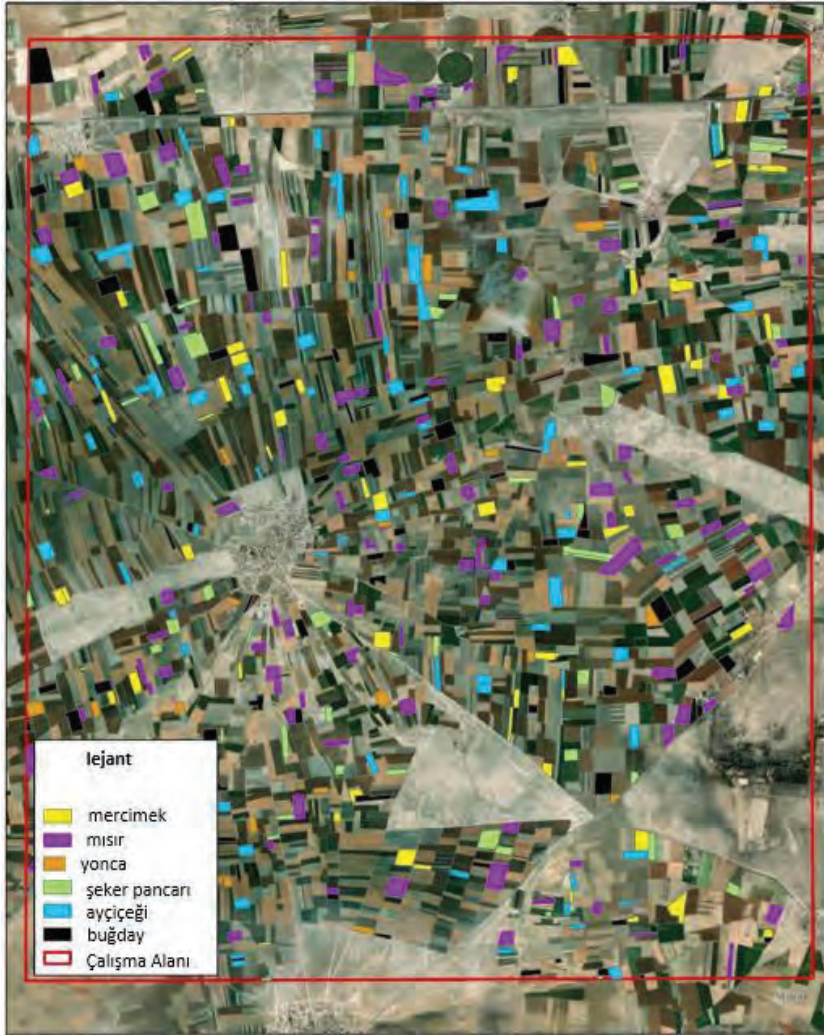
Çalışma alanı içinde ÇKS sistemine kayıtlı parseller arasında en çok beyan edilen ürünler buğday, mısır, ayçiçeği, yonca, şeker pancarı ve mercimektir (Fig. 4). Her bir ürün için, çalışma alanına homojen şekilde dağılmış yaklaşık 100 adet parsel seçilmiştir. Seçilen bu parseller, Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen zaman serisi NDVI verileriyle karşılaştırılarak her bir parsel için özgü spektral ayrışım eğrileri elde edilmiştir. Ardından, her bir ürün sınıfı için bu eğriler üzerinden ortalamalar alınarak, ürünlere ait karakteristik spektral ayrılma eğrileri oluşturulmuştur. Bu spektral ayrılma eğrileri segmentasyon işlemi için en uygun tarihli PlanetScope görüntülerinin seçimine referans olmuştur. Segmentasyon işlemi, mekânsal doğruluk ve çözünürlük gereksinimi nedeniyle yaklaşık 3 metre çözünürlüğe ve sekiz spektral banda sahip olan PlanetScope (PSB.SD) verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir (Planet, 2022). Özellikle çalışma alanındaki parsellerin yaklaşık %35'inin 0,64 hektardan küçük olması, yüksek çözünürlüklü verilerin tercih edilmesini gerekli kılmıştır. Bu sayede, küçük tarımsal parsellerin sınırlarının daha ayrıntılı ve doğru biçimde tespit edilmesi mümkün olmuştur.

### 2.2 Referans Tarım Parselleri

SAM modeli ile oluşturulan tarım parsel sınırlarının doğruluğu, Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından geliştirilen Tarımsal Üretim Kayıt Sistemi (TÜKAS) verileriyle test edilmiştir. TÜKAS projesi kapsamında, 50 cm çözünürlüklü ortofoto ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılarak, kadastro parsel sınırları içindeki tarım alanları sayısallaştırılmış ve referans parseller oluşturulmuştur. Tarım dışı alanlar (ev, havuz, vb.) bu parsellerden çıkarılmıştır. Bu veriler, 2013'ten itibaren Çiftçi Kayıt Sistemi'nde (ÇKS) tarımsal kayıt ve destekleme uygulamalarında kullanılmıştır. Tarım alanlarında görülen çeşitlilik ve mevsimsel değişiklikler, parsel sınırlarında görsel farklılıklara yol açabilmektedir, ancak hukuki sınırlar değişmemektedir. Çalışma alanında toplam 4.212 referans parsel yer almakta olup, bunların %63,4'ü (2.672 adet) orta ölçekli (2,56–16 ha), %32,6'sı (1.374 adet) küçük ölçekli (0,64–2,56 ha), %2,6'sı (108 adet) çok küçük (<0,64 ha) ve yalnızca %1,4'ü (58 adet) büyük ölçekli (16–100 ha) sınıfındadır (Lesiv et al., 2019). Ortalama parsel büyüklüğü yaklaşık 4 hektar olarak hesaplanmıştır.

### 2.3 Çiftçi Beyanlı Parseller (ÇKS Verisi)

Çalışmada ayrıca, üreticiler tarafından beyan edilen ve Çiftçi Kayıt Sistemi (ÇKS) kapsamında toplanan ürün bazlı verilerden de yararlanılmıştır (FDP Regulation, 2018; Şimşek ve Durduran, 2023). İlçe genelinde en sık beyan edilen altı temel ürün (buğday, mısır, ayçiçeği, şeker pancarı, mercimek ve yonca) dikkate alınarak yaklaşık 600 parsel seçilmiştir (Şekil 2). Bu parseller, Sentinel-2 NDVI zaman serileriyle karşılaştırılarak, her ürün türüne özgü spektral eğrileri oluşturulmuştur (Şimşek, 2024; 2025). Elde edilen bu eğriler, bitkisel gelişim evrelerinin daha doğru şekilde izlenmesine olanak sağlamış ve analiz için en uygun üç tarih (25 Mayıs, 19 Temmuz ve 22 Eylül 2022) belirlenmesine imkân sağlamıştır.



Şekil 2. Çalışma alanı içindeki çiftçi beyanı parselleri

### 3. Metodoloji

Bu çalışmada, tarımsal parsel sınırlarının yüksek doğrulukla belirlenebilmesi amacıyla, yüksek mekânsal çözünürlük sunan PlanetScope uydu görüntüleri ile Meta AI tarafından geliştirilen Segment Anything Model (SAM) birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem hem zamansal hem de spektral duyarlılığa dayalı bir iş akışı ile tarımsal sınırların ayrıntılı biçimde ortaya konmasını hedeflemektedir. Segmentasyon süreci dört temel aşamadan oluşmaktadır: (i) veri temini, (ii) ön işleme, (iii) segmentasyon ve (iv) doğruluk değerlendirmesi. Veri temini aşamasında, Sentinel-2 uydu verilerinden elde edilen NDVI zaman serileri üzerinden çalışma alanındaki baskın tarımsal ürünlerin fenolojik gelişim evreleri analiz edilmiştir. Bu analiz, spektral ayrışmanın maksimum düzeye ulaştığı kritik dönemleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, sonraki adımlarda kullanılacak PlanetScope görüntülerinin zamanlamasına doğrudan yön vermiştir. Aşağıda, bu süreçte izlenen yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır. İlk olarak, fenolojik aşamaların belirlenmesi ve zaman serisi temelli görüntü seçimi ele alınmış; ardından segmentasyon işlemleri ve doğruluk değerlendirmeleri sistematik bir biçimde sunulmuştur.

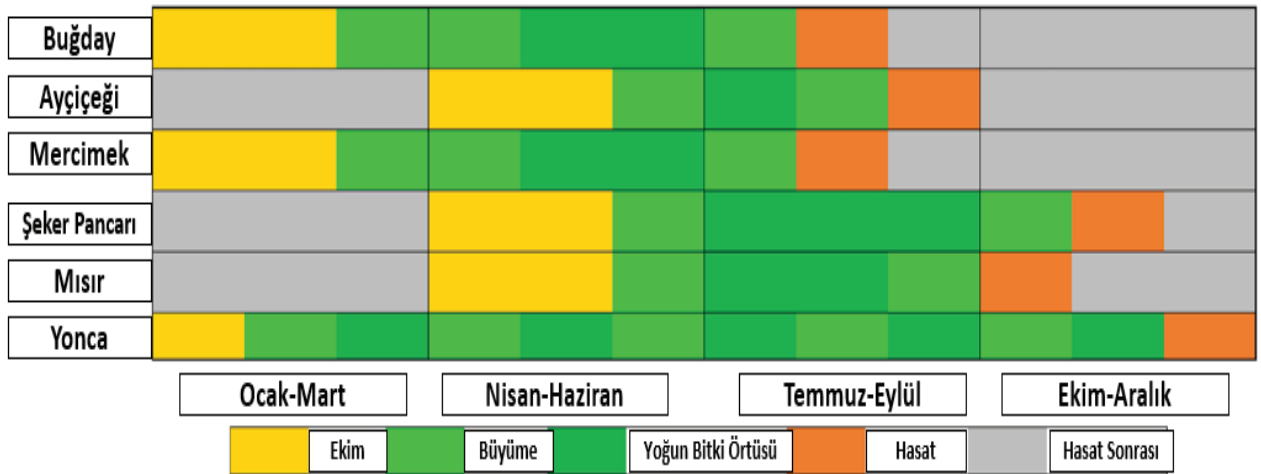
#### 3.1 Fenolojik Aşamaların Belirlenmesi ve Zaman Serisi PlanetScope Görüntülerinin Seçimi

Bu çalışmada, tarımsal parsel sınırlarının hassas biçimde belirlenebilmesi amacıyla, yüksek çözünürlüklü PlanetScope görüntüleri ile Segment Anything Model (SAM) entegre bir yaklaşımla kullanılmıştır. Segmentasyon süreci, dört temel aşamadan oluşmaktadır: veri temini, ön işleme, segmentasyon ve doğruluk değerlendirmesi. İlk aşamada, Sentinel-2 tabanlı NDVI zaman serileri kullanarak, çalışma alanındaki baskın ürün türlerinin fenolojik gelişim evreleri analiz edilmiştir (Şekil 3). Ürnlere özgü NDVI eğrileri üzerinden yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler sonucunda, parsel sınırlarının spektral ve mekânsal olarak en belirgin hâle geldiği üç kritik tarih belirlenmiştir: 25 Mayıs, 19 Temmuz ve 22 Eylül 2022. Bu tarihler, ürün türlerinin gelişim evrelerine bağlı olarak spektral tepkilerinde en fazla ayrışmanın gözlemlendiği dönemleri temsil etmektedir (Şekil 4). Bu bulgular doğrultusunda, segmentasyon işlemleri için yalnızca bu üç stratejik tarihe ait PlanetScope (PSB.SD) görüntüleri temin edilmiştir. Görüntü seçimi, rastgele değil;

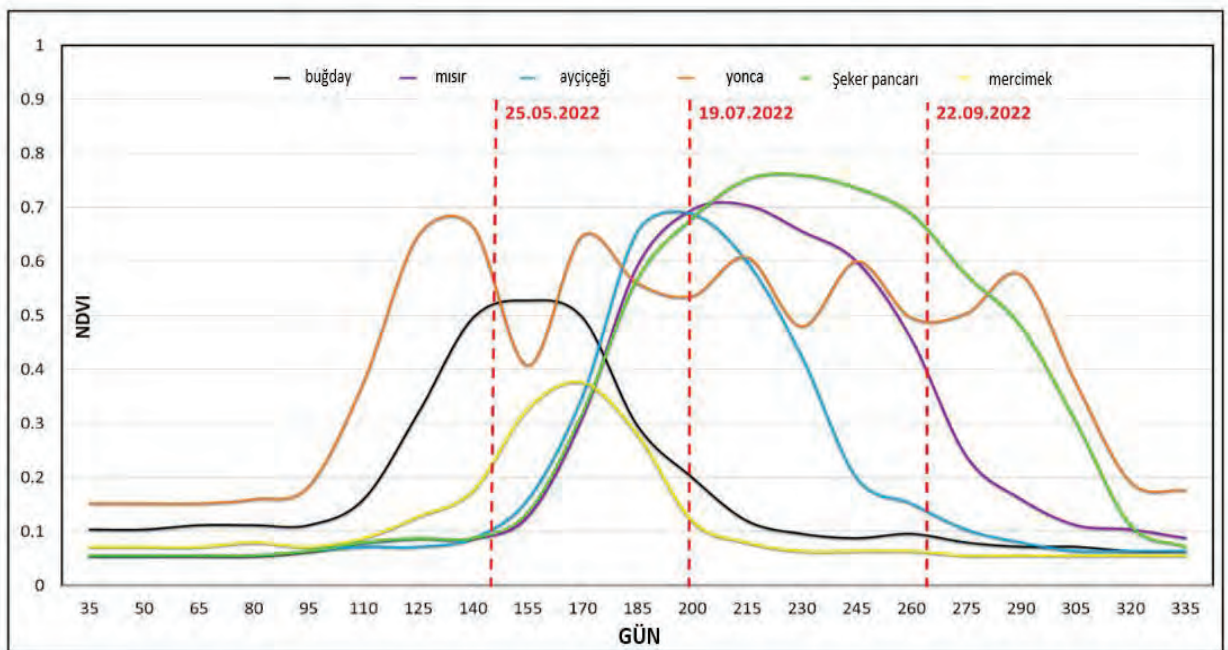
*Segment Anything Modeli ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenoloji Uyumlu Tarımsal Sınır Çıkarımı (Sıfır Çekim Öğrenme Yaklaşımı)*

fenolojik evrelere dayalı spektral farklılıkların en yüksek olduğu dönemler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, ürün çeşitliliğinden kaynaklanan spektral ayrışmadan azami düzeyde fayda sağlanmış, gereksiz veri yığını ve işlem yükü en aza indirilmiştir. Seçilen bu tarihlere ait görüntüler üzerinden NDVI hesaplanmış ve bu üç zamana ait değerler birleştirilerek çok zamanlı bir NDVI bileşimi (NDVI zaman serisi; NDVI-TS) oluşturulmuştur (Şekil 5). Segmentasyon modeli bu NDVI-TS verisi ile beslenmiş, gerçek veya yalancı renk kompozitlere yer verilmemiştir. Bu tercih, analiz sürecinin fenolojik duyarlılık temelinde yapılandırılmasını sağlamış ve modelin tarımsal parsel sınırlarını tanımlamadaki başarımını artırmıştır.

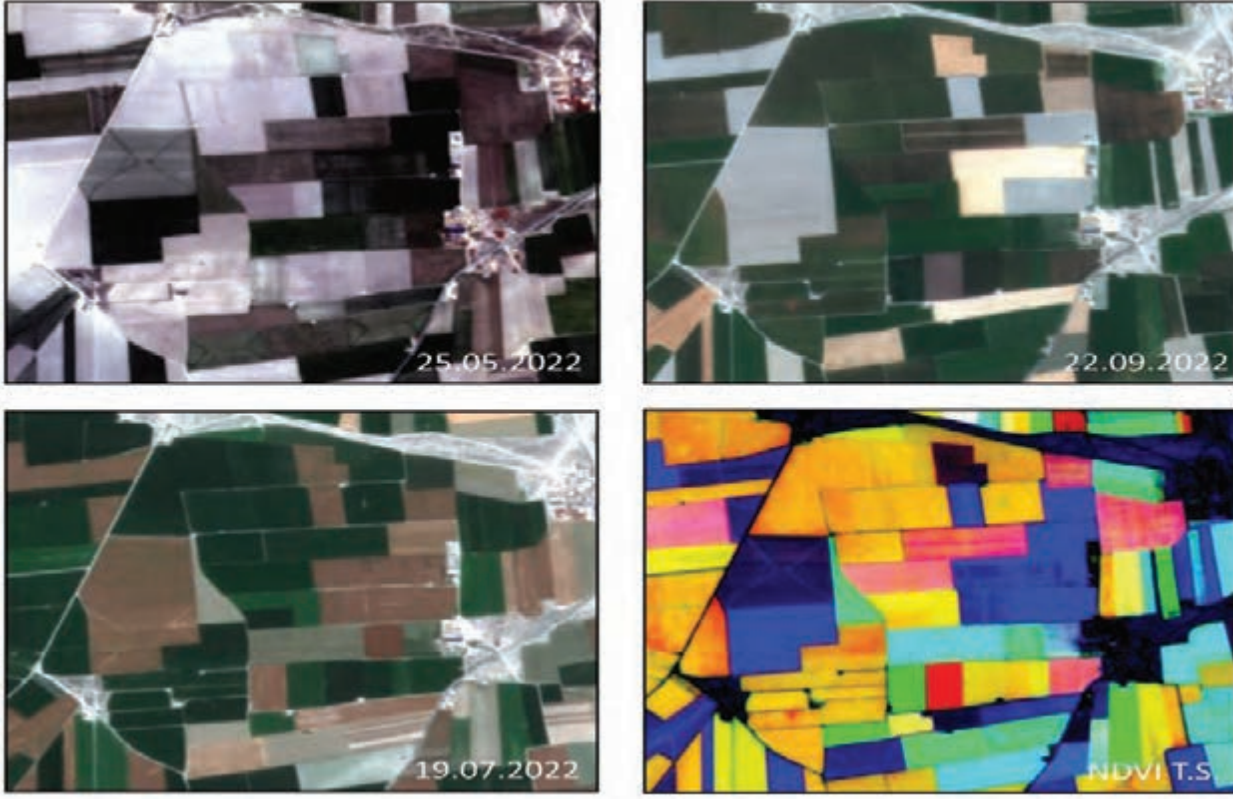
NDVI gibi vejetasyon indekslerinin zamansal değişimini yansıtarak parsel sınırlarını belirlemede önemli avantajlar sunduğu belirtilmektedir. NDVI, bitki sağlığı ve yoğunluğunu ölçerken, ürün türleri ve fenolojik evreler arasındaki spektral farkları ortaya çıkarır. Bitkiler gelişim sürecinde farklı NDVI değerleri gösterdiği için, erken gelişim dönemlerinde sınırlar daha net olurken, olgunluk evresinde örtüşen bitki örtüsü sınırların görünürlüğünü azaltabilir. Ancak komşu parsellerde farklı ürünler varsa, bu farklar gelişim ilerledikçe daha belirgin hale gelir. Çok zamanlı NDVI analizleri, tarla içindeki homojenliği ve parseller arası farklılıkları vurgulayarak sınırları daha net şekilde ayırt etmeyi sağlar. Literatür, farklı tarihli NDVI verilerinin segmentasyon doğruluğunu artırdığını göstermektedir. Bu nedenle, sınırların daha belirgin olduğu farklı dönemlerden elde edilen NDVI verilerinin kullanımı önerilmektedir. Fenolojik evrelere dayalı görüntü seçimi, segmentasyon doğruluğunu iyileştirirken, daha sürdürülebilir ve hesaplamasal açıdan verimli bir iş akışı sunmuştur. Bu yaklaşım, SAM temelli sınır tespiti uygulamalarında zamansal optimizasyonun model performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Çalışma alanında tarımsal faaliyetlerin zamanlamasını gösteren fenolojik ekim takvimi



Şekil 4. Farklı tarımsal ürün türlerine ait NDVI zaman serisi verileri kullanılarak oluşturulan spektral ayırım eğrileri.



Şekil 5. 25.05.2022, 19.07.2022 ve 22.09.2022 tarihlerine ait NDVI görüntülerinin birleştirilmesiyle oluşturulan NDVI zaman serisi (NDVI-TS) haritası.

### 3.2 SAM (Segment Anything Model)

Çok zamanlı NDVI verilerinin oluşturduğu fenoloji temelli veri seti, segmentasyon işlemlerinde doğrudan girdi olarak kullanılmış ve tarımsal parsel sınırlarının belirlenmesinde Meta AI tarafından geliştirilen Segment Anything Model (SAM) ile entegre edilmiştir. SAM, kullanıcı etkileşimli yapısı ve Vision Transformer (ViT) tabanlı mimarisi sayesinde, görsel girdilerden yüksek doğrulukta segmentasyon maskeleri üretebilme kapasitesine sahiptir (Kirillov et al., 2023). Bu çalışmada, SAM'in özellikle tarımsal alanların heterojen yapısını çözümlenebilme yeteneği değerlendirilmiş ve modelin NDVI tabanlı verilerle performansı test edilmiştir. Segmentasyon öncesinde, NDVI zaman serisinin görsel kontrastını artırmak amacıyla bazı temel ön işleme adımları uygulanmıştır. Bu adımlar arasında, spektral sınırların daha belirgin hâle gelmesini sağlamak üzere histogram eşitleme ve histogram germe gibi görüntü iyileştirme tekniklerine yer verilmiştir (Gonzalez and Woods, 2018). Bu yöntemler hem parsel içi homojenliği hem de parseller arası farklılıkları daha açık biçimde ortaya koyarak, SAM'in segmentasyon kararlarını destekleyici bir zemin oluşturmuştur (Tripathy et al., 2024).

Modelin uygulanmasında, 25 Mayıs, 19 Temmuz ve 22 Eylül 2022 tarihli PlanetScope görüntülerinden elde edilen NDVI katmanları birleştirilmiş ve bu çok zamanlı bileşik veri (NDVI-TS) SAM'e giriş olarak sağlanmıştır. Bu strateji sayesinde, farklı ürünlerin fenolojik evrelerine karşılık gelen zamansal varyasyonlar tek bir veri yapısında toplanmış ve sınır ayrımlarının zamana bağlı değişimi etkili biçimde yakalanmıştır. Bu durum, özellikle sınıra yakın bölgelerde spektral belirsizliklerin azaltılmasına katkı sunmuş; segmentasyonun doğruluğunu artırmıştır (Graesser and Ramankutty, 2017; Zhang et al., 2023). SAM, farklı görevler ve veri yoğunlukları için ViT-B, ViT-L ve ViT-H olmak üzere üç farklı encoder mimarisi sunmaktadır (Zhou et al., 2023). Bu çalışmada, modelin işlem süresi ve doğruluk çıktıları arasındaki denge göz önünde bulundurularak, çeşitli encoder seçenekleri test edilmiş ve tarımsal sınır tespitine en uygun yapı analiz edilmiştir. Uygulanan yaklaşım, yalnızca zamansal seçimi optimize etmekle kalmamış; aynı zamanda segmentasyon modelinin karar kalitesini iyileştirecek şekilde görsel ön işleme adımlarıyla da desteklenmiştir. Sonuç olarak, NDVI tabanlı zamansal veri yapısının SAM ile bütünleştirilmesi, tarımsal parsel sınırlarının otomatik, hassas ve tekrarlanabilir şekilde tanımlanmasına olanak tanımış; bu bağlamda SAM'in tarımsal alanlara özgü segmentasyon uygulamaları için yüksek potansiyel taşıdığı ortaya konmuştur.

### 3.3 SAM Ayarlanabilir Parametreler

Segment Anything Model (SAM) ile gerçekleştirilen segmentasyon işlemlerinin başarımı, yalnızca modelin mimari yapısına (ViT-B, ViT-L, ViT-H) değil; aynı zamanda hiperparametre ayarlarına da doğrudan bağlıdır. Bu kapsamda, segmentasyon kalitesi ile işlem

*Segment Anything Modeli ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenoloji Uyumlu Tarımsal Sınır Çıkarımı (Sıfır Çekim Öğrenme Yaklaşımı)*

süresi arasında denge kurmak amacıyla çeşitli parametre kombinasyonları test edilmiştir. Özellikle `points_per_side` ve `crop_n_layers` parametreleri, modelin çıktı detay düzeyi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Tablo 3). Analizler, yaklaşık 50 km<sup>2</sup>'lik bir test sahasında yürütülmüş ve farklı parametre ayarlarının segmentasyon doğruluğu ve işlem süresi üzerindeki etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, `points_per_side = 32` ve `crop_n_layers = 2` kombinasyonu hem işlem süresi hem de çıktı kalitesi açısından optimum sonuçları vermiştir. Bu yapılandırma, segmentasyon maskelerinin mekansal doğruluğunu artırırken, işlem süresini kabul edilebilir düzeyde tutmuştur.

Buna karşılık, `pred_iou_thresh` ve `stability_score_thresh` gibi eşik değerlerinin, model çıktıları üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, Ferreira et al. (2024) tarafından benzer şekilde rapor edilen sonuçlarla da uyumluluk göstermektedir. Öte yandan, `crop_n_points_downscale_factor` ve `min_mask_region_area` gibi parametrelerin model performansına olan etkisi sınırlı kalmış; bu nedenle varsayılan değerler tercih edilmiştir. Tüm segmentasyon işlemleri, yüksek performanslı bir işlem ortamı olan Google Colab A100 GPU altyapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üç zamanlı NDVI-TS veri seti kullanılarak yapılan her bir segmentasyon çalışması için ortalama işlem süresi yaklaşık 6 saat olarak ölçülmüştür. Bu süre, kullanılan parametre değerleri ve veri hacmi dikkate alındığında, SAM modelinin yüksek çözünürlüklü ve çok zamanlı verilerle çalışabilirliğini doğrulamaktadır.

**Tablo 3.** SAM parametreleri

Parametre	Değer Aralığı	Açıklama	Varsayılan Değer
<b>Points_per_side</b>	16–512	Girdi görüntüsünün her bir kenarı boyunca yerleştirilecek örnekleme noktalarının sayısını belirler. Yüksek değerler segmentasyon detayını artırır ancak işlem süresini uzatır.	32
<b>Crop_n_layers</b>	1–10	Segmentasyonun farklı çözünürlük seviyelerinde kaç kez tekrarlanacağını belirler. Katman sayısının artırılması daha ince sonuçlar üretir ancak hesaplama süresini uzatır.	0
<b>Pred_iou_thresh</b>	0.5–1	Tahmin edilen maske ile yer gerçeği arasında kabul edilebilir örtüşme oranını (IoU) belirler. Düşük eşik değeri işlem hızını artırır ancak yanlış pozitif sayısını yükseltebilir.	0.88
<b>Stability_score_thresh</b>	0.5–1	Segmentasyon maskelerinin kararlılığını ölçen eşik değeridir. Daha düşük eşikler daha fazla segment üretir ancak tutarlılığı azaltabilir.	0.95
<b>Crop_n_points_downscale_factor</b>	1–5	Derin katmanlardaki örnekleme yoğunluğunu azaltmak için kullanılan ölçekleme katsayısıdır. Daha yüksek değerler işlem hızını artırır ancak detay kaybına neden olabilir.	1
<b>Min_mask_region_area</b>	10–1000	Kabul edilecek segmentlerin minimum alanını (piksel cinsinden) belirler. Yüksek eşikler küçük ve anlamlı olmayan bölgeleri filtreleyerek daha temiz sonuçlar sağlar.	0

### 3.4 Segmentasyon Sonrası İşlem Süreci

Segmentasyon sonucunda elde edilen poligonlar QGIS ortamına aktarılmış ve bu aşamada çeşitli geometrik iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle küçük boyutlu, birbirinden izole olmuş ya da yapışık şekilde oluşan segmentler, morfolojik işlemler (örneğin erosion, dilation, opening, closing) yoluyla filtrelenmiş; kenar düzeltmeleri ise sadeleştirme (simplification) ve yumuşatma (smoothing) algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda, yalnızca tarımsal üretim amacıyla kullanılan ve geometrik olarak tutarlı olan alanlar temsil edilebilmiştir. Uygulanan NDVI tabanlı çok zamansal analiz yaklaşımı, tek zamanlı görüntülerle yapılan segmentasyonlara kıyasla belirgin biçimde daha yüksek performans göstermiştir. Bunun temel nedeni, farklı ürün türlerinin fenolojik gelişim evrelerine bağlı olarak gösterdiği spektral tepkilerin zamansal olarak birleştirilmesi sayesinde, ürün tiplerinin ve parsel içi heterojenliğin daha doğru ayrıştırılabilmesidir. Bu durum, segmentasyon doğruluğunu ve sınır temsil kabiliyetini önemli ölçüde artırmıştır (Tripathy et al., 2024; Zhang et al., 2020). Nitekim literatürde de vurgulandığı üzere, çok zamansal NDVI analizleri; özellikle dinamik, mevsimsel geçişlerin yoğun olduğu ve arazi örtüsü bileşenlerinin karışık yapı sergilediği alanlarda, spektral kontrastın maksimum olduğu dönemleri kapsayarak parsel sınırlarının daha belirgin hale gelmesini sağlamaktadır. Bu durum, yüksek doğruluklu segmentasyon çıktılarının elde edilmesine olanak tanımaktadır.

## 4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, tarımsal parsel sınırlarının doğru, otomatik ve kapsamlı biçimde belirlenebilmesi amacıyla, çok zamanlı NDVI zaman serisi görüntülerinin Meta AI tarafından geliştirilen Segment Anything Model (SAM) ile entegrasyonu araştırılmıştır. Parsel sınırlarının zamansal olarak en belirgin hale geldiği üç tarih (25 Mayıs, 19 Temmuz ve 22 Eylül 2022), Sentinel-2 NDVI eğrileri üzerinden tespit edilmiş; bu tarihlere karşılık gelen PlanetScope görüntülerinden elde edilen NDVI katmanları birleştirilerek çok zamanlı bir NDVI

bileşimi (NDVI Time Series, NDVI-TS) oluşturulmuştur. Farklı fenolojik dönemleri kapsayan bu çok zamanlı veri yapısı, ürünler arası spektral ayrımı güçlendirerek SAM'in parsel sınırlarını daha net ve kesin biçimde ayırt etmesini mümkün kılmıştır.

Segmentasyon performansı, yalnızca mekânsal doğruluk açısından değil, aynı zamanda geometrik bütünlüğü de göz önünde bulunduran çok boyutlu metriklerle kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Mekânsal doğruluğun ölçümünde, klasik istatistiksel metrikler olan Precision, Recall, Intersection over Union (IoU) ve F1 skoru kullanılmıştır. Bu metrikler, model tarafından tahmin edilen segmentasyon alanları ile referans veriler arasındaki piksel düzeyindeki örtüşmeyi yansıtmaktadır. Bu bağlamda;

- True Positives (TP): Model ve referansın örtüştüğü alanlar,
- False Positives (FP): Model tarafından tahmin edilip referansta bulunmayan alanlar,
- False Negatives (FN): Referansta olup model tarafından tespit edilemeyen alanlar,

olarak tanımlanmıştır. Ancak, segmentasyonun sadece piksel tabanlı doğruluğunu değil, aynı zamanda parsel sınırlarının yapısal ve topolojik bütünlüğünü de değerlendirmek amacıyla, Geometric Over-Segmentation Error (GOSE) ve Geometric Under-Segmentation Error (GUSE) metrikleri kullanılmıştır (Persello ve Bruzzone, 2010). GOSE, bir referans parselin birden çok tahmin segmentine bölünme derecesini; GUSE ise birden çok referans parselin aynı tahmin segmenti altında birleşme oranını ölçmektedir. Böylece, modelin segmentasyon sürecindeki aşırı parçalanma veya aşırı birleştirme eğilimleri niceliksel olarak ortaya konmuştur.

Söz konusu metriklerin hesaplanmasında kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{FP+TP} \quad (1) \quad \text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$\text{IoU} = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (3) \quad \text{F1 Score} = 2 \times \frac{(\text{Precision} \times \text{Recall})}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (4)$$

$$\text{GOSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left( 1 - \frac{(R_i \cap S_i)}{R_i} \right) \quad (5) \quad \text{GUSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left( 1 - \frac{(R_i \cap S_i)}{S_i} \right) \quad (6)$$

n: Referans segment sayısını,  
 Ri: i. referans segmentin alanını,  
 Si: Ri ile en fazla örtüşen tahmin edilen segmenti ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, NDVI-TS temelli çok zamanlı segmentasyon yaklaşımının yüksek başarımlı sergilediğini göstermektedir. Bu yöntemin IoU ve F1 skorları sırasıyla 0.89 ve 0.93 olarak ölçülmüş; aynı zamanda GOSE ve GUSE değerleri 0.12 ve 0.13 gibi düşük oranlarda kalmıştır. Bu bulgular, SAM modelinin yalnızca alansal doğrulukta değil, aynı zamanda topolojik tutarlılık açısından da yüksek kalite sunduğunu ortaya koymaktadır. Düşük GOSE ve GUSE skorları, modelin parselleri doğru sınıflandırmanın ötesinde, yapısal olarak da anlamlı ve tutarlı segmentasyon maskeleri oluşturduğunu göstermektedir. NDVI zaman serisi verisinin kullanımı, SAM'in spektral benzerlikleri daha etkin yorumlamasına olanak tanımış ve tarımsal faaliyet yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda sınırların daha net ve düzenli biçimde ayrılmasını sağlamıştır (Şekil 7). Segmentasyon başarısının yalnızca model mimarisine değil, aynı zamanda fenolojiye dayalı tarih seçiminin doğruluğuna ve zamansal spektral farklılıkların stratejik şekilde entegre edilmesine bağlı olduğu vurgulanmalıdır. Bitkilerin farklı gelişim evrelerinde sergilediği spektral varyasyonlar, özellikle parsel sınırlarında kontrastı artırarak segmentasyon kalitesine doğrudan katkı sağlamaktadır. NDVI zaman serisi, tarımsal alanların mekânsal örüntüsünü doğru ve güvenilir biçimde yansıtmaktadır.

Segment Anything Modeli ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenoloji Uyumlu Tarımsal Sınır Çıkarımı (Sıfır Çekim Öğrenme Yaklaşımı)



Şekil 6. NDVI zaman serisine dayalı tarımsal sınır segmentasyon sonuçları

SAM modeli, iç dokusu homojen ve sınırları belirgin olan parsellerde yüksek başarı göstermiştir. Ancak, heterojen yapıya sahip, doğal sınır elemanlarıyla çevrili veya görsel olarak karmaşık alanlarda segmentasyon doğruluğunda bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Buna karşın, NDVI zaman serisi (NDVI-TS) verisi, bu zorlukları büyük ölçüde hafifleterek modelin girdi kalitesini artırmış ve segmentasyon performansını iyileştirmiştir.

Elde edilen sonuçlar, NDVI-TS'nin hem doğru alan tespiti hem de geometrik/topolojik bütünlük bakımından üstün bir segmentasyon çıktısı sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, segmentasyon kalitesinin yalnızca geleneksel doğruluk metrikleriyle değil, aynı zamanda GOSE ve GUSE gibi yapısal bütünlüğü ölçen göstergelerle değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. NDVI-TS temelli bu yaklaşım, SAM gibi ileri görsel segmentasyon modelleriyle entegre edildiğinde, otomatik, yüksek doğruluklu ve yapısal olarak tutarlı parsel sınırlarının elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

### 5.Sonuçlar

Tarım parsellerine ait sınırların hassas ve otomatik şekilde belirlenmesi, sürdürülebilir tarım yönetimi, arazi kullanım planlaması ve hassas tarım uygulamalarının etkinliği açısından kritik bir gerekliliktir. Bu sınırların doğru tespiti, ürün bazlı analizlerden verim tahminine kadar birçok ileri düzey tarımsal karar destek sisteminin temelini oluşturur. Uydu görüntülerindeki tarımsal parseller, ürün türü ve fenolojik evreye bağlı olarak değişken spektral özellikler sergilemekte; bu da klasik segmentasyon yöntemlerinin sınır belirlemede yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Özellikle ürünler arası yumuşak geçişler, geleneksel algoritmaların doğruluğunu olumsuz yönde etkiler. Bu noktada, görsel bütünlüğe dayalı segmentasyon kabiliyeti sunan SAM gibi yeni nesil modeller, NDVI zaman serileri (NDVI-TS) ile desteklendiğinde, parsel sınırlarını daha tutarlı ve detaylı şekilde tespit etmeyi mümkün kılmaktadır.



Şekil 7. Google Earth görüntüsü ile SAM yöntemi ile oluşturulmuş tarım parsellerinin çakıştırılmış görünümü

Bu çalışma, SAM modelinin NDVI-TS verisi ile desteklenmiş yüksek çözünürlüklü PlanetScope görüntüleri üzerinden tarımsal sınır segmentasyon performansını değerlendirmiştir. Bulgular, zaman serisi tabanlı verilerin kullanımıyla ürünlerin fenolojik farklılıklarının belirginleştiğini ve bunun parsel sınırlarının görsel ayrımını güçlendirdiğini göstermektedir. Zaman serisi yaklaşımı, ürün gelişim döngüsüne duyarlı segmentasyon süreci sunarak, tek tarihli görüntülere dayalı yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sağlamaktadır.

SAM'ın zero-shot öğrenme yeteneği, etiketli veri ihtiyacını azaltmakta ve segmentasyonun farklı bölgelere kolayca uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Model başarısı; uygun zaman dilimlerinde seçilen NDVI-TS görüntüleri, segmentasyon öncesi uygulanan görüntü iyileştirme adımları (örneğin kenar iyileştirme) ve hiperparametrelerin optimal yapılandırılmasıyla önemli ölçüde artırılabilir. Öte yandan, SAM'ın doğası gereği tarım dışı nesnelere de segmentlere dahil etme eğilimi bulunmakta; bu nedenle analiz sonrası filtreleme yöntemleri ile bu alanlar ayrıştırılmıştır. Ayrıca, point prompt tabanlı müdahale yöntemleri test edilmiş ancak segmentasyon başarısını anlamlı şekilde geliştirmemiştir; bu sonuç literatürdeki güncel çalışmaları da desteklemektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen NDVI zaman serisi destekli segmentasyon yaklaşımı, SAM modelinin tarımsal parsel sınır tespitinde etkinliğini artırmakta hem zamansal hem yapısal olarak daha doğru ve tutarlı sınırlar elde edilmesini sağlamaktadır. Gelecek çalışmalar, bu yaklaşımın farklı ürün desenleri ve coğrafi bölgelerde test edilmesiyle modelin genellenebilirliği ve uygulama kapsamı daha da genişletilecektir.

*Segment Anything Modeli ve Planet Scope Görüntüleri Kullanılarak Fenoloji Uyumlu Tarımsal Sınır Çıkarımı (Sıfır Çekim Öğrenme Yaklaşımı)*

## 6. Referanslar

Campbell, J. B. (2011). Introduction to remote sensing (5th ed.). Guilford Press.

Crommelinck, S., Bennett, R., Gerke, M., Yang, M. Y., & Vosselman, G. (2017). Contour detection for UAV-based cadastral mapping. *Remote Sensing*, 9(2), 171. <https://doi.org/10.3390/rs9020171>

Ferreira, L. B., Martins, V. S., Aires, U. R. V., Wijewardane, N. K., Zhang, X., & Samiappan, S. (2025). FieldSeg: A scalable agricultural field extraction framework based on the Segment Anything Model and 10-m Sentinel-2 imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110086. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110086>

Graesser, J., & Ramankutty, N. (2017). Detection of cropland field parcels from Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 201, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.027>

Huang, Z., Yang, X., Liu, Y., Wang, Z., Ma, Y., Jing, H., & Liu, X. (2025). Multi-type change detection and distinction of cultivated land parcels in high-resolution remote sensing images based on Segment Anything Model. *Remote Sensing*, 17(5), 787. <https://doi.org/10.3390/rs17050787>

Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., ... & Girshick, R. (2023). Segment anything. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 4015–4026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02643>

Lesiv, M., Laso Bayas, J. C., See, L., Duerauer, M., Dahlia, D., Durando, N., ... & Blyshchyk, V. (2019). Estimating the global distribution of field size using crowdsourcing. *Global Change Biology*, 25(1), 174–186. <https://doi.org/10.1111/gcb.14492>

North, H. C., Pairman, D., & Belliss, S. E. (2018). Boundary delineation of agricultural fields in multitemporal satellite imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12, 237–251. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2884513>

Persello, C., & Bruzzone, L. (2010). A novel protocol for accuracy assessment in classification of very high resolution images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), 1232–1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2029570>

Persello, C., Tolpekin, V. A., Bergado, J. R., & de By, R. A. (2019). Delineation of agricultural fields in smallholder farms from satellite images using fully convolutional networks and combinatorial grouping. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111253. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111253>

Planet. (2022). Introduction to Planet's new 8 band data and access via NASA's commercial smallsat data acquisition (CSDA). [https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2022-06/PlanetCSDA8-Band\\_Data\\_0.pdf](https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2022-06/PlanetCSDA8-Band_Data_0.pdf)

Şimşek, F. F. (2024). Optik ve radar görüntüleri ile aşırı gradyan artırma algoritması kullanılarak tarımsal ürün desen tespiti. *Geomatik*, 9(1), 54–68. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1332997>

Şimşek, F. F. (2025). Comparison of agricultural crop type classifications with different machine learning algorithms by generating ground truth data from farmer declaration parcels. *International Journal of Engineering Geosciences*, 10(2), 207–220. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1552141>

Şimşek, F. F., & Durduran, S. S. (2023). Açık kaynak kodlu Eo learn kütüphanesi ve çok zamanlı Sentinel 2 görüntüleri ile tarımsal ürün sınıflandırması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 10(1), 45–62. <https://doi.org/10.9733/JGG.2023R0004.T>

Tripathy, P., Baylis, K., Wu, K., Watson, J., & Jiang, R. (2024). Investigating the Segment Anything Foundation Model for Mapping Smallholder Agriculture Field Boundaries Without Training Labels. *arXiv preprint arXiv:2407.01846*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01846>

TÜKAS. (2020). Agricultural Production Registration System Technical Report. Ankara: General Directorate of Agricultural Reform.

Watkins, B., & Van Niekerk, A. (2019). A comparison of object-based image analysis approaches for field boundary delineation using multi-temporal Sentinel-2 imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.009>

Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>

Zhang, C., Harrison, P. A., Pan, X., Li, H., Sargent, I., & Atkinson, P. M. (2020). Scale sequence joint deep learning (SS-JDL) for land use and land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111593. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111593>



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

*Fatih Fehmi ŞİMŞEK, Melih ALTAY*

Zhang, H., Liu, W., Niu, H., Yin, P., Dong, S., Wu, J., ... & Zhu, C. (2023). Land cover change detection based on vector polygons and deep learning with high resolution remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 4402218. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3346968>

Zhou, T., Wang, W., Konukoglu, E., & Van Gool, L. (2023). Rethinking semantic segmentation: A prototype view. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 2572–2583). <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00261>



20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Fotogrametri Uygulamalarında Eğik (Oblique) Verilerin Kullanılması

Fuat Volkan PASİNLİ<sup>1,\*</sup>, Sedat BAKICI<sup>2</sup>

Atay Mühendislik, Mutlukent Mahallesi, Beysu Villakent Sitesi, 2010 Cadde No:1 Beysukent, 06800 Çankaya/Ankara

### Genişletilmiş Özet

Fotogrametrik yöntemlerle toplanan veriler hızla gelişen, çeşitlenen yazılım ve donanım imkanları sayesinde gittikçe daha fazla disiplinde daha farklı ihtiyaçları karşılamaktadır. Yakın geçmişe kadar hava fotoğrafı denildiğinde sadece nadir pozisyonda yerleşik hava kameraları ile çekilen görüntüler akla gelirdi, ürün noktasında ise stereo modellerden çizilen hali hazır haritalar ve üretilen ortofotolar yeterlikten değişen ihtiyaçlar ve beklentiler sonucu sayısal yüzey modelleri, gerçek ortofoto, 3 boyutlu mesh modeller de ürün yelpazelerine dahil olmaya başlamıştır. Eğik açılı çekilen (Oblique) hava fotoğrafları da günümüzde farklı amaçlarla kullanılmaya başlanmış bu yöntemle elde edilen görüntülerden daha detaylı veri toplamak mümkün olmuştur.

Eğik (Oblique) fotoğraf çekme tekniği yaygın olarak yaklaşık 10 yıldır kullanılmaktadır, Özellikle 3 boyutlu modellemelerin önem kazanması ve dijital ikiz kavramı ile tanışmamızdan sonra bu modellerin nasıl daha iyi üretileceği sorusuna bir cevap olarak eğik açıda çekim yapabilen kameralar hayatımıza girmiştir. 3 boyutlu modeller diğer bir deyişle dijital ikizler objelerin her açıdan tüm detayları ile simüle edilerek ve ölçekli olarak saklanarak ileride olası bir yok olma halinde aslına uygun olarak tekrar inşa edilmesine olanak sağlamakta, tarihi mirasımızın korunması noktasında oldukça önemli rol almaktadır. Dijital ikizlerin tek kullanım alanı envanter olmayıp mimari renavasyon çalışmalarında da oldukça önemli katkı sağlamaktadırlar. Bunların yanı sıra 3 boyutlu şehir modelleri kadastro ve belediyeçilik hizmetleri ile turizmin yanı sıra CBS uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır.

Nadirden alınan hava görüntüleri modellemesi yapılacak objenin yan yüzeylerini göstermemekte ve nadir hava fotoğraflarından bu yan yüzeylerde sağlıklı veri toplanamamaktadır, bu durum, hem bu bölgelerde otomatik olarak oluşturulan nokta bulutunda bozulmaya hem de o nokta bulutundan üretilen 3 boyutlu modellerde deformasyonlara sebep olmaktadır. İşte bu noktada eğik açı ile çekilen fotoğraflar önem kazanmaktadır, yaklaşık 45°'lik açı ile konumlandırılmış hava kameralarından elde edilen görüntüler ölü bölgelerin de görüntülenebilmesi ve bu bölgelerde veri toplanmasına imkân vermekte, daha sağlıklı 3 boyutlu modeller üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Eğik fotoğrafların kullanım alanlarının yaygınlaşması ile donanımsal destek de gecikmemiş ve bazı firmalar nadir görüntülerle eş zamanlı eğik görüntüler de toplayabilen kameralar üretmiştir. İlk başta geniş ölçekli ve uçaklara monte edilen eğik hava kameraları üretilmiştir, daha sonra drone teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte aynı mantıkta üretilmiş eğik dron hava kameraları da kullanıma sunulmuştur. Eğik kamera sistemleri hemen hemen aynı mantık ile üretilmiştir. Merkezde bulunan nadir açıda bir kameranın etrafına 45°'lik açılarla yerleştirilmiş 4 adet ilave kamera ile tek bir istasyonda, Sağ, Sol, İleri, Geri ve Nadir pozisyonlarda 5 adet görüntü alınmaktadır. Genel olarak yöneltme bilinmeyenleri her kamera için ölçülmekte, nadir kameranın dış yöneltme bilinmeyenleri ölçülmekte ve diğer kameraların nadir kameraya göre dönüklükleri ve offset'leri (eksantrik) hassas olarak bilindiği için eğik kamera bilinmeyenleri de nadir kameraya göre hesaplanarak bulunmaktadır yani her kamera için ayrı bir Gncs alıcısı ve ayrı bir İmu mevcut değildir. Burada göz önünde bulundurulması gereken önemli husus; Eğik kameradan gelen görüntülerin yer örnekleme aralıklarının nadir kameradan elde edilen görüntünün yer örnekleme aralığına göre yaklaşık %30 daha yüksek olacağı yani çözünürlüklerinin bir parça daha düşük olacağıdır, bu fark eğik formda yerleştirilen kameranın eğim açısı ile ters orantılı olarak artacak ya da azalacaktır. (Nadir kamera pozisyonunun uçuş eksenine ile arasındaki açının 90° olduğu düşünülerek)

Tek objenin modellemesinin söz konusu olduğu durumlarda ya da daha küçük ölçekli projelerde tek kameraya sahip dronlar yapılan uçuş planı yazılımı tarafından otomatik olarak hazırlanan akıllı uçuş planları ile (Smart Oblique) kamera açısını uçuşa ve objeye göre otomatik olarak anlık ayarlayabilmekte ve tek kamera ile de eğik görüntü toplanabilmektedir. Bu genelde döner kanat dronlarda kameranın bağlandığı Gimbal ile mümkün olmaktadır çünkü bu durumda kamera direk dron gövdesine değil Gimbal'a monte edilmektedir.

Eğik veri toplama tekniği sadece hava fotoğraflarında değil lidar verisi toplamada da sunduğu avantajlar dolayısı ile birçok uygulamada kullanılmaktadır. Açılı yerleştirilen lidar tarayıcıları ya da bir gimbal ile eğik açı verilebilen tarayıcılarla sadece nadir değil eğik pozisyonda da veri toplanabilmekte, böylelikle özellikle binaların ince detayları çıkarılabilmekte ya da kompleks şekle sahip objelerin gerçekçi 3 boyutlu modelleri oluşturulabilmektedir. Çatı payı ölçülmesi istenilen bazı projelerde de bu teknik yaygın olarak kullanılmaktadır.

\* Sorumlu Yazar: Fuat Volkan Pasinli: Tel: +90 (312) 212 2211 Fax: +90 (312) 212 2275  
E-posta: vpasinli@ataymuhendislik.com



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası



20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

Bu çalışmada Dronlar için tasarlanmış Riebo D2M eğik kamerası ile Ankara/Polatlı ilçesinde yaklaşık 600 hektarlık alanda Riebo D2M eğik kamera ile gerçekleştirilen pilot proje kapsamında toplanan görüntülerin yanı sıra Nevşehir’de DJI L2 lidar tarayıcı ile hem nadir hem de eğik açıda toplanan lidar verilerinden örnekler ağırlıklı olarak sunulacaktır. Polatlı’da gerçekleştirilen pilot projede “double grid” uçuş planı ile (Doğu-Batı / Kuzey-Güney) toplam 36000 adet nadir ve eğik hava görüntüsü alınmıştır (5 farklı açıda), yeterli miktarda Yer Kontrol Noktası Tersus Luka GNSS alıcıları ile Tusaga Aktif sistemi kullanılarak ölçülmüş TG20 jeoidi kullanılmak sureti ile ortometrik kotlar elde edilmiştir. Daha sonra bu görüntüler farklı yazılımlarda işlenerek (DJI Terra / Pix4d Matic) sadece ürün değil yazılım performansları da test edilmiştir ancak sunumun asıl amacı yazılım testi değil özellikle eğik açıda toplanan veriler ile nadir açıdan toplanan veriler arasında ki farklılıkları belirlemek ve avantaj / dezavantajlarını ortaya koymaktır. Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü envanterinde bulunan Vexcel Ultracam Osprey Mark3 Eğik kamerası ile toplanmış görüntülerin 3 boyutlu kadastro çalışmalarında nasıl kullanıldığı konusunda da bilgi verilecek ve üretilen modellerden örnekler sunulacaktır. Eğik kameralardan gelen veriler ve elde edilen ürünlerin yanı sıra eğik kameraların fiziksel yapıları da örnekleri ile birlikte anlatılacaktır. Sadece sonuç ürünleri değil sonuç ürüne giden yolda yapılan işlemler de detaylı olarak gösterilecektir. Özellikle havai nirengi ve dengeleme işlemleri eğik kameralarda bir parça daha farklı yapılmaktadır. Eğik kamera dengelemeleri için yazılan özel programların yanı sıra bu dengelemelerin klasik dron dengeleme yazılımları ile nasıl yapılabileceği ve elde edilen sonuçlar da sunumda yer alacaktır.

Sunum ana ve alt başlıklardan oluşacak, kamera yapıları, veri toplama ve işleme teknikleri, dengeleme metotları, nerelerde kullanıldıkları konusunda detaylı bilgi verilecek ve örnek veriler, tablolar ve görüntüler ile konu desteklenecektir. Bu çalışma ile eğik görüntüler konusunda az bilinenler ya da bilinmeyenler konusunda bir parça da olsa katkı vermek hedeflenmiştir.

#### KAYNAKLAR:

G. J. Grenzdörffer a, \*, M. Guretzkia, I. Friedlanderc (2025): Photogrammetric Image Acquisition And Image Analysis Of Oblique Imagery- A New Challenge for the Digital Airborne System Pfiff

Dr. Shyama Prasad Mukherjee University, Ranchi: Principles of Aerial Photographs and Photogrammetry

Styliani Verykokou and Charalabos Ioannidis: Oblique Aerial Images: Geometric Principles, Relationships and Definitions

#### Anahtar Kelimeler

Fotogrametri, Oblique Görüntü, Eğik Görüntü, 3 Boyutlu Şehir Modelleri, Oblique Lidar, Eğik Lidar, Dijital İkiz, 3 Boyutlu Model



# Mobil LiDAR ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti

Ayşe Buşra YANIÇ<sup>1,\*</sup>, Burak YILDIRIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul İmar İnşaat A.Ş., 34394, Şişli, İstanbul.

<sup>2</sup>İstanbul İmar İnşaat A.Ş., 34394, Şişli, İstanbul.

## Özet

Kentsel yeşil alanların etkin planlama ve yönetimi, sürdürülebilir şehircilik anlayışının temel taşlarından biridir. Bu çalışma, mobil LiDAR ve drone teknolojilerinden elde edilen verilerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit veri modelini ve LiDAR veri setinden otomatik obje çıkarımını ele almaktadır. Bu modelin, yeşil alan yönetiminde obje çıkarımı süreçlerindeki potansiyeli incelenmiş ve her iki veri setinin avantajları ile dezavantajları değerlendirilmiştir. Mobil LiDAR, yoğun nokta bulutu verisiyle rölatif doğruluğu yüksek yüzey modellemeleri elde etmeyi ve obje çıkarımını mümkün kılar; drone teknolojisi geniş alanların hızlı taranmasına, mobil LiDAR sisteminin erişemediği alanlara erişmesine olanak tanımaktadır. Bu teknolojilerin birleşimiyle elde edilen hibrit model, zemin türleri, yapı türleri ve envanterler gibi yeşil alan içerisinde bulunan farklı objelerin daha hassas ve detaylı vektörize edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma, İBB Park ve Bahçeler Dairesi Başkanlığı sorumluluğunda olan yaklaşık 5500 hektarlık kentsel yeşil alan verisinin güncellenmesi kapsamında yapılmış olup, test alanı olarak Göztepe 60. Yıl Parkı seçilmiştir. Toplanan mekânsal veriye; ön-işleme, sınıflandırma, vektörizasyon, obje çıkarımı ve CBS entegrasyonu adımları gerçekleştirilmiştir. Hibrit veri modeli, insan ölçeğindeki objelerin konumlarının ve detaylarının çok daha hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında, ağaç konumu ve ağaca ait ölçülebilir özellikler (yükseklik, taç çapı ve gövde çapı) TerraSolid ve FME platformunda yapılan geliştirmelerle yaklaşık %70 doğruluk ile otomatik tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, LiDAR verisi ile otomatik obje ve öznelik çıkarımının avantaj ve dezavantajlarını ele almış, hibrit modelin tekil veri kaynaklarına göre daha yüksek detay seviyesi sunduğunu ortaya koymuş ve gelecekte yapılacak yeşil alan yönetimi amaçlı çalışmalarda İHA'dan elde edilecek lidar veri setinin projeye katkısı yorumlanmıştır.

## Anahtar Sözcükler

Mobil LiDAR, İHA, Nokta Bulutu, Obje Çıkarımı, Yeşil Alan Yönetimi

## 1. Giriş

Günümüz kent yaşamında yeşil alanlar, sadece ekolojik dengeyi sağlamakla kalmaz; aynı zamanda kent estetiği, hava kalitesinin iyileştirilmesi, sıcaklık kontrolü ve bireylerin fiziksel-ruhsal sağlığı açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Kentleşmenin hızla arttığı günümüzde, bu alanların korunması ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesi, kentsel planlamada öncelikli bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda, yüksek teknolojiye dayalı uzaktan algılama yöntemlerinin kullanımı, yeşil alanlardaki obje ve yapıları doğru bir şekilde analiz etmek ve güncel verilerle desteklemek açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Yeşil alan objelerinin tespiti ve analizi için uzaktan algılama teknolojileri, son derece etkili bir yöntem sunmaktadır. Özellikle LiDAR teknolojisi ve fotogrametri tekniği, bu alandaki verimlilikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Dai vd. (2018), multispektral hava LiDAR teknolojilerinden elde edilen nokta bulutu verilerini, sık ormanlık alanlardaki ağaç tespiti çalışmalarında kullanmıştır. Takhtkeshha vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, multispektral LiDAR verileri kullanılarak makine öğrenmesi teknikleri aracılığıyla kentsel ve kırsal alanlarda ağaç noktalarının belirlenmesi araştırılmış ve üç farklı derin öğrenme modeli karşılaştırılmıştır. You vd. (2021) ise, hava LiDAR verileriyle kentsel alanlardaki ağaç morfolojisini kullanarak ağaç çıkarımını incelemiştir.

Hava araçlarına entegre edilen LiDAR sensörlerinin yanı sıra, motorlu kara taşıtlarına entegre edilerek çalışan mobil haritalama sistemleri (MMS), geomatik alanında yapılan gözlemlerde büyük avantajlar sunmaktadır (Wang vd., 2019). Yol sınırlarının belirlenmesi ve çıkarılması (Yang vd., 2013) ile bina cephelerinin elde edilmesi (Li vd., 2016) gibi çalışmalar, mobil LiDAR sistemlerinin yeşil alanlar dışındaki kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 274 19 48 Fax: +90 (212) 266 51 83

E-posta: busra.yanic@imar.istanbul (Yaniç B.), burak.yildirim@imar.istanbul (Yıldırım B.)

## Mobil LiDAR ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti

Mobil LiDAR sistemleri, yeşil alan çalışmalarında da kullanılmaktadır. Herrero-Huerta vd. (2018), çalışmalarında mobil LiDAR sistemi kullanarak kentsel alanlardaki ağaçların yapısal parametrelerinin tahmini için otomatik bir metodoloji geliştirmeyi amaçlamışlardır. Guan vd. (2015) ise kentsel alanlarda ağaç çıkarımı ve sınıflandırması amacıyla mobil LiDAR verilerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiş; bu çalışmada, derin öğrenme teknikleri ile özellik çıkarımı yapılmıştır.

LiDAR verilerinin obje çıkarımı ve ağaç tespiti çalışmalarındaki başarısının yanı sıra, fotogrametrik yöntemler de günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Dersch vd. (2022), evrimsel sinir ağı modeli kullanarak bireysel ağaç tespiti üzerine çalışmalar yapmıştır. Dakov ve Petrova-Antonova (2024) ise kentsel alanlarda bitki örtüsü ve ağaç tespitine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Görüldüğü üzere, LiDAR ve fotogrametri verileri obje tespiti konusunda etkinliklerini kanıtlamış ve özellikle kentsel alanlarda yapılan çalışmalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kent bölgelerindeki yeşil alanların izlenmesi ise günümüzde önemli araştırma konularından biridir.

## 2. Gelişmiş Haritalama Yöntemleri

### 2.1 Mobil Haritalama Sistemleri

Mobil Haritalama Sistemi (MMS), hareketli bir platform üzerine monte edilen yüksek algılama kapasiteli lazer tarayıcı (LiDAR) aracılığıyla coğrafi veri toplamak amacıyla kullanılan bir sistemdir (Elhashash vd., 2022). Bu tür mobil ölçme ve değerlendirme sistemleri, birden fazla elektronik birim ve bunlarla ilişkili veri aktarım bileşenlerini içerir. Bu bileşenlerin merkezi bir yapı altında etkileşimli biçimde yönetilmesini gerektiren bir sistem entegrasyonu yaklaşımını zorunlu kılmaktadır.

MMS platformu; lazer tarayıcı, 360° kamera, Küresel Konumlama Sistemi (GPS), Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) ve veri kayıt ünitesi olmak üzere çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır (Schwarz ve El-Sheimy, 2004). Bu çalışmada kullanılan mobil haritalama sistemi ile, araç erişiminin mümkün olduğu tüm cadde, sokak ve karayollarında 10 metre aralıklarla 360° panoramik görüntüler elde edilmekte ve bu görüntüler, LiDAR nokta bulutu verisi ile entegre edilmektedir.

Kullanılan MMS'ye ait sistem bileşenleri aşağıda detaylandırılmıştır:

- **GPS:** Yüksek hassasiyetli konum verileri, Trimble marka BD982 model çift frekanslı GNSS alıcısı ile elde edilmiştir. Bu alıcı, saniyelik çözünürlükte RINEX formatında veri işleyebilme kapasitesine sahiptir.
- **IMU:** IMU birimi, içinde yer alan jiroskop ve ivmeölçerler sayesinde hareketli platformun anlık açısal ( $\omega$ ,  $\psi$ ,  $\kappa$ ) ve konumsal ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) değişimlerini rölatif olarak ölçmektedir. Bu çalışmada, Applanix marka POSLV5 model IMU kullanılmış olup saniyede 200 konum ve dönüklük bilgisi üretebilmektedir.
- **LiDAR:** Nokta bulutu verisi, Velodyne marka Puck VLP-16 model Lidar cihazı ile elde edilmiştir. Bu cihaz, 16 lazer kanalına sahip olup, 80 metreye kadar ölçüm yapabilmekte; her bir kanal yatayda 360° ve dikeyde 30° görüş alanı sunmaktadır. Saniyede yaklaşık 300.000 nokta alımı gerçekleştirilebilmektedir.
- **360° Kamera Konfigurasyonu:** Panoramik görüntüleme için NCTech iSTAR Pulsar marka kameralar kullanılmıştır. Sistem, dört adet balıkgözü (fisheye) lens aracılığıyla 360° görüntü kaydı yapmakta; bu görüntüler gerçek zamanlı olarak “.raws” formatında ve zaman etiketiyle kayıt altına alınmaktadır.
- **Sistem Kalibrasyonu:** Verilerin koordinatlandırılması aşamasında, montaj hataları veya farklı cihazlardan gelen veriler nedeniyle oluşabilecek uyumsuzlukları gidermek amacıyla doğrusal ve açısal düzeltme değerlerinin belirlenerek hesaplamalara dâhil edilmesi, sistem kalibrasyonu olarak adlandırılır.

**Leverarm Ölçümü:** Mobil sistemlerde kullanılan koordinat sistemi, “**body koordinat sistemi**” olarak adlandırılmaktadır ve bu sistemin referans noktası IMU'nun merkezidir. Lazer tarayıcı, dijital kamera ve GPS gibi diğer ekipmanların merkez noktalarının, bu referans noktasına olan mesafelerinin üç ekseninde (X, Y, Z) yüksek hassasiyetle belirlenmesi işlemine “**leverarm ölçümü**” denir.

Body koordinat sisteminde, aracın hareket yönü +X eksenini olarak tanımlanır. +Y eksenini bu doğrultuya 90° dik olacak şekilde yatay düzlemde, +Z eksenini ise araçtan yukarıya (yani gökyüzüne) doğru tanımlanır. Bu bağlamda, üç farklı leverarm ölçümünden söz edilebilir: GPS leverarmı, kamera leverarmı ve lazer tarayıcı leverarmı.

**Boresight Kalibrasyonu:** Mobil LiDAR sistemlerinde, IMU ile lazer tarayıcı arasında oluşabilecek açısal farkların belirlenmesi süreci “**boresight kalibrasyonu**” olarak adlandırılır. Bu işlem ile IMU ve lazer tarayıcı arasındaki açısal sapmalar tespit edilerek hesaplamalara dâhil edilir.

Açısal düzeltmeler, fotogramride **dış yönelme elemanları** olarak da bilinen üç eksenle tanımlanır:  $\omega$  (omega),  $\psi$  (psi) ve  $\kappa$  (kappa). Bu değerler, leverarm ölçümünde olduğu gibi doğrudan ölçülemez; genellikle yapılaşmanın bulunduğu bir alanda gerçekleştirilen test ölçümleri aracılığıyla hesaplanması gerekmektedir.

Saha ölçümlerine geçilmeden önce, tüm leverarm ve boresight kalibrasyon işlemleri tamamlanmış; elde edilen doğrusal ve açısal düzeltme parametreleri veri işleme sürecine entegre edilmiştir.

Saha verilerinin toplanmasının ardından, ölçüm sonrası veri işleme adımlarına geçilmiştir. İlk olarak, IMU ve GNSS verileri senkronize edilerek ham konum ve dönüklük bilgileri elde edilmiştir. Bu bilgiler, lazer tarayıcıdan alınan ham verilerle entegre edilerek nokta bulutu oluşturulmuştur. Boresight ve leverarm kalibrasyonlarına ait düzeltme parametreleri bu aşamada hesaplamalara dahil edilmiştir.

Oluşturulan nokta bulutu; yoğunluk, doğruluk ve süreklilik açısından kontrol edilmiş; gerekli görülen durumlarda filtreleme, veri gürültüsü (noise) tespiti ve konum hatalarının giderilmesine yönelik düzeltmeler uygulanmıştır. Bu işlemlerin ardından, TerraSolid yazılımının TerraMatch modülü kullanılarak dengeleme (adjustment) işlemi gerçekleştirilmiş ve verinin geometrik tutarlılığı artırılmıştır.

Tüm bu süreçler sonucunda, çalışma alanına ait yüksek doğrulukta üç boyutlu mekânsal veriyi içeren nokta bulutu başarıyla elde edilmiştir.

## 2.2 İnsansız Hava Aracı Sistemleri

İnsansız Hava Araçları (İHA), uzaktan kumanda ile ya da önceden tanımlanmış bir uçuş planına göre hareket edebilen; entegre cihazlar aracılığıyla eş zamanlı olarak görüntü ya da üç boyutlu (3B) lazer verisi toplayabilen, hızlı ve güvenilir teknolojik sistemlerdir.

Başlangıçta ağırlıklı olarak askeri amaçlarla kullanılan bu araçlar, günümüzde sivil kullanım alanlarında da yaygın olarak yer almaktadır. Sivil İHA pazarının büyümesiyle birlikte; arama-kurtarma, afet yönetimi, orman yangınlarıyla mücadele, tarım, altyapı izleme, sınır güvenliği ve kargo taşımacılığı gibi birçok sektörde etkin şekilde kullanılmaktadırlar (Jawhar vd., 2017). Buna ek olarak, yeşil alan yönetimi gibi çevresel uygulamalarda da hızlı veri üretme kabiliyetleri sayesinde önemli avantajlar sağlamaktadırlar.

İHA'lar; kullanım amacı, yapısal tasarımı, uçuş kabiliyeti ve ağırlık-menzil özelliklerine göre farklı kategorilere ayrılmaktadır:

- **Kullanım amacına göre:** Askeri, sivil/ticari, endüstriyel, tarımsal, eğlence ve hobi amaçlı İHA'lar
- **Yapısal tasarıma göre:** Sabit kanatlı, döner kanatlı ve hibrit İHA'lar
- **Uçuş kabiliyetine göre:** Manuel, yarı-otonom ve tam otonom İHA'lar
- **Ağırlık ve menzile göre:** Mikro, mini, küçük, orta ve büyük İHA'lar

Bu sınıflandırmalar sayesinde, kullanım amacına en uygun İHA türü belirlenerek görev verimliliği artırılabilir.

İHA sistemleri, farklı açılardan ve yüksekliklerden yüksek çözünürlüklü fotoğraflar çekerek fotogrametrik veri üretimi sağlar. Aynı nesnenin iki veya daha fazla farklı konumdan görüntülenmesiyle elde edilen **stereo görüntü** çiftleri, üç boyutlu modelleme yapılmasına olanak tanır. Bu süreçte kullanılan **Stereo Dense Matching** yöntemi ile, aynı nesneye karşılık gelen pikseller eşleştirilir ve her piksel için derinlik bilgileri hesaplanarak bir nokta bulutu (point cloud) oluşturulur. Elde edilen nokta bulutları, yüzey modelleri, dijital yükseklik modelleri (DSM) ve üç boyutlu analizler için temel veri kaynağını oluşturur.

Bu çalışmada fotogrametrik veri toplamak amacıyla, Zenmuse P1 kamera ile donatılmış DJI Matrice 300 RTK model İHA sistemi kullanılmıştır. Sistem, 45 megapiksel çözünürlükte görüntü kaydı yapabilmekte ve yerden yaklaşık 500 metre yüksekliğe kadar (AGL - Above Ground Level) uçuş gerçekleştirebilmektedir.

Veri alımından önce uçuş planı hazırlanmış ve Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nden (SHGM) gerekli uçuş izinleri alınmıştır. Uçuş öncesinde, sistemin konum hassasiyetini artırmak amacıyla, çalışma sahasına homojen şekilde dağılmış Yer Kontrol Noktaları (YKN) tesisi gerçekleştirilmiştir. Bu YKN'ları, görüntülerin konumlandırılmasında referans olarak kullanılmıştır.

Alınan stereo görüntü çiftlerine, Stereo Dense Matching algoritması uygulanarak yüksek doğrulukta nokta bulutu üretilmiştir. Elde edilen bu veri, çalışmada fotogrametrik nokta bulutu olarak adlandırılmış ve analiz sürecinde temel veri seti olarak kullanılmıştır.

### 2.3. Nokta Bulutu Karşılaştırması; LiDAR ve Fotogrametrik Nokta Bulutu

Mobil Haritalama Sistemleri (MMS), LiDAR teknolojisi kullanarak lazer tarayıcı ile yeryüzü objesi arasındaki mesafeyi ölçer ve üç boyutlu (3D) nokta bulutu oluşturur (Mallet ve Bretar, 2009). LiDAR sensöründen gönderilen lazer ışını, bitki örtüsüne nüfuz ederek orman altı topoğrafyasına ulaşabilir; bu sayede arazi yükseklik modeli fotogrametrik nokta bulutuna kıyasla daha detaylı şekilde elde edilir.

Fotogrametri ise veri toplama kolaylığı ve maliyet açısından LiDAR'a göre daha avantajlıdır. Daha düşük maliyetli ve erişilebilir olması, kullanıcıların çalışma alanlarını daha sık ölçmelerine ve zamana duyarlı veri toplamalarına imkân sağlar. Ancak, fotogrametri pasif bir uzaktan algılama yöntemi olduğundan; hava durumu, sis ve bulut gibi meteorolojik koşullardan etkilenmektedir.

Bu kapsamda, çalışmada hem LiDAR hem de fotogrametrik yöntemlerle elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırmalı analizi yapılmış; izlenen yönetsel süreç aşağıda açıklanmıştır.

## 3. Materyal ve Yöntem

### 3.1. Çalışma Alanı ve Veri

Bu çalışma, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Park ve Bahçeler Dairesi Başkanlığı sorumluluğunda bulunan toplam 5505 hektarlık kentsel yeşil alanın genelinde yapılmış olup, uygulama ve test çalışmaları için Kadıköy ilçesindeki yaklaşık 7.8 hektar büyüklüğündeki Göztepe 60. Yıl Parkı (Şekil 1) test alanı olarak seçilmiştir. Bu alanın seçiminde, kentsel yeşil alanlar içerisinde çeşitli obje sınıflarını barındırması etkili olmuştur.



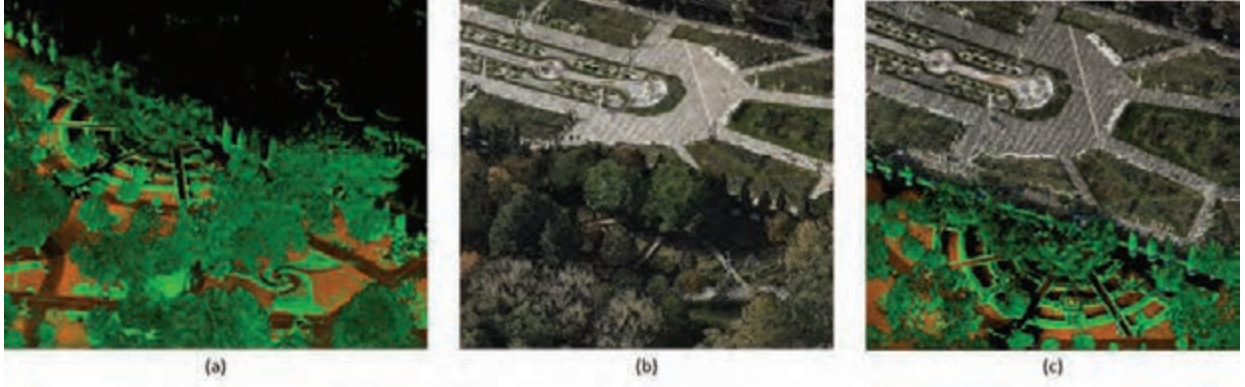
Şekil 1: Çalışma alanı

Test alanına yönelik olarak hem Mobil Haritalama Sistemi (MMS) hem de İnsansız Hava Aracı (İHA) verileri kullanılmıştır. Araç üzerine entegre edilmiş MMS ile gerçekleştirilen veri toplama (tarama) sürecinde, ön işleme ve dengeleme işlemlerinin ardından LAS (Long ASCII Standard) formatında nokta bulutu elde edilmiştir.

Elde edilen LAS formatındaki LiDAR nokta bulutunun sınıflandırması, nokta tabanlı sınıflandırma yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir ve veri altı sınıfa ayrılmıştır: ground (zemin), low vegetation (alçak bitki örtüsü), medium vegetation (orta bitki örtüsü), high vegetation (yüksek bitki örtüsü), low point (alçak nokta) ve default (diğer).

MMS'nin menzilin yetersiz kaldığı bölgelerde, özellikle araç erişimin mümkün olmadığı kısımlarda nokta bulutunda eksiklikler olduğu Şekil 2.a'da gözlemlenmiştir. Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla, tamamlayıcı bir yöntem olarak İHA verilerinden faydalanılmıştır. İHA ile gerçekleştirilen uçuşlardan elde edilen görüntüler, ön işleme adımlarının ardından **Stereo Image Dense Matching** yöntemiyle LAS formatında fotogrametrik nokta bulutuna dönüştürülmüştür. Şekil 2.b'de görüldüğü üzere, İHA ile elde edilen nokta bulutunda herhangi bir boşluk bulunmamaktadır.

İki farklı kaynaktan elde edilen nokta bulutlarının doğrudan birleştirilmesi çeşitli teknik sorunlara yol açabileceğinden, veriler önce ayrı ayrı sınıflandırılmış, ardından uyumlu hale getirilerek birleştirilmiştir. MMS ve İHA verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan **hibrit nokta bulutu** Şekil 2.c’de sunulmaktadır.



Şekil 2: MMS nokta bulutu (a), İHA nokta bulutu (b), Hibrit nokta bulutu (c)

Şekil 2.c’de de görülebileceği gibi, hedeflendiği şekilde çalışma alanına ait eksiksiz bir nokta bulutu elde edilmesiyle, yeşil alan objelerinin tespiti ve vektörizasyonuna yönelik analiz adımlarına geçilmiştir.

### 3.2. Vektörizasyon ve Obje Çıkarımı

Sınıflandırılmış LiDAR nokta bulutu kullanılarak, CAD tabanlı yazılımlar aracılığıyla Tablo 1’de yer alan kentsel yeşil alan objeleri tespit edilmiştir. Tespit edilen bu objeler, vektör formatına dönüştürülerek Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamına aktarılmıştır (Şekil 3).

Tablo 1: Kentsel yeşil alan obje türleri

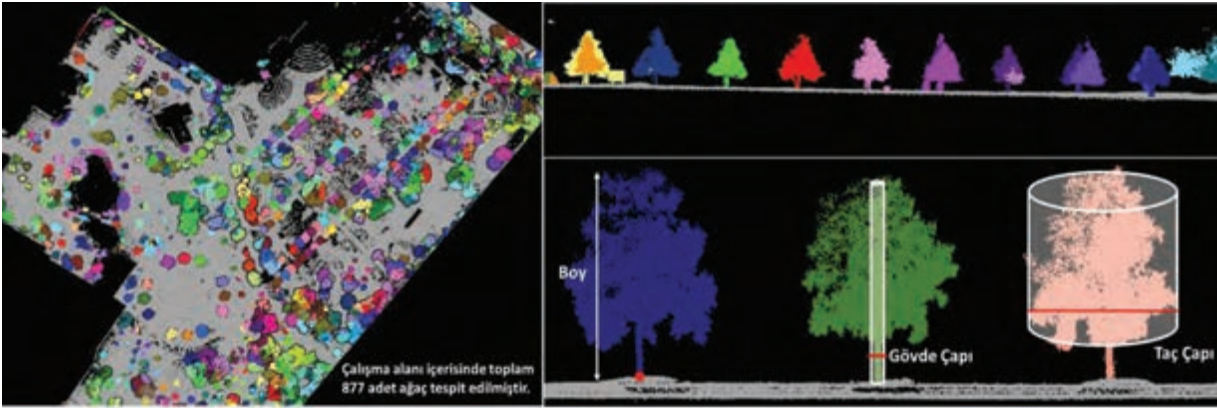
	Sert Zemin Türleri	Yapı Türleri	Envanter Türleri	Yeşil Alan Türleri
1	Adım Taşı	Duvar	Aydınlatma Direği	Çalı Alanı
2	Çocuk Oyun Alanı	Güvenlik	Bank	Çim Alanı
3	Fitness Alanı	Havuz	Çöp Kovası	Gül Alanı
4	Kaldırım	İdari Bina	Elektrik Panosu	Mevsimlik Çiçek Alanı
5	Merdiven	Sanat Ögesi	Fitness Aletleri	
6	Otopark	Sosyal Tesis	Güvenlik Kamerası	
7	Yaya Yolu	Trafo	Kapak	
8	Diğer	Tuvalet	Oyun Ekipmanı	
9		Diğer	Pergola	
10			Sanat Ögesi	
11			Tabela	
12			Diğer	

Mobil LiDAR ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti



Şekil 3: CBS ortamına aktarılan objeler

Bu çalışmada obje çıkarımı sürecinde, özellikle ağaçlara ait konum, yükseklik, taç çapı ve gövde çapı gibi ölçülebilir özelliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla TerraSolid yazılım paketi içerisinde yer alan araçlar kullanılarak, nokta bulutu üzerinden otomatik obje çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, FME platformunda, obje çıkarımına yönelik özel algoritmalar geliştirilmiş ve bu algoritmalarla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü üzere, otomatik olarak tespit edilen ağaç konumları noktasal obje sınıfında yer almakta ve her bir ağaç için konumsal ve morfolojik özellikler ayrı ayrı belirlenebilmektedir.



Şekil 4. Otomatik ağaç çıkarımı

Gerçekleştirilen vektörizasyon ve obje çıkarımı sürecinin ardından, elde edilen mekânsal veriler üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda çalışma alanındaki yeşil alan objelerine ilişkin sayısal ve konumsal bulgulara ulaşılmıştır. Aşağıda, bu çalışmadan elde edilen temel sonuçlar özetlenmiştir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, İHA ve MMS kullanılarak elde edilen nokta bulutlarının avantajları ve dezavantajları detaylı olarak incelenmiştir.

MMS, sokak düzeyinde veri toplamak için tasarlanmış, yüksek yoğunlukta ve rölatif doğruluğu yüksek nokta bulutları sağlayan bir sistemdir. Bu sayede kentsel objelerin tespitinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, lazer tarayıcı menzili ve araç erişimi gibi fiziksel kısıtlamalar nedeniyle, engebeli, yüksek ya da erişimi zor bölgelerde MMS'nin tek başına yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

İHA'lar ise hava yoluyla erişim sağlayarak fiziksel olarak ulaşılamayan alanlarda hızlı ve kapsamlı veri toplama avantajı sunmaktadır. Bununla birlikte, üstten fotoğraf çekimi esasına dayandığından, küçük ölçekli nesnelerin ve bir başka objenin altındaki yapıların tespiti konusunda sınırlamalar bulunmaktadır. Ayrıca, İHA ile üretilen nokta bulutları, küçük çaplı kentsel objelerin morfolojik özelliklerinin belirlenmesinde hatalı veya eksik sonuçlar verebilmektedir.

Bu çalışmada, İHA görüntülerinden üretilen nokta bulutları, sokak ölçeğindeki küçük kentsel objelerin tespitinde MMS nokta bulutu kadar yüksek doğruluk ve çözünürlük sağlayamamıştır. Mobil LiDAR verisi ile yapılan ağaç tespiti ise, fotogrametrik yöntemlere kıyasla daha doğru ve güvenilir sonuçlar sunmuştur.

Sonuç olarak, MMS ve İHA verilerinin birlikte kullanılması, her iki yöntemin eksikliklerini tamamlayarak kentsel yeşil alanların üç boyutlu modellenmesinde kapsamlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Elde edilen veriler ve sonuçlar doğrultusunda, İHA ve MMS teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik bulgular ve ileriye dönük öneriler aşağıda sunulmuştur.

## 5. Bulgular ve Öneriler

İHA ve MMS nokta bulutlarının birleştirilmesi, her iki teknolojinin güçlü yönlerini bir araya getirerek daha kapsamlı ve yüksek doğrulukta veri üretimini sağlamıştır. Hibrit veri kullanımı, kentsel yeşil alanların daha doğru bir şekilde modellenmesi ve analizi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu birleşimin uygulamasında bazı teknik zorluklarla karşılaşabilmektedir. Bu zorluklar; farklı sistemlerdeki koordinat sistemlerinin uyumlu hale getirilmesi, farklı çözünürlükteki verilerin dengelenmesi ve çevresel koşul değişimlerinin etkisinin azaltılması ve çoklu veri kaynaklarının birlikte sınıflandırılmasıdır. Karşılaşılan teknik zorlukların aşılması ile birlikte, İHA ve MMS verilerinin entegrasyonu kentsel yeşil alanlardaki sert zemin ve yapı türleri ile yeşil alan envanter türleri ve sınırlarını, konumsal ve yapısal özellikleriyle yüksek doğrulukta tespit etme imkânı sunmaktadır.

Son yıllar LiDAR sensörlerinin daha küçük boyutlarda üretilmesiyle, taşınabilirliği kolaylaşmış ve İHA platformunda kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bu çalışmada karşılaşılan teknik zorluklar göz önünde bulundurulduğunda, gelecekteki projelerde İHA platformuna entegre edilen LiDAR teknolojisinin kullanımı, proje maliyetini düşürecek, operasyonel süreci sadeleştirecek ve daha hızlı sonuç alınmasını sağlayacaktır. Ayrıca özellikle orman-altı topografyasında yer alan objelerin fotogrametrik yöntemle kıyasla daha iyi ayırt edilebileceği öngörülmektedir. Tüm bu bulgular ışığında, İHA ve MMS teknolojileri kentsel yeşil alanların modellenmesinde güçlü ve tamamlayıcı bir çözüm alternatifi olarak değerlendirilebilir.

## Teşekkür

YAYSİS çalışmasının ilk aşamasında yürütülen tüm çalışmalara sağladıkları liderlik, kapsamlı katkılar ve paylaştıkları güncel verilerle sürecin gelişimine doğrudan yön veren; başta İBB Park ve Bahçeler Dairesi Başkanlığı olmak üzere, bu süreçte proje ortağı İPA Stratejik Danışmanlık A.Ş.(BİMTAŞ)'ne şükranlarımızı sunarız.

## Kaynaklar

- Dai W., Yang B., Dong Z., Shake A. (2018) A new method for 3D individual tree extraction using multispectral airborne LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 144, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.08.010.
- Dakov V., Petrova-Antonova D. (2024) Urban tree detection from remote sensing data based on DeepForest model. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-4/W4-2024*, 8th International Conference on Smart Data and Smart Cities (SDSC), 4–7 June 2024, Athens, Greece, doi: 10.5194/isprs-annals-X-4-W4-2024-XXX-2024.
- Dersch S., Schöttl A., Krzystek P., Heurich M. (2022) Novel single tree detection by transformers using UAV-based multispectral imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022*, 6–11 June 2022, Nice, France, 741–748. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-741-202.
- Elhashash M., Albanwan H., Qin R. (2022) A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications. *Sensors* 22(11): 4262.
- Guan H., Yu Y., Ji Z., Li J., Zhang Q. (2015) Deep learning-based tree classification using mobile LiDAR data. *Remote Sensing Letters*, 6(11), 864–873, doi: 10.1080/2150704X.2015.1088668.
- Guan H., Li J., Cao S., Yu Y. (2016) Use of mobile LiDAR in road information inventory: A review. *International Journal of Image and Data Fusion* 7(3), 219-242.
- Herrero-Huerta M., Lindenbergh R., Rodríguez-González P. (2018) Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context. *PLOS ONE*, 13(4), e0196004, doi:10.1371/journal.pone.0196004.



*Mobil LiDAR ve İHA Verilerinin Hibrit Kullanımıyla Kentsel Yeşil Alanlarda Ağaç ve Obje Tespiti*

- Jawhar I., Mohammed N., Al-Jaroodi J., Agrawal D.P., Zhang S. (2017) Communication and networking of UAV-based systems: Classification and associated architectures. *International Journal of Network and Computer Applications* 84, 93-108.
- Li Y., Hu Q., Wu M., Liu J., Wu X. (2016) Extraction and simplification of building façade pieces from mobile laser scanner point clouds for 3D street view services. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(12), 231, doi: [10.3390/ijgi5120231](https://doi.org/10.3390/ijgi5120231).
- Mallet C., Bretar F. (2009) Full-waveform topographic LiDAR: State-of-The-Art, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1): 1-16.
- Schwarz K.P., El-Sheimy N. (2004) Mobile mapping systems-State of the art and future trends. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35, 10.
- Ren H., Pang R., Huang W., Xu B. (2025) Experimental study on intelligent detection for surface defects on earth-rockfill dams based on UAV images and TLS point clouds. *Measurement* 256(B).
- Takhtkeshha N., Mazzacca G., Remondino F., Hyypä J., Mandlburger G. (2025) *Multispectral LiDAR data for extracting tree points in urban and suburban areas*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2508.19881>
- Yang B., Fang L., Li J. (2013) Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 80–93, doi: [10.1016/j.isprsjprs.2013.02.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.012).
- You H., Li S., Xu Y., He Z., Wang D. (2021) Tree extraction from airborne laser scanning data in urban areas. *Remote Sensing*, 13(17), 3428, doi: [10.3390/rs13173428](https://doi.org/10.3390/rs13173428).
- Wang Y., Chen Q., Zhu Q., Liu L., Li C., Zheng, D. (2019) A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas. *Remote Sensing*, 11(1540), 1–25, doi: [10.3390/rs11131540](https://doi.org/10.3390/rs11131540).

# Bildiriler Teknik Oturum 7

## Arazi Yönetimi

**Oturum Başkanı:** Dr. Azer İlgar Kara, *Hacettepe Üniversitesi*

- 7.1. Gıda Güvenliği ve Güvencesinin Sağlanmasında Arazi Yönetimi: Harita Mühendisliği Perspektifi (Bildiri Özet)  
(*Nihal Genç, Hüsniye Ebru Çolak, Volkan Başer*)
- 7.2. Kuruluşlarının 100'üncü Yılında, Sistem Teorisi Yaklaşımıyla, Türkiye Harita ve Kadastro Kurumlarının ve Faaliyetlerinin Gelişiminin İncelenmesi ve Benzer Ülkelerle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi (Bildiri Özet)  
(*Abdulahit Torun*)
- 7.3. Arazi Yönetiminde Tüze Çalışmalarına Öneriler (Tam Metin)  
(*Mehmet Ertaş*)
- 7.4. Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi (Bildiri Özet)  
(*Cihat Erda Gümüş, Özgen Sadu Çağlar, Fatih Çağatay Kaplan*)
- 7.5. Gayrimenkul Sektöründe Yeni Bir Dönem: Gayrimenkul Tokenizasyonu ve Uygulamaları (Tam Metin)  
(*Orhan Mataracı, Tolgahan Özden*)
- 7.6. Toprak Gaspından Veri Gaspına: Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. Yılında Dijital Sömürgecilik Karşısında Ulusal Veri Egemenliği Modeli (Bildiri Özet)  
(*Yasemin Kuleyin*)

# Gıda Güvenliği ve Güvencesinin Sağlanmasında Arazi Yönetimi: Harita Mühendisliği Perspektifi

Nihal GENÇ<sup>1,2\*</sup>, Hüsnüye Ebru ÇOLAK<sup>3</sup>, Volkan BAŞER<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 28200, Giresun, Türkiye

<sup>3</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>4</sup>Giresun Üniversitesi, Giresun Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 28049, Giresun, Türkiye

## Genişletilmiş Özet

Gıda güvenliği, bireylerin sağlıklı ve aktif bir yaşam sürdürebilmesi için gerekli besinlere fiziksel, ekonomik ve sosyal açıdan sürekli ve yeterli erişim imkanına sahip olması olarak tanımlanırken; gıda güvencesi, bu besinlerin üretimden tüketime kadar uzanan tedarik zinciri boyunca sağlıklı, hijyenik ve zararlı bileşenlerden arındırılmış şekilde sunulmasını ifade eder. Bu iki kavram, üretim kapasitesini doğrudan etkileyen arazi ve toprak kaynaklarının durumu ile güçlü bir ilişki içerisindedir (FAO, 2017). Tarımsal üretimin miktarı ve kalitesi; toprağın verimliliği, biyolojik çeşitliliği, su-iklim etkileşimi ve ekolojik dengeye sıkı sıkıya bağlıdır. Ancak arazi tahribatı, erozyon, yanlış sulama, tuzlaşma, organik madde kaybı, aşırı otlatma ve kontrolsüz kentleşme gibi olumsuz süreçler, üretim kapasitesini azaltarak gıda güvenliğini ve güvencesini doğrudan zedelemektedir. Bu nedenle, gıda güvenliği ve güvencesi politikalarının başarısı, arazinin korunması ve sürdürülebilir yönetimiyle doğrudan bağlantılıdır (Genc vd., 2025; Malek & Verburg, 2021). Bu durum, arazi yönetimi olarak adlandırılan kavramsal çerçeve ile sağlanmaktadır. Arazi yönetimi; doğal kaynakların korunması, arazi kullanım planlaması, mülkiyet düzenlemeleri ve çevresel etkilerin azaltılmasını, planlama-düzenleme-uygulama aşamalarında bütünleştiren sistematik bir süreçtir (Lemmen vd., 2015; Yomralioglu ve Cete, 2017). Tarım özelinde bu süreç, tarıma elverişli alanların korunması, verimliliğin artırılması ve sürdürülebilir üretim modellerinin kalıcı hale getirilmesi hedeflerine odaklanır. Bu kapsamda yürütülen tarımsal arazi kullanım planlaması; ürün desenini iklim koşulları, toprak özellikleri ve ekolojik eşiklerle uyumlu biçimde kurgular, kentsel yayılma baskısını sınırlandırır ve üretim alanlarının sürekliliğini güvence altına alır. Toprak sağlığının güçlendirilmesine yönelik olarak ise arazi yönetimi kapsamında; erozyon kontrolü, münavebe, azaltılmış toprak işleme, organik madde yönetimi ve hassas sulama gibi yöntemler uygulanır. Su yönetimi planlanarak sulama verimliliği artırılır, su kaynaklarının uzun vadeli kullanılabilirliği güvence altına alınır. İklim değişikliğine uyum stratejilerinin bu süreçte entegre edilmesi de, üretim sistemlerinin çevresel ve ekonomik risklere karşı dayanıklılığını güçlendirir. Böylece arazi yönetimi, gıda güvenliğinin ve güvencesinin sürdürülebilir biçimde sağlanabilmesi için gerekli altyapıyı hazırlar.

Arazi yönetiminin etkin biçimde uygulanabilmesi, doğru, güncel ve konuma dayalı verilere erişim ile mümkün olmaktadır. Harita mühendisliği, bu noktada devreye girerek arazi yönetimine mekânsal veri temelli çözümler sunmaktadır. Tarımsal üretim alanlarının envanterinin çıkarılması, sınırlarının hassas biçimde belirlenmesi, arazi kullanım türlerinin ve tarımsal kabiliyet sınıflarının bilimsel yöntemlerle sınıflandırılması, zamansal değişimlerin izlenmesi ve değerlendirilmesi gibi kritik uygulamalar, harita mühendisliği disiplininin doğrudan katkı sağladığı alanlar arasında yer almaktadır. Bu süreçte Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Uzaktan Algılama (UA), İnsansız Hava Araçları (İHA), Küresel Konumlama Sistemleri (GPS) ve LiDAR gibi ileri teknolojiler, arazi kullanımının mekânsal boyutunun analizinde vazgeçilmez araçlar olarak öne çıkmaktadır. Harita mühendisliği tarafından üretilen mekânsal veriler, yalnızca mevcut durumu ortaya koymakla kalmamakta; geleceğe yönelik senaryoların bilimsel temellere dayalı olarak modellenmesini de mümkün kılmaktadır. Günümüzde Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı tarım sensörleri, toprak nemi, sıcaklık, pH değeri, tuzluluk oranı, besin elementleri ve atmosferik koşullar gibi parametreleri anlık ve konuma dayalı olarak ölçerek bu veri ekosistemini daha da güçlendirmektedir. Elde edilen yüksek çözünürlüklü veriler, CBS ve UA sistemleri aracılığıyla işlenerek çok boyutlu analizlere dönüştürülmektedir. Böylece arazi yönetimi, sorunlar ortaya çıktıktan sonra müdahaleye dayalı yöntemlerden, riskleri önceden öngören ve erken müdahale imkânı sunan yönetim anlayışına evrilmektedir. Bu analizler, tarım alanlarındaki değişim eğilimlerini, risk bölgelerini ve verimlilik potansiyeli yüksek alanları ortaya çıkarmakta; böylece planlama süreçleri somut verilerle desteklenmektedir. Mekânsal analizler sonucunda elde edilen çıktılar, mekânsal karar destek sistemleri ve tarım bilgi sistemleriyle entegre edilerek stratejik politika geliştirme süreçlerine doğrudan girdi sağlamaktadır. Bu entegrasyon sayesinde, kentsel yayılma baskısı kontrol altına alınabilmekte, kırsal alanlar bütüncül planlama anlayışıyla yönetilebilmekte ve tarım alanlarının sürdürülebilir üretim kapasitesi uzun vadede güvence altına alınabilmektedir. Böylece harita mühendisliği, yalnızca teknik bir veri sağlayıcı değil; aynı zamanda gıda güvenliğini koruyan, gıda güvencesini garanti altına alan ve arazi yönetimini bilimsel temellere dayalı olarak yönlendiren stratejik bir aktör hâline gelmektedir.

Ulusal ve uluslararası düzeyde, gıda güvenliği ve güvencesi ile arazi yönetimi arasındaki ilişki, temel strateji belgelerinde ve politika çerçevelerinde açıkça tanımlanmış ve öncelikli bir kalkınma alanı olarak konumlandırılmıştır. Türkiye’de 12. Kalkınma Planı (2024–2028); tarım arazilerinin korunmasını, arazi kullanım planlamasının güçlendirilmesini, tarımsal üretim kapasitesinin artırılmasını ve iklim değişikliğine uyumun sağlanmasını, gıda güvenliğinin ve güvencesinin temel bileşenleri olarak ele almaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Bu hedefler, Tarım ve Orman Şurası Kararları ile desteklenmiş; üretim planlamasında iklim ve toprak verilerine dayalı yöntemlerin kullanılması, doğal kaynakların etkin yönetimi ve tarımsal verimliliğin artırılması yönünde politika önerileri ortaya konmuştur (Tarım Orman Şurası, 2019). Ekonomik planlama ekseninde ise Orta Vadeli Program (2025–2027), gıda güvenliği ile doğrudan ilişkili olarak tarım sektöründe dijitalleşme, yeşil dönüşüm ve verimlilik artışı hedeflerini gündeme taşımaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2024). Türkiye’nin Paris Anlaşması’na taraf olması, gıda güvenliğinin güvence altına alınması ve açlığın ortadan kaldırılmasının ulusal politika öncelikleri arasında yer aldığı uluslararası düzeyde teyit etmektedir (United Nations, 2015). Bu kapsamda sunulan Ulusal Katkı Beyanı (NDC), tarımsal üretim

\* Sorumlu Yazar

E-posta: [nihal.genc@giresun.edu.tr](mailto:nihal.genc@giresun.edu.tr) (N. GENÇ), [ecolak@ktu.edu.tr](mailto:ecolak@ktu.edu.tr) (H. E. ÇOLAK), [volkan.baser@giresun.edu.tr](mailto:volkan.baser@giresun.edu.tr) (V. BAŞER)

*Gıda Güvenliği ve Güvencesinin Sağlanmasında Arazi Yönetimi: Harita Mühendisliği Perspektifi*

alanlarının korunması, sürdürülebilir arazi kullanımının yaygınlaştırılması ve iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılması yönünde somut hedefler ortaya koymaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Bu hedefler, yasal zeminde 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu ile tarım arazilerinin amaç dışı kullanımının önlenmesi, parçalanmanın engellenmesi ve arazi kullanım kararlarının uygulanması; 5488 sayılı Tarım Kanunu ile tarımsal üretimin planlanması, gıda arz güvenliğinin korunması ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetiminin sağlanması hükümleriyle desteklenmektedir (T.C. Resmî Gazete, 2005; T.C. Resmî Gazete, 2006.). Küresel ölçekte ise Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (özellikle SKH 2: Açlığa Son ve SKH 15: Karasal Yaşam) gıda güvenliği, arazi yönetimi ve doğal kaynakların korunması arasındaki karşılıklı bağımlılığı net bir biçimde ortaya koymaktadır (United Nations, 2015). Öte yandan, Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization-FAO)'nın sürdürülebilir arazi yönetimi stratejileri, tarımsal üretkenliği artırılması ile ekosistem hizmetlerinin korunması arasında denge kurmayı amaçlarken; Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) raporları, iklim değişikliğinin arazi kullanımı ile gıda güvenliği ve güvencesi üzerindeki etkilerini bilimsel bulgularla ortaya koymakta, bu alanlarda entegre politika gerekliliğini vurgulamaktadır (IPCC, 2019; FAO, 2011; FAO, 2019). Sonuç olarak, gıda güvenliği ve güvencesinin sürdürülebilir biçimde sağlanabilmesi; ulusal strateji belgeleri, politikalar, mevzuatlar, uluslararası taahhütler ve küresel normlar arasında tutarlı, arazi yönetimini merkeze alan ve bilim temelli bir politika bütünlüğünün hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevenin uygulanmasında, mekânsal veri üretimi, analiz ve izleme kapasitesiyle harita mühendisliği kritik bir destek sağlayarak karar süreçlerini güçlendirmekte; böylece hem tarımsal üretim sürekliliğini güvence altına almakta hem de toplumların güvenilir, sağlıklı ve yeterli gıdaya erişimini garanti eden stratejik bir güvenlik çerçevesi oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, gıda güvenliği ve güvencesinin sağlanmasında arazi yönetiminin rolünü ve bu süreçte harita mühendisliğinin katkılarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda, ulusal ve uluslararası düzeyde yürütülen uygulamalar incelenerek mevcut yaklaşımların güçlü ve zayıf yönleri, politika, strateji ve mevzuatlardaki eksiklikler ile karşılaşılan sorunlar değerlendirilecektir. Ayrıca, arazi yönetimi süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunulacak ve harita mühendisliğinin planlama, izleme ve değerlendirme aşamalarındaki kritik işlevi vurgulanacaktır. Çalışma, gıda güvenliği ve güvencesine yönelik bütüncül, veri temelli ve sürdürülebilir bir yönetim anlayışının oluşturulmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

**Anahtar Kelimeler**

Gıda Güvenliği, Gıda Güvencesi, Arazi Yönetimi, Harita Mühendisliği, Sürdürülebilir Tarım, Mekânsal Analiz

**Kaynaklar**

FAO. (2011). Sustainable land management in practice – Guidelines and best practices for Sub-Saharan Africa. TerrAfrica, World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT), & Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

FAO. (2019). *Sustainable food and agriculture: An integrated approach*. Rome, Italy. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01212-3>  
Food and Agriculture Organization of the United Nations

FAO. (2017). *Climate-smart agriculture: B7 sustainable soil and land management* (2nd ed.). FAO.

Genc, N., Colak, H. E., & Baser, V. (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>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.007>

Lemmen, C., van Oosterom, P., & Bennett, R. (2015). The Land Administration Domain Model. *Land Use Policy*, 49, 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.014>

Malek, Ž., & Verburg, P. H. (2021). Representing responses to climate change in spatial land system models. *Land Degradation & Development*, 32(17), 4954–4973. <https://doi.org/10.1002/ldr.4083>

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *12. Kalkınma Planı (2024–2028)*. [https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-İkinci-Kalkinma-Planı\\_2024-2028\\_11122023.pdf](https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-İkinci-Kalkinma-Planı_2024-2028_11122023.pdf)

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2024). *Orta Vadeli Program (2025–2027)*. [https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/09/Orta-Vadeli-Program\\_2025-2027.pdf](https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/09/Orta-Vadeli-Program_2025-2027.pdf)

T.C. Resmî Gazete. (2005). 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5403&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>

T.C. Resmî Gazete. (2006). 5488 sayılı Tarım Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5488&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

Nihal GENÇ, Hüsnüye Ebru ÇOLAK, Volkan BAŞER

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2019). *III. Tarım Orman Şûrası komisyon raporları*. <https://cdnys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetGaleriFile/330/DosyaGaleri/958/III.%20TARIM%20ORMAN%20%C5%9E%C3%9CRA%20KOM%C4%B0SYON%20RAPORLARI.pdf>

United Nations. (2015). *Paris agreement*. [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf)

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations General Assembly. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Yomraliölu, T., & Cete, M. (2017). Cadastre or land administration: A case study of Turkey. In T. Yomraliölu & J. McLaughlin (Eds.), *Cadastre: Geo-information innovations in land administration* (pp. 39–57). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51216-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51216-7_3)

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Kuruluşlarının 100üncü Yılında, Sistem Teorisi Yaklaşımıyla, Türkiye Harita ve Kadastro Kurumlarının ve Faaliyetlerinin Gelişiminin İncelenmesi ve Benzer Ülkelerle Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Abdulvahit TORUN

### Genişletilmiş Özet

Harita ve kadastro faaliyetleri, ülkelerin savunması, kalkınması, yönetimi ve mülkiyet hukuku, koruma ve güvenliğinin sağlanması için hayati öneme sahiptir. Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluşunun ikinci yılında (1925), Osmanlı İmparatorluğundan devralınan, haritacılık ve kadastro konularındaki dağınık yapı, modern bir devletin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yeniden düzenlenmiştir. 1925 yılında kabul edilen 657 ve 658 sayılı kanunlarla temelleri atılan Harita Genel Müdürlüğü (HGM) ve Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ile harita ve kadastro alanındaki ulusal altyapının kurulmasında temel miladı olmuştur. Bunu takip eden yıllarda, 1928 yılında HGM'de bir şube olarak başlayan hidrografi çalışmaları, 1950 yılında Seyir ve Hidrografi Dairesinin kurulmasıyla, denizcilik alanındaki boşluk da doldurulmuştur.

Sistem teorisinde, çevresi ile etkileşimli bir organizasyon; kurumsal ve mevzuat altyapısı, veri/bilgi/türün alış-verişi, sunulan-alınan faaliyet bakımından açık bir sistem olarak görülür. Açık bir sistem; sınırları, alt sistemleri, karşılıklı ilişkileri, geri bildirim döngüleri ve adaptasyon gibi temel kavramlar ile tanımlanır. Bu çalışmada, harita ve kadastro kurumları bir sistem olarak ele alarak, mevzuat, teknoloji, insan kaynaklarının ve iş akışlarının haritalama, kadastro ve tapu kayıtlarının oluşturduğu veri, bilgi ve uygulamaların oluşturulması ve yönetilmesi, çevre ile etkileşim sonucunda değişimi konuları ele alınmaktadır. Bu bağlamda, HGM ve TKGM'yi; girdiler, süreçler, çıktılar ve geri bildirim mekanizmalarından oluşan birer sistem olarak ele almak, gelişim süreçlerini daha bütüncül bir şekilde değerlendirmeye imkan sağlamaktadır. Kuruluşların takip eden ilk yıllarda, daha çok birer kapalı sistem olarak çalışan bu kurumlar, zaman içinde oluşan kapasite gelişimi, ülke şartlarının zorlaması (hızlı kentleşme, nüfus artışı vb.) ve diğer dış çevre etkisi ile giderek koşullar çerçevesinde birer açık sisteme dönüşmüş, girdileri çeşitlenmiş ve çıktılarının etki ve kapsamı genişlemiştir.

Türkiye'de modern haritacılık çalışmaları 1700'lü yılların sonunda eğitim ve mühendislik uygulamalarındaki gelişmelerle başlamıştır. Bunu takip eden dönemde, modern kadastro çalışmaları, Tanzimat sonrasında 1859 yılında çıkarılan Kadastro Kanunu ile Türkiye'de arazi ölçümü ve vergilendirmesi için ilk yapılandırılmış sistem ile başlamıştır. Bu sistemde, açıkça girdi olarak tespit, tanımlama, günün koşullarında ölçme ve gerekli hallerde çizim gibi teknik unsurlardan oluşan mülkiyet belirleme ve çıktı olarak da, mülkiyetin ve verginin bireyselleşmesi, vergi kaydının bireyselleşmesi ve tabana yayılması çıktısından oluşmaktadır. Dönemin sosyo-kültürel ve ekonomik şartları, idare-vatandaş ilişkisindeki zayıf bağ sebebiyle, mülkiyet-vergi ikilisinin bireye indirgenmesi tam olarak başarılamasa da, genel Osmanlı ekonomik sistemi içinde gelişmeyi kadastro bakımından ortaya koymaktadır. Yüzyılın sonuna doğru, insan kaynaklarındaki gelişmelerle birlikte, Türkiye modern haritacılığının başlangıcı, 1895 yılında 5nci Şubenin kurulması ile gerçekleşmiştir. İmparatorluğun savaşa geçen yıllarında dahi haritacılık faaliyetinin sürdürülmesi, hem savunma hem de kalkınma için önceliğe sahip olmuştur. Asıl gelişme, 1925'te çıkarılan 657 ve 658 sayılı yasalar, bu alt sistemleri bir devlet örgütünde birleştirerek yasal sınırlar, resmi geri bildirim kanalları (denetimler, revizyonlar) ve merkezi organizasyonlar oluşturdu.

Bu dönemde, harita ve Kadastro Mühendisleri Odası (HKMO), 10 şube, 7 Bölge Temsilciliği, 81 il ve 140 ilçe temsilciliği, %90'ı aktif olan 23 bini aşkın üye, 4500 tescilli büro ve şirket ile bunların çalışanları dahil 60 bin kişinin içinde olduğu bir büyük meslek alanını temsil eder hale geldi.

1943'te başlayan birinci derece jeodezik ağ ölçümü 10 yıl içinde ölçülüp dengelendi. 1970'lere gelindiğinde, manyetik, gravite ve hiyerarşik dereceli jeodezik ağlar oluşturuldu, seri ölçekte topografik haritaların üretimi tamamlandı. 1996'da uydu jeodezisi tekniği ile TUTGA, 2008'de TUSAGA-Aktif kullanıma açıldı. Önce topografik haritalar, ardından da kadastro bilgileri sayısal hale getirildi ve web hizmeti olarak sunuldu. 2010 yılında, HGM ve TKGM yanında, TUCBS realizasyonu göreviyle CBS GmMdlüğü kuruldu.

Eğitim alanında önemli gelişme sağlandı. Yıldız Teknik Üniversitesi (İstanbul Teknik Okulu), 1949'da kuruldu. 20 yıl içinde KTÜ (1968) ve İTÜ'de (1969) bölümler kuruldu. 2024 itibarıyla, faal olmayanlar da dahil 20'ye yakın üniversitede, Türkiye'nin her bölgesinde harita mühendisliği eğitimi vermektedir. Bu sayısal artış, eğitim kalitesi, bölümler arasında eğitim seviye farkını da birlikte getirdi.

Cumhuriyet dönemi harita ve kadastro çalışmalarındaki gelişmeler,

1925-1950 Kurumsal yapılanma, temel haritacılık tasarım ve faaliyetleri, insan kaynaklarında gelişme: Bu dönemde, insan kapasitesinde devrim niteliğinde gelişme sağlanarak, bunun etkisi ile ülke temel ağlarının tasarım, ölçü ve hesabı gerçekleştirildi. 1950-1970 Ülke temel ağlarının kurulması, kalkınma ve eğitim altyapısının oluşturulması: Bu dönemde, ülke ekonomisindeki gelişme, sanayileşme ve kentleşmeyle birlikte artan harita talepleri, geleneksel ölçüm yöntemleri yerine fotogrametrik yöntem ile hızlıca karşılandı ve ülke coğrafyasının kapsayan topografik haritalar üretildi. Gravite ve manyetik ağlar da dahil temel jeodezik ağlar, kadastral çalışmaları da destekler hale gelerek, modern bir altyapı kuruldu.

1970-2000 Ülkedeki sosyo-ekonomik-kültürel gelişmeye paralel kalkınmanın desteklenmesi, dijitalleşme altyapısının hazırlanması: Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler haritacılık ve kadastro çalışmalarını hızlandırdı ve sayısallaştırdı. Bu dönemde, sistematik kadastro için hazırlıklar tamamlandı, arazi yönetiminin temel girdisi için ihtiyaçlar arttı.

2000-2025 Kamu kontrollü ekonomiden, serbest ekonomiye geçişin haritacılık ve kadastro alanındaki yansımaları, haritacılık ve kadastro çalışmalarının iş ve ekonomik faaliyetin merkezinde yer alması: Bu dönem haritacılık işlerinde dijitalleşme, CORS, jeoid belirleme de ileri seviyeye geçişe paralel olarak kadastro alanında bilgi sistemi oluşturulmasının ardı sıra, sistematik kadastro gerçekleştirilmesi izledi. Kamu kurumlarının coğrafi veri kullanımı artarak, kamu hizmetleri, iş ve ekonomik faaliyetin bir parçası oldu. Bu çalışmalarda, hem nitel hem de nicel olarak büyüyen özel sektör önemli katkı sağladı. kronolojik başlıkları altında incelenmektedir.

Bu çalışma, HGM ve TKGM kurumlarının gelişmesi ve yürüttükleri faaliyetlerin, sistem teorisi çerçevesinde nasıl bir evrim geçirdiğini, kapalı bir yapıdan dinamik ve açık bir sisteme nasıl dönüştüğünü analiz etmektedir. Bu çalışmada, ilk olarak, sistem teorisinin temel ilkeleri ve kurumların gelişimine uygulanışı açıklanmaktadır. Ardından, Tanzimat döneminden başlayarak, mülkiyetin güvence altına alınması, köylünün topraklandırılması temel sorunu başta olmak üzere Türkiye'nin sosyo-ekonomik gelişmesine paralel olarak; HGM ve TKGM'nin kurumsal gelişimi, kanunlar, mevzuat ve önemli projeler bazında incelenmektedir. Daha sonra, Türkiye ile benzerlik gösteren ülkelerin harita ve kadastro sistemleri karşılaştırmaktadır. Bunlara ek olarak, çalışmanın içeriğiyle doğrudan ilgili olması sebebiyle, tarihsel gelişme içinde CBS Genel Müdürlüğü'nün kuruluşu ve yürüttüğü faaliyetler ile Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'nın (HKMO) kuruluşu, ülke boyutunda örgütlenmesi ve geçirdiği değişim, tarihsel kronoloji içinde, harita ve kadastro çalışmaları bağlamında ortaya konmaktadır. Nihai olarak, Türkiye'nin harita ve kadastro alanında gerçekleştirdiği başarıları ve eksikliklerin değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Türkiye'nin harita (HGM) ve kadastro (TKGM) kurumları, kuruluşundan itibaren, yasal ve teknolojik girdileri, toplumsal ve ekonomik değişimlerle birleştirerek kapalı bir sistemden, dinamik ve açık bir sisteme dönüşmüştür. HGM, jeodezik ağların (yatay/düşey datum, jeoid, gravite vd.) çağdaş seviyede sürdürülmesi, TKGM ile birlikte TUTGA ve TUSAGA-Aktif gibi ağ ve servislerin oluşturulması ile modern hizmet sağlamaya devam etmektedir. TKGM, ulusal kadastro altyapısını oluşturma, teknolojik dönüşümü gerçekleştirmek ve uluslararası finansal kaynakları etkin kullanmak yoluyla sistematik kadastroda önemli sonuçlar alma bakımından önemli başarıları imza atmıştır. Ancak, jeodezik altyapının ekonomik verimlilik sağlayacak şekilde iyileştirilmesi, tüm ülkeyi kapsayan sistematik kadastro tutarlı, tam, sürdürülebilir şekilde yürütülmesi, 3B kent modellerinin kadastro verisine entegrasyonu, kurumlar arası veri entegrasyonunun tam olarak sağlanması gibi çözülmesi gereken zorluklar da devam etmektedir. Bu zorluklar, sistemin gelecekteki evrimini şekillendirecek ana unsurlar olacaktır.

#### KRONOLOJİ: ULUSAL HARİTACILIK FAALİYETLERİ

Yıl 1925: Harita Genel Müdürlüğü kuruldu, 657 Sayılı Kanun.

Yıl 1925: Tapu ve kadastro Genel Müdürlüğü kuruldu, 658 Sayılı Kadastro Kanun.

Yıl 1928 ve 1950: Seyir ve Hidrografi Dairesi kuruldu.

Yıl 1943: Birinci derece jeodezik ağ ölçümü, 10 yıl içinde ölçülüp dengelendi.

Yıl 1970: Manyetik, gravite ve hiyerarşik dereceli jeodezik ağlar oluşturuldu.

Yıl 1970'ler: Seri ölçekte topografik haritaların üretimi tamamlandı.

Yıl 1996: Uydu jeodezisi tekniği ile TUTGA kuruldu.

Yıl 2009: Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif) Sistem kuruldu.

Yıl 2008: Tapu ve Kadastro Modernizasyon Projesi (TKMP) başladı ve kadastro dijitalleştirildi.

Yıl 2010 : HGM ve TKGM yanında, TUCBS realizasyonu göreviyle CBS Genel Müdürlüğü kuruldu.



## Arazi Yönetiminde Tüze Çalışmalarına Öneriler

**Mehmet ERTAŞ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Harita ve Kadastro Programı, Ardıçlı Mahallesi, İsmet Paşa Cd. No:351, 42250 Selçuklu/Konya.

### Özet

Yaygın kullanımı ile taşınmaz; taşınamayan, üretilmeyen, çoğaltılmayan ve yeryüzü üzerinde konumu sabit olan arsa, arazi, konut, bağ bahçe gibi mülk unsurlarıdır. Diğer endüstriyel mallar gibi üretimi ve rekabeti olmadığı için bu anlamda sahibine tekel ayrıcalıkları tanır. Bu nedenle düşünürler taşınmaz mülkiyetine diğer malların sahipliği gibi bakmamışlar ve bu konuda farklı öğretiler gelişmiştir. Taşınmazın, topluma karşı görevlerinin olduğu görüşü genel kabul görmüş ancak bu görevin sınırları ülkelerin yönetim anlayışına göre değişkenlik göstermiştir.

Günümüzün demokratik ülkelerinin mülkiyete bakış açısının kökleri Roma hukukuna ve Yunan felsefesine dayanmaktadır. Burada temel öge mülk sahipliğinin mutlaklığıdır. Bazı demokratik ülkelerde artık bu mutlaklığı sınırlandırmaktadır. Bir taraftan küresel iklim değişikliği, dış göçler, iç göçler, nüfus değişkenliği, tarım ve orman alanlarının daralması, artan kentleşme, artan işsizlik ve bu sorunu gidermek için büyük endüstri alanlarına gerek duyulması gibi nedenler, öte taraftan sermaye sahiplerinin taşınmaz edinmeyi diğer sektörlere göre daha cazip görmeleri bu alandaki sorunu daha da artırmıştır.

Ülke insanı için temel insan haklarından olan barınma, beslenme ve yaşamak için bile asgari mülk sahipliği olanaksız hale gelmiştir. Sektörde oluşan ranttan pay almak için ülkemizdeki sermaye sahipleri bu alana yönelerek gereksiniminden daha fazla mülk edinmiş durumdadır. İlgi ve gereksinimi olmadığı halde bu alanda bulunanları buradan uzaklaştırmak için ülke olarak tüzemizde bazı değişiklikleri yapmak artık zorunludur. Bu çalışmada, var olan tüze metinleri gözden geçirilmiş ve mesleğimizin ana uğraş konularından olan; 18. madde uygulamaları, arazi toplulaştırması, emlak vergisi gibi alanlarda sınırlı da olsa bazı tüze önerileri sunulmuştur.

### Anahtar Sözcükler

İmar Planı, İmar Kanunu, Emlak Vergisi Kanunu, Belediye Kanunu, İmar Polisi

### Abstract

In its widespread use, real estate refers to property elements such as land, plots, residences, and vineyards that cannot be moved, produced, or reproduced, and that are fixed on the surface of the earth. Unlike other industrial goods, real estate is not subject to production or competition, and therefore grants its owner monopoly privileges. Therefore, thinkers have not viewed real estate ownership in the same way as other goods, and different doctrines have developed on this subject. The view that real estate has duties to society is generally accepted, but the limits of these duties have varied depending on the country's governance approach.

The perspective on property in today's democratic countries is rooted in Roman law and Greek philosophy. The fundamental element here is the absoluteness of property ownership. Some democratic countries are now limiting this absoluteness. On the one hand, factors such as global climate change, international migration, internal migration, population volatility, shrinking agricultural and forest areas, increasing urbanization, rising unemployment, and the need for large industrial areas to address these problems, and on the other, the fact that capitalists see real estate acquisition as more attractive than other sectors, have further exacerbated the problem in this area. Even basic human rights like shelter, food, and even minimal property ownership for survival have become impossible for the people of this country. Capitalists in our country, seeking to capitalize on the profits generated by this sector, have turned to this sector and acquired more property than they need. It is now imperative that we, as a country, make some changes to our legal system to remove those who are in this sector despite their lack of interest or need. This study reviews existing legal texts and presents some, albeit limited, legal proposals for areas such as Article 18 implementation, land consolidation, and property taxes, which are among the core areas of our profession.

### Keywords

Zoning Plan, Zoning Law, Property Tax Law, Municipal Law, Zoning Police

### 1. Giriş

Ülkemizde 2000 yılında %78 olan kentli nüfusun yaşanan iç göç nedeniyle %94'e çıkması, sayısı belirsiz sığınmacının ülkemize yönelmesi, iklim değişikliği, maden çıkarma çalışmaları gibi nedenlerle kentlerdeki nüfus kısa sayılabilecek sürede artmıştır. Kent ilgilileri bu birikime hazırlıksız yakalanmıştır. Bugün artık kentlilerin;

- Beslenmeleri için tarım alanlarına,
- Barınmaları için konut alanlarına,
- Yaşamlarını sürdürebilmeleri için çalışma alanlarına,
- Eğitim alanlarına,
- Yeşil alanlara

\* Mehmet ERTAŞ: Tel: +90 (332) 2232376 Fax: +90 (332) 2410185 E-posta: mertas@ktun.edu.tr

daha çok ihtiyacı vardır.

Bununla birlikte temel öge olan “mülk sahipliğinin mutlaklığı” tanımı, artık alışlagelen kapsamının dışında düşünölmeye başlamıştır. Çünkü toprak, “herkes için yaşamın kaynağı” olduğu olgusu öne çıkmaya başladığından toprağın topluma karşı görevleri düşünölmür hale gelmiştir. Yerel yönetimler kentsel alan düzenlemelerinde ihtiyaç duydukları toprağı özel mülkiyetten karşılama yoluna gitmişlerdir. 1933 yılında %15 ile başlayan bu süreç günümüzde %45 e kadar yükselmiştir. Ancak bu kez de deyim yerindeyse kantarın topuzu fazla kaçarak, her türlü ortak kullanım alanını özel mülk sahiplerinden karşılar hale gelmişlerdir. Kamunun ortak kullanım alanı için yapılan arsa teminleri amacından saparak ücretli otoparklara ve belediye iştiraki haline dönüşen belediye hizmet alanlarına (BHA) bedelsiz arsa teminine dönüştürmüştür. Bu açıdan DOP’un kapsamı yeniden değerlendirilmelidir.

Ölkemizde, elde ettiğı gelir bakımından asgari düzeyde bile barınma gereksinimini gideremeyecek bir alt gelir grubu oluşmuştur. Arsa ve arazi düzenlemelerine bu gelir grupları Sosyal Konut Oranı (SKO) olarak yapılacak kesinti ile sürece dahil edilmelidir.

İmar planlarının yapım ve uygulamasına yönelik işlemler, sadece belediye tarafından yürütölmektedir. Oysa bu işlerin eğitimi almış Şehir Plancıları, Harita Mühendisleri, İnşaat Mühendisleri gibi meslekler, odaları eliyle “imar polisi” adıyla imar komisyonunun yerine sürece dahil edilmelidir.

Emlak Vergisi uygulamalarında her taşınmaz tekil olarak ele alınmış ve vergi oranı sabit tutulmuştur. Oysa mülk sahibinin tüm taşınmazları birlikte ele alınarak toplam değeri üzerinden (gelir vergisinden ayrı olarak) kademeli olarak vergilendirme olmalıdır. Böylece taşınmazın bir yatırım aracı olarak görölmekten koparılıp, kullanımının gerçek ihtiyaç sahibine özgülmesi sağlanacaktır. Ayrıca kent içinde etrafı yapılaşmış ama atıl duran boş arsalarından sadece arsa vergisi alınmamalı, farklı bir bakış açısıyla vergilendirilerek kullanıma sokulmalıdır.

Arazi toplulaştırma çalışmalarında ise mera alanlarının etrafı, ağıl ve çardak olarak planlanıp, altyapısı giderilip, hayvancılıkla ilgilenen köy sakinlerine sunulmalıdır. Böylece köy yerleşim merkezindeki kötü koku ve yollardaki dışkı sorunu da çözümlenmiş olur.

Kıscası arazi yönetimini ilgilendiren konulardaki tüzemizin (yasa ve yönetmelik) bazı konuları gözden geçirilerek güncellenmesi gerekir. Bu bildiride, tüze çalışmalarına az da olsa katkı sağlama amacı taşınmaktadır.

## 2. DOP’un Tarihsel Süreci ve Kamunun Toprak İhtiyacı

DOP, kısaca bir düzenleme bölgesinde var olan ortak kullanım alanlarının düzenleme bölgesindeki taşınmazlardan yüzölçümleri oranında karşılanmasıdır diyebiliriz. Bu anlamda Cumhuriyetimizin ilk yıllarından itibaren bazı yasal çalışmalar evrimleşerek yapılmıştır. Tam olarak bugünkü anlamıyla DOP olarak tanımlayamasak da ilk olarak 1933 tarihli 2433 nolu kanunda ayırma ve birleştirme işlemlerinde DOP, kadastro parsellerinin yola ve ortak kullanım alanlarına isabet eden kesimlerinin terk edilmesi demektir ve en çok %15 olabiliyordu (2433/6 md).

Bugünkü İmar Kanununun atası olan 1956 yılında yürürlüğe giren 6785 sayılı kanunun 42. maddesi bugünkü tanımlamaya oldukça benzer bir tanımla, arsa düzenlemelerinde düzenleme bölgesindeki tüm kadastro parsellerinden yol, meydan otopark ve yeşil alan karşılığı olarak kesinti yapılabileceğini, kesinti oranının en çok %25 olabileceğini ve kalan hakedişe göre parselasyon yapılabileceğini öngörmekteydi (6785/42 md).

Bu maddenin Anayasa Mahkemesince iptalinden sonra 1972 yılında yürürlüğe giren 1605 sayılı yasa ilk defa Düzenleme Ortaklık Payı kavramı kullanılmıştır. Yasa biraz değiştirilerek “düzenleme dolayısıyla meydana gelen değeri artışları karşılığında düzenleme ortaklık payı olarak düşülebilir” ifadesi gelmiştir. Ortak kullanım alanlarının içeriğı, yol, meydan, otopark, yeşil saha, çocuk bahçesi ve park olarak biraz daha genişletilmiş ve kesinti oranı %25 olarak korunmuştur. Ancak ilk defa herhangi bir parselden bir defadan fazla düzenleme ortaklık payı alınmaz kuralı gelmiştir (1605/42 md).

1985 yılında yürürlüğe giren 3194 sayılı İmar Kanununun ilk halinde, düzenleme ortaklık payları, düzenlemeye tabi tutulan yerlerin ihtiyacı olan yol, meydan, park, otopark, çocuk bahçesi, yeşil saha, cami ve karakol gibi umumî hizmetlerden ve bu hizmetlerle ilgili tesislerden başka maksatlarda kullanılamaz demektir. Buna göre DOP’tan karşılanacak ortak kullanım alanlarına cami ve karakol alanları da eklenmiş ve kesinti oranı %35 e çıkarılmıştır (3194/18 md).

2003 yılı 5006 sayılı yasa ile 3194 sayılı İmar Kanununun 18. maddesinde cami sahası, ibadethane yeri olarak değiştirilmiş, DOP olarak kesilebilecek alanlar içine Milli Eğitim Bakanlığına bağlı ilk ve ortaöğretim kurumları da eklenmiştir. Bu kez DOP oranı %40 a çıkarılmıştır (5006/1 md).

3194 sayılı İmar Kanununda 2019 yılı, 7181 sayılı yasa ile yapılan değişiklikte DOP tan karşılanacak alanlar içine Sağlık Bakanlığına bağlı sağlık tesis alanları, pazar yeri, semt spor alanı, toplu taşıma istasyonları ve durakları, otoyol hariç erişme kontrolünün uygulandığı yol, su yolu, resmî kurum alanı, mezarlık alanı, belediye hizmet alanı, sosyal ve kültürel tesis alanı, eklenmiştir. Bu kez kesinti oranı %45 e yükseltilmiştir (Çay T., Kandemir E. S., 2022). Parselden bir defadan fazla düzenleme ortaklık payı alınmaz kuralı kaldırılarak bir parselin birden fazla düzenlemeye konu olabileceğini ve eski terk miktarı dikkate alınarak kesinti oranının %45 e kadar olabileceğini belirtmektedir. Ayrıca DOP un kesilemeyeceğı durumlarda kesinti miktarının bedele dönüştürölebileceğı, DOP hesabında kapanan yol ve dere yataklarının dikkate alınması gerektiğı kuralı getirilmiştir. İlave olarak Belediye veya valiliğın; parselasyon planlarını, imar planlarının kesinleşme tarihinden itibaren beş yıl içinde yapması ve onaylaması kuralı gelmiştir (7181/9 md).

Böylece %15 ile başlayan kesinti oranı %45 e ulaşmıştır. Bu yasada ayrıca şunlara da dikkat çekmek gereklidir.

Belediye hizmet alanı (BHA): Belediyelerin görev ve sorumlulukları kapsamındaki hizmetlerinin götürülebilmesi için gerekli itfaiye, acil yardım ve kurtarma, ulaşımaya yönelik transfer istasyonu, araç ve makine parkı, bakım ve ikmal istasyonu, garaj ve triyaj alanları, belediye depoları, asfalt tesisi, atık işleme tesisi, zabıta birimleri, mezbaha, ekmek üretim tesisi, pazar yeri, idari, sosyal ve kültürel merkez gibi mahallî müşterek nitelikteki ihtiyaçları karşılamak üzere kurulan tesisler ile sermayesinin yarısından fazlası belediyeye ait olan şirketlerin sahip olduğu tesislerin yapılabileceği alandır (Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği/5 md 1. fıkra) şeklinde tanım yapılmıştır. Uygulama imar planlarında BHA olarak kesinti yapılan alanlar, mahallî müşterek nitelikteki ihtiyaçları karşılamak üzere kurulan tesisler olarak tanımlanan ortak kullanım alanları için kullanılmalarından daha çok sermayesinin yarısından fazlası belediyeye ait olan şirketler için bedava arsa temini amacıyla kullanılmaktadır (Kitir M. 2025).

5393 sayılı Belediye Kanununun 70. maddesi; Belediye kendisine verilen görev ve hizmet alanlarında, ilgili mevzuatta belirtilen usullere göre şirket kurabilir, derken 71. maddesine göre, özel gelir ve gideri bulunan hizmetlerini İçişleri Bakanlığının izniyle bütçe içinde işletme kurarak yapabilir (5393/70, 71 md) demektedir.

Belediye şirketlerinin hizmet binaları inşaatı, belediye bütçesi tarafından karşılanmaktadır. Böylece belediye şirketleri inşaat ve arsa teminini bedelsiz karşılayarak ticari faaliyet yapmaktadır. Belediyeler 5393 sayılı belediye kanununun 14 ve 15. maddelerinde sayılan görev ve sorumluluklarına ait işlemlerde bu arsa ve binaları kullanabildiği gibi bundan başka kafe ve lokantalarda da bu arsa ve binaları kullanabilmektedir.

Burada sorulması gereken soru bu kafe ve lokantalardaki ücret politikasıdır. Bazı belediyeler buradaki ücretleri sakinlerinin lehine, kar beklentisi olmaksızın oldukça ucuz tutarken bazı belediyelerde piyasa ile aynı ücret politikası uygulayıp, kira ve vergi veren özel girişimciye karşı haksız rekabet yapabilmektedir.

Öte yandan bir başka sorun ise açık belediye otoparklarıdır. Yasada açıkça kamunun ortak kullanımına özgülenmesi gereken ve DOP tan karşılanan ve kamusal kullanım gücünü artırmak için tescil dışı olan yolların kenarları ve otoparklar ücretli otopark olarak kullanılmaktadır. Bu ise arsa temini konusunda yasanın amacıyla çelişmektedir. DOP olarak kesilen ortak kullanım alanlarına her yasa çalışmasında yeni ortak kullanım alanı eklenmiş ve kesinti oranı da %15 den %45e çıkmıştır. Böylece Kamu, ortak kullanım için gerekli arsa teminini tümüyle düzenleme bölgesindeki mal sahipleri üzerine yüklemiştir. Kendisi sadece bu alanların inşaat masraflarını yüklenir hale gelmiştir.

Konuyu özetlersek, ortak kullanım alanları için gerekli arsa temini için başlayan süreç, kamu kurumlarının arsa ihtiyaçlarının da giderilmesine evrilmiş daha da ötesi ticari işletme olarak faaliyet gösteren belediye iştiraklerinin de arsa ihtiyacını giderir hale dönüşmüştür.

Öte taraftan anayasal hak olan barınma ihtiyacını günümüz koşullarında gidermesi olanaksız olan alt geçim grupları için ücretsiz arsa temin edilmesi bazı ülkelerde uygulanmaya başlanmıştır. Bu nedenle DOP olarak kesilen alanların kapsamının kamu kurumları adına daraltılması ve alt gelir gruplarına konut için arsa temininin konunun kapsamına alınması gereklidir. Bunun için DOP oranı düşürülerek, her düzenleme bölgesi için Sosyal Konut Oranı (SKO) eklenmelidir.

Bir diğer konu da imar planlarıdır. Bunların yapım ve değerlendirme süreçleri tümüyle belediyelerin yetkisinde ve denetimindedir. Burada, konuyla doğrudan ilgili meslek örgütlerinin görüşleri de dikkate alınmalıdır.

Ayrıca Kamu kurumları; imar planlarının yapımları, uygulamaları ve arazi toplulaştırma işlemleri sonucunda yapılan bazı yargılamalarda davayı kaybettiklerinden yargılama giderleri kamuya bir yük haline gelmeye başlamıştır. Bununla da ilgili bir düzenlemenin yapılması gerekir.

Buna göre İmar Kanununa, Belediye Kanununa, Emlak Vergisi Kanununa ve Arazi Topplulaştırma Yönetmeliğine bazı tanımların eklenmesi gerekir.

### 3. Arsa Düzenlemesinin amacı

Arsa düzenlemesi, kentlerin gereksinmesi olan yeteri kadar arsayı konut yapımına hazır duruma getirmeyi amaçlamaktadır. Arsa düzenlemesi, imar planlarının uygulanmasıyla planlı ve düzenli yerleşmenin oluşması ve yapılaşmaların plan, fen, sağlık ve çevre koşullarına uygunluğunun sağlanması açısından kamu yararını koruyan ve gözetilen bir işlemdir. Arsa düzenlemeleriyle, toplumun sağlayacağı yarar, kişilerin uğrayacağı zarardan fazladır ve bu işlem, kamu düzeninin korunması ve sağlanması amacıyla yapılmaktadır (Köktürk E. 2007).

Bir bölgede arsa düzenlemesinin yapılabilmesi için öncelikle 1/1000 ölçekli uygulama imar planı yapılması ve yürürlüğe konulması, düzenlemenin de bu plana dayanması gerekmektedir. Yapılan arsa düzenlemelerinde önce ham imar arsası üretilir. Daha sonra inşa edilen altyapı tesislerine göre imara uygun arsalar üretilmiş olur. Bu tür düzenlemeler için yasalarımızda bazı değişikliklerin yapılması gerekir. Bu tür değişiklikleri başka ülkelerde yapmıştır (Kim H. M., Han S. S., 2012).

#### 3.1. İmar Kanununa Eklenecekler

a) Sosyal konut: Hane başı toplam geliri en çok asgari ücret kadar olan ailelerin yararlanabileceği kat mülkiyeti esaslı konuttur. Toplam brüt kullanım alanı 90 m<sup>2</sup> yi geçemez. TOKİ tarafından yapılır veya yaptırılır. Onbeş yılda faizsiz, eşit taksitlerde ve asgari ücrete yapılan zam oranında güncellenen bedelle ödemesi yapılır. Konutların inşası SKO dan gelen

### Arazi Yönetiminde Tüze Çalışmalarına Öneriler

bedelle ihtiyaca göre peyderpey yapılır. Satılamaz, kiralanamaz ve herhangi bir teminata karşılık gösterilemez. Malikin ölmesi halinde mirasçılardan bu şartı sağlayanlardan biri aynı ödeme planıyla yararlanabilir, mirasçılar bu şartı sağlamadığı takdirde konut geri alınır, o ana kadar ödenen bedel kiraya sayılır. Mazeretsiz beş taksiti ödenmediği takdirde konut boşaltılır. Bu konutlardan, düzenlemeyi yapan belediyenin sınırları içinde kesintisiz ve aralıksız on yıl ve daha fazla yaşayan, hiçbir mülkü olmayan belde sakini T C vatandaşı yararlanır.

**b)** Sosyal konut alanı: İlçe belediyelerince, belediye sınırları içerisinde belirlenen, mülkiyeti hazineye ait ve altyapısı ilgili belediyece karşılanmak suretiyle ayrılan alanlardır.

**c)** Sosyal konut oranı (SKO): Her düzenleme bölgesinde %5 olarak sosyal konutun finansmanı için kesilen arsa payı oranıdır. Kesilen Sosyal Konut Oranları her belediyenin kendi sakini için kullanılır. Düzenleme bölgesinden kesilen bu miktar;

- Sosyal konut parsel(ler)i yapılaşmanın az olduğu düzenleme bölgesinde bağımsız bir parsel olarak ayrılır, bu parsel o ilçede sosyal konut projesine başlanacağına satışa çıkarılır, elde edilen bedel projeye aktarılır,
- Yapılaşmanın yoğun olduğu veya fiziken bağımsız bir parselin oluşturulmadığı durumlarda düzenleme bölgesindeki malikler projeye alan karşılığı borçlandırılır, hissedarlar en geç iki yıl içinde bu miktarı satın almak zorundadır, satışı almayalar iki yılın sonunda ecrimisil bedeli öder, elde edilen bedel projeye aktarılır,

**d)** Önceden düzenleme gören yerlerde bu maddenin hükümleri uygulanmaz.

**e)** İmara olgun arsa: Elektrik, içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz, çöp hizmeti, kablo internet ve tv hizmeti, kamu toplu ulaşım araçlarına, eğitim ve sağlık tesislerine 500 m den yakın olan ve özellikle ilk beş hizmeti sorunsuz alan imar parsellerine denir.

**f)** Ham imar arsası: İmara olgun arsadaki ilk beş altyapı tesisinin herhangi üçünden yararlanan imar parsellerine denir.

**g)** İmarı beklenen arazi: Tarımsal ya da orman amaçlı kullanımdan kentsel amaçlı kullanıma geçişin ilk aşamasını oluşturan alanlardır. Belediye sınırları içinde olan, nazım imar planı çizilen ancak uygulama imar planı sınırları dışında olan, konumu dolayısıyla yakın bir gelecekte imar planı sınırları içine dahil edilmesi beklenen alanlardır. Yapılaşma için gelişmemiş ama arsaya dönüşme potansiyeline sahip alanlardır.

**h)** Düzenleme Ortaklık Payı: Düzenlemeye tabi tutulan yerler ile bölgenin ihtiyacı olan umumi ve kamu hizmet alanları için, İmar Kanunu'nun 18 nci maddesine göre alınacak düzenleme ortaklık payları, düzenlemeye tabi tutulan arazi ve arsaların düzenlemeden önceki yüzölçümlerinin yüzde otuzbeşini geçemez.

Düzenleme ortaklık paylarının aşağıdaki kullanımlardan, öncelik sırasına göre alınması esastır.

- Yol, meydan, park, halka açık ücretsiz otopark, zemin altı en az iki kat ve zemin üstü en az iki kat olmak üzere belediye iştiraki olan katlı otopark, çocuk bahçesi/parkı ve yeşil saha,
- Milli Eğitim Bakanlığına bağlı öğretime yönelik eğitim tesis alanları,
- Pazar yeri, semt spor alanı ve şehir içi toplu taşıma istasyonları ve durakları,
- Spor alanı, teknik altyapı alanı,
- Sosyal ve kültürel tesis alanı,
- Özel tesis yapılmasına konu olmayan ağaçlandırılacak alan, rekreasyon alanı ve mesire alanları,
- Mezarlık alanı,

**i)** Kamu Tesis Alanı: Düzenleme ortaklık payı için kullanılan alanların dışındaki kamunun kullanımına ayrılan alanlardır. Kamu tesis alanındaki parseller ilgili kamu kurumunca en geç beş yıl içinde kamulaştırılır. Bu sürenin aşılması durumunda hissedarlara ecrimisil öder.

**j)** KTO: Kamu tesisleri oranı, Düzenleme ortaklık payı için kullanılan alanların dışındaki kamunun kullanımına ayrılan alanların toplamının düzenlemeye katılan toplam kadastro parsellerine oranıdır. Kamunun ortak kullanımına ayrılan diğer alanlara düzenleme bölgesindeki tüm parseller alanları oranında hisselendirilir.

### 3.2. Belediye Kanununa Eklenecekler

İmar Polisi: Belediye Meclis üyelerinin aralarından Harita Mühendisi, İnşaat Mühendisi, Şehir Plancısı, Mimar olanlar varsa öncelikle bu meslek grubundan olan (bunların yokluklarında bu mesleklere ait ön lisans mezunu olanlar), bu meslek grubundan üye yoksa ilgi duyan üç üye (5393/24 md 3. fıkra), belediyenin kendi personeli olan varsa Harita Mühendisi, İnşaat Mühendisi, Şehir Plancısı ve Mimardan iki teknik personel, belediyenin bağlı bulunduğu il içindeki Harita Mühendisleri Odası, İnşaat Mühendisleri Odası, Şehir Plancıları Odası, Mimar Odası, Jeoloji Mühendisleri Odasından birer üye, uygulamanın yapıldığı mahalle(ler)nin muhtar(lar)ı ve planlamanın yapıldığı bölgede tarihi ve kültürek yapıların olması halinde Anıtlar Kurulundan bir üye olmak üzere en az on bir kişiden oluşur. İmar Polisi toplantılarına Belediye Meclisinden seçilen bir üye başkanlık eder. Her üye bağlı bulunduğu Meclis veya Oda tarafından seçimle gelir ve en çok 2 yıl görev yapabilir. Oylamalar açık oylama olarak yapılır. Seçilen üye çekimser oy kullanamaz. Görüşülen konuya red oyu veren üye karşı görüş notunu yazmak zorundadır. İmar Polisinin kararları yargıya açıktır. İmar polisi kararlarının yargı kararına aykırı olması durumunda her türlü yargılama gideri İmar polisi üyelerine aittir. Her üyeye

oturum başı ulaşım ve konaklama gideri ile 5000 TL huzur hakkı ilgili belediye tarafından ödenir. Her toplantıdan önce ödemelerin bir kamu bankası eliyle yapılmalıdır. Ödemeler tamamlanmadan toplantı yapılamaz.

İmar planı çizim ve değişikliklerine ait görüşmeleri ve kabulü öncelikle İmar Polisinin onayına sunulur. Kabul edilen planlar Belediye Meclisince görüşülür. Belediye Meclisince kabul edilen planlar Belediye Başkanının onayı ile yürürlüğe girer. Kararlar oy çokluğu ile alınır.

Her türlü parselasyon planına ait görüşmeleri ve kabulü öncelikle İmar Polisinin onayına sunulur. Kabul edilen planlar Belediye Encümenince görüşülür. Belediye Encümenince kabul edilen planlar Belediye Başkanının onayı ile yürürlüğe girer. Kararlar oy çokluğu ile alınır.

### 3.3. Emlak Vergisi Kanununa Eklenecekler

İmara olgun arsalar, uygulama imar planının kesinleşmesinden itibaren on yıl içinde isabet ettiği yapı adasının imar hükümlerine yapılaşmamışsa onuncu yılın sonundan itibaren bu hükümlere göre yapılaşmış gibi kabul edilerek tahakkuk eden emlak vergisinin yüzde yetmişi alınır.

İnşaat ruhsatının alındığı tarihten üç yıl sonra inşaatın yapım aşaması ve/veya hukuki durumuna bakılmaksızın ruhsat sahibi üç yılın sonunda ruhsatın öngördüğü yapılaşma gerçekleşmiş gibi tahakkuk edecek olan emlak vergisinin yüzde yetmişini öder.

Aile konutları emlak vergisinden muaftır. Aile konutlarında tüm altyapı tesislerine abonelik ve bu tesislere ait her türlü ödentiler ailedeki tek kişinin üzerinde olmalıdır. Bir konut ancak aralarında kan ve soy bağı bulunan bir aileye özgülenebilir. Aileye üye bireylerin NVİ deki ikamet kayıtları bu konut üzerinde olmalıdır. Her ailenin emlak vergisinden muaf ancak bir konutu olabilir.

Aile konutu haricindeki tüm taşınmazlardan emlak vergisi alınır. Emlak vergisi mülk sahibinin üzerindeki tüm taşınmazların toplam değeri dikkate alınarak kademeli olarak tahsil edilir;

- Taşınmazların değeri 15 000 000 TL'ye olan mülklerden onbinde beş oranında,
  - Taşınmazların değeri 15 000 000 TL – 100 000 000 TL'ye olan mülklerden binde bir oranında,
  - Taşınmazların değeri 100 000 000 TL – 500 000 000 TL'ye olan mülklerden binde iki oranında,
  - Taşınmazların değeri 500 000 000 TL – 1 000 000 000 TL'ye olan mülklerden binde üç oranında,
  - Taşınmazların değeri 1 000 000 000 TL üzeri olan mülklerden binde dört oranında,
- Emlak vergisi alınır.

Ticari ve sanayi alanlarında işyeri sahibi aynı zamanda mülk sahibi ise emlak vergisi olarak taşınmaz değerinin binde ikisini öder.

Ticari ve sanayi alanlarındaki işyerlerini kiraya verenler mülk sahibi, emlak vergisi olarak taşınmaz değerinin binde onunu öder.

OSB, DHMİ ve Lİ lerde işyeri sahibi aynı zamanda mülk sahibi ise emlak vergisinden muaftır.

OSB, DHMİ ve Lİ lerde işyeri sahibi olmayan mülk sahibi taşınmaz değerinin binde onunu emlak vergisi olarak öder.

### 3.4. Arazi Toplulaştırma Kanununa Eklenecekler

Arazi toplulaştırması, öncelikle sabit tesisler etrafında yapılmalıdır.

Arazi toplulaştırmasında dikili ve örtü altı araziler hariç her bir işletmenin tüm arazileri en çok üç yerde toplulaştırılabilir.

Arazi toplulaştırması yapılan köyde aynı zamanda hayvancılık da yapılıyorsa, mera alanının etrafındaki uygun bir yer hayvancılık tesisi (ağıl, ahır gibi) kurulması için 3000 m<sup>2</sup> ile 10000 m<sup>2</sup> alan arsında değişen ve köyün hayvancılık potansiyeli de dikkate alınarak yeter sayıda parsel üretilir. Bu parsellerin elektrik, yol ve su hizmetleri DSİ tarafından giderilir. Köy yerleşim merkezindeki, ahır, ağıl, kümes gibi hayvanların barınacağı her türlü yapı buraya taşınır.

### 3.5. Genel Hükümler

Nazım imar planı, uygulama imar planı, 18. madde uygulaması, arazi toplulaştırması, kentsel dönüşüm uygulaması gibi arsa ve arazi uygulama projelerinin tümünde her türlü vekalet, yargılama, mahkeme harçları da dahil olmak üzere tüm hukuki masraflar yüklenici firma ve ilgili kurumun kontrol ekibi tarafından ödenir.

### 3.6. Hukuki Dayanak

Türkiye Cumhuriyetinin Anayasasınının 35. Maddesi Herkes, mülkiyet ve miras haklarına sahiptir. Bu haklar, ancak kamu yararı amacıyla, kanunla sınırlanabilir. Mülkiyet hakkının kullanılması toplum yararına aykırı olamaz.

Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesinin "Mülkiyetin korunması" başlıklı Ek Protokolünün I. maddesinde: Her gerçek ve tüzel kişinin mal ve mülk dokunulmazlığına saygı gösterilmesini isteme hakkı vardır. Bir kimse, ancak kamu yararı sebebiyle ve yasada öngörülen koşullara ve uluslararası hukukun genel ilkelerine uygun olarak mal ve mülkünden yoksun bırakılabilir. Yukarıdaki hükümler, devletlerin, mülkiyetin kamu yararına uygun olarak kullanılmasını düzenlemek veya

vergilerin ya da başka katkıların veya para cezalarının ödenmesini sağlamak için gerekli gördükleri yasaları uygulama konusunda sahip oldukları hakka halel getirmez hükümleridir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Yerel yönetimler kentsel alan düzenlemelerinde ihtiyaç duydukları toprağı özel mülkiyetten karşılama yoluna gitmişlerdir. 1933 yılında %15 ile başlayan bu süreç günümüzde %45 e kadar yükselmiştir. Ancak bu kez de deyim yerindeyse kantarın topuzu fazla kaçarak, her türlü ortak kullanım alanını özel mülk sahiplerinden karşılar hale gelmişlerdir. Kamunun ortak kullanım alanı için yapılan arsa teminleri amacından saparak ücretli otoparklara ve belediye iştiraki haline dönüşen, belediyelerin tüccar gibi kazanç sağladıkları belediye hizmet alanlarına (BHA) bile bedelsiz arsa teminine dönüşmüştür. Bu açıdan DOP'a bakış açımız yeniden gözden geçirilmelidir.

Bir başka önemli sorunumuz ise sermayedarlar için "arsalar" yatırım aracı haline dönüşmüştür. Oysa sermaye, sanayide kalıp, istihdam artırıcı yatırımlar yapmalıdır. Bu durum alt gelir gurubundakilerin en temel ihtiyacı olan "barınma" için konuta erişiminde engeldir. Bu açıdan ülkemiz için "mülk sahipliğinin mutlaklığı" tanımından vazgeçip toprak, "herkes için yaşamın kaynağı" olduğu olgusunu kabul etmeliyiz.

Arsa ve arazi düzenlemesi yaparken kamu kurumlarına bedelsiz arsa temini amacıyla değil kamunun ortak kullanım alanlarına bedelsiz arsa temini amacını gütmeliyiz. Arsaları bir yatırım aracı olmaktan çıkarıp onu kullanıcısının amacına yönelik planlamalıyız. Bunun için kamu, alt gelir guruplarının konuta erişimini sağlayacak inşaat ve finansman problemini çözerken mülk sahipleri de sosyal konut projelerine verecekleri arsa ile katkı sağlamalıdır.

İmar planlarının yapım ve uygulamasına yönelik işlemler, sadece belediyeler tarafından yürütülmektedir. Oysa bu işlerin eğitimi almış Şehir Plancıları, Harita Mühendisleri, İnşaat Mühendisleri gibi meslekler, odaları eliyle "imar polisi" olarak sürece dahil edilmelidir.

Emlak Vergisi uygulamalarında her taşınmaz tekil olarak ele alınmış ve vergi oranı sabit tutulmuştur. Oysa mülk sahibinin tüm taşınmazları birlikte ele alınarak toplam değeri üzerinden (gelir vergisinden ayrı olarak) kademeli olarak vergilendirme olmalıdır. Böylece taşınmazın bir yatırım aracı olarak görülmesinden koparılıp, kullanımının gerçek ihtiyaç sahibine özgülenmesi sağlanacaktır.

Ayrıca kent içinde etrafı yapılaşmış ama atıl duran boş arsalarından sadece arsa vergisi alınmamalı, farklı bir bakış açısıyla vergilendirilerek kullanıma sokulmalıdır.

Arazi toplulaştırma çalışmalarında ise mera alanlarının etrafı, ağıl ve çardak olarak planlanıp, altyapısı giderilip, hayvancılıkla ilgilenen köy sakinlerine sunulmalıdır. Böylece köy yerleşim merkezindeki kötü koku ve yollardaki hayvan dışkı sorunu da çözümlenmiş olur.

#### Kaynaklar

Çay T., Kandemir E. S., (2022) Türkiye'de imar uygulama mevzuatındaki gelişim süreci. *Geomatik Dergisi – 2022; 7(1); 26-40 e-ISSN 2564-6761*

Köktürk E., Köktürk E., (2007) Arsa Düzenlemelerinin Hukuksal Dayanağı *TBB Dergisi, Sayı 70*

Kim H. M., Han S. S., (2012) *Seoul Cities Volume 29, Issue 2, April 2012, Pages 142-15*

Kitir M., (2025) 7181 sayılı Kanun'un imar planları üzerindeki etkileri: belediye hizmet alanları özelinde bir değerlendirme, Konya örneği, *International Journal of Human Sciences (JHS) ISSN: 2458-9489, Volume: 22, Issue: 1*

2433 sayılı *Belediye yapı ve yollar kanunu* 21.06.1933, Resmi Gazete sayı: 2433

1605 sayılı *6785 sayılı İmar Kanununda bazı değişiklikler yapılması hakkında kanun* 20.07.1972, Resmi Gazete sayı: 14251

3194 sayılı *İmar kanunu* 03.05.1985, Resmi Gazete sayı: 18749

6785 sayılı *İmar Kanunu* 07.10.1920, Resmi Gazete sayı: 9359

5006 sayılı *İmar Kanunu ile İmar ve Gecekondu Mevzuatına Aykırı Yapılara Uygulanacak Bazı İşlemler ve 6785 Sayılı İmar Kanununun Bir Maddesinin Değiştirilmesi Hakkında Kanunda Değişiklik Yapılmasına İlişkin Kanun* 17.12.2003, Resmi Gazete sayı: 25319

5393 sayılı *Belediye kanunu* 03.07.2005, Resmi Gazete sayı: 25874

7181 sayılı *Tapu Kanunu Ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun* 04.07.2019, Resmi Gazete sayı: 30827

*Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği* 14.06.2014, Resmi Gazete sayı: 29030



TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara

## Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi

Özgen Sadu ÇAĞLAR<sup>1</sup>, Fatih Çağatay KAPLAN<sup>2</sup>, Cihat Erda GÜMÜŞ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Kadastro Dairesi Başkanlığı, 06420, Ankara.

<sup>2</sup>Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Kadastro Dairesi Başkanlığı, 06420, Ankara.

<sup>3</sup>Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Kadastro Dairesi Başkanlığı, 06420, Ankara.

### Özet

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) tarafından kadastral bilgilerin dijital ortama aktarılmasını ve yönetilmesini sağlayan ve birçok bileşenden oluşan Elektronik Kadastro Projesi başlatılmıştır. Proje, kadastro sicilinde yer alan tüm teknik verilerin dijitalleştirilmesi ve kadastro süreçlerinin dijital olarak yürütülmesini hedeflemektedir. Projenin en önemli bileşenlerinden biri de Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesidir. Ülkemizde tapulama ve kadastro çalışmaları sırasında yürürlükte bulunan kanunlar çerçevesinde bazı taşınmazlar tescil harici veya tespit dışı olarak bırakılmıştır. Sonraki süreçlerde çeşitli çalışmalar ile bu alanların tescilleri kısmen yapılsa da günümüzde halen birçok tescil harici alan varlığını sürdürmektedir. Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi ile ülke genelindeki tespit ve tescil harici tüm alanların sayısallaştırılarak kadastral envanterinin çıkarılması sağlanacaktır. Proje kapsamında, tescil harici alanların; paftalarındaki niteliklerine uygun ve mevcut kadastral verilerle bütünlük sağlayacak biçimde sayısallaştırılması, Mekânsal Gayrimenkul Sistemi'ne (MEGSİS) entegre edilerek elektronik onay süreçlerinin tamamlanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda MEGSİS uygulamasında "Tescil Harici Alanlar Modülü" geliştirilmiştir. Projenin temel amaçlarında biri de ülke genelindeki tescil harici alanların envanterini oluşturarak ekonomiye kazandırmak ve kamunun arsa üretimindeki rolünü güçlendirmektir. Bu çalışma ile bütüncül bir kadastral veri altyapısının kurulmasının yanı sıra, kadastral çalışmalar da etkin ve verimli hale getirilecektir.

### Anahtar Sözcükler

Arazi Yönetimi, Kadastro, Elektronik Kadastro Projesi, Tescil Harici Alanlar, CBS.

## 1. Giriş

Tescil Harici Alanların Ekonomiye Kazandırılması Projesi'nin temel amacı ülke genelindeki tespit ve tescil harici bırakılmış tüm alanların sayısallaştırılarak envanterinin çıkarılmasıdır. Bu proje, 21 Mayıs 2025 tarihinde İstanbul'da gerçekleştirilen Kurumumuzun 178. Yıl Lansmanında Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanımız tarafından kamuya açıklanmıştır.

Projenin amaçları ve sağlayacağı faydalar şunlardır:

- **Kadastro envanterinin oluşturulması:** Proje kapsamında ülkemizin tescil harici alan envanterinin oluşturulması hedeflenmektedir. Bugüne kadar farklı kanunlarla yürütülen tapulama/kadastro çalışmaları sonucu oluşan tescil harici alanlara ilişkin çalışmalar uzun yıllardır farklı uygulamalarla (*İdari Yoldan Tescil, Kamulaştırma, Yenileme/Güncelleme Çalışmaları vb.*) devam etmektedir. Ancak bütüncül olarak net bir şekilde envanteri çıkarılmamış, ancak tesciline ihtiyaç duyulan alanlarda bu çalışmalar yapılmıştır.
- **Ekonomiye kazandırılması:** Bu alanlar, günümüzde artan arsa ihtiyacı, sürdürülebilir arazi yönetimi, konut üretimi ve kamu yatırımları açısından stratejik bir kaynak olarak görülmektedir. Kentsel büyüme ve nüfus baskısı nedeniyle, geçmişte tespit dışı bırakılmış ancak fiilen kamu kullanımıyla şekillenmiş tescil harici alanların, güncel planlama ve imar stratejileri kapsamında arsa rezervi olarak değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.
- **Kamu rolünün güçlendirilmesi:** Tescil harici alanların envanterinin çıkarılması sonucu Hazine adına idari yoldan tescil edilmesi, arsa üretiminde kamunun etkinliğini güçlendirecek ve bu taşınmazların sosyal konut, kamu hizmet alanları veya ekonomik yatırım projelerinde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.
- **Veri altyapısının oluşturulması ve entegrasyon:** Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün çalışmalarıyla, tescil harici alanların kadastral altyapısının oluşturulması ve coğrafi ile hukuki verilerinin Mekânsal Gayrimenkul Sistemi (MEGSİS) veri tabanında toplanması amaçlanmaktadır. Bu sayede:
  - Arazi yönetiminde bütüncül bir veri altyapısı oluşturulacaktır.
  - Gayrimenkul üzerine yapılan planlamalar mülkiyet altyapısıyla uyumlu hale getirilecektir.
  - Kamu kurumları arası koordinasyon güçlendirilecektir.
- **Kurumsal süreçlerin iyileştirilmesi:** Proje ile kadastro sicilindeki tüm teknik verilerin dijitalleştirilmesi ve kadastro süreçlerinin dijital olarak yürütülmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda MEGSİS uygulamasında yeni bir veri modülü geliştirilmiştir.
- **İş yükünün azaltılması ve hataların önlenmesi:** Proje ile Kadastro Müdürlüklerinin iş yükünün %20'sine tekabül eden plan örneği işleminin kullanıcıdan bağımsız yürütülmesine imkan sağlanacaktır. Kadastro teknik evraklarının elektronik sistem tarafından oluşturulmasına olanak tanınacaktır. Tescil harici alanları oluşturulan birimlerin ikinci defa kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duyulmadan dinamik olarak yönetilmesi sağlanacaktır. Kadastro işlem kontrollerinin sistem tarafından yapılmasına olanak sağlayarak iç ve dış kullanıcının hatalı işlem yapmasının önüne geçilecektir. Kadastro parsellerindeki teknik hatalar, parsel kenarlaşma sorunları net bir şekilde ele alınabilecektir. Sonuç olarak, bu proje sadece fiziksel olarak arsa üretimi değil, aynı zamanda haritacılık tekniği, kadastral sürdürülebilirlik ve kamu yararı açısından da çok yönlü katkılar sağlamayı hedeflemektedir.

\* Sorumlu Yazar: Tel:+90 (312) 5514976

E-posta: [tk45624@tkqm.gov.tr](mailto:tk45624@tkqm.gov.tr) (Gümüüş C.E.)

## 2. Uygulama

### 2.1. Tescil Harici Alanların Sayısallaştırılması

Tescil Harici Alanların (THA) sayısallaştırılması süreci temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; veri üretimine hazırlık ile veri üretimi ve verilerin MEGSİS - THA Modülüne elektronik onaylı olarak yüklenmesidir. Çalışmanın ilk aşamasında Kadastro Müdürlüklerince THA geometrilerinin oluşturulacağı birim için kadastro birim sınırı belirlenmiştir. Birim sınırları idari sınır olmamakla birlikte; ilgili birimde tescilli ve onaylı parsellerin en dış sınırını kapsayacak şekilde ve komşu birimlerle kenarlaşması sağlamak suretiyle oluşturulmaktadır. Birim içerisinde kalan tescilli parseller dışındaki boşluklar, kadastro paftası ile kontrol edilerek tescil harici alan olarak CAD programında sayısallaştırılmıştır. Geometriler ITRF96 datumunda ve 2005.00 referans epogunda oluşturulmuştur. Oluşturulan geometrilerin niteliği öncelikle paftasında veya teknik evraklarında yazılan nitelik olarak; eğer paftasında nitelik yazılmamışsa uydu görüntüleri ile ortofoto haritalardan faydalanarak, gerekirse zeminde inceleme yapılarak belirlenen niteliğe göre adlandırılmıştır (Örneğin; Yol/1, Dere/2, Tarıma Elverişli Olmayan Yer/3 vb.). Sayısal CAD ortamında oluşturulan bu geometriler GML formatına dönüştürülmüş, ayrıca her bir tescil harici alan için gerekli öznelik verileri de oluşturularak THA Modülüne yüklenerek öznelik verileri de eş zamanlı olarak MEGSİS veri tabanına entegre edilmiştir. Öznelik verilerinde; ilgili alanın terk sonucu oluşan alan olup olmadığı, tescili için yürütülen sürecin olup olmadığı, kısıtlılık durumuna ilişkin bilgileri, tescilinde ekonomik fayda sağlayıp sağlamayacağı, herhangi bir kullanım/işgal durumunun olup olmadığı ve bir imar planında kalıp kalmadığı bilgileri de Kadastro Müdürlükleri tarafından belirlenerek sisteme girilmiştir.

### 2.2. Tescil Harici Alanların Sınıflandırılması

4721 sayılı Türk Medeni Kanunu'nun 715. maddesi ve 3402 sayılı Kadastro Kanunu'nun 16. ve 18. maddeleri gereğince; dağlar, tepeler, kayalıklar, kıyılar, genel sular ve tarıma elverişli olmayan sahihsiz araziler özel mülkiyet konusu olamaz. Bu taşınmazlar, "devletin hüküm ve tasarrufu altındaki sahihsiz yerler" olarak kabul edilir. Yine 3402 sayılı kanun öncesi yapılan tapulama çalışmalarına dayanak olan 766 ve 509 sayılı Tapulama Kanunları da benzer şekilde tarıma elverişli olmayan sahihsiz yerler ve orman sayılan yerlerin tapulamaya tabi tutulmadığını, ancak paftasında gösterilmesini belirtir. Geçmiş yıllarda yapılan tapulama ve kadastro çalışmalarında tescil harici bırakılmış alanlar ile sonrasında yapılan değişiklik işlemlerinde çeşitli sebeplerle tescile tabi olmayan alanların nitelikleri paftasına ve teknik evraklarına göre kayıt altına alınmıştır. Proje kapsamında ülke genelinde 81 il yetki alanındaki Kadastro Müdürlüklerinden toplanan verilere göre farklı nitelikler tespit edilmiştir. Kadastro Dairesi Başkanlığımız tarafından bu nitelikler analiz edilerek üst kategorilerde sınıflandırılmıştır.

### 2.3. Tescil Harici Alanların Yönetilmesi

Ülke genelinde yapılan çalışma neticesinde yaklaşık 50 bin kadastro biriminde olmak üzere tescil harici alan geometrileri MEGSİS üzerinden sayısal olarak kayıt altına alınmıştır. Yine proje kapsamında ilgili idarelerince yapılan Nazım ve Uygulama İmar Planları ile köy yerleşik alanları ve özel kanunlara tabi alanlar ile birlikte Kadastro Dairesi Başkanlığımız tarafından analiz ve iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Ayrıca çalışmalar neticesinde Tescil Harici Alanların merkezden yönetilebileceği bir arazi yönetim sistemi de geliştirilmektedir. Proje sonunda tescil harici alanların ekonomiye kazandırılmasında fayda görülen kısımlarının değerlendirmeleri yapılarak öncelikli olarak Bakanlığımız koordinasyonunda tescillerinin yapılmasına katkı sağlanması, Hazine mülkiyetine ve ekonomiye kazandırılması hedeflenmektedir.

## 3. Sonuçlar

Türkiye'nin arazi yönetim sisteminde, tescil harici veya tespit dışı bırakılan alanlar, günümüze kadar büyük ölçüde göz ardı edilmelerine karşın hukuki, teknik ve planlama boyutlarıyla yüksek stratejik öneme sahip yeni bir mülkiyet kategorisi oluşturmaktadır. Bu alanların yönetimi, taşınmazlara yönelik politikaları belirleyen ve yöneten lider kurum olan Genel Müdürlüğümüzce sistematik bir yaklaşımla gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Geçmişte kadastro çalışmalarında kayıt dışında bırakılan bu alanlar, günümüzde artan arsa ihtiyacı, sosyal konut politikaları ve kamu yatırımları için temel bir kaynak teşkil etmekte; bu durum, söz konusu alanların doğru sınıflandırılmasını, envanterinin çıkarılmasını ve tapu siciline de entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır.

Bu gereksinim doğrultusunda, Genel Müdürlüğümüz, tescil harici alanların kadastral altyapısını oluşturmak ve bu alanlara ilişkin coğrafi verileri Mekânsal Gayrimenkul Sistemi (MEGSİS) veri tabanında merkezileştirmek üzere; Elektronik Kadastro Projesinin bir bileşeni olarak THA Modülünü geliştirmiş ve taşra teşkilatı ile birlikte bu verileri MEGSİS'de toplamıştır. Bu çalışmayla; arazi yönetiminde bütüncül bir veri altyapısının tesis edilmesi, planlama ve kamu yatırımlarının sağlam bir mülkiyet atlığıyla uyumlu hale getirilmesi ve ilgili kamu kurumları arasındaki koordinasyonun güçlendirilmesi sağlanacaktır.

Tescil harici alanların, hukuki statülerine uygun olarak Hazine adına tescil edilmesi, önemli kazanımları da beraberinde getirmektedir. Bu kazanımlar arasında; kamusal arsa üretiminin desteklenmesi, sosyal konut ve kamu hizmet alanları için arsa rezervleri oluşturulması ve nihayetinde tapu sicil sisteminin güvenilirliği ile kadastral verilerin bütünlüğünün korunması yer almaktadır. Sonuç olarak, yapılan bu proje ile tescil harici alanlar: hukuki bir boşluk olmalarının ötesinde veriye dayalı, planlı ve kamu yararını önceleyen modern bir arazi yönetimi anlayışının temel bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Gayrimenkul Sektöründe Yeni Bir Dönem: Gayrimenkul Tokenizasyonu ve Uygulamaları

Orhan MATARACI<sup>1</sup>, Tolgahan ÖZDEN<sup>2</sup>, Orhan Ercan<sup>3</sup>, İ. Raci BAYER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Bakan Müşavirliği, Ankara

<sup>2</sup> Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Ankara.

<sup>3</sup> Ankara Üniversitesi, Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Bölümü, Ankara

<sup>4</sup> Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, AB ve Dış İlişkiler Genel Müdürlüğü, Ankara.

### Özet

Tokenizasyon, küçük yatırımcıların daha önce yüksek sermaye gereksinimleri nedeniyle erişemedikleri gayrimenkul piyasalarına girmelerine olanak tanır. Dahası, gayrimenkul piyasasında likiditeyi artırarak yatırımcıların varlıklarını ikincil piyasalarda token alım-satımı yaparak kolayca nakde çevirmelerine olanak tanır. Bu akışkanlık, blok zinciri işlemlerinin artan şeffaflığı ve güvenliğiyle birleştiğinde, gayrimenkul tokenizasyonu, gayrimenkul yatırım dünyasında yenilik yaratma potansiyeline sahip bir gelişmeye imkân tanımaktadır.

Tokenizasyon konusuna iyimser olmak için en önemli sebeplerden biri, tokenleştirmenin mevcut klasik gayrimenkul ile ilgili sistemin işleyişini kökten değiştirecek kapsamlı bir yeniden yapılandırma gerektirmeyecek olmasıdır. Aksi takdirde dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde kökten teknik ve hukuki değişikliklere ihtiyaç olacağı anlaşılmaktadır. Bunun yerine, blok zinciri ve tokenleştirmenin, gayrimenkul sektörünü tamamen altüst etmeden işlemleri basitleştirecek olması ve yeni katma değerler katacak potansiyelleri barındırmasıdır. Bir başka deyişle mevcut sistemleri tamamen tokenleştirmenin yerine hibrit bir yöntemle kullanılabilme kapasitesine sahip olması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada; Web of Science web sitesi kullanılarak yapılan sorgulamalarda içeriğinde "real estate-tokenization" kelimeleri bulunan 2021-2025 yılları arasında 10 adet makale incelenmiş ve dünyada gayrimenkul tokenizasyon uygulamaları hakkında bilgiler derlenmiştir. Gayrimenkul tokenizasyon ile ilgili incelenen çalışmalardan potansiyel kullanım kapasitesine rağmen literatürün taraması ile elde edilen çıkarımlar irdelendiğinde; gayrimenkul sektöründe tokenleştirmenin mevcut durumu ve gelecekteki potansiyeli hakkında bir analiz sunulmakta ve bu teknolojiden yararlanmak için üstesinden gelmesi gereken çeşitli zorluklar olduğu görülmüştür.

### Anahtar Kelimeler

Gayrimenkul Tokenizasyonu, Blok zincir, token, Arazi Yönetimi, Dijital Dönüşüm

### Abstract

Tokenization allows small investors to enter real estate markets previously inaccessible due to high capital requirements. Furthermore, it increases liquidity in the real estate market, allowing investors to easily convert their assets into cash by trading tokens on secondary markets. This fluidity, combined with the increased transparency and security of blockchain transactions, makes real estate tokenization a potentially innovative development in the real estate investment world.

One of the most important reasons for optimism about tokenization is that it won't require a comprehensive restructuring that would fundamentally alter the functioning of the current traditional real estate system. Otherwise, it's understood that fundamental technical and legal changes would be necessary in many countries around the world and in our country. Instead, blockchain and tokenization offer the potential to simplify transactions and add new value without completely disrupting the real estate sector. In other words, it's crucial that existing systems be able to be used in a hybrid way, rather than being completely tokenized.

This study examined 10 articles between 2021 and 2025 that contained the keyword "real estate-tokenization" in searches conducted using Web of Science software, and compiled information on real estate tokenization applications worldwide. Despite the potential potential for real estate tokenization, the numerous inferences derived from the literature review of the reviewed studies on real estate tokenization provide an analysis of the current status and future potential of tokenization in the real estate sector, and highlights the challenges that must be overcome to utilize this technology.

### Keywords

Real Estate Tokenization, Blockchain, token, Land Management, Digital Transformation

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

## 1. Giriş

Gayrimenkul tokenizasyonu, gayrimenkul yatırımının demokratikleşmesi (sadece zengin veya yüksek sermaye sahibi kişilere değil, daha geniş kitleler tarafından yatırıma erişilebilir olunması) ve yenilikçi bir işlem olarak önemli bir dönüşümü temsil etmektedir. Bir başka ifade ile blockchain (blok zincir) teknolojisinden yararlanarak, gayrimenkul piyasasında likiditeyi, erişilebilirliği ve şeffaflığı artıran yeni bir paradigma sunmaktadır. Bu yenilik, yalnızca alternatif ve verimlilik arayan geleneksel yatırımcılara hitap etmekle kalmıyor, aynı zamanda küçük ölçekli yatırımcıların daha önce ulaşamadıkları bir pazara katılımlarının kapılarını da açmaktadır.

Son yıllarda araştırma, geliştirme ve kullanımda olan blok zincir teknolojisi, uzmanlar tarafından dünyanın çehresini önemli ölçüde değiştirdiğini, blok zincir tabanlı çözümlerin ekonomi, finans ve gayrimenkul de dahil olmak üzere çeşitli sektörler üzerinde yakın gelecekte büyük bir etkiye sahip olacağını öngörülmektedir. Bu çalışmada blok zincir teknolojisinin araştırma ve uygulama alanı bulunduğu gayrimenkul tokenizasyonu hakkında bilgilere ağırlıklı olarak yer verilmektedir.

Tokenizasyon teknik olarak son derece karmaşık bir dijital dönüşüm teknolojisine sahiptir. Gayrimenkul tokenizasyonu en basit haliyle, bir taşınmazın tüm değerinin yahut parçalara bölünmüş temsili değerlerinin bir tokena (dijital sertifika) dönüştürülmesi ve ardından söz konusu tokenların satılması suretiyle yatırımcıların taşınmazın mülkiyetini talep etme hakkına, taşınmazdan yararlanma veya kira alacağından pay talep edebilme yetkisine sahip olunması ve benzer hakların devredilmesinin sağlanmasıdır (Moriarty, 2023). Buradan da anlaşılacağı üzere tokenizasyonun, gayrimenkul sektörünü dönüşüm konusunda gelecekte yaratıcı bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Literatürde gayrimenkul tokenizasyonunun dünyada gerçekten etkili olacak ve bu teknolojinin geniş çapta neler başarabileceğini gösterecek ilk blok zinciri kullanım örneklerinden biri olabileceğinden bahsedilmektedir (Baum, 2021; Hashank & Choudhury, 2022). Tüm geçiş zorluklarına rağmen, bilinen haliyle doğrudan gayrimenkul sektöründe mevcut tüm sorunlara önemli iyileştirmelerle katkı sağlayacağından bahsedilmektedir.

Dünyada tokenizasyonun yapı taşı olan tokenlerin hukuki niteliği tartışmalıdır. Tokenler üzerinde zilyetlik ve mülkiyet tesis edilmesi için bunların eşya niteliği taşıması gerekmektedir. Bunun için bir hukuk reformuna ihtiyaç duyulmaktadır. Tokenler üzerinde zilyetlik ve mülkiyet tesis edilmesi için bunların eşya niteliği taşıması gerekmektedir. Bu bakımdan tokenlerin eşya hukuku bakımından değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Tokenler cismani bir varlık olmadığı için yani fiziksel bir varlık olmadığı için birçok ülkede yürürlükte olan kanunlara göre eşya niteliği taşımamaktadır. (TBV, 2024)

Uzmanlar tarafından yapılan araştırmalarda ise gayrimenkul tokenizasyonu blok zincirin potansiyelini göstermesi için ideal bir fırsat olarak değerlendirilmektedir. Bu da dünya çapındaki yatırımcıların daha önce erişemedikleri gayrimenkul yatırım türlerine erişilebileceği anlamına gelmektedir. Daha likit olanaklar, daha fazla piyasa şeffaflığı, sahip olunan varlıklar üzerinde daha iyi kontrol, güvenilir mülkiyet takibi, doğrudan varlık ticareti, gerçek zamanlı yatırım prosedürleri vb. anlık faydalı etki yaratacak iyileştirmeler bu teknolojiye bakış açısında memnuniyet yaratmıştır (TBV, 2024; Baum, 2021; Hashank & Choudhury, 2022). Şüphesiz bu imkanların oluşabilmesi için birçok sektörde olduğu gibi zamanında, doğru, güncel ve hukuki geçerliliği olan veriye/bilgiye erişimin sağlanması, sürecin sorunsuz ve hızlı bir şekilde işlemesi gayrimenkul sektörü için son derece önemlidir. Bilinçli ve doğru kararlar; anlık, doğru, güncel ve hızlı bilgi gerektirmektedir.

Gayrimenkul tokenizasyonu, dijital teknolojilerin ve blok zincir tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte daha da önemli bir konu haline gelmiştir. Tapu sicilinin blok zincirinde tutulması veya entegre edilmesi halinde tapu senetleri tokenize edilerek dijital bir sertifikaya çevrilebilme imkânı ortaya çıkmıştır. Günümüzde gayrimenkul tokenizasyonu ile ilgili araştırmaların ve uygulamaların daha çok gelişmiş gayrimenkul piyasalarında alternatif yöntemler olarak görülmektedir. İşte bu noktada devreye dijital gayrimenkul sertifikaları (Real Estate Tokenization / Fractional Ownership) girmektedir. Küresel ölçekte farklı ülkelerde yaygınlaşan bu model, yatırımcıların küçük paylarla büyük projelere katılmasına olanak tanımakla birlikte taşınmaz (gayrimenkul) yönetimi, finansmanı ve geliştirilmesi alanında da yeni bir vizyon oluşturmaktadır.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

## 2. Gayrimenkul Tokenizasyonunun Avantajları

Gayrimenkul tokenizasyonu, yatırım ortamını yeniden şekillendirerek bir dizi avantajın ve fırsatın kilidini açmaktadır. İşte devrim niteliğindeki potansiyelini pekiştiren temel avantajlar:

- ✓ **Küresel Yatırım Erişimi:** Tokenizasyon, dünya çapındaki mülklere yatırım yapmayı sağlar ve portföyü kitalara yayarak yerel pazarların ötesinde yatırım için fırsatlar sağlar.
- ✓ **Hisseli Mülkiyet ve Yatırım Portföylerinin Çeşitlendirilmesi:** Tokenleştirme, prestijli bir mülkün bir kısmına sahip olmayı sağlar. Sermayeyi çeşitli varlıklara dağıtarak riski azaltarak ve çeşitlendirmeyi en üst düzeye çıkarmaya imkân sağlar. Tokenleştirme, hisseli mülkiyete olanak tanıyarak yatırımcıların daha az sermayeyle yatırım portföylerini farklı türdeki mülkler ve konular arasında çeşitlendirmelerine imkân tanır.
- ✓ **Anında ve Artan Likidite:** Blok zincir, tokenların anında alım satımını kolaylaştırarak, geleneksel olarak likit olmayan gayrimenkulleri dinamik, neredeyse hisse senedi benzeri bir piyasaya dönüştürür. Tokenleştirme, gayrimenkulleri daha likit varlıklara dönüştürerek, gayrimenkul yatırımlarının değerini açığa çıkarabilir ve daha geniş bir yatırımcı yelpazesi için daha çekici hale getirebilir.
- ✓ **Daha Düşük İşlem Maliyetleri:** Blok zincir ve akıllı sözleşmeler, süreçleri otomatikleştirerek broker, avukat ve banka vb. ihtiyaçları ortadan kaldırır. Bu, işlem maliyetlerini önemli ölçüde düşürerek yatırım getirisini artırabilir.
- ✓ **Gelişmiş Şeffaflık ve Verimlilik:** Blok zincirin değiştirilemez kayıt defteri özelliği, mülkiyet ve işlemlerin şeffaf ve korumalı bir kaydını sağlamaktadır. Blok zincir kullanımı, işlemlerde ve kayıt tutmada yüksek düzeyde şeffaflık sağlayarak dolandırıcılık ve hataları azaltabilir. Akıllı sözleşmeler, mülk yönetimi ve işlemlerin birçok yönünü otomatikleştirerek verimliliğin artmasını sağlayabilir.
- ✓ **Küresel Yatırım Fırsatları:** Tokenleştirme platformları, sınırsız iş birliğini ve bilgi paylaşımını teşvik etmektedir. Dünyanın dört bir yanından farklı bakış açılarına ve yatırım içgörülerine erişim sağlar. Tokenizasyon, sınır ötesi gayrimenkul yatırımlarını daha basit ve daha verimli hale getirerek, daha önce düzenleyici ve lojistik engeller nedeniyle sınırlı erişime sahip olan yatırımcılara uluslararası pazarlar açabilmektedir.
- ✓ **Otomatik Yönetim:** Akıllı sözleşmeler, kira toplama ve kar payı dağıtımı gibi görevleri otomatikleştirerek zamanında ve şeffaf olarak ödemeler sağlayabilir.
- ✓ **Erişilebilir ve Yenilikçi Finansman Modelleri:** Parçalı kredilendirme, birden fazla yatırımcının bir mülk satın alımının finansmanına katkıda bulunmasına imkan sağlar. Bu, geleneksel kredilere hak kazanamayanlar için daha fazla finansal kapsayıcılığı teşvik etmektedir. Tokenizasyon, gayrimenkul yatırımları için kitle fonlaması gibi yaratıcı finansman çözümlerine olanak tanımakta ve arazi/gayrimenkul geliştiricilerine ve yatırımcılarına sermaye toplamanın yeni yollarını sunabilmektedir.
- ✓ **Mevzuata Uygunluk:** Akıllı sözleşmeler, ilgili düzenlemelere otomatik olarak uyum sağlayacak şekilde programlanabilir ve bu sayede hem yatırımcıların hem de ihraççılara kolaylık sağlayabilir. Evrak işlerine daha az, stratejik yatırımlara daha fazla zaman ayırma imkânı oluşabilir.
- ✓ **Çevre Dostu Yatırım:** Tokenleştirme, çevre dostu ve sürdürülebilir gayrimenkul projelerinin finansmanını kolaylaştırarak, sorumlu kalkınma uygulamalarını teşvik edebilir ve olumlu bir çevresel etkiye katkıda bulunabilir. (The Comprehensive Guide to Real Estate Tokenization, 2024).

## 3. Gayrimenkul Tokenizasyonunun Zorlukları

Gayrimenkul tokenizasyonu, gayrimenkul yatırımında önemli bir değişimi temsil etse de potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için ele alınması gereken kendine özgü zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorluklar bazıları şunlardır:

- ✓ **Teknik ve Operasyonel Zorluklar:** Blok zincir teknolojisinin gayrimenkul sektörüne entegrasyonu, gelişmiş teknik altyapı gerektirir. Ölçeklenebilirlik, işlem hızı ve mevcut sistemlerle birlikte çalışabilirlik gibi konular önemli zorluklar doğurabilir. Blok zincir aracılığıyla veri yapılandırma ve standardizasyonun olmayışı (güvenlik, siber riskler, maliyetler vb) önemli bir zorluktur. Veri gizliliği, birlikte çalışabilirlik ve verilerin tam olarak dijital ortama dönüştürülmesindeki eksiklikler gibi unsurlar yatırımcı için göz önünde bulundurması gereken etkenlerdir. Ayrıca, blok zincir sistemlerinin yönetimi ve bakımındaki operasyonel karmaşıklıklar, geleneksel gayrimenkul şirketleri için sorunlu durumlardır. Özellikle

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

uygulama sırasında faydalı olsa da blok zincirin merkeziyetsizliği, uzun vadede dijital teknolojinin yönetimini ve sürdürülebilirliğini zorlaştırabilir.

- ✓ **Düzenleyici Engeller ve Yasal Çerçeve:** Gayrimenkul tokenizasyonu, halihazırda karmaşık bir yasal ve düzenleyici ortamda varlığını sürdürmektedir. Farklı ülkelerin menkul kıymetler, gayrimenkul mülkiyeti ve dijital varlıklarla ilgili farklı yasaları vardır ve bu da tokenizasyon süreçlerinin standartlaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum çeşitli düzenlemelere uyumun sağlanması, küresel ölçekte benimsenmesinin önünde önemli bir engel teşkil etmektedir.
- ✓ **Piyasa Kabulü ve Yatırımcı Güveni:** Avantajlarına rağmen, tokenleştirme hala birçok yatırımcı ve gayrimenkul profesyoneli için yeni bir kavramdır. Güven ve kabul oluşturmak hayati önem taşımaktadır; bu da eğitim, kanıtlanabilir başarı öyküleri ve tokenleştirme geleneksel yöntemlere göre katma değerinin açık kanıtlarını gerektirir. Uygulamalarla bu konuda somut göstergeler sağlanmalıdır.
- ✓ **Güvenlik Endişeleri:** Blok zincir doğası gereği güvenli olsa da veri gizliliği, siber güvenlik tehditleri ve tokenların saklandığı dijital cüzdanların güvenliğiyle ilgili endişeler oldukça önemli önemlidir. Yatırımcı güvenini kazanmak için güçlü güvenlik önlemlerinin sağlanması kritik öneme sahiptir.
- ✓ **Uygulamalarda likite sınırlı:** İkinci el piyasasının yani tokenların borsada daha yoğun ve büyük miktarlarda işlem görmesi gerekir. Literatürde yapılan araştırmalarda tokenize edilmiş gayrimenkul varlıklarının düşük işlem hacmine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ **Pazarlana, yatırımcı eğilimi:** Bu yeni modelin yaygınlaşması için yatırımcı bilinci ve güveninin oluşması önemlidir.

#### 4. Gayrimenkul (Taşınmaz) Tokenizasyonu Sistem Mimari

Finansal açıdan, gayrimenkul mülkiyetini tamamını, hisselerini, mülkiyete bağlı aynı hakları veya bu mülkiyete ait payların, blok zinciri teknolojisi üzerinde dijital varlık (token-sembol) formatında temsil edilme sürecini ifade eden tokenizasyon, gayrimenkul piyasalarına yönelik yenilikçi alternatif bir modeldir. Tokenlar orijinal veriyi temsil eder ama kendi başına bir anlam taşımazlar. Tokenlar yalnızca yetkili sistemler tarafından çözülebilir ve yönetilebilir. Bu teknolojik dönüşüm, geleneksel tapu sicil ve mülkiyet yönetim süreçlerinin şeffaflık, güvenlik ve verimlilik sorunlarına çözüm üretme potansiyeline sahiptir (Swan, 2015; Mougayar, 2016). Süreç, fiziksel bir varlığın dijitalleştirilmesini ve bu dijital varlığın yönetimi, transferi, parçalı mülkiyete konu edilmesi gibi işlemlerin akıllı sözleşmeler (smart contracts) aracılığıyla güvenli, otomatik ve aracı kurumlardan bağımsız bir şekilde yürütülmesini kapsamaktadır (Buterin, 2014). Gayrimenkul tokenizasyonu için önerilen sistem mimarisi, işlevsel açıdan birbiriyle entegre çalışan üç temel katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar, fiziksel tapu-kadastro verisinden zincir üzerindeki token yönetimine kadar olan süreci sistematik olarak ele almaktadır.

##### 4.1. Varlık Dijitalleştirme Katmanı

Bu katman, fiziksel gayrimenkul verisinin blok zinciri ortamında temsil edilebilir bir dijital forma dönüştürülmesinden sorumludur. Temel aşamalar şunlardır:

- ✓ **Veri Toplama ve Doğrulama:** Gayrimenkule ait kritik veriler (ada numarası, parsel numarası, yüzölçümü, malik bilgisi, hissesi, niteliği, takyidatlar vb.) yetkili kamuya ait tapu-kadastro sistemlerinden API (iki yazılım bileşeninin belirli tanımlar ve protokoller aracılığıyla birbiriyle iletişim kurmasına olanak tanıyan mekanizmalardır) veya güvenli ağ protokolleri (verilerin bir iletişim ağ üzerindeki farklı cihazlar arasında nasıl iletileceğini belirleyen yerleşik kurallar) aracılığıyla alınır. Bu adım, blok zincir üzerindeki bilginin hukuki ve fiziksel (teknik) gerçeklikle uyumunu ve entegrasyonunu sağlamaktadır.
- ✓ **Benzersiz Kimlik (Unique Asset ID) Oluşturma:** Doğrulanmış tapu-kadastro verisi setine özgü, değiştirilemez bir kimlik (ID) atanır. Benzersiz Kimlik, kriptografik imzalama ve hash kavramları genellikle digital varlıkların güvenli şekilde tanımlanması, izlenmesi ve doğrulanması için bir arada kullanılır.
- ✓ **Kriptografik İmzalama ve Hash Üretimi:** Kriptografi, bilgiyi erişime karşı şifreyerek koruma yöntemidir. Amaç, veriyi gizli ve bütün halde tutmaktır. Tokenizasyonda token oluşturma veya şifreleme-çözme sürecinde kriptografik algoritmalar (yazılım kodu) kullanılır. Tapu-kadastro verilerinin bütünlüğünü ve orijinalliğini kanıtlamak amacıyla, bu veriler standart hash algoritmaları (örneğin, SHA-

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

256, HMAC) kullanılarak özetlenir (hashing). Bu özet (hash), varlığın parmak izi niteliğindedir ve blok zincirine kaydedilecek olan nihai veri referansını oluşturur.

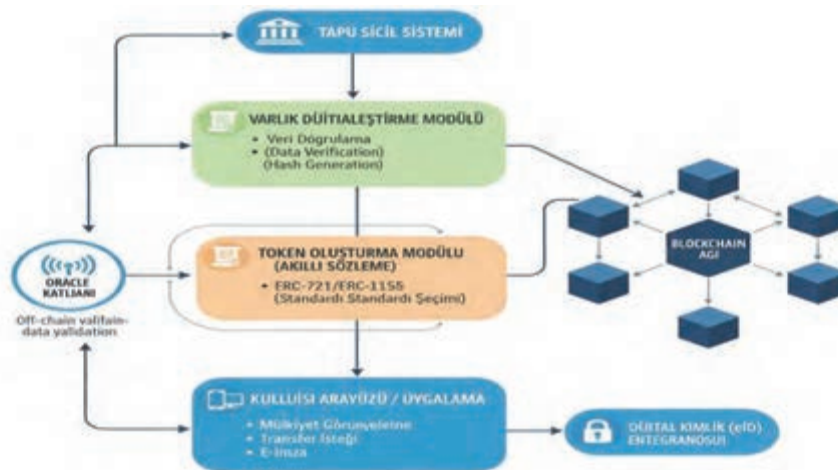
#### 4.2. Token Üretim ve Yönetim Katmanı

Bu katman, dijital varlıkların zincir üzerindeki temsili olan tokenların oluşturulduğu ve yönetildiği merkezi mekanizmadır.

- ✓ **Token Standardı Seçimi:** Tokenın gayrimenkulü nasıl temsil edeceğine bağlı olarak uygun bir blok zinciri token standardı seçilir.
  - **Tekil (Bölünemez) Mülkiyet İçin: ERC-721** (Non-Fungible Token- NFT) standardı, her bir tokenın benzersiz bir taşınmazı/gayrimenkulü veya varlığı temsil etmesi için tercih edilir.
  - **Paylı (Bölünebilir/Fraksiyonel) Mülkiyet İçin: ERC-1155** veya özel olarak tasarlanmış fraksiyonel token standartları, bir gayrimenkulün mülkiyetinin birden fazla dijital paya bölünerek yönetilmesine olanak tanır.
- ✓ **Akıllı Sözleşme Geliştirilmesi:** Tokenların tüm yaşam döngüsü (üretimi, transferi, kısıtlamalar, tapu doğrulama kuralları) bu katmanda yer alan akıllı sözleşmeler tarafından yönetilir. Sözleşmeler, mülkiyet transferinin sadece belirli koşullar (örneğin, resmî kurum onayı) sağlandığında gerçekleşmesini zorunlu kılarak hukuki güvenliği sağlar (Köksal, 2020). Token sahipliği değiştiğinde, bu değişiklik blok zincirinin dağıtık defterine kalıcı ve değiştirilemez biçimde kaydedilir. Bir başka ifadeyle akıllı sözleşmeler; gayrimenkul tokenleştirmede, mülkiyeti doğrulama, alım-satım işlemlerini yönetme, kazançları dağıtma ve yatırımcı haklarını uygulama gibi temel süreçleri otomatikleştirirler.

#### 4.3. Veri Entegrasyonu ve Yetkilendirme Katmanı

- ✓ Tokenizasyonun hukuki geçerliliğini ve işlevselliğini sağlamak için blok zinciri dışındaki (off-chain) resmî verilerle entegrasyon kritik öneme sahiptir.
- ✓ Oracle Mekanizması: Resmî kurum sistemleriyle (Tapu-Kadastro) blok zinciri arasındaki veri akışı, oracle katmanı üzerinden sağlanır. Oracle, zincir dışı verileri (örneğin, tapu müdürlüğü onay kayıtları, haciz bilgileri) güvenilir bir şekilde zincire taşır ve akıllı sözleşmelerin bu verilere göre kararlar almasını sağlar.
- ✓ Dijital Kimlik (eID) Entegrasyonu: Kullanıcıların yasal olarak tanımlanabilmesi ve işlemleri yetkilendirebilmesi için Dijital Kimlik (eIDAS, e-Devlet) sistemleriyle entegrasyon zorunludur. Bu entegrasyon, blok zincirinde gerçekleşen token transfer işleminin gerçek bir kişiye ve yasal yetkiye dayandığını kanıtlayarak hem teknik hem de hukuki bir güven zinciri oluşturur. Çoklu imza ve doğrulama mekanizmaları ile Devlet yetkilileri ve bankaların onayı olmadan token transferi yapılamaz.



Şekil 1. Gayrimenkul Tokenizasyon Mimarisi

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

Bu akışta, varlık dijitalleştirme modülü (veri doğrulama, Hash üretimi) ile blok zinciri ağı arasındaki etkileşim, hukuki uygunluk için oracle tabanlı doğrulama katmanını içermelidir. Nihai olarak, son kullanıcılar mülkiyetlerini görüntüleme, transfer talebinde bulunma ve bu talebi e-imza ile yetkilendirme gibi işlemleri kullanıcı arayüzü (cüzdan uygulaması) üzerinden gerçekleştirebilirler. Gayrimenkul tokenizasyonu gibi hassas bir alanda blok zinciri seçimi, sistemin güvenliği ve entegrasyon kabiliyeti açısından hayati öneme sahiptir.

- **Ağ Türü:** Kamusal sistemlerle yüksek düzeyde entegrasyon ve resmî denetim gerekliliği nedeniyle, izinli (permissioned) blok zincirler (örneğin, Hyperledger Fabric (Cachin, 2016)) veya regülatif gereksinimlere uyum sağlayan izinli Ethereum Sanal Makinesi (EVM) uyumlu ağlar genellikle tercih edilir. İzinli yapılar, ağa katılan düğümlerin ve doğrulayıcıların kimliklerinin bilinmesini ve yetkilendirilmesini zorunlu kılar.
- **Gizlilik Mekanizmaları:** Tapu bilgilerinin gizliliğini korumak amacıyla, verilerin blok zinciri yerine IPFS (InterPlanetary File System) gibi dağıtık dosya sistemlerinde veya özel (private) zincir tabanlı veri saklama çözümlerinde tutulması uygun bir yaklaşımdır. Zincirde sadece verinin hash değeri ve mülkiyet kanıtı yer alır.
- **İşlem Doğrulaması:** Transfer işlemlerinin gizliliğini artırmak için Zero-Knowledge Proof (ZKP) veya hash tabanlı mülkiyet kanıtı (hash-based ownership proof) mekanizmaları entegre edilebilir. ZKP, işlem yapan tarafın kimlik veya mülkiyet bilgilerini ifşa etmeden işlemin geçerliliğini kanıtlamasına olanak tanır.

Gayrimenkul tokenizasyonu, gayrimenkul mülkiyetinin ve yönetiminin merkeziyetsiz, güvenli, şeffaf ve izlenebilir bir yapıya kavuşmasını sağlayan teknolojik bir devrim potansiyeli taşımaktadır. Burada Merkeziyetsizlik mülkiyetin dijitalleşmesi, daha yaygın katılım, teknolojiyle dönüşüm olarak ortaya çıkmaktadır. Önerilen üç katmanlı mimari (Varlık Dijitalleştirme, Token Yönetimi, Veri Entegrasyonu), fiziksel ve hukuki gereklilikleri blok zinciri teknolojisinin getirdiği yenilikçi mekanizmalarla (akıllı sözleşmeler, oracle, eID entegrasyonu) başarılı bir şekilde birleştirmeyi hedeflemektedir. Bu sistem, geleneksel mülkiyet transfer süreçlerindeki maliyetleri ve süreyi önemli ölçüde azaltırken, yatırım ve finansal erişimi artırarak global gayrimenkul piyasalarında yeni bir dönemi başlatabilir.

## 5. Gayrimenkul Tokenizasyonunun Literatür Çalışmalarından Çıkarımlar

Bu çalışmada; Web of Science yazılımı kullanılarak yapılan sorgulamalarda buluna 38 adet başlığında “blockchain-tokenization” kelimesinin geçtiği makalelerin sayısı azaltılarak başlığında “real estate-tokenization” kelimeleri bulunan 2021-2025 yılları arasında 10 adet makale ve bu makalelerin bazı referans kaynakları incelenmiştir. Ayrıca dünyada gayrimenkul tokenizasyon uygulamaları hakkında bilgilere ulaşılmaya çalışılmıştır. Gayrimenkul tokenizasyon ile ilgili incelenen çalışmalardan potansiyel kullanım kapasitesine rağmen literatürün taraması ile elde edilen birçok çıkarımlar irdelendiğinde; gayrimenkul sektöründe tokenleştirmenin mevcut durumu ve gelecekteki potansiyeli hakkında bir analiz sunulmaktadır. 2021–2025 yılları arasında gayrimenkul tokenizasyonu (RWT) üzerine yazılmış önemli akademik makalelerden ön plana çıkan sonuçlar aşağıda sunulmaktadır. Bunlar şunlardır;

- Blok zincir teknolojisinin gayrimenkul sektöründeki potansiyeli vurgulanmaktadır. Özellikle şeffaflık, güvenlik ve verimlilik gibi avantajları sayesinde, gayrimenkul varlıklarının tokenizasyonunun sektördeki geleneksel engelleri aşabileceği belirtilmektedir (Joshi & Choudhury, 2022).
- Merkeziyetsiz kimlik (SSI) ve akıllı sözleşmeler kullanarak gayrimenkul transferlerinin doğrulanmasını öneren bir çerçeve sunulmaktadır. Bu yaklaşımın, kimlik ve mülkiyet sahteciliğini önlemeye yardımcı olabileceği ve dijital pazarlarda güvenliği artırabileceği ifade edilmektedir (Shehu, & Pinto, 2022).
- Blok zincir tabanlı tokenizasyonun altyapı yatırımı ve geliştirilmesindeki geleceğini inceleyen bir Delphi tabanlı senaryo analizi yapılmıştır. Tokenizasyonun altyapı finansmanında devrim yaratma potansiyeline sahip olduğu, ancak karşılaşılan belirsizlikler ve zorluklar tartışılmaktadır (Tian & Wang, 2022).
- Gayrimenkul piyasasında tokenizasyon uygulamaları, örgüt-teknoloji-çevre (TOE) çerçevesiyle ele almış ve 75 hakemli makaleyi sistematik olarak incelenmiştir. Tokenizasyonun faydaları arasında artırılmış likidite, daha geniş yatırımcı erişimi, maliyet ve işlem süresinde azalma, şeffaflık ve otomasyon gibi unsurlar yer almaktadır. Ancak, uygulamalarda önemli engeller bulunduğu tespit edilmiştir: bunlar teknoloji riskleri (örneğin siber güvenlik, akıllı sözleşmelerin hataları), farklı ülkelerdeki regülasyonel eksiklikler, kuruluşların

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

merkeziyetsiz varlık modellerine yönelik temkinli tutumu gibi. Başarılı için üç önemli ihtiyaç ön plana çıkmaktadır: bunlar yatırımcı eğitimi, teknoloji standartlarının oluşturulması ve regülasyonel uyum/harmonizasyondur. Ayrıca makale gelecekteki araştırmalar için önemli boşlukları işaret etmektedir: ölçeklenebilirlik, kurumsal entegrasyon, risk yönetimi gibi alanlarda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, gayrimenkul tokenizasyonu büyük potansiyele sahip olduğu ancak uzun vadeli başarısı, sağlam yasal çerçevelerin geliştirilmesine ve geleneksel finans sistemleriyle sorunsuz entegrasyona bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Jaouhari & Samadhya, 2025).

- Gayrimenkul tokenizasyonun dönüşümün önünde düzenleyici belirsizlikler, piyasa standardizasyonu eksikliği ve yatırımcı güveni gibi engeller bulunduğunu vurgulanmaktadır. Tokenizasyonun gayrimenkul finansmanında devrim yaratma potansiyeline sahip olduğu, fakat bu dönüşümün kademeli ve düzenleyici yasal altyapı ile uyumlu biçimde gerçekleşebileceği belirtilmektedir. (Baum, 2020).
- Tokenizasyonun gayrimenkul piyasalarında yatırımın demokratikleşmesini, likiditenin artmasını ve işlem maliyetlerinin düşmesini sağlayabileceği belirtilmektedir. Ancak, bu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleşebilmesi için regülasyon eksikliği, yatırımcı eğitimi yetersizliği ve teknolojik standartların tutarsızlığı gibi sorunların çözülmesi gerektiğini vurgulanmaktadır. Makale, Singapur, Hong Kong ve Japonya gibi ülkelerin pilot projeler ve düzenleyici sandbox'lar aracılığıyla öncü rol üstlendiğini; buna rağmen genel olarak APAC(Asia-Pacific) piyasasının hâlâ erken benimseme aşamasında olduğunu ifade edilmektedir. Tokenizasyonun geleceği umut verici olsa da kurumsal güven ve yasal netlik sağlanmadan geniş çaplı bir dönüşümün mümkün olmayacağı vurgulanmaktadır. (Chow & Tan, (2022).
- Almanya'da gayrimenkul tokenizasyonunun mevcut durumunu, düzenleyici çerçevesini ve uygulanabilir teknik modeller incelenmektedir. Gayrimenkul piyasasının dijitalleşme sürecinde tokenizasyonun potansiyelini analiz edilirken hem yasal engelleri hem de teknolojik fırsatları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Sonuçta; Almanya'nın gayrimenkul tokenizasyonunda Avrupa içinde öncü bir ekosistem oluşturma potansiyeline sahip olduğu ortaya koyulmaktadır. Bunun için hukuki çerçevenin netleştirilmesi, dijital tapu entegrasyonu ve güvenilir teknik altyapıların geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Henker, & Atzberger, 2023).
- Gayrimenkul yatırım dünyasında geleneksel modele dayalı finansallaşmadan (özellikle REITs = Gayrimenkul Yatırım Ortaklıkları-GYO) başlayarak, blok zincir tabanlı tokenizasyon aracılığıyla ortaya çıkan model karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Makale, gayrimenkul piyasasının finansallaşmadan (mülkiyetin ürünleşmesi, portföyleşme, likidite artışı) desantralizasyona (mülkiyetin dijitalleşmesi, daha yaygın katılım, teknolojiyle dönüşüm) doğru evrildiğini öne sürmektedir. Gayrimenkul piyasasının tarihsel ve yapısal dönüşümünü anlatılmakta, mülkiyetin nasıl el değiştirdiği ve yatırım aracına dönüştüğü süreci ortaya koymaktadır. Finansallaşma süreciyle gayrimenkul mülkiyeti portföylerin bir parçasına dönüşerek likit hale geldiği; şimdi ise tokenizasyon süreciyle bu likidite dijitalleşme sayesinde daha da artarak küresel ölçekte erişilebilir hale geldiği vurgulanmaktadır (Liu & Chen, 2025).
- Gayrimenkul sektöründe blok zincir ve tokenizasyon teknolojilerinin gerçekte ne ölçüde uygulandığını ve potansiyellerinin ne olduğunu sorgulanmaktadır. Makale, bu teknolojilerin "vaat edilen faydaları" ne kadar gerçekleştirebildiğini, karşılaşılan engelleri ve bundan sonra ne yapılması gerektiğini tartışmaktadır. Makalede tokenizasyonun zorluklarından bahsedilmektedir. Bunlar; düzenleyici çerçeve belirsizlikleri, tokenleştirilmiş gayrimenkul paylarının hukuki statüsünün net olmadığını, tokenin menkul kıymet mi yoksa gayrimenkul yatırımı mı olarak değerlendirileceği hususunda belirsizlikler olduğunu ortaya koymaktadır. Blok zincir uygulamalarının ölçeklendirilmesi, likidite yaratılması, yatırımcıların ve kullanıcıların alışması gibi süreçler hâlâ erken aşamada olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca makalede, teknolojik vaatlerle gerçek uygulama arasında bir bağlantı kurulmaya çalışılmakta; vaat edilen faydaların ne kadar gerçekleştiği sorusuna cevap bulunmaya çalışılmaktadır. Burada teknolojik olarak vaat edilen tüm faydalar otomatik olarak gerçekleşmediğinden bahsediliyor; örnek olarak tokenize edilmiş bir mülkünden gerçekten kolayca satılması, likiditenin yaratılmasının garanti olmadığını, yasal ve düzenleyici kurallar ile ilgili netlik olmadığı ortaya koyulmaktadır. Tokenizasyonun sadece teknik bir çözüm değil; iş modeli, yönetim, piyasa kabulü gibi sosyal ve kurumsal boyutlarının var olduğunu, bu nedenle çok disiplinli bir yaklaşım önerilmektedir. (Moriarty, 2023)
- Çalışmada yer alan 26 ampirik uygulama üzerinden birkaç ülke/örnek öne çıkmaktadır. Aşağıda kısa ve öz biçimde yer alan bazı ülke-örneklerini şunlardır.
  - Estonia: Kamu kayıt sistemlerinde blok zincir denemeleri yapılmış (ulusal tapu-kadastro sistemlerine blok zincir eklemesi olarak)

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

- Georgia: Mülkiyet kayıtlarında blok zincir teknolojisinin kullanımıyla ilgili vaka analizleri yapılmıştır.
- Sweden: Blok zincir ile kadastro/arsa kayıt sistemindeki dönüşümlerden bahsedilmiş; ancak çok büyük ölçekli değil, “mevcut sisteme ek katman” şeklinde uygulamalar görüldüğü tespit edilmiştir.
- United Arab Emirates (özellikle Dubai): Gayrimenkul ve tapu kayıtlarında blok zincir uygulamalarına dair çalışmalar olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada görüldüğü üzere, blok zincir uygulamaları çoğunlukla arsa/arazi yönetimi alanında yoğunlaşmış; gayrimenkul tokenizasyonu veya yönetim gibi alanlarda sayısal olarak çok daha az ampirik uygulama bulunduğundan bahsedilmektedir (Saari & Vimpari, 2022).

## 6. SONUÇ

Gayrimenkul tokenizasyonu, yapılan çalışmalarda blok zincir teknolojisinin yatırım dünyasına sunduğu en dikkat çekici dönüşüm uygulamalarından biri olduğu anlaşılmaktadır. Taşınmaz varlıkların dijital tokenlara dönüştürülmesiyle birlikte, geleneksel gayrimenkul yatırımlarında karşılaşılan yüksek katılım maliyeti, düşük likidite ve sınırlı erişim gibi sorunlarına tokenizasyon ile daha etkili çözümler sunulabilmektedir. Bu modelin, hem mülk sahiplerine alternatif finansman yöntemleri yaratmakta hem de yatırımcılara daha şeffaf, düşük maliyetli ve kolay erişilebilir yatırım fırsatları sunduğu anlaşılmaktadır.

Uluslararası alanda sistematik literatür taraması üzerinden yapılan tokenizasyon ile ilgili araştırmalardan, gayrimenkul tokenizasyonunun likidite, maliyet düşüşü, daha hızlı işlemler ve yatırımcı katılımı gibi avantajları ortaya koyarken; yasal düzenleme ve denetleme eksikliği, teknolojik riskler ve kurumsal direnç gibi engeller nedeniyle uygulamaların sınırlı kaldığı ortaya koyulmuştur. Buna rağmen gayrimenkul tokenleştirme kavramı henüz yeni ortaya çıkmış olsa da küresel çapta çeşitli pazarlarda kayda değer uygulamalara tanıklık etmiştir. Bu erken uygulamalar, gayrimenkul varlıklarının tokenleştirilmesinin potansiyeli ve pratikliği hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Özellikle Amerika, Birleşik Arap Emirlikleri, İngiltere, Singapur vb. gayrimenkul piyasalarında gelişmiş olan ülkelerde ticari, konut, tarihi binalar tokenleştirilerek, yatırımcıların mülkün bir payını temsil eden tokenları satın almalarına olanak sağlanmıştır. Bu girişimler, büyük ölçekli yatırımların yönetilmesinde ve getirilerin verimli bir şekilde dağıtılmasında tokenleştirmenin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Ancak bu dönüşüm yalnızca teknolojik değil; aynı zamanda hukuki, finansal ve yapısal düzenlemeleri gerektiren çok katmanlı bir süreç olduğu uzmanlar tarafından özellikle vurgulanmaktadır. Akıllı kontrat güvenliği, regülasyonlara uyum, yatırımcı doğrulama sistemleri ve tapu kayıt sistemleriyle entegrasyon gibi konular, bu alandaki gelişimin sürdürülebilirliği açısından kritik önemde olduğu literatür çalışmalarıyla öne çıkmaktadır. Doğru altyapı ve net yasal çerçevelerle desteklenen tokenizasyon modelleri, önümüzdeki dönemde gayrimenkul piyasasının küresel ölçekte daha kapsayıcı, verimli ve yenilikçi bir yapıya kavuşmasına öncülük edeceği anlaşılmaktadır. Gayrimenkul ve arazi yönetimi gibi muhafazakar bir sektörde bu anlayış bilgi asimetrisi gibi sektör sorunlarını çözebilecek teknik ve hukuki geçerliliği olan bir dijitalleşmede etkili ve başarılı olabilir olduğunu gösterebilir.

Gayrimenkul tokenizasyonu, tapu-kadastro sistemlerinin dijitalleşmesi ve arazi yönetiminin modernizasyonu açısından kritik bir yenilik alanı olarak öne çıkabilir. Türkiye’deki dijital tapu-kadastro altyapısı, bu dönüşüm için sağlam bir temel sunsa da özellikle veri altyapısında veri kalitesinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve blok zincir ile tapu ve kadastro sisteminin entegrasyonu hem hukuki hem teknik açıdan çok yönlü bir çalışmayı gerektirmektedir.

Gayrimenkul tokenizasyonu umut vaat etse de zorluklarla da karşı karşıyadır. Mevzuat engelleri, piyasa kabulü ve teknolojik sınırlamalar yaygın benimsenmeyi yavaşlatmıştır. Yatırımcının korumasını sağlamak, yerel gayrimenkul yasalarıyla uyum sağlamak ve birlikte çalışabilir platformlar geliştirmek bu alanda devam eden temel zorluklardır.

Gayrimenkul ve blok zinciri teknolojisinin entegrasyonu hala gelişme aşamasındadır. Teknolojik gelişmeler devam ettikçe ve dijital varlıklarla ilgili düzenleyici çerçeveler olgunlaştıkça, gayrimenkul tokenizasyonunun yatırım ortamını yeniden şekillendirme potansiyeli muhtemelen artacaktır. Sektör, daha yenilikçi uygulamalar, gelişmiş platform işlevleri ve daha fazla kabul görme gibi zorlukları ancak büyük ölçekli projeler ile aşabilecektir. Tokenizasyonun gayrimenkul hukuku, menkul kıymetler düzenlemesi ve dijital varlık mevzuatının kesişim noktasında yer aldığı göz önüne alındığında, bu alanda yol almak karmaşık ve zorlu olabilir. Özellikle düzenleyici kurumlar, tokenleştirilecek gayrimenkulün geleceğini şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Yatırımcı çıkarlarını korurken inovasyonu teşvik eden dengeli bir ortam yaratmaktan sorumludurlar. Mevcut yasaları bu yeni yatırım biçimine uyarlayacak şekilde düzenlemeler yapmak kritik öneme sahiptir.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

Blok zincir teknolojisindeki gelecekteki gelişmeler, gayrimenkul tokenizasyonunun ölçeklenebilirliğini, hızını ve güvenliğini önemli ölçüde etkileyecektir. Farklı blok zincir platformları arasında birlikte çalışabilirlik gibi blok zincir altyapısındaki iyileştirmeler, daha verimli ve güvenli işlemleri kolaylaştıracaktır. Teknolojik standardizasyonun sağlanması ile tokenleştirme süreçleri ve blok zinciri birlikte çalışabilirliği için endüstri standartlarının geliştirilmesi ve benimsenmesi, sorunsuz işlemlerin ve mevcut gayrimenkul sistemleriyle entegrasyonun sağlanması açısından önemli olacaktır. Gayrimenkul tokenizasyonu gayrimenkul piyasalarının ve mülkiyet sistemlerinin modernizasyonunda önemli bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Gayrimenkul yatırımının geleceğini şekillendiren, onu dünya çapındaki yatırımcılar için daha erişilebilir, likit ve verimli hale getiren önemli bir oyuncu haline getirmektedir. Ancak bu potansiyelin gerçekleşebilmesi için teknolojik ve veri/bilgi altyapının yanı sıra yasal ve kurumsal çerçevenin de eş zamanlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece, tokenizasyonun sağladığı likidite, küresel gayrimenkul piyasalarına erişim, şeffaflık, güvenlik ve işlem hızı avantajları yanı sıra arazi yönetimi ve mülkiyet kayıt sistemlerinde kalıcı ve etkili bir dönüşüm yaratabilir. Önümüzdeki dönemde bu alanda yapılacak pilot uygulamalar ve kamu-özel sektör iş birlikleri, tokenizasyona uygun gayrimenkul pazarının küresel ölçekte yaygınlaşmasında belirleyici rol oynayacaktır. Tokenleştirme geliştikçe, gayrimenkul sektörüyle etkileşim ve yatırım yapma biçimimizi dönüştürecek daha da heyecan verici olasılıkların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Tokenizasyon gibi yatırımcı dostu bir hizmet ile gayrimenkul ekosisteminin daha işlevsel çalışmasına katkı sağlayacaktır. Bu bağ, gayrimenkul/arazi piyasasının, yönetiminin ve finansmanın iyileştirilmesinde dönüştürücü bir anahtar olarak tetikleyici bir güce sahip bir potansiyeli barındırmaktadır.

---

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

## KAYNAKLAR

- Baum, A. (2020) Tokenisation: The future of real estate investment? Saïed Business School, Oxford University, Oxford. <https://www.sbs.ox.ac.uk/sites/default/files/2020-01/tokenisation.pdf>
- Baum, A. (2021) Tokenization-The Future of Real Estate Investment? The Journal of Portfolio Management, 47(10). DOI: 10.3905/jpm.2021.1.260.
- Buterin, V. (2014) A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. Ethereum Whitepaper.
- Cachin, C. (2016) Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric. IBM Research.
- Chow, Y. L., Tan K. K. (2022) Real Estate Insights Is tokenization of real estate ready for lift off in APAC? Journal of Property Investment & Finance, 40(3). <https://doi.org/10.1108/JPIF-10-2021-0087>.
- Hashank, J., Choudhury, A. (2022) Tokenization of Real Estate Assets Using Blockchain. International Journal of Intelligent Information Technologies, 18(3). <https://orcid.org/0000-0003-0072-4001>.
- Henker, R., Atzberger, D. (2023) Real Estate Tokenization in Germany: Market Analysis and Concept of a Regulatory and Technical Solution. 2023 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC), Dubai, United Arab Emirates. DOI: 10.1109/ICBC56567.2023.10174954.
- Jaouhari, A., Samadhya, A. (2025) Tokenization And The Future Of Property Investment: A New Paradigm For Real Estate. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/IJSPM/article/view/24814/13063>.
- Joshi, R., Choudhury, A. (2022) Tokenization of Real Estate Assets Using Blockchain. <https://www.igi-global.com/gateway/article/full-text-pdf/309588&riu=true>.
- Köksal, A. (2020) Blockchain ve Gayrimenkul Yönetimi: Tapu Tokenizasyonu Uygulamaları. Akademik Yayınlar.
- Liu, A., Chen, C. (2025) From real estate financialization to decentralization: A comparative review of REITs and blockchain-based tokenization. Geoforum, 159. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2024.104193>.
- Moriarty, C. (2023) Is RealT Reality? Investigating the Use of Blockchain Technology and Tokenization in Real Estate Transactions. Minnesota Journal of Law Science&Technology, 424(2). <https://scholarship.law.umn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1544&context=mjlst>.
- Mougayar, W. (2016) The Business Blockchain: Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology. Wiley.
- Saari, A., Vimpari, J. (2022) Blockchain in real estate: Recent developments and empirical applications. Land Use Policy, 121. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106334>.
- Shehu, A., Pinto, A. (2022) A Decentralised Real Estate Transfer Verification Based on Self-Sovereign Identity and Smart Contracts. <https://www.scitepress.org/Papers/2022/113847/113847.pdf>.
- Swan, M. (2015) Blockchain: Blueprint for a New Economy. O'Reilly Media.
- The Comprehensive Guide to Real Estate Tokenization. (2024) <https://www.zoniq.com/resources/revolutionizing-property-markets-the-comprehensive-guide-to-real-estate-tokenization>.
- Tian, Y., Wang, C. (2022) The Future of Blockchain-Enabled Tokenization in Infrastructure Investment and Development: A Delphi-Based Scenario Analysis. DOI: 10.48550/arXiv.2208.04710. <https://arxiv.org/abs/2208.04710>.
- Türk Bilişim Vakfı (TBV). (2024) Tokenizasyon Geleceğin Para ve Varlık Sistemi. <https://bctr.org/bctr-rapor-tokenizasyon-gelecegin-para-ve-varlik-sistemi-31355/>.

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0532) 675 93 61

E-posta: orharita@gmail.com (Orhan MATARACI)

20. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1-3 Ekim 2025, Ankara.

## Toprak Gaspından Veri Gaspına: Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. Yılında Dijital Sömürgecilik Karşısında Ulusal Veri Egemenliği Modeli

Yasemin KULEYİN

### Genişletilmiş Özet

Bu bildiri, Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. yılında, tarihsel toprak gaspı ile günümüz veri sömürgecilği arasındaki yapısal benzerlikleri inceleyerek, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün (TKGM) 200 yıllık deneyiminin dijital çağda veri egemenliği için sunduğu çözüm potansiyelini analiz etmektedir. Çalışma, GAFAM şirketlerinin veri çıkarım uygulamaları ile sömürgeci dönem toprak gaspı yöntemleri arasındaki paralellikler kurarak, aynı aktörlerin farklı dönemlerdeki rollerini ortaya koymaktadır. TKGM'nin TAKBİS başarısı, epok-normalizasyon kapasitesi ve ilk tesis tespit tutanağı uygulamaları, dijital veri kadastro modelini için emsal teşkil etmektedir. Bildiri, veri satışı yetkilerinin düzenlenmesi ve sosyal verinin önemi bağlamında, ulusal veri egemenliği için somut politika önerileri sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Veri sömürgecilği, dijital kolonializm, kadastro, veri egemenliği, TKGM, GAFAM, toprak gaspı

#### 1. Giriş: İki Sömürgecilik Çağının Kesişimi

Türkiye Kadastro Kanunu'nun yürürlüğe girdiği 1925 yılından bu yana geçen 100 yıl, insanlığın iki farklı sömürgecilik dalgasına tanıklık etmiştir. İlki, toprak ve doğal kaynaklar üzerinden gerçekleştirilen geleneksel sömürgecilik; ikincisi ise Nick Couldry ve Ulises A. Mejias'ın (2019) kavramsallaştırdığı “veri sömürgecilği” olarak adlandırılan 21. yüzyılın yeni sömürgecilik biçimidir. Bu iki dönem arasındaki yapısal benzerlikler, sadece metaforik değil, kapitalizmin evrimsel sürekliliğini gösteren somut paralellikler içermektedir. Veri sömürgecilği, “tarihsel sömürgecilğin yarıcı çıkarımcı uygulamalarını bilgisayarın soyut nicelleştirme yöntemleriyle birleştiren” bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, günümüzde Google, Amazon, Facebook, Apple ve Microsoft (GAFAM) şirketlerinin geliştirmekte olan ülkelerdeki faaliyetlerinde somut karşılığını bulmaktadır. Özellikle Afrika'da gözlemlenen dijital sömürgecilik uygulamaları, 54 ülkeden sadece 36'sında veri koruma yasasının bulunması ve düzenleyici kurumların yetersizliği ile karakterize edilmektedir.

Bu bağlamda, TKGM'nin 200 yıllık kurumsal deneyimi ve özellikle son 20 yıldaki dijital dönüşüm başarıları, veri egemenliği için alternatif bir model sunma potansiyeline sahiptir. TAKBİS'in 58,5 milyon parseli tek koordinat sisteminde birleştirilmesi ve 2006 eTR Ödülleri “Kamu'dan Vatandaşa e-Hizmetler Kategorisi” birinciliği, ulusal veri egemenliğinin somut bir örneğini teşkil etmektedir.

#### 2. Tarihsel Paralellikler: Toprak Gaspından Veri Gaspına

##### 2.1 Aktör Sürekliliği ve Güç Yapıları

Tarihsel toprak gaspı ile günümüz veri gaspı arasındaki en çarpıcı benzerlik, aktörlerin coğrafi ve sermaye kökenlerindeki sürekliliktir. 16-19. yüzyıl sömürgeci döneminde İspanyol, Portekiz, Fransız, İngiliz ve Hollanda sömürgeci güçleri ile Doğu Hindistan Şirketi gibi korporasyonların oynadığı rol, günümüzde ABD merkezli GAFAM şirketleri tarafından dijital alanda sürdürülmektedir. Bu süreklilik, sadece coğrafi değil, aynı zamanda yapısal bir karaktere sahiptir. Tarihsel dönemde “az sayıda sahibin toprak kontrolü ile başkalarının emeğinin meyvelerini talep etmesi” şeklinde tanımlanan asimetrik mülkiyet ilişkileri, günümüzde veri tekeliyle ve algoritmik manipülasyon yoluyla yeniden üretilmektedir. Silicon Six'ın (Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft, Netflix) 2011-2020 arası tahmini 100 milyar USD vergi açığı, bu asimetrik yapının ekonomik boyutunu göstermektedir.

##### 2.2 Çıkarım Yöntemlerinin Evrimi

Sömürgecilik yöntemlerinin fiziksel şiddetten algoritmik manipülasyona evrimi, dikkat çekici bir dönüşümü yansıtmaktadır. Tarihsel dönemde “zorla el koyma, yasal manipülasyon ve şiddet” yoluyla gerçekleştirilen toprak gaspı, günümüzde “ücretsiz hizmetler, kullanıcı sözleşmeleri ve algoritmik manipülasyon” aracılığıyla veri gaspına dönüşmüştür. Bu dönüşümde özellikle dikkat çekici olan, meşrulaştırıcı söylemlerin benzerliğidir. Sömürgeci dönemin “uygarlaştırma misyonu” ve “kalkınma vaatleri”, günümüzde “teknolojik ilerleme”, “bağlantı sağlama” ve “ücretsiz hizmetler” söylemiyle yer değiştirmiştir. Meta'nın (Facebook) 2021'de WhatsApp gizlilik politikası güncellemesi ile telefon numaraları, cihaz tanımlayıcıları ve ödeme verilerinin paylaşımına başlaması, bu meşrulaştırıcı söylemlerin arkasındaki gerçek amacı ortaya koymaktadır.

#### 3. TKGM'nin Emsal Uygulamaları ve Veri Egemenliği Denevimi

##### 3.1 TAKBİS Başarısı: Ulusal Veri Egemenliğinin Somut Örneği

TKGM'nin Tapu ve Kadastro Bilgi Sistemi (TAKBİS) uygulaması, ulusal veri egemenliği için emsal teşkil eden bir başarı hikayesidir. 58,5 milyon parselin tek koordinat sisteminde birleştirilmesi, sadece teknik bir başarı değil, aynı zamanda veri sömürgecilğine karşı alternatif bir model sunmaktadır. Bu başarı, GAFAM şirketlerinin veri manipülasyonuna karşı güvenilir bir alternatif oluşturma potansiyelini göstermektedir.

TAKBİS'in kurumlar arası veri paylaşım kapasitesi, dijital veri kadastro modelini için kritik bir deneyim sunmaktadır. Gelir İdaresi ile e-tahsilat, Noterler Birliği ile vekaletname/miras doğrulama, Adalet Bakanlığı ile elektronik rehin kurma/kaldırma, bankalarla e-ipotek ve e-satış-ipotek işlemleri, veri egemenliğinin kurumsal boyutunu örneklemektedir.

### **3.2 Epok-Normalizasyon ve Kalite Yönetimi Kapasitesi**

TKGM'nin jeodezik-kadastro veri yönetimindeki epok-normalizasyon kapasitesi, veri sömürgeciliğine karşı teknik bir alternatif sunmaktadır. Tescile esas jeodezik-kadastro üretimlerin zamana bağlı değişim (epok/hız ve deformasyon) yönetimi, BÖHHBÜY ile uyumlu kalite güvencesi ve referans sistem yönetimi, dijital veri kadastro sunumunun teknik temelini oluşturmaktadır.

Referans epoku yönetimi ( $t_{ref} = 2005.0$ ), hız ve deformasyon modeli, düşey/yükseklik dönüşümü, saha kalibrasyonu protokolleri ve kalite metaverisi etiketleme sistemleri, GAFAM şirketlerinin opak algoritmalarına karşı şeffaf ve güvenilir bir alternatif model sunmaktadır.

### **3.3 Veri Satışı Modeli ve Yetki Düzenlemeleri**

TKGM'nin "Tescil Sonrası Jeodezik-Kadastro Verilerinin Epok-Normalizasyonu ve Kalite Etiketlemesiyle Ürünleştirilmesi" modeli, veri satışı yetkilerinin nasıl düzenlenmesi gerektiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Tescil kaydı ile türev veri ürünü ayrımı, koşullu veri satışı modeli ve izlenebilirlik sistemleri, veri egemenliğinin ekonomik boyutunu düzenlemektedir.

Bu model, özellikle epok-normalize sabit noktalar, parsel köşe seti türevleri, jeoit yüzeyi tabanlı düşey dönüşüm hizmeti ve deformasyon/olay katmanları gibi ürün kataloğu ile veri değerinden elde edilen gelirin adil paylaşımı için somut bir çerçeve sunmaktadır.

## **4. İlk Tesis Tespit Tutanağı ve Sosyal Verinin Önemi**

### **4.1 Sosyal Veri Etkisi ve Temsil Boşlukları**

İlk tesis kadastro sürecinde düzenlenen tespit tutanağı, hukuken mülkiyet ve sınır tespitine odaklanırken, sosyal veri açısından kritik bir potansiyel barındırmaktadır. Malik-merkezli yapının fiili kullanıcı veya hane verisini doğrudan üretmemesi, dijital sömürgecilik analizinde önemli bir paralel oluşturmaktadır.

GAFAM şirketlerinin kullanıcı verilerini toplarken gerçek ihtiyaç ve bağlamları göz ardı etmesi ile kadastro süreçlerinde fiili kullanıcıların görünmez kalması, benzer yapısal sorunları yansıtmaktadır. Bu paralellik, veri sömürgeciliğinin sadece teknik değil, aynı zamanda sosyal bir boyuta sahip olduğunu göstermektedir.

### **4.2 Dolaylı Göstergeler Üretimi ve Anonim Veri Yönetimi**

TKGM'nin TAKBİS/MEGSİS, MAKS/UAVT ve ADNKS kayıtlarının anonim ve özet düzeyde eşleştirilmesi, veri sömürgeciliğine karşı alternatif bir model sunmaktadır. Parsel başına malik sayısı, paylı mülkiyet oranı, absentee (malik adresi ≠ taşınmaz adresi) oranı, askı-itiraz oranı, çekişmeli tespit oranı ve kesinleşme süresi gibi sosyal göstergeler, KVKK uyumlu anonimleştirme ile üretilebilmektedir.

Bu yaklaşım, GAFAM şirketlerinin kişisel veri sömürsüne karşı, toplumsal fayda odaklı anonim göstergeler üretimi alternatifini sunmaktadır. Periyodik göstergeler üretimi ve kurumlar arası paylaşım protokolleri, veri egemenliğinin sosyal boyutunu güçlendirmektedir.

## **5. Dijital Veri Kadastro Modeli: Çözüm Önerisi**

### **5.1 Beş Temel İlke ve Uygulama Çerçevesi**

TKGM deneyiminden hareketle önerilen Dijital Veri Kadastro Modeli, beş temel ilke üzerine inşa edilmektedir: şeffaflık, güvenlik, egemenlik, hesap verebilirlik ve kapsayıcılık. Bu ilkeler, GAFAM şirketlerinin opak ve sömürücü uygulamalarına karşı alternatif bir çerçeve sunmaktadır.

Şeffaflık ilkesi, tüm veri işleme süreçlerinin açık ve erişilebilir olmasını; güvenlik ilkesi, hukuki güvence altında veri saklama ve işlemeyi; egemenlik ilkesi, ulusal kontrolde veri yönetimi ve paylaşımını; hesap verebilirlik ilkesi, kamu yararına hizmet eden kurumsal yapıyı; kapsayıcılık ilkesi ise dijital uçurum ve temsil yansızlığının önlenmesini hedeflemektedir.

### **5.2 Teknik Uygulama ve Sosyal Kapsayıcılık**

Dijital Veri Kadastro Modeli'nin teknik uygulaması, TKGM'nin epok-normalizasyon ve kalite yönetimi deneyiminden yararlanmaktadır. Kişisel verilerin ulusal kayıt sistemi, veri kullanım haklarının şeffaf tanımlanması, çok uluslu şirketlerin veri kullanımının denetimi ve veri değerinden elde edilen gelirin adil paylaşımı, modelin temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

Sosyal kapsayıcılık mekanizmaları, ilk tesis süreçlerindeki temsil boşluklarından çıkarılan derslerle geliştirilmektedir. Dijital uçurum kaynaklı temsil yansızlığının önlenmesi, katılım mekanizmalarında erişim adaletsizliğinin giderilmesi ve anonim göstergeler üretimi yoluyla toplumsal faydanın artırılması hedeflenmektedir.

## **6. Uygulama Yol Haritası ve Risk Yönetimi**

### **6.1 Kısa ve Uzun Vadeli Hedefler**

Dijital Veri Kadastro Modeli'nin uygulanması için önerilen yol haritası, kısa vadeli (0-12 ay) ve uzun vadeli (1-5 yıl) hedefleri içermektedir. Kısa vadeli hedefler arasında veri sözlüğü ve kalite prosedürlerinin oluşturulması, KVKK uyumlu anonimleştirme protokollerinin geliştirilmesi ve MEGSİS-MAKS-ADNKS eşleştirme sisteminin kurulması yer almaktadır.

Uzun vadeli hedefler ise dijital geri bildirim ve paylaşım sistemlerinin kurulması, belediyelerle paylaşım protokollerinin geliştirilmesi ve uluslararası veri egemenliği anlaşmalarının imzalanmasını kapsamaktadır. Bu süreçte TKGM'nin 200 yıllık kurumsal deneyimi, değişim yönetimi için kritik bir avantaj sunmaktadır.

### **6.2 Risk Analizi ve Önlemler**

Dijital Veri Kadastro modelinin uygulanmasında karşılaşılabilecek riskler, teknik, sosyal ve kurumsal boyutlarda analiz edilmektedir. Teknik riskler arasında mevzuatın tutanak içeriğini sosyal alanla genişletmeye elvermemesi, veri eşleştirmede zaman uyumsuzlukları ve kalite kontrol süreçlerinde kaynak kısıtları yer almaktadır.

Sosyal riskler, dijital uçurum kaynaklı temsil yanlılığı, yorum yanlılıkları ve bağlam kaybı ile katılım mekanizmalarında erişim adaletsizliğini kapsamaktadır. Kurumsal riskler ise kurumlar arası koordinasyon zorlukları, kapasite geliştirme süreçlerinde gecikme ve uluslararası standartlarla uyum sorunlarını içermektedir.

### **7. Sonuç ve Politika Önerileri**

Türkiye Kadastro Kanunu'nun 100. yılında, toprak gaspından veri gaspına uzanan tarihsel süreklilik, aynı zamanda çözüm arayışları için de önemli ipuçları sunmaktadır. TKGM'nin 200 yıllık deneyimi ve özellikle TAKBİS başarısı, veri sömürgeciliğine karşı alternatif bir model geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Önerilen Dijital Veri Kadastro modeli, GAFAM şirketlerinin sömürücü uygulamalarına karşı şeffaf, güvenli ve kapsayıcı bir alternatif sunmaktadır. İlk tesis tespit tutanağı deneyiminden çıkarılan sosyal veri dersleri, veri egemenliğinin sadece teknik değil, aynı zamanda sosyal bir boyuta sahip olduğunu göstermektedir.

Veri satışı yetkilerinin düzenlenmesi, epok-normalizasyon kapasitesinin geliştirilmesi ve kurumlar arası anonim gösterge paylaşımının yaygınlaştırılması, ulusal veri egemenliği için somut adımları oluşturmaktadır. Bu bağlamda, TKGM'nin emsal uygulamaları, 21. yüzyılın dijital sömürgecilik meydan okumasına karşı Türkiye'nin özgün bir yanıt geliştirme kapasitesini göstermektedir.



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

# Bildiriler Teknik Oturum 8

## Yapay Zekâ ve Yenilikçi Meslek Uygulamaları

**Oturum Başkanı:** Dr. Kaan Kalkan, *Uzaktan Algılama Grup Lideri, TÜBİTAK UZAY*

8.1. Otonom Sürüş ve İnsansı Robotlar (Tam Metin)  
(Caner Güney)

8.2. Tarım-Enerji Kesişimi İçin Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Agrivoltaik Uygunluk Analizi (Tam Metin)  
(Batuhan Kılıç)

8.3. Çok Kaynaklı Yer Gözlem Verileri Kullanılarak Açıklanabilir Mısır Rekoltesi Tahmini (Bildiri Özet)  
(Mustafa Serkan Işık, Ozan Öztürk, Mehmet Furkan Çelik)

8.4. Atmosferik ve Meteorolojik Faktörlere Dayalı Güneş Paneli Performans Tahmini (Bildiri Özet)  
(Remzi Zaman, Müslüm Hacı)

8.5. Uzayda Navigasyon (Tam Metin)  
(Caner Güney)

8.6. Güzergâh Optimizasyonunda ÇKKV ve Bir Grafik Sinir Ağı Yaklaşımının Karşılaştırmalı Analizi (Tam Metin)  
(Korcan Alpan, Firdevs Turan, Hüseyin Pehlivan)

# Otonom Sürüş ve İnsansı Robotlar

Caner Güney<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

## Özet

Otonom sürüş ve insansı robotların çalışması tamamen yapay zekâ tarafında bulunduğu ve yapay öğrenme algoritmaları kullanıldığı için makine öğrenmesi ve derin öğrenme ile doğrudan ilişkilidir. Otonom araçlar ve insansı robotlar gerçek dünya ortamında çalıştığı için Uzamsal Zekâ ile de doğrudan ilişkilidir. Otonom sürüş yalnız bir araca yönelik olmadığı, trafikte diğer sürücülü ve sürücüsüz araçlarla birlikte kullanıldığı ve özellikle kent içinde kullanıldığı için akıllı sistemlerle, akıllı şehirlerle de ilişkisi bulunmaktadır. Bu kadar geniş bir ekosisteme yayılan otonom sürüş ve otonom hareket eden sistemlere ilişkin Geomatik / Harita ve Kadastro / Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği sektörünün bir politika belirlemesi ve yol haritası oluşturması kaçınılmaz olarak görülmektedir. Bu çalışma kapsamında; HD-map kavramı, otonom sürüşe yönelik bir HD-map ürünlerinin nasıl üretilebileceği, sürücüsüz araçlarla, insansı robotlar arasında özellikle navigasyon açısından benzerlik olup olmadığı vb. konular ele alınacaktır.

## Anahtar Sözcükler

Sürücüsüz Araçlar, İnsansı Robotlar, İnsansız Savaş Araçları, HD-maps, Uzamsal Zekâ

## Abstract

Autonomous driving and the operation of humanoid robots are directly related to machine learning and deep learning, as they are entirely on the side of artificial intelligence and artificial learning algorithms are used. Since autonomous vehicles and humanoid robots operate in a real-world environment, they are directly related to Spatial Intelligence. Since autonomous driving is not directed to just one vehicle, but is used together with other driver and driverless vehicles in traffic, and is especially used in the city, it is also related to smart systems and smart cities. It is inevitable for the Geomatics Engineering sector to determine a policy and create a road map regarding autonomous driving and autonomous moving systems that spread over such a wide ecosystem. Within the scope of this study; The concept of HD-map, how HD-map products for autonomous driving can be produced, whether there are similarities between driverless vehicles and humanoid robots, especially in terms of navigation, etc. topics will be discussed.

## Keywords

Self-Driving Cars, Humanoids, Unmanned Combat Vehicles, HD-maps, Spatial Intelligence

## 1. Giriş

Sürücüsüz otomobiller veya herhangi bir gezgin robot sistemi için doğru ve güvenilir konum ve yönelim bilgisi (geopose) ile içinde bulunduğu ortamın yalnız uzamsal (geospacially) olarak değil aynı zamanda durumsal (situationally) olarak da anlaşılması (perception) kritik öneme sahiptir. Ortam gerçekliğinin zamansal-uzamsal modellenmesi, sürücüsüz otomobilin konumunu (localization), etrafındaki statik ve hareketli nesnelerin tespitini (object detection), yaya, bisikletli, başka bir araç veya yoldaki engel gibi nesnelerin türünün tanımlanmasını (object recognition) ve nesnelerin ne kadar hızlı ne yöne hareket ettiğinin (object tracking) tahmin edilmesini gerektirir. Yol işaretleri, yaya trafiği, yerel trafik kuralları, inşaat faaliyetleri ve trafik sıklığı gibi konularda bağlam farkındalığına (context awareness) sahip otonom araçlar hem nerede olduklarını hem de etraflarında neler olduğunu bilebilir. Ancak bu tür bilgiler mevcut olduğunda aracın etrafındaki kinematik ve hareket modeli (motion model) kısıtlamalarına göre yolcular için güvenli ve konforlu bir yolculuk/otonom sürüş sağlanabilir. Bunlar olmadan sürücüsüz bir araç yolculuğuna başlayamaz, otonom sürüş sistemi herhangi bir akıllı görevi yerine getiremez ve diğer yol kullanıcıları kaynaklı beklenmedik davranışlara (behavior) tepki veremez.

Otomatik araçlarda (automated vehicles) kullanılan uyarlanabilir hız sabitleyici, şeritte tutma, akıllı park asistanı gibi ADAS (Advanced Driver Assistance Systems - Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri) teknolojileri sürüşün karmaşıklığını önemli ölçüde azaltmıştır. Sürücüsüz otomobiller ise herhangi bir insan müdahalesi olmadan görevi güvenli ve hızlı bir şekilde tamamlamak üzere geliştirilmekte olan otonom araçlardır (autonomous vehicles). (Poggenhans vd., 2018) 'Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automotive Engineers, SAE)' otomatik sürüşü (automated driving) hiç otomasyon olmadığı anlamına gelen Düzey 0'dan tam otomasyon anlamına gelen Düzey 5'e kadar uzanan altı 'Otomasyon Düzeyine (Level of Automation, LoA)' ayırmaktadır.

Otonom sürüş teknolojisi son yıllarda önemli bir ilerleme kaydetmiş olsa da, henüz genel kullanımda tam otonom araçlar bulunmamaktadır. Gece ve gündüz durumları, değişen hava koşulları, farklı yol geometrileri, çeşitli yol kaplamaları, sürüş ortamının dinamik yapısı ve değişkenliği gibi gerçek dünya koşullarında sürücüsüz araçların yaygın kullanımını kolay olmadığı görülmektedir. Güvenli ve konforlu bir otonom sürüş gerçekleştirebilmek için aracın içinde bulunduğu ortamın ve koşulların semantik ve bilişsel olarak anlaşılması/idrak edilmesi gerekmektedir. (Zheng vd., 2015)

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 285 3822  
E-posta: guneycan@itu.edu.tr (Güney, C.)

## 2. Önceden Üretilmiş Otonom Sürüş Haritaları

Geleneksel yüksek kaliteli dijital haritalar (Standard Definition Maps, SD-Maps) ve web tabanlı harita servisleri makinelerin/yapay zekânın kullanımı için değil insanların kullanımı için üretildiğinden sürücüsüz otomobiller bu tür haritalarla otonom sürüşü gerçekleştirememektedir. Diğer taraftan desimetre altı doğrulukta ve çok yüksek ayrıntı düzeyinde aracın içinde bulunduğu ortamın 3B durağan temsili (static representation) sunabilen otonom sürüş haritaları (HD-maps) yapay zekâ tarafından otonom sürüşe ilişkin hassas hesaplamaları yapmakta kullanılabilir. Otonom sürüş haritaları, klasik haritalar gibi yalnız bir detayın nerede olduğunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda bu detayın neyi temsil ettiğini açıklayan bilgileri de içermektedir. Otonom sürüş haritaları genel olarak aşağıda ifade edilen bilgileri (HD-map contents) kapsamaktadır (Li vd., 2021):

- Yollar, yol çevresindeki binalar, sokak mobilyaları, ağaçlar ve açık alanlar dâhil olmak üzere yol alanı (street space) bilgisi
- Yol sınırları, şeritler, şerit sınırları, kavşaklar, bordürler, yol eğimleri, kurp eğriliği, hız tümsekleri, bisiklet yolları vb. bilgilerin bulunduğu yol unsurlarının (road elements) 3B geometrisi (Loose vd., 2009)
- Trafik işaretleri, trafik ışıkları, şerit işaretleri, yaya geçitleri, park yerleri, şerit kısımları için hız sınır değerleri, şeritler için dönüş kısıtlamaları, kavşakta hangi şeritlerin geçiş öncelikleri olduğu gibi yol unsurlarının semantik bilgisi
- Yalnız yol ağına ilişkin olmayan aynı zamanda şeritlere ilişkin topolojik bilgi
- Gerçek zamanlı trafik bilgileri, inşaat faaliyetleri, yoğun yaya trafiği, trafik sıkışıklıkları gibi değişken bilgi (volatile data).

## 3. Otonom Sürüş Haritası Üretimi

Sürücüsüz otomobillerin otonom sürüşüne destek olarak kullanılan otonom sürüş haritaları genel olarak aşağıdaki yöntemlerle üretilmektedir:

- Geleneksel otonom sürüş haritası üretimi (offline mapping)
  - Harita ve harita bilgisi üretimi, jeodezik ölçme konusunda uzmanlaşmış ve yeryüzü gerçekliğini modelleyebilen işletmeler tarafından 'Gezgin Harita Üretim Sistemi (Mobile Mapping System, MMS)' biçiminde özel tasarlanmış araçlarla gerçekleştirilen jeodezik ölçülere dayalı olarak otonom sürüş haritası üretilebilir (a full-stack solution for HD-map production)
- Yapay zeka hizmet sağlayıcılarının otonom sürüş haritası üretimi
  - Sürücülü ve sürücüsüz araçlardan elde edilen veri kümelerinden derin öğrenme temelli bilgisayarlı görü teknikleri kullanılarak otonom sürüş haritası üretilebilir.
- Toplum içerisindeki gönüllülerinin otonom sürüş haritası üretimi (crowdsourcing, crowdsourced fleet mapping)
  - Taksiler, otobüsler, çöp kamyonları gibi sürücülü araçlarda bulunan kameralardan elde edilen filo veri kümelerinden ve bireysel sürücülerin kendi elde ettiği veri kümelerinden derin öğrenme temelli bilgisayarlı görü teknikleri kullanılarak otonom sürüş haritası üretilebilir.

## 4. Yapay Zekânın Vücut Bulması

Günümüzde her işi AI kullanarak makineye yaptırma eğilimi bulunmaktadır. Bu eğilim hem dijital dünyada transformer mimarileri, GenAI uygulamaları, AI Agents, Agentic AI gibi Digital AI tarafında hem de fiziksel dünyada otonom sürüş, gezgin robotik uygulamaları gibi Embodied AI veya Physical AI tarafında görülmektedir.

Physical AI/Embodied AI tarafında en öne çıkan eğilim yapay zekânın vücut bulmasıdır. Gezegen gezginleriyle (rover) başlayan yolculuk, sürücüsüz araçlarla devam etmiş ve ardından ev ortamında çalışan robot süpürgeler ve sonrasında birçok farklı ortamda çalışabilen insansı robotlarla (humanoids) ilerlemektedir.

Bu durum robotlar çağının başladığını yani makinelerin (Physical AI) yükselişe geçtiği göstermektedir. Sürücüsüz araçlar için 2005 yılında gerçekleştirilen DARPA Grand Challenge, 2009 yılında Google firmasının sürücüsüz araç geliştirme projesini başlatması gösteriyor ki otonom sürüş 20 yıldır zaten çalışılmaktadır. İlk örneği 1996 yılında ortaya çıkan robot süpürgeler, son 10 yıldır evlerde etkin olarak kullanılmaktadır. Robot evriminde son dönemde farklı ortamlarda farklı alanlarda farklı işleri yapabilen insansı robotlar öne çıkmaktadır. Öyle ki Digital AI coşkusundan (AI hype) sonra yeni coşku Physical AI (Embodied AI) üzerinden oluşturulmaktadır. AI etkisi ile robotlar artık yalnız insanların verdiği komutları yerine getiren bir makine olmaktan problem çözmeye başlayan birer varlığa evrilmektedir. Bu evrimi yalnız bugünün AI düzeyi ile değerlendirmek hatalı bir yaklaşım olacaktır. Dijital tarafta AGI/ASI düzeyine ulaşıldığında Physical AI tarafında neler olabileceğini iyi düşünmek ve planlamak gerekmektedir. Dijital tarafta yoğun olarak kullanılan AI önce beyaz yaka tarafından yapılan işleri devralmaya başlamışken, yakın zamanda mavi yakanın yaptığı işleri devralacaktır. Tesla, Hyundai, Mercedes gibi araba üreten fabrikalarda ve Amazon işlettiği lojistik merkezlerinde bu durum zaten başlamıştır. Acıkmayan, mola istemeyen, yorulmaya, 7/24 gece-gündüz çalışabilen robotlar fabrikada çalışabilir. Gelişmekte olan ülkelerden hizmet sektöründe çalışmak için gelişmiş olan ülkelere olan

göçlere gerek kalmayabilir. İnsanların arkadaş edinmesine lüzum kalamayabilir, insansı robot bugün ChatGPT gibi AI asistanların olduğundan çok daha iyi bir arkadaş olabilir. AI iş birliğinde (Human AI collaboration) insan emeğinin yerini alan bu yeni varlıkla nasıl bir ortak gelecek inşa edeceğimizi iyice düşünmemiz ve planlamamız gerekmektedir. Aksi takdirde düşünebilen insansı robotlar insanların yerine bu süreci planlayabilirler. Ayrıca yakın geleceğe hazırlık yalnız teknik ve mesleki açıdan bir hazırlık değildir. Psikolojik ve sosyolojik olarak da hazırlanmak gerekmektedir.

Dünyada AI alanında ya da AI coşkusunda (AI hype) 2025 yılı Agentic AI yılı olarak önceliklenmiştir. Benzer Silikon Vadisi bakış açısı 2026 yılını da AI botlardan sonra fiziksel botlar olarak önceliklendirmektedir. Bu önceliklendirmede de insansı robotlar (humanoids) ve hava/kara/deniz gibi her türlü ortamda hareket edebilen otonom araçlar öne çıkmaktadır. Tesla firmasının hedeflerinden biri olan her eve bir Optimus bot hedefini dikkate almak gerekmektedir. Yakın zamanda Çinli startup Noetix Robotics firmasının geliştirip satışını yaptığı Bumi insansı robotunun iPhone'dan daha ucuz olduğunu unutmamak gerekmektedir (URL 1). 5-10 yıl içerisinde insansı bir robota sahip olmak tıpkı bir arabaya bir cep telefonuna bir bulaşık makinesine sahip olmak gibi sıradan bir hâle dönüşecektir.

Her ne kadar genel amaçlı otonom insansı robotlar üretilse de hizmet alanının sınırlandığı insansı robotlarda üretilmektedir. Bugüne değin insansı robotlar için öne çıkan hizmet alanları fabrikalar yani üretim hatları, lojistik merkezleri, sağlık merkezleri, evde hasta ve yaşlı bakımı, inşaat alanları, mağaza ve restoran gibi ortamlarda servis alanı, ev işleri, askeri alanda piyade olarak kullanılmasıdır. NASA tarafında yatırım yapılan Apptronic firmasının geliştirdiği Apollo robotu aynı zamanda Ay ve Mars yüzeyinde yapılacak çalışmalarda kullanılmak için geliştirilmektedir. Farklı ortamlarda farklı kullanım alanları için eğitilen ve gelişen humanoidler sonrasında tüm işleri yapabilen genel amaçlı insansı robotlara dönüşecektir.

Nasıl Digital AI bir insanın düşünme şeklini taklit edilerek geliştirilmeye çalışılıyorsa, Physical AI/Embodied AI yaklaşımı da benzer biçimde ilerlemektedir. İnsansı robotlar (humanoid robots) insan anatomisine benzer biçimde geliştirilmektedir. Her ne kadar firmaların insan formuna benzer farklı android tasarımları olsa da cinsiyeti olmayan iki ayaklı robotlar genelde erkek formunda görünmektedir. Son zamanda XPeng firmasının IRON robotunda olduğu gibi kadın formu biçiminde görünen humanoid robotlar da geliştirilmektedir. Bununla beraber Gynoid (feminine humanoid robot) örneğinde olduğu gibi insansı robotlar için farklı isimlendirmeler de kullanılmaya başlamıştır. Belki de insanın benmerkezi yapısı insansı robot formunda gelişmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yoksa farklı ortamlarda farklı işler için farklı formda robotlar daha kullanışlı olabilir. AGI/ASI düzeyine ulaşıldığında yani robotların AI tarafından tasarlandığı ve geliştirildiği dönemlerde nasıl farklı formlarda robotlar ortaya çıkacaktır. Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterildiği gibi insansı bir robotun araziye lazer tarayıcı, total station gibi bir cihazı kullanarak ölçme yapması düşüncesi anlamsızdır. Diğer bir ifadeyle araziye ölçme yapmak için iki ayaklı robot gönderilebilir düzeye gelindiğinde hala total station, lazer tarayıcı gibi bir cihazı kullanılmasını beklemek anlamlı olmayabilir. Onun yerine başka bir formda bir ölçme robotunun araziye gidip ölçmeyi yalnız üzerinde bulunan sensörler ile yapması daha anlamlı olacaktır. Üstelik farklı formlardaki ölçme robotları sürü zekâsını (swarm intelligence) kullanarak daha etkin sonuçlar üretebilecektir.



Şekil 1: İnsansı robotun bir geomatik mühendisi gibi çalışması



Şekil 2: Sürücüsüz araçtan, insansı robotlardan, dört ayaklı robotlardan ve dronelardan oluşan bir ölçme ekibi

İki ayaklı robotlar önce yürümeyi öğrenmiş, ardından nesne taşıma konusunda gelişmiştir. Bugünlerde ise Unitree firmasının G1 örneğinde olduğu gibi insanın fiziksel sınırlarına ulaşmış ve hatta geçmeye başlamıştır. Bugünün insansı robotları insan hızında ve daha yüksek hızda yürüyebilmekte, insandan daha hızlı koşabilmekte, düştüğünde kalkabilmekte, engebeli arazide hareket edebilmekte ve dengesini koruyabilmekte, sert itmelere-vurmalara karşı kendini toparlayabilmekte, dans edebilmekte ve daha birçok şeyi yapabilmektedir. İnsansı robotların fonksiyonel olarak eksik kaldığı nokta hâlâ insan vücudunun esnekliğini yakalayamamış olmalarıdır. Başka bir deyişle robotik yarışının odaklandığı alanlardan biri serbestlik derecesi (Degree of Freedom, DoF) konusudur. İnsansı robotun bütünü serbestlik derecesi yanında özellikle ellerindeki serbestlik derecesinin artırılması öne çıkan konudur. İnsan elinin serbestlik derecesi en çok 27 DoF olarak kabul edilir. Şu ana kadar buna en çok yaklaşan Tesla firmasının Optimus Gen 3 robotu olup bu robotun ellerinde 22, el bileklerinde ise 3 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Bir insansı robotun amacı yalnız bir nesneyi bir yerden diğer bir noktaya taşımak, büyük nesnelere yerini değiştirebilmek olmamalıdır. İnsansı robotların görev yapacağı fabrikalarda, evlerde, hastanelerde faydalı olabilmeleri için ellerini ve parmaklarını karmaşık işlerde hassa biçimde kullanabilmeleri gerekmektedir. Örneğin iğneye iplik geçirebilmesi veya cerrah gibi hassas el hareketleri yapabilmesi ve benzeri eylemler parmak uçlarına eklenen kapasitif basınç sensörleri, eklemlerde kullanılan harmonik sürücüler ile gerçekleştirilebilir. Elin ve parmakların kabiliyetli ve esnek olmasının yanında ısıya, suya, toza ve basınca dayanıklı malzemelerden yapılması gerekmektedir.

İnsansı robot geliştirme yarışındaki diğer bir kilit nokta robotta kullanılacak AI modelinin geliştirilmesidir. Çünkü sorun yalnız algılayıcılardan (sensors), eyleyicilerden (actuators), servo motorlardan ve bataryadan oluşan bir sisteme

ChatGPT, Gemini vb. AI asistanı veya 'Büyük Dil Modelini (Large Language Model, LLM)' yüklemek değildir. Bu ancak robotun söyleneni anlamasına yardımcı olacaktır diğer bir ifadeyle robotun komutu/promptu almasına aracı olacaktır. Robotun aldığı komutu içinde bulunduğu ortam ve nesnelere ilişkilendirebilmesi için üzerindeki sensörlerden elde ettiği görüntüleri yorumlayabilmesi gerekmektedir. Bu da büyük bir sorun değildir. Çünkü Digital AI tarafında geliştirilmiş olan 'Görsel Dil Modelleri (Vision Language Model, VLM)' bu konuda yardımcı olabilir. Burada asıl sorun robotun aldığı komutları nasıl kendi davranış modeline dönüştüreceğidir. Başka bir deyişle elleriyle, kollarıyla, bacaklarıyla yani bedeniyle ne yapması gerektiğine karar vermesi ve bunu 3B uzayda gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bunun için VLA (Visual Language Action) AI modelleri kullanılmaktadır. Böylece robotik sistem dil yeteneğini, görsel algıyı ve motor kontrolünü bütünleştirebilir. Yani insansı robot gördüklerini ve duyduklarını anlayıp buna uygun biçimde eyleme geçebilir. Tabii bu modelin insan hareketlerini içere birçok video ile eğitilmesi gerekmektedir. Örneğin bu bir arazide ölçme yapan bir insansı robot, bir geomatik mühendisinin nasıl total station, laser tarayıcı kullandığının videoları üzerinden robotun eğitilmesi veya robotun arazide geomatik mühendisini kendi izlemesi şeklinde robotun eğitilmesi gerekmektedir. Bir diğer eğitim veri kümesi de teleoperasyon verisidir. Teleoperasyon aşamasında insanlar robotu uzaktan kontrol edip ona görevi bizzat yaptırarak robota işleri öğretebiliyor. Digital AI tarafındaki benzer biçimde Physical AI tarafında da taklit ederek öğrenme (imitation learning) uygulanmalıdır.

İnsansı robotlar uzamsal zekâ açısından değerlendirildiğinde VLA modeline ek olarak iki modele daha gereksinim bulunmaktadır. Bunlardan ilki robotun kendi vücudunu kontrol edebileceği robot foundation modelidir. İkincisi ise henüz daha çözülememiş olan ancak üzerinde yoğun biçimde çalışılan Robot World Model (3D World Model)'dir.

Bu konularda en çok çalışan firmalardan biri Nvidia firmasıdır. Nvidia firması bir robotun sanal ortamda eğitilip fiziksel dünyadaki haline entegre edilebilecek türde (sim-to-reality) bir ürün yelpazesi oluşturmaya çalışmaktadır. Robot foundation model olarak Gr00t, simülasyon frameworkü olarak Isaac, simülasyon ortamı olarak Omniverse ve Cosmos, işlemi olarak da Jetson Thor ürünlerini geliştirmektedir.

## 5. Elektrikli Araçlarda Otonom Sürüş

Otonom sürüşte uygulamada son gelinen nokta robotaksilerdir. Tesla firması da bu yönde ilerlemekte ve cybercab adı altında robotaksilerini geliştirmeye çalışmaktadır. Firmanın planlaması dahilinde global bir taksi firması olmayı hedeflemektedir. Bununla birlikte Tesla firması bu hedefinin çok uzağında bulunmaktadır. Şu ana kadar Tesla firmasının robotaxileri ABD'de yalnız Austin Texas'ta ve San Fransisco'da çalışmaktadır. Oysaki Google Waymo firmasının otonom sürüş taksileri ABD'de 2018 yılından beri hizmet vermektedir. Benzer şekilde Çin'deki AutoX sartup firması ve teknoloji devi Baidu firması Çin'de robotaksi hizmeti vermektedir.

Görüldüğü üzere elektrikli araçlarda gelişme otonom sürüş ve robotaksi tarafına doğru kaymaktadır. O zaman insanın aklına gelen ilk soru Türkiye'de otonom sürüş ve robotaksi uygulaması ne zaman başlayacaktır? Bunun için gerekli olan ilk şey yatırım bulmak ve finans modelleri oluşturmaktır. Türkiye'de bu konularda çalışabilecek çok sayıda girişim olabileceği öngörülmelidir. Özellikle uzamsal zekâ alanında çalışan sektörler, girişimler, kişiler, öğrenciler başarıyı yüksek ve güvenilir AI tabanlı otonom sürüş modellerinin geliştirilmesinde etkin rol alabilirler.

Bu durumda İstanbul'da robotaksileri Tesla firması mı yoksa TOGG firması mı işletecektir?

Dünya genelindeki ucuz araç talebini karşılayabilmek için elektrikli araç üreticileri ürettikleri otomobillerinin maliyetlerini düşürmeye ve böylece satış fiyatlarını 30 bin dolar bandına hatta 20 bin dolar düzeyine çekmeye çalışmaktadır. Araba fiyatları düşürülmeye çalışıldığı bir ortamda bu araçlarda otonom sürüş özelliğinin korunabilmesi için otonom sürüş maliyetinin de düşük kalması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle otonom sürüş başarımı arttırılırken, bu sürüşün maliyetinin de düşürülmesi gerekmektedir. Elektrikli araç dönüşümünün başlangıcını yapan Tesla önce autopilot özelliğini daha sonra FSD (Full Self-Driving) özelliğini ve sonrasında da robotaksilerde kullanılan yeni tür FSD özelliğini çıkarmıştır. Bu kadar büyük gelişmelerin sonucunda Tesla'nın robotaksisi ABD'de Haziran 2025 tarihinden itibaren hizmet vermeye başlamıştır. Ancak yalnız yukarıda ifade edildiği gibi Teksas'ta Austin kentinde ve California'da San Fransisco kentinde hizmet vermektedir. Robotaksi her ne kadar otonom olsa da insan bir şoför gözetiminde hareket etmektedir. Hareketi sırasında 50 km/s hızı geçmemektedir. Ayrıca robotaksinin Austin kentinde bazı kritik bölgelere girmesine izin verilmemektedir. Diğer taraftan sürücüsüz araç çalışmalarına 2009 yılında başlayan ve 2016 yılında Waymo ismi ile markalaşan Google, 2020 yılından itibaren ABD'de 45 kentte taksi hizmeti vermektedir. Tesla ve Waymo firmalarının robotaksileri arasındaki en büyük fark maliyetleridir. Waymo araçların maliyeti 180 bin dolar seviyesindeyken, Tesla araçlar 40 bin dolar düzeyindedir. Bu maliyet farkının ana etkenlerinden biri Tesla'nın perception görevi için yalnız 8 adet kamera kullanması, Waymo'nun ise kamera, Lidar, radar, HD-map gibi birçok sensörü kullanıyor olmasıdır.

Tesla FSD teknolojisini hem elektrikli otomobillerde hem Optimus robotunda Dojo chipsetinde kullanmaktadır. Tesla FSD V12 sürümünde kural tabanlı yapıdan uçtan-uca sinir ağı (end-to-end neural network) mimarisine geçmiştir. Bu AI modelinin eğitiminde milyarlarca kilometrelik sürüş verisi kullanılmıştır. FSD teknolojisinin en güncel sürümü 12 Kasım 2025 tarihine yayınlanan FSD Supervised 14.1.7 versiyonudur. Tesla geniş bir veri kümesine sahip olmasına rağmen supervised modelden unsupervised modele geçemeye çalışmaktadır. Bununla birlikte Tesla FSD halen tüm dünyada beta aşamasında kullanılmaktadır.

## Otonom Sürüş ve İnsansı Robotlar

Tesla araçlarındaki autopilot özelliği Türkiye’de kullanılabilirken FSD paketi Türkiye bu alanda Avrupa Birliğini takip ettiği için kullanılamamaktadır. Tesla’dan yapılan açıklamalara göre 2026 yılının ilk çeyreğinde FSD paketi hem Avrupa’da hem de Çin’de kullanılmaya başlayacaktır. Bu durumda Türkiye’de de kullanılabilir olacaktır.

Tesla dışında diğer otomobil üreticileri de kendi otonom sürüş sistemlerini geliştirmektedir. Bunlarda öne çıkanlar General Motor Company (GMC) firmasının SuperCruise teknolojisi, Ford firmasının BlueCruise teknolojisi, Mercedes firmasının DistronicPlus teknolojisi, BMW firmasının DirversPlus teknolojisi ve Nissan firmasının ProPilot teknolojisidir. Çin tarafından öne çıkan otonom sürüş sistemi Xaomi firmasının Pilot ve Huawei firmasının sistemleridir. Henüz TOGG ekosisteminde bu tür biri ürün bulunmamakta ve ADAS (Advanced Driver Assistance Systems - Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri) türü sistemler kullanılmaktadır. TOGG bu konudaki çözümleri için HERE firması ile iş birliği yapmaktadır.

Yukarıdaki konulara ek olarak elektrikli ve sürücüsüz araç üreten firmalar insansı robot üretmeye başlamıştır.

Bu durumda 2018 yılında kurulmuş olan TOGG firması, yerli marka olarak ayakta kalmaya devam etmek istiyorsa üretim bantlarında insansı robot üretmeyi düşünmelidir. Morgan Stanley firması tarafından hazırlanan raporda; 2050 yılına kadar dünya genelinde 1 milyar insansı robot olacağı ve pazar büyüklüğünün 5 trilyon dolara ulaşacağı ifade edilmektedir. Görünen o ki dünya genelinde insansı robotik sektörü otomotiv sektörünü en az ikiye katlayacak büyüklüğe ulaşacak.

Sürücüsüz araçlarla insansı robotların eğitimi arasındaki farklardan biri de sürücüsüz araçlar milyonlarca kilometre uzunluktaki yollardaki sürüş verisi ile eğitilmişken insansı robotlar için bu tür bir eğitim veri kümesi bulunmaktadır.

## 6. Savaş Araçlarında Otonom Sürüş

Otomotiv sektörü, Türkiye’nin en güçlü olduğu, en çok ihracatın yapıldığı sanayi sektörüdür. Bununla birlikte bugün en hızlı büyüme kaydettiği sektörde savunma sanayidir.

Sivil kullanım dışında da askeri alanda geleneksel platformlardan uzaklaşma ve otonom sistemlere doğru bir geçiş görülmektedir. Bunun örnekleri Rusya-Ukrayna, Hindistan-Pakistan, Yemen-ABD, İsrail-İran arasındaki çatışmalarda/savaşlarda görülmüştür. Bu savaşlarda havada, karada, denizde, deniz altında kullanılan drone türü robotik araçlar tank, gemi gibi konvansiyonel savaş sistemlerine zarar verilebilmektedir. Diğer bir ifadeyle 5,000 veya 10,000 dolar gibi maliyetlere sahip insansız harcanabilir robotik araçla veya bu araçlardan oluşan bir sürü/filo ile yüz milyonlarca dolar maliyetindeki geleneksel savaş araçlarına zarar verilebilmekte ve işlevsiz hale getirilebilmektedir. Bu tür hafif, taşınabilir, modüler ve düşük maliyetli robotik araçlar insansız ve harcanabilir olduğundan kayıpları durumu da büyük bir sorun yaratmamaktadır. Bunun en önemli göstergelerinden bir diğeri de ABD ordusunun bu tip sistemlere 36 milyar dolar fon ayırmasıdır (URL 2). Otonom sistemlerden kasıt AI destekli, uzaktan kontrol edilebilen ve otonom görev yapabilen sistemlerdir/araçlardır. Bu sistemler ağır ve pahalı geleneksel silah sistemlerinden daha hızlı, esnek ve maliyet açısından daha düşük çözümlerdir. Yalnız ABD ordusu değil dünya genelinde bu yönde bir eğilim bulunmaktadır. Türkiye’de farklı bir durumda değildir. Özellikle drone konusunda dünya genelinde en ön sıralarda yer almaktadır. Türkiye’de geliştirilen insansız hava araçlarına Bayraktar tarafından üretilen TB1, TB2, TB3 SİHA, Akıncı, Kızılelma, TUSAŞ tarafından üretilen ANKA, ANKA III, TUSAŞ Aksungur, Göksungur ve 5. nesil savaş uçağı olan Kaan, Havelsan tarafından üretilen BAHA, Aselsan Serçe, Vestel tarafından üretilen Karayel örnek olarak gösterilebilir. Kara tarafında insansız yani otonom biçimde hareket edebilen Roketsan tarafından geliştirilen silahlandırılmış robot köpek Koz bulunmaktadır.

Diğer bir değişen savaş kavramı da daha az sayıda pilotlu uçak ve onları tamamlayacak pilotsuz uçak (autonomous air vehicle) yaklaşımıdır. İnsansız hava araçlarının önceleri yalnız keşif ve gözetleme görevleri yapması, ardından silahlanarak bazı kritik hedeflere nokta atışı yapması, daha sonrasında normal uçakların görevlerini yerine getirmeye başlaması ve en sonunda AI destekli olarak insansız uçabilen savaş uçağına evrilmiş durumdadır. Burada da ana hedeflerden biri maliyetleri düşürmektir. Çünkü amaçlardan biri gerektiğinde bu araçların savaş ortamında feda edilebilmesi yani harcanabilmesidir. Türkiye’de bu konuda geliştirmeler yapılmaktadır. Kaan ve Kızılelma’nın birlikte kullanılması ve robotik sürü görevi görmesi planlanmaktadır. ABD’de de General Atomics tarafından üretilen Gambit ve Andruil firması tarafından üretilen Fury ile Çinliler tarafından geliştirilen FH-97 insansız savaş uçakları bulunmaktadır.

## 7. Sonuç

Otonom sürüş teknolojisi son on yılda büyük bir ilerleme kaydetmiş olsa da, sürücüsüz otomobillerin otonom sürüş haritalarına olan gereksinimi devam etmektedir. Bununla birlikte sürücüsüz otomobillerin üretiminde, satış sürecinde ve hizmet süreçlerinde değişiklikler yaşandığı gibi kullandıkları otonom sürüş haritalarının üretiminde, kullanımında, paylaşımında ve sürüş fonksiyonları ile olan etkileşimlerinde de değişiklikler yaşanmaktadır.

Standart önceden üretilmiş otonom sürüş haritalarının üretimi için yer gözlem uydularına ilişkin uzaktan algılama, hava fotogrametrisi, havadan lazer tarama, mobil lazer tarama gibi jeodezik ölçme teknikleri ve elde edilen verinin anlamlı biçimde haritaya dönüştürülmesi için harita üretim yazılımları/teknolojisi hâlâ gereklidir. Bunun da ötesinde sözü edilen veri kümelerinden şerit düzeyinde geometri, sokak mobilyaları gibi yol bilgisinin otomatik ayrıştırma yapacak yapay öğrenme temelli algoritmalar da gereklidir.

Sürücüsüz otomobiller için ayrıntı düzeyi yüksek otonom sürüş haritalarının üretimini ve güncellenmesini hızlandırmak ve maliyetleri düşürmek için kitle kaynak yaklaşımı ve uçtan-uca harita üretim yöntemi kullanılabilir. Bu tür bir çözümle otonom sürüş haritalarının üretiminde ölçeklendirme sorunu ortadan kaldırılabilir.

Eğer geomatik/harita mühendisleri de sektörlerindeki katma değeri arttırmak istiyorsa navigasyon sistemleri ve otonom sürüş konusunda verecekleri katkılara yönelik eylem planlarını hazırlamaları gerekmektedir.

## Kaynaklar

Li, Q., Wang, Y., Wang, Y., & Zhao, H. (2021) HDMaPNet: A Local Semantic Map Learning and Evaluation Framework. ArXiv, abs/2107.06307.

Loose, H., Franke, U. & Stiller, C. (2009) Kalman Particle Filter for lane recognition on rural roads. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 60-65.

Poggenhans, F., Pauls, J.H., Janosovits, J., Orf, S., Naumann, M., Kuhnt, F., & Mayr, M. (2018) Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving. Proceedings of 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1672-1679.

[URL 1 <https://interestingengineering.com/innovation/humanoid-robot-cheaper-than-an-iphone> [Erişim tarihi: 30 Ekim 2025]

[URL 2] <https://www.wsj.com/politics/national-security/us-army-drones-shift-20cc5753> [Erişim tarihi: 26 Ekim 2025]

Zheng, K., Zheng, Q., Yang, H., Zhao, L., Hou L., & Chatzimisios, P. (2015) Reliable and efficient autonomous driving: the need for heterogeneous vehicular networks. IEEE Communications Magazine. 53 (12), 72-79.



# Tarım-Enerji Kesişimi için Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Agrivoltaik Uygunluk Analizi

**Batuhan KILIÇ**

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ.

## Özet

Bu çalışmada, Elazığ ili özelinde makine öğrenmesi tabanlı bir agrivoltaik yer uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın amacı, tarım ve güneş enerjisi üretiminin entegre edileceği potansiyel alanları nesnel ve açıklanabilir bir yöntemle belirlemektir. Bu doğrultuda, güneş ışınımı, topografya, arazi kullanımı ve altyapı unsurları gibi çeşitli veri kaynaklarından 15 coğrafi kriter derlenmiştir. Ön işleme aşamasında korelasyon ve çoklu bağlantı testleri uygulanmıştır. Lojistik Regresyon (LR), Rastgele Orman (RO) ve Destek Vektör Makinesi (DVM) olmak üzere üç farklı makine öğrenmesi modeli eğitilerek performansları doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skoru ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Modellerin öngörülerini açıklamak için Shapley Additive Explanations (SHAP) yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, RO modelinin yaklaşık %96 doğruluk ile en başarılı model olduğunu, LR ve DVM yöntemlerine kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. SHAP analizi sonucunda, agrivoltaik uygunluğu en çok etkileyen kriterlerin arazi kullanımı, demiryolu, yerleşim yeri ve ana yollara yakınlık ile güneş ışınımı olduğu; su kütlelerine, fay hatlarına, korunan alanlara ve havaalanlarına yakınlığın etkisinin ise sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Mekânsal uygunluk haritaları, çalışma alanının orta kesiminde kuzey-güney doğrultusunda ve doğusunda güneybatı-kuzeydoğu doğrultusunda yoğunlaşan potansiyel agrivoltaik bölgelerini işaret etmektedir. Bölgenin yaklaşık %15'i agrivoltaik kurulumlar için uygun alan olarak belirlenirken, %60'ının uygun olmadığı saptanmıştır. Önerilen çalışma, agrivoltaik yer seçimi konusunda literatürdeki boşluğu dolduran öncü bir yaklaşımdır; sabit ağırlıklara dayalı geleneksel yöntemlere kıyasla daha uyarlabilir bir çözüm sunmaktadır. Açıklanabilir yapay zekâ ile desteklenen bu çerçeve, agrivoltaik sistemlerin planlanmasında karar vericilere yüksek doğruluklu haritalar ve kritik belirleyicilere dair içgörüler sağlayarak sürdürülebilir enerji-arazi kullanımı planlamasına katkı sunmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

Yenilenebilir Enerji, Agrivoltaik, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Makine Öğrenmesi, Açıklanabilir Yapay Zekâ

## Abstract

In this study, a machine learning-based agrivoltaic site suitability analysis was conducted for the province of Elazığ. The objective was to identify potential locations where agriculture and solar energy production can be co-located using an objective and explainable methodology. To this end, fifteen geospatial criteria were compiled from diverse data sources, including solar irradiation, topography, land use, and infrastructure factors. During preprocessing, correlation and multicollinearity tests were applied. Three machine learning models—Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM)—were trained, and their performance was evaluated using accuracy, recall, precision, and F1-score. Model predictions were interpreted with Shapley Additive Explanations (SHAP). The results indicate that the RF model achieved the highest performance, with approximately 96% accuracy, and outperformed LR and SVM by a statistically significant margin. According to the SHAP analysis, the most influential determinants of agrivoltaic suitability were land use; proximity to railways, settlements, and primary roads; and solar irradiation, whereas proximity to water bodies, fault lines, protected areas, and airports exerted limited effects. The spatial suitability maps highlight potential agrivoltaic zones concentrated along a north-south corridor in the central part of the study area and along a southwest-northeast trend in the east. Approximately 15% of the region was identified as suitable for agrivoltaic installations, while 60% was deemed unsuitable. The proposed study offers a pioneering approach that addresses a gap in the literature and provides a more adaptable alternative to traditional fixed-weight methods. Supported by explainable artificial intelligence, the framework delivers high-accuracy maps and insights into critical drivers, thereby contributing to sustainable energy-land use planning and informing decision-makers.

## Keywords

Renewable Energy, Agrivoltaics, Geographic Information Systems, Machine Learning, Explainable Artificial Intelligence

## 1. Giriş

Son yıllarda küresel ortalama sıcaklık, sanayi öncesi düzeylere kıyasla ilk kez 1,5 °C'nin üzerine çıkmıştır. Bu seviye, Paris İklim Anlaşması'nın ısınmayı 2 °C'nin oldukça altında tutma ve tercihen 1,5 °C ile sınırlama hedefleri bakımından kritik bir dönüm noktasını temsil etmektedir (Copernicus, 2025). 2023 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı, uluslararası topluma fosil yakıtlardan kademeli olarak uzaklaşma ve yenilenebilir enerjiyi kapsamlı biçimde yaygınlaştırma yönünde ilk ortak çağrısı yapmıştır. Avrupa'da ise bu değişime yanıt olarak 2050 yılına kadar iklim nötrlüğünü hedefleyen Yeşil Mutabakat olmuştur. Hedefler doğrultusunda, sera gazı emisyonlarının 1990 yılı düzeylerine kıyasla 2030 yılına kadar en az %55 azaltılması öngörülmektedir (Bellone vd., 2024). Artan nüfus ve yükselen elektrik talebi bağlamında, yenilenebilir enerji kaynakları iklim değişikliğiyle mücadele ve kaynak tükenmesinin önlenmesi için

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0533) 395 04 00

E-posta: batuhankilic@firat.edu.tr (Batuhan KILIÇ)

stratejik bir çözüm alanı sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi hâlen fosil yakıtlarla karşılanan küresel enerji gereksiniminin kayda değer bir kısmını üstlenebilecek teknik potansiyele sahip olup, elektrik üretim teknolojileri içinde en hızlı büyüyen seçenek konumundadır. Bununla birlikte, güneş enerji santrallerinin (GES) kurulumlarının geniş arazi gereksinimi, tarımsal kullanım, biyolojik çeşitliliğin korunması ve elektrik üretimi arasında arazi tahsisi çatışmalarını artırmaktadır. Büyük ölçekli güneş enerjisi çiftliklerinin kapladığı alan, yükselen küresel tarımsal talep bağlamında giderek daha fazla sorgulanmaktadır. Morfolojik ve iklimsel koşullar ekilebilir arazileri GES uygulamaları için görece elverişli kıldığından, kurulumlar tarihsel olarak önce tarım alanlarına, ardından kurak ve çayır-mera sahalarına yönelmiştir. Bu durum, çevresel etkileri en aza indiren ve gıda üretim kapasitesini zedelemeyen sürdürülebilir enerji yerleşimleri ile uygulama modellerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Adeh vd., 2019; Curioni vd., 2025; Kruitwagen vd., 2021).

Agrivoltaik sistemler (diğer bir ifade ile Tarım-GES veya agrofotovoltaik), tarım ve güneş enerjisi üretiminin aynı parselde eşzamanlı yürütülmesini sağlayan çift-kullanımlı bir arazi modeli sunar (Dupraz vd., 2011; Goetzberger & Zastrow, 1982). Bu sistemde fotovoltaik paneller tarım arazileri üzerine yükseltilerek konumlandırılır; altta bitkisel üretim sürerken, oluşan kısmi gölgeleme mikroiklimi ılımlılaştırır ve bitki dayanıklılığını artırır. Böylelikle arazi verimliliği yükselir, yenilenebilir enerji üretimi tarımsal faaliyeti yerinden etmeden genişler (Agir vd., 2023). Eşzamanlı bitkisel üretim ve elektrik üretimi, özellikle arazi kıtlığı ya da hızla artan enerji talebinin baskı oluşturduğu bölgelerde arazi tahsisi kaynaklı rekabeti azaltır (Khazael vd., 2025). Bu özellikleriyle agrivoltaik sistemler, gıda güvenliği ve iklim hedeflerini birlikte gözeten Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (Food and Agriculture Organization, FAO) İklim açısından Akıllı Tarım (Climate-Smart Agriculture, CSA) yaklaşımıyla uyumlu bir uygulama zemini sunmaktadır (Hauger vd., 2025). Doğrudan tarımsal kazanımların ötesinde, agrivoltaik sistemler geleneksel enerji üretimine eşlik eden sera gazı emisyonlarını azaltarak çevresel yükü hafifletir. Farklı coğrafi bölgelere mekânsal uyarlanabilirlikleri sayesinde gıda güvenliğini gözetirken kayda değer bir elektrik üretim potansiyeli sunarlar. Türkiye'de tarımın stratejik önemi dikkate alındığında, agrivoltaik kurulumları arazi kullanımını optimize ederek gıda ve enerji üretiminin eşzamanlı sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir. Ekonomik açıdan, panellerin entegrasyonu üretilen elektriğin işletme içinde kullanılmasına ya da şebekeye satılmasına imkân tanıyarak çiftçilere ek bir gelir akışı yaratır. Ayrıca panellerin sağladığı fiziksel örtü, dolu fırtınaları gibi aşırı hava olayları karşısında koruma sunarak operasyonel sürekliliği ve iklimsel dayanıklılığı destekler (Fraunhofer ISE, 2024).

Agrivoltaik sistemlerin etkin biçimde uygulanması, güneş ışınımı, topografik özellikler, tarımsal alanlar, arazi kullanımı, altyapı ve sosyo-ekonomik koşullar gibi çeşitli etmenleri bütünleştiren kapsamlı bir mekânsal analiz gerektirir. Agrivoltaik sistemler için yer uygunluk analizi problemi, bu ölçütler temelinde sistemin işletimsel uygulanabilirliğini ve uzun dönemli verimliliğini belirlediğinden, temel bir mekânsal karar verme görevi niteliği taşır. Son yıllarda farklı ülkelerde çok sayıda çalışma agrivoltaik uygulamaları için uygun konumların belirlenmesi ve değerlendirilmesine odaklanmıştır (Dere vd., 2024; Elkadeem vd., 2024; Fattoruso vd., 2024; Hauger vd., 2025; Reher vd., 2025). Bu bağlamda, Coğrafi Bilgi Sistemleri ile bütünleşik Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları yer uygunluğunu değerlendirmede yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak ÇKKV'nin sabit (statik) ağırlıklara ve uzman yargılarına dayanması, özne yanlılık riskini artırmakta; değişen mekânsal veri kümelerine ve bölgesel bağlamlara uyarlanabilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca bu sistemler değişen veri ve güncellemelere karşı esnek değildir. Bu nedenle uygunluk analizinde geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını gidermeye yönelik yenilikçi bir yaklaşım ise, uyarlanabilirliği artırmak ve özne önyargıyı azaltmak amacıyla insan bilişsel karar verme süreçlerini benzeştiren yapay zekâ tekniklerinin uygulanmasıdır. Mevcut literatür çerçevesinde, agrivoltaik sistemlerde yer seçimine makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanmasını kapsamlı biçimde ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır; bu nedenle sunulan araştırma alan için öncü nitelikte bir katkı sunmaktadır. Çalışmanın temel yazar katkıları şunlardır:

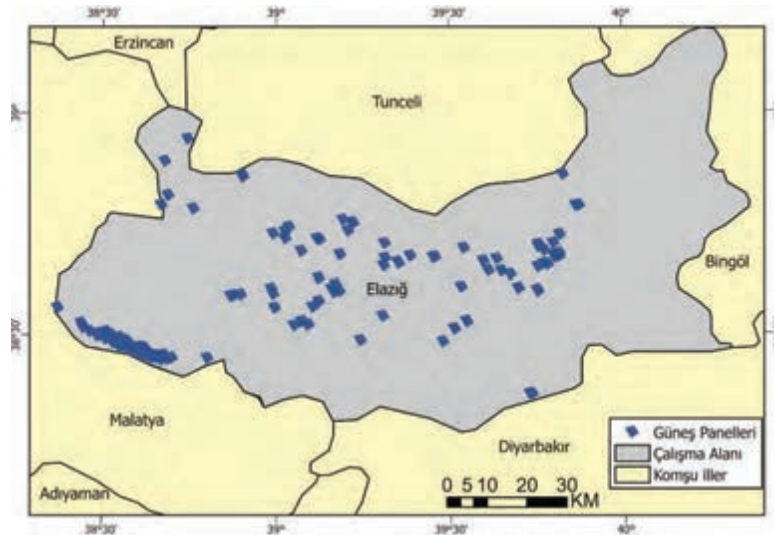
- Agrivoltaik sistemlerinin seçimine uygun potansiyel alanları belirleyebilen özgün bir makine öğrenme çerçevesi geliştirmek.
- Agrivoltaik için uygun sahaları belirlemede geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmek.
- Makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanarak agrivoltaik uygunluk haritalarının doğruluk ve hassasiyetini artırmak.
- Açıklanabilir yapay zekâ yöntemleri aracılığıyla agrivoltaik yer seçiminin hem yerel hem de küresel etkilerini nicelleştirerek, optimal çift kullanımlı arazi potansiyelinin altında yatan temel belirleyicileri ortaya koymak.

Potansiyel alanların belirlenmesi, agrivoltaik uygunluk analizi için kritik bir önkoşul olup; yer seçimi uygunluğunu artıran, azaltan veya sınırlayan çoklu değerlendirme ve kısıtlama faktörlerinin birlikte ele alınmasını gerektirir. Çalışma kapsamında, agrivoltaik sistemlerin uygunluk analizini belirlemek için küresel yatay ışınım, yükseklik, eğim, bakı, jeoloji, arazi kullanım-arazi örtüsü, şebeke bağlantı noktalarına, doğalgaz hatlarına, fay hatlarına, ana yollara, korunan alanlara, demiryollarına, yerleşimlere, su kütlelerine ve havaalanlarına yakınlık gibi toplamda on beş yer seçimi kriteri değerlendirilmiştir. Önerilen yaklaşım beş ana aşamadan oluşmaktadır: (1) 15 kritere ilişkin verilerin sırasıyla özellik

değişkenleri ve yer gerçeği verileri olarak toplanması; (2) Özellik seçimi: özellikler arası ilişkilerin incelenmesi için korelasyon ve çoklu bağlantı analizlerinin yürütülmesi ve ardından ilgili özelliklerin belirlenmesi amacıyla Boruta algoritmasının uygulanması; (3) Lojistik Regresyon (Logistic Regression, LR) (Wright, 1995), Rastgele Orman-RO (Random Forest, RF) (Breiman, 2001) ve Destek Vektör Makinesi-DVM (Support Vector Machine, SVM) (Cortes & Vapnik, 1995) gibi üç farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak model eğitimi ve çeşitli performans ölçütlerine dayalı model değerlendirmesi; (4) Makine öğrenmesi yöntemlerinin Açıklanabilir yapay zekâ (Shapley, 1953) yaklaşımıyla yorumlanması; ve (5) Mevcut agrivoltaik alanlarının belirlenmesi için güneş panelleri ile tarım alanlarının mekânsal olarak bindirilmesi ve agrivoltaik sistemlerinin uygunluk haritalarının üretilmesi.

## 2. Çalışma Alanı ve Yöntem

Deneysel test alanı yüksek güneşlenme, uygun radyasyon rejimine sahip ve sulama altyapısı gelişen ovalarda yoğun tarımsal faaliyet gösteren Elazığ ili olarak seçilmiştir. Doğu Anadolu bölgesinde yer alan ve yaklaşık 8.200 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsayan bu bölge; sulama destekli tarım ovaları ile yüksek verimli pancar, pamuk ve yazlık sebze üretimi ile karakterize olup, agrivoltaik sistemler açısından uygun bir aday konumundadır. Şekil 1'de çalışma bölgesi ve bölgede yer alan mevcut güneş paneli konumları yer almaktadır.



Şekil 1: Çalışma alanı ve mevcut güneş panelleri

Çalışma bir dizi ardışık aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, bölgedeki agrivoltaik alanlarının yer seçimi ve mevcut agrivoltaik alanı envanterini etkileyen 15 farklı kriter ilgili kaynaklardan toplanmış ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında işlenmiştir. Ardından, 'Agrivoltaik Alan Veri Seti' rastgele eğitim ve test verilerine bölünerek oluşturulmuştur. Sırasıyla eğitim ve doğrulama için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. İkinci aşamada, veri setine alakasız özelliklerin dahil edilmesini önlemek için çeşitli yöntemler kullanılarak yer seçimi kriterleri incelenmiştir. Burada, kriterler arasındaki ilişkileri incelemek için çoklu doğrusallık (multicollinearity) ve Pearson korelasyon testleri uygulanmıştır. Üçüncü aşamada, LR, RO ve DVM adlı 3 makine öğrenmesi modeli eğitilmiş ve modellerin hiperparametre optimizasyonu yapılmıştır. Ek olarak, modellerin başarısı doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skoru gibi çeşitli doğruluk metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonrasında makine öğrenme modellerinin çıktılarında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olup olmadığını kontrol etmek için Cochran Q testi çok amaçlı test olarak kullanılmış ve elde edilen sonuçlara dayanarak, istatistiksel olarak anlamlı model çiftlerini tespit etmek için ikili McNemar testi uygulanmıştır. Dördüncü aşamada, veri setindeki her bir örneğin eğitilen modellere olan katkısı açıklanabilir yapay zekâ yöntemlerinden biri olan Shapley Additive Explanations (SHAP) yöntemi ile yorumlanmıştır. Son olarak, 3 makine öğrenmesi modelinden elde edilen çıktılarla tarım alanlarının mekânsal olarak bindirilmesiyle agrivoltaik uygunluk haritaları oluşturulmuş ve bölgedeki aday konumların uygunluğu değerlendirilmiştir.

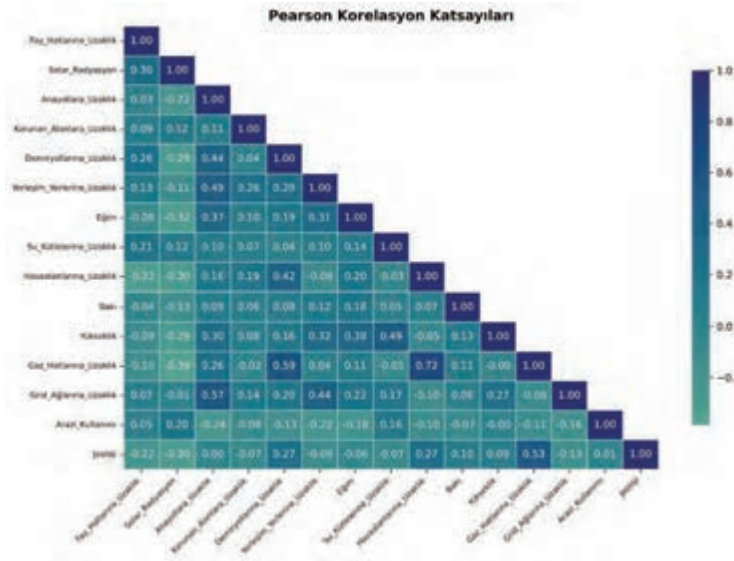
## 3. Bulgular ve Tartışma

Veri kümesinden alakasız özellikleri ortadan kaldırmak, makine öğrenimi tabanlı yer seçimi süreçleri için çok önemli bir adımdır, çünkü bu özellikler model performansını önemli ölçüde engelleyebilir. Bu nedenle çoklu doğrusallık testi ve Pearson korelasyon testi uygulanmıştır. Her bir kriter için Varyans Enflasyon Faktörü (VEF) ve Tolerans (TOL) ölçütü

değerleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Çoklu doğrusallık testi sonuçlarına göre en yüksek VEF değeri 4.003 ve en düşük TOL değeri 0.250 ile “Gaz Hatlarına Uzaklık” kriteri için tespit edilmiştir. Bu bulgular, değerlendirilen ölçütler bakımından olumsuz bir çoklu doğrusallık durumunun bulunmadığını göstermektedir.

Tablo 1: Çoklu doğrusallık test sonuçları

Özellik	VEF	TOL
Fay Hatlarına Uzaklık	2.056	0.486
Solar Radyasyon	1.666	0.600
Anayollara Uzaklık	2.045	0.489
Korunan Alanlara Uzaklık	1.385	0.722
Demiryollarına Uzaklık	2.578	0.388
Yerleşim Yerlerine Uzaklık	1.715	0.583
Eğim	1.452	0.689
Su Kütlelerine Uzaklık	1.654	0.605
Havaalanlarına Uzaklık	3.806	0.263
Bakı	1.063	0.941
Yükseklik	2.032	0.492
Gaz Hatlarına Uzaklık	4.003	0.250
Grid Ağlarına Uzaklık	1.705	0.587
Arazi Kullanımı	1.765	0.567
Jeoloji	2.305	0.434



Şekil 2: Pearson korelasyon matrisi

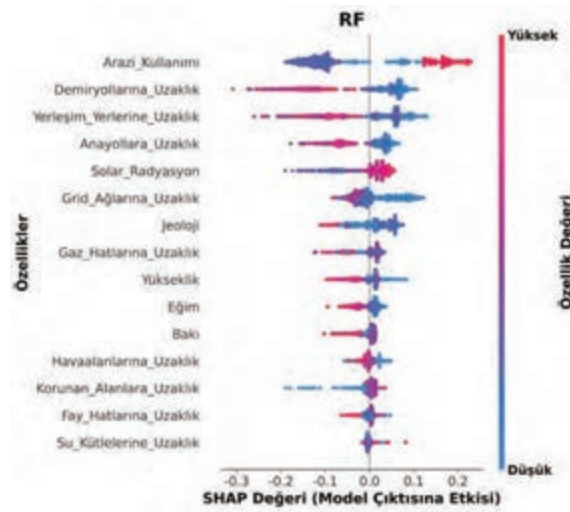
Pearson korelasyon testlerinin sonuçları Şekil 2’de bir korelasyon matrisi olarak verilmiştir. Elde edilen katsayıların 0,80 eşğini aşmaması, ölçütler arasında yüksek düzeyli doğrusal ilişkinin olmadığı ve kriterlerin birlikte kullanımının uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Her bir makine öğrenme modelinin karışıklık matrisleri aracılığıyla hesaplanan değerlendirme ölçütleri olarak doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skoru değerleri Tablo 2’de sunulmaktadır. Genel doğruluk açısından, RO modeli diğer modellerden daha iyi performans göstermiştir (0.9637). Onu DVM (0.8778) ve LR (0.8304) izlemiştir. Ayrıca, makine öğrenme modelleri arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar olup olmadığını araştırmak için Cochran Q ve ikili McNemar testleri gerçekleştirildi. Cochran Q testi sonuçlarına göre, modeller arasında istatistiksel olarak önemli bir fark elde edilmiştir ( $\chi^2(2) = 219.114, p < .000$ ). Diğer yandan, ikili McNemar testleri incelendiğinde, tüm makine öğrenme model çıktılarının istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. En büyük anlamlı fark RO ve LR arasında (143.269), en az anlamlı fark ise DVM ve LR arasında (44.628) görülmüştür.

Tablo 2: Makine öğrenme yöntemlerinin değerlendirme ölçütleri

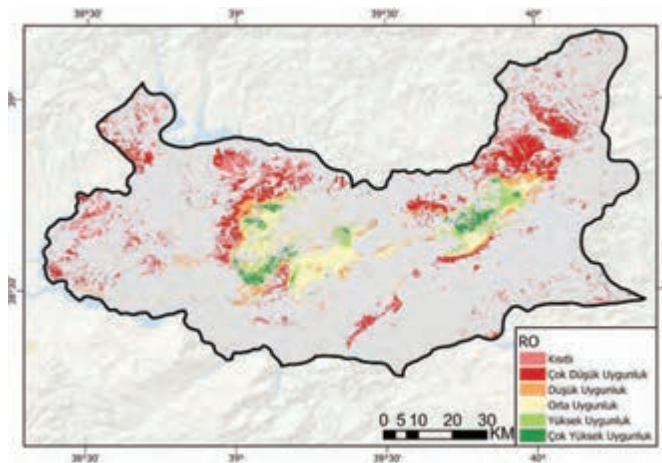
Makine Öğrenme Yöntemleri	Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik	F1 Skor
LR	0.8304	0.9117	0.7843	0.8432
<b>RO</b>	<b>0.9637</b>	<b>0.9543</b>	<b>0.9727</b>	<b>0.9634</b>
DVM	0.8778	0.8991	0.8623	0.8803

Agrivoltaik alanların uygunluk analizi için anlamlı içgörüler elde etmek amacıyla, bir girdi özelliğinin makine öğrenimi model tahminlerini nasıl etkilediğini açıklamak çok önemlidir. SHAP özet grafikleri, bu modeller için hem örnek hem de kriter bazında açıklamalar sunar. Şekil 3, çalışmada en iyi sonuçları sunan RO makine öğrenme modelinin SHAP grafik değerlerini göstermektedir. RO modelinin SHAP grafiğine göre, arazi kullanımı, demiryollarına, yerleşim yerlerine ve anayollara uzaklık ve solar radyasyon en çok katkı sağlayan kriterler iken, su kütlelerine, fay hatlarına, korunan alanlara ve havaalanlarına olan uzaklık kriterleri en az katkı sağlamıştır. Bu bulgular, belirli arazi kullanım sınıflarının, ulaşım ağlarına erişilebilir alanların ve yüksek güneş ışınımına sahip bölgelerin agrivoltaik potansiyel bakımından daha elverişli olduğunu göstermektedir.



Şekil 3: RO yöntemine ait SHAP değerleri

Son olarak RO makine öğrenme yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile çalışma bölgesindeki tarım alanları mekansal olarak bindirilmiş ve Şekil 4'te gösterildiği gibi bölgeye ait uygunluk analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre bölgenin orta bölümünde kuzey-güney doğrultusunda, doğusunda ise güneybatı-kuzeydoğu doğrultusu boyunca potansiyel agrivoltaik alanlar tespit edilmiştir. Uygunluk analizi sonuçlarına göre, çalışma alanının yaklaşık %60'lık bir bölümünün agrivoltaik alanlar için uygun olmadığı görülürken %15'i potansiyel agrivoltaik alanlar olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4: RO yöntemine ait agrivoltaik uygunluk analizi

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında geliştirilen makine öğrenmesi tabanlı agrivoltaik uygunluk analizi çerçevesi ile elde edilen başlıca sonuçlar ve bunlara odaklı öneriler aşağıda sıralanmaktadır:

- Üç yöntem arasından RO modeli, yaklaşık %96 doğruluk ile agrivoltaik uygunluk tahmininde en yüksek performansını göstermiş; diğer iki yönteme kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha başarılı bulunmuştur. Bu sonuç, arazi uygunluğu analizinde güçlü bir öğrenme algoritması seçiminin kritik olduğunu ortaya koymaktadır.
- Açıklanabilir yapay zekâ tekniği olan SHAP ile kriterlerin modele etkisi incelendiğinde, arazi kullanımı, demiryolu, yerleşim yeri ve ana yollara yakınlık ve güneş ışınımı değişkenlerinin agrivoltaik uygunluk üzerinde en belirleyici kriterler olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, su kaynaklarına, fay hatlarına, korunan alanlara ve havaalanlarına mesafe gibi kriterlerin görece düşük etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu durum, agrivoltaik potansiyel alan belirlemede özellikle tarımsal arazi özellikleri ve altyapı yakınlıklarının ön planda tutulması gerektiğini göstermektedir.
- Elde edilen uygunluk haritaları, Elazığ ilinde potansiyel agrivoltaik alanların mekânsal olarak belirli bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Özellikle ilin orta kesiminde kuzey-güney doğrultusunda uzanan bir hat boyunca ve doğu kısmında güneybatı-kuzeydoğu ekseninde yüksek uygunluk değerleri saptanmıştır. Çalışma alanının yaklaşık %15'inin agrivoltaik kurulumlar için elverişli olduğu, buna karşın %60'ının uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, bölgedeki agrivoltaik uygulamalar için öncelikli alanları ve sınırlamaları açıkça ortaya koymaktadır.
- Oluşturulan agrivoltaik uygunluk haritaları, karar vericiler ve planlamacılar için güvenilir ve uygulanabilir bir araç işlevi görmektedir. Bu sayede temiz enerji ve gıda güvenliği konularını birleştiren projelerde, subjektif uzman yargılarına dayalı yöntemlere kıyasla daha veri odaklı ve tekrarlanabilir bir yaklaşım benimsenebilir. Elde edilen sonuçlar, optimum agrivoltaik alanların seçimi konusunda bilimsel temelli bir yol haritası sunarak gıda ve enerji güvenliği hedeflerine eşzamanlı katkı yapmaktadır.

Gelecekte, önerilen çerçevenin farklı bölgelere uygulanması ve modele yeni değişkenlerin (ekonomik veriler veya iklim projeksiyonları vb.) dahil edilmesi ile genellenebilirliğinin incelenmesi planlanmaktadır.

#### Kaynaklar

- Adeh, E.H., Good, S.P., Calaf, M., Higgins, C.W. (2019) Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Scientific Reports* 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>
- Agir, S., Derin-Gure, P., Senturk, B. (2023) Farmers' perspectives on challenges and opportunities of agrivoltaics in Türkiye: An institutional perspective. *Renewable Energy* 212, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.137>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Zad, A.N., Colauzzi, M., Campana, P.E., Amaducci, S. (2024) Simulation-Based decision support for agrivoltaic systems. *Applied Energy* 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Breiman, L. (2001) Random forests. *Machine learning* 45(1), 5-32.
- Copernicus (2025) Global Climate Highlights 2024. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024> [Erişim tarihi: 10 Temmuz 2025].
- Cortes, C., Vapnik, V. (1995) Support-vector networks. *Machine learning* 20(3), 273-297.
- Curioni, M., Galli, N., Manzolini, G., Rulli, M.C. (2025) Global Land-Water competition and synergy between solar energy and agriculture. *Earth's Future* 13(2). <https://doi.org/10.1029/2024ef005291>
- Dere, S., Günay, E.E., Kula, U., Kremer, G.E. (2024) Assessing agrivoltaics potential in Türkiye – A geographical information system (GIS)-based fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) approach. *Computers & Industrial Engineering* 110598. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110598>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y. (2011) Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy* 36(10), 2725-2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Elkadeem, M.R., Zainali, S., Lu, S.M., Younes, A., Abido, M.A., Amaducci, S., Croci, M., Zhang, J., Landelius, T., Stridh, B., Campana, P.E. (2023) Agrivoltaic systems potentials in Sweden: A geospatial-assisted multi-criteria analysis. *Applied Energy* 356, 122108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122108>

- Fattoruso, G., Toscano, D., Venturo, A., Scognamiglio, A., Fabricino, M., Di Francia, G. (2024) A spatial multicriteria analysis for a regional assessment of eligible areas for sustainable agrivoltaic systems in Italy. *Sustainability* 16(2), 911. <https://doi.org/10.3390/su16020911>
- Fraunhofer ISE (2024) Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html> [Erişim tarihi: 10 Temmuz 2025].
- Goetzberger, A., Zastrow, A. (1982) On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Hauger, S., Lieb, V., Glaser, R. (2025) Spatial potential analysis and site selection for agrivoltaics in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 213, 115469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115469>
- Khazael, S.M., Maulud, K.N.A., Karim, O.A. (2025) Geospatial planning strategies for agrivoltaic systems: a review of criteria, decision models and emerging challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 81, 104444. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104444>
- Kruitwagen, L., Story, K.T., Friedrich, J., Byers, L., Skillman, S., Hepburn, C. (2021) A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature* 598(7882), 604–610. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03957-7>
- Reher, T., Lavaert, C., Ottoy, S., Martens, J.A., Van Orshoven, J., Cappelle, J., Diels, J., Van De Poel, B. (2025) Room for renewables: A GIS-based agrivoltaics site suitability analysis in urbanized landscapes. *Agricultural Systems* 224, 104266. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104266>
- Shapley, L.S. (1953) Stochastic games\*. *Proceedings of the national academy of sciences* 39(10), 1095-1100. <https://doi.org/10.1073/pnas.39.10.1095>
- Wright R.E. (1995) Logistic regression. Reading and Understanding Multivariate Statistics, *American Psychological Association* 217–244.

# ÇOK KAYNAKLI YER GÖZLEM VERİLERİ KULLANILARAK AÇIKLANABİLİR MISIR REKOLTESİ TAHMİNİ

Mustafa Serkan Işık<sup>1</sup>, Ozan Öztürk<sup>2\*</sup>, Mehmet Furkan Çelik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>OpenGeoHub Foundation, 6865 HK Doorwerth, The Netherlands.

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, 53100 Rize, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Natural Resources, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, 7522 NB Enschede, The Netherlands.

## Genişletilmiş Özet

İklim değişikliği ve aşırı nüfus artışına bağlı olarak artan gıda talebi, küresel gıda güvenliğini ciddi biçimde tehdit etmektedir. Ayrıca, küresel ısınmanın neden olduğu aşırı ve ani yağışlar ile bu yağışların neden olduğu seller ve sıcak hava dalgalarından kaynaklanan kuraklık olayları gıda güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu tür olağan dışı iklim olayları tarımsal üretimi ve rekolteyi önemli ölçüde düşürerek ciddi ekonomik kayıplara yol açabilmektedir (Yuan vd., 2024). Söz konusu etkiler, pek çok farklı tarım ürünü önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Mısırlı beslenme, hayvancılık ve biyoenerji açısından kritik önemi dikkate alındığında, mevcut tablo karar vericiler için ciddi bir kaygı alanı oluşturmaktadır. Bu nedenle, potansiyel gıda üretiminin doğru biçimde tahmin edilmesi, tedarik zinciri yönetiminde karşılaşılan risk ve belirsizliklerin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çerçevede, ürün rekoltesini yüksek doğrulukla tahmin edebilen modellere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Doğru rekolte tahmini, gıda güvenliği ile tedarik zinciri yönetimi için stratejik bir araç olup, paydaşların etkili stratejiler geliştirmesine ve arz-talep dengesinin korunmasına somut katkı sağlamaktadır (Muruganatham vd., 2022; Cao vd., 2020). Buna paralel olarak, rekoltenin mekansal ve zamansal değişimini etkileyen çevresel faktörlerin ortaya konması da önemli bir gerekliliktir. Bu faktörler arasındaki ilişkilerin anlaşılması, tarımsal planlama ve yönetim süreçlerindeki karar alma mekanizmalarını güçlendirerek karar alma mekanizmalarını desteklemektedir.

Uydu verileri, iklim faktörleri, toprak yapısı ve topoğrafya bilgilerinin birlikte kullanımı, güçlü bir rekolte tahmin modeli geliştirmeye imkan tanımaktadır. Uzaktan algılama, bitki sağlığı ve fenolojisi hakkında zengin ve önemli bilgi sunmaktadır. Sıcaklık ve yağış gibi iklim değişkenleri ise büyüme döneminin izlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Toprak yapısı ve topoğrafya ise su ile besin tutma kapasitesini belirleyerek rekolteyi doğrudan etkilemektedir (Çelik vd., 2022). Böylece, birbirini tamamlayan bu veri katmanları, tarımsal sistemlerin dinamiklerini daha bütüncül bir yaklaşımla modellemeyi mümkün kılmaktadır.

Makine öğrenme teknikleri, son yıllarda çok sayıda rekolte tahmini çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemler, uzaktan algılama, iklimsel koşullar, toprak yapısı ve topografik değişkenler gibi çok kaynaklı verilerden anlamlı bilgiler çıkararak rekolte tahminini geliştirmektedir. Ayrıca çevresel faktörler ve rekolte arasındaki karmaşık ilişkileri ve mekansal-zamansal örüntüleri de etkili biçimde modelenebilmektedir (Khaki & Wang, 2019; Peichl vd., 2021; Khan vd., 2022). Bununla birlikte, son çalışmalar model doğruluklarını artırmış olsa da özellikle mısır rekoltesini etkileyen çok sayıda değişken dikkate alındığında açıklanabilirlik önemli bir sorun olmaya devam etmektedir (Mateo-Sanchis vd., 2023; Paudel vd., 2023). Bu nedenle rekolte ile model girdi değişkenleri arasındaki ilişkilerin şeffaf biçimde ortaya çıkarılması, tarımsal planlama ve politika geliştirmede güvenilirlik açısından kritik öneme sahiptir (Çelik vd., 2023). Tam da bu noktada, sabit aktivasyon fonksiyonları yerine parametreleri öğrenilebilir aktivasyon fonksiyonları kullanan Kolmogorov-Arnold Network (KAN), klasik MLP'ye kıyasla doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilme kapasitesi sayesinde umut verici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Liu vd., 2024; Seydi vd., 2025; Jamalı vd., 2024).

Bu çalışmada, 2016-2023 dönemi için CONUS bölgesinde idari bölge düzeyinde (county-level) rekolte tahmin modeli geliştirmek amacıyla uzamsal-zamansal bir makine öğrenme modeli önerilmiştir. Yer gözlem verileri, yıllık tarım alanı haritalarıyla örtüştürülerek yalnızca mısır alanları seçilmiş ve idari bölge bazlı rekolte istatistikleri ile eşleştirilmiştir. Ön işleme sonrasında elde edilen veri seti, KAN, MLP, SVR, RFR, KNN ve LASSO modelleriyle hem sezon içi hem de sezon sonu tahminlerinde kullanılmıştır. Modeller, eyalet dışı bırakma (leave-one-state-out) çapraz doğrulamasıyla test edilmiştir. Ayrıca Bayesian model parametre optimizasyonu sayesinde modellerin uygun biçimde eğitilmesi sağlanmıştır. KAN'ın açıklanabilirlik özelliği kullanılarak yer gözlem değişkenlerinin mısır fenolojisine etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

İdari bölge bazında mısır rekoltesinin hem sezon sonunda hem de sezon içinde tahmin edebilmek amacıyla kapsamlı bir veri kümesi hazırlanmıştır. Bu veri kümesi, bitki fenolojisine ilişkin biyofiziksel parametrelerin yanı sıra iklim, topografik ve toprak özelliklerini içermektedir. USDA tarafından sağlanan tarım alanı sınıflandırma haritası (Cropland Data Layer) kullanılarak 13 eyalete ait mısır sınıflandırma haritaları ve yıllık rekolte verileri 2016-2023 yılları için derlenmiştir. Rekolte tahmini kapsamında toprak yapısı, topografik değişkenler ve iklim verileri birlikte değerlendirilmiştir. Toprak yapısı (kum, silt ve kil oranları) su tutma kapasitesi, besin döngüsü ve kök gelişimini etkileyerek ürün fenolojisinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Topoğrafik faktörler olan yükselti ve eğim, mikro iklim koşullarını ve toprak neminin dağılımını belirlemektedir. İklim verileri ise yağış ile minimum ve maksimum sıcaklıkları kapsayarak büyüme döngüsünün izlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Söz konusu veriler GEE platformundan elde edilmiştir (Poggio vd., 2021; Jarvis vd., 2008; Thornton vd., 2020). Bu bütünlük yaklaşım, farklı süreçlerin rekolte üzerindeki bileşik etkilerinin daha doğru yakalanmasını mümkün kılmaktadır.

2016-2023 dönemi için uydu, iklim, toprak yapısı ve topoğrafya verileri ilçe düzeyinde ön işleme tabi tutulmuştur. Değişkenler dinamik (iklim ve uydu verileri) ve statik (toprak ve topografik) özellikler olarak sınıflandırılmıştır. Dinamik veriler dört haftalık dönemler halinde gruplandırılmıştır. Eksik veriler enterpolasyonla tamamlanmış ve gürültüyü azaltmak amacıyla Savitzky-Golay filtresi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, özellikle uydu kaynaklı değişkenlerin güçlü korelasyonlar sunduğunu göstermektedir. EVI (0.79), LST (0.55) ve LAI (0.51) en yüksek korelasyonu göstermektedir. Bu korelasyonlar çoğunlukla Ağustos-Ekim döneminde belirginleşmiştir. İklim değişkenleri ise daha zayıf fakat istatistiksel açıdan anlamlı ilişkiler sergilemiştir. Bu bulgu, bitki örtüsü dinamiklerini yakalayan uzaktan algılama verilerinin rekolte tahmininde kritik rolüne işaret etmektedir.

Çok Kaynaklı Yer Gözlem Verileri Kullanılarak Açıklanabilir Mısır Rekoltesi Tahmini

Nihai veri seti, Nisan–Kasım arasında belirlenen sekiz zaman aralığında 56'sı dinamik ve 6'sı statik olmak üzere 62 özelliği içermektedir. Dinamik özellikler, fenoloji boyunca dört haftalık ortalama ve toplamlarla türetilmiştir. Farklı kaynaklardan gelen veriler öznitelik boyutunda birleştirilerek yaklaşık 6700 gözlemden oluşan ve 2016–2023 döneminde 13 eyaleti kapsayan geniş bir veri seti oluşturulmuştur. Veriler %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmıştır. ML modelleri tek eyaleti dışı bırakma yaklaşımıyla çapraz doğrulamadan geçirilerek genellenebilirlik yönü güçlendirilmiş ve nihai performans test veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Böylece hem modelin öğrenme kapasitesi hem de sahadaki olası transfer kabiliyeti nesnel biçimde test edilmiştir.

Çalışma kapsamında, yakın zamanda önerilen derin öğrenme yöntemlerinden biri olan Kolmogorov–Arnold Ağı (KAN) kullanılarak eğitilmiş, açıklanabilir bir mısır rekolte tahmin modeli sunulmaktadır. KAN, mısır rekolte tahmininde 0.85 R<sup>2</sup> ve 0.84 t/ha RMSE değerleri elde ederek yaygın şekilde kullanılan makine öğrenme modellerini geride bırakmıştır. RFR modeli de güçlü bir model olarak öne çıkarken, LASSO en düşük sonuçları elde etmiştir. KNN ve MLP ise orta düzeyde performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, KAN'ın hem doğruluk hem de model açıklanabilirliği bakımından pratik üstünlükler sunduğunu göstermektedir. Hasat öncesi rekolte tahmini ve üretim kayıplarının erken tespitini mümkün kılarak çiftçilere kaynak kullanımında ve karar verici yapılara gıda güvenliği planlamasında önemli katkılar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, ortaya konan rekolte tahmini ve potansiyeli özellikle tarımsal planlama ve stratejik karar alma süreçleri açısından değerli bir katkı sunmaktadır. Bulgular, KAN'ın idari bölge düzeyinde mısır rekoltesi tahmininde hem yüksek doğruluk hem de açıklanabilirlik sağladığını göstermektedir. Gelecekte ise farklı iklim ve toprak koşullarına sahip bölgelerde, transfer öğrenme yaklaşımları kullanılarak modelin genelleştirilebilirliğinin test edilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, ölçeklenebilir ve açıklanabilir rekolte tahmini çözümleriyle tarımsal karar destek sistemlerinin etkinliği daha da artırılabilir.

Anahtar Kelimeler

Rekolte tahmini, Mısır, Kolmogorov–Arnold Ağları (KAN), Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI)

Kaynaklar

- Cao, J., Zhang, Z., Tao, F., Zhang, L., Luo, Y., Han, J., & Li, Z. (2020). Identifying the contributions of multi-source data for winter wheat yield prediction in China. *Remote Sensing*, 12(5), 750.
- Çelik, M. F., Işık, M. S., Yüzüğüllü, O., Fajraoui, N., & Erten, E. (2022). Soil moisture prediction from remote sensing images coupled with climate, soil texture and topography via deep learning. *Remote Sensing*, 14(21), 5584. <https://doi.org/10.3390/rs14215584>
- Çelik, M. F., Işık, M. S., Taşkın, G., Erten, E., & Camps-Valls, G. (2023). Explainable artificial intelligence for cotton yield prediction with multisource data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3303643>
- Jamali, A., Roy, S. K., Hong, D., Lu, B., & Ghamisi, P. (2024). How to learn more? Exploring Kolmogorov–Arnold Networks for hyperspectral image classification. *Remote Sensing*, 16(21), 4015. <https://doi.org/10.3390/rs16214015>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe (Version 4). Retrieved November 1, 2024, from <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Khaki, S., & Wang, L. (2019). Crop yield prediction using deep neural networks. *Frontiers in Plant Science*, 10, 621. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00621>
- Khan, S. N., Li, D., & Maimaitijiang, M. (2022). A geographically weighted random forest approach to predict corn yield in the US Corn Belt. *Remote Sensing*, 14(12), 2843. <https://doi.org/10.3390/rs14122843>
- Liu, Z., Wang, Y., Vaidya, S., Ruehle, F., Halverson, J., Soljačić, M., Hou, T. Y., & Tegmark, M. (2024). KAN: Kolmogorov–Arnold Networks. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2404.19756>
- Mateo-Sanchis, A., Adsua, J. E., Piles, M., Muñoz-Marí, J., Pérez-Suay, A., & Camps-Valls, G. (2023). Interpretable long short-term memory networks for crop yield estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3244064>
- Muruganatham, P., Wibowo, S., Grandhi, S., Samrat, N. H., & Islam, N. (2022). A systematic literature review on crop yield prediction with deep learning and remote sensing. *Remote Sensing*, 14(9), 1990. <https://doi.org/10.3390/rs14091990>
- Paudel, D., de Wit, A., Boogaard, H., Marcos, D., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2023). Interpretability of deep learning models for crop yield forecasting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, 107663. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107663>
- Peichl, M., Thober, S., Samaniego, L., Hansjürgens, B., & Marx, A. (2021). Machine-learning methods to assess the effects of a non-linear damage spectrum taking into account soil moisture on winter wheat yields in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(12), 6523–6545. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6523-2021>
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Seydi, T., Sadegh, M., & Chanussot, J. (2025). Kolmogorov–Arnold network for hyperspectral change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3539535>
- Thornton, M. M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P. E., & Kao, S.-C. (2020). Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 [Data set]. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1840>
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: A comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>

# ATMOSFERİK VE METEOROLOJİK FAKTÖRLERE DAYALI GÜNEŞ PANELİ PERFORMANS TAHMİNİ

Remzi ZAMAN<sup>1</sup> \*, Müslüm HACAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul.

## Genişletilmiş Özet


Güneş enerjisi, dünya genelinde sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynakları arasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerjiye geçişi zorunlu kılmaktadır (Gündüz ve Bıcıl, 2022; Ataş ve Memduhoğlu, 2023). Güneş panellerinin doğru şekilde konumlandırılması, uygun sistem boyutunun seçilmesi ve bölgesel iklim verilerinin dikkate alınması, enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır. Ancak farklı lokasyonlarda kurulacak yeni paneller için verimliliği önceden tahmin edebilmek, yatırım planlaması ve enerji yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bugüne kadar bu amaçla gerek ulusal (Ataş ve Memduhoğlu, 2023) gerekse uluslararası (Miraftabzadeh vd., 2023; Nadeem vd., 2024; Benitez ve Bingham, 2025; Lari vd., 2025; Nguyen vd., 2025) bazı akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar genellikle enerji sistemlerinin konumlandırılmasında, yüzey morfolojisi, yıllık iklim verileri ve meteorolojik veriler gibi farklı öznitelikleri kullanabilmektedir. Bu çalışma, dünya genelinde güneş enerjisi panellerinin verimliliğini tahmin edebilecek makine öğrenimi tabanlı bir tahmin modeli tasarlanmaktadır. Model, mevcut güneş paneli kurulumlarından toplanan üretim ve yakın-gerçek zamanlı kullanım verileri (Haghdadi vd., 2016) ile atmosferik ve meteorolojik uydu verilerini bir araya getirerek eğitilecektir. Bu sayede yeni kurulacak paneller için enerji üretimi ve verimlilik tahminleri yapılabilecek, yatırımcılar ve politika yapıcılar için karar destek mekanizmaları sağlanacaktır. Model, veri kaynaklarını web siteleri ve API'ler (Uygulama Programlama Arabirimi) üzerinden entegre edebilmek, gerçek zamanlı ve geriye dönük veriler ile çalışma yeteneğine sahiptir.

Modelin eğitimi için birincil veri kaynağını, mevcut güneş paneli sistemlerinden toplanan açık kaynaklı operasyonel veriler oluşturmaktadır (PVOutput, 2025). Bu veri setinde şu panel özellikleri yer almaktadır: location\_id (yer numarası), system\_size (sistem büyüklüğü), generation (kapasite), efficiency (verim), average (ortalama), outputs (çıktılar), date (tarih). İkincil veri kaynağını, Tablo 1'de detaylarıyla açıklanan, meteorolojik faktörlerin analiz ve modellenmesinde kullanılan ve NASA tarafından sürekli olarak sağlanan veriler oluşturmaktadır (NASA POWER API, 2022).

Tablo 1. Meteorolojik ve atmosferik parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
Tüm Gökyüzü Kısa Dalga Radyasyonu (Yüzey)	Tüm atmosfer koşullarında yüzeye ulaşan kısa dalga ışınım (W/m <sup>2</sup> )
Açık Gökyüzü Kısa Dalga Radyasyonu	Bulutsuz havada yüzeye ulaşan kısa dalga güneş ışınımı (W/m <sup>2</sup> )
Tüm Gökyüzü Şeffaflık İndeksi	Atmosferin güneş ışığını geçirme oranı
Açık Gökyüzü Şeffaflık İndeksi	Bulutsuz atmosferde ışığın geçiş oranı
Tüm Gökyüzü Uzun Dalga Radyasyonu	Atmosferden gelen uzun dalga radyasyon miktarı
Açık Gökyüzü Uzun Dalga Radyasyonu	Bulutsuz atmosferde gelen uzun dalga ışınım
Tüm Gökyüzü Fotosentez Etkin Radyasyon	Fotosentez için uygun radyasyon miktarı
Açık Gökyüzü Fotosentez Etkin Radyasyon	Bulutsuz atmosferde fotosenteze uygun radyasyon
Hava Sıcaklığı (2m)	2 metrede ölçülen günlük ortalama sıcaklık
Maksimum Hava Sıcaklığı	Günlük maksimum sıcaklık
Minimum Hava Sıcaklığı	Günlük minimum sıcaklık
Çiğ Noktası Sıcaklığı	Havanın nem doygunluğuna ulaştığı sıcaklık
Bağıl Nem	2 metre yüksekliğindeki bağıl nem oranı
Rüzgar Hızı (2m)	2 metre yüksekliğindeki rüzgar hızı
Rüzgar Hızı (10m)	10 metre yüksekliğindeki rüzgar hızı
Rüzgar Yönü (2m)	2 metrede ölçülen rüzgar yönü
Bulutluluk Oranı	Gökyüzünün bulutlarla kaplı oranı
Atmosfer Üstü Kısa Dalga Radyasyonu	Atmosferin üst sınırında gelen kısa dalga ışınım

## Çok Kaynaklı Yer Gözlem Verileri Kullanılarak Açıklanabilir Mısır Rekoltesi Tahmini

Toplam Yağış (Düzeltilmiş)	Günlük toplam yağış miktarı
	

Şekil 1. Çalışma alanı ve panel konumlarının dağılımı.

Çalışmada, güneş paneli verimliliğini tahmin etmek amacıyla denetimli makine öğrenimi algoritmaları kullanılmakta ve doğrusal regresyon, rastgele orman (Random Forest), LightGBM ve XGBoost gibi algoritmalar test edilerek en yüksek doğruluğu sağlayan model karşılaştırılması yapılmaktadır. Modelleme süreci sırasıyla şu adımlardan oluşmaktadır:

- Veri Toplama ve Ön İşleme: Panel verileri ile NASA meteorolojik verileri birleştirme, eksik veya hatalı kayıtları temizleme,
- Öznitelik Mühendisliği: Mevcut verilerden türetilmiş özelliklerin seçilmesi
- Model Eğitimi ve Hiperparametre Optimizasyonu: Çeşitli algoritmalar üzerinde GridSearchCV ve RandomSearch yöntemleri uygulanarak en iyi modelin seçilmesi
- Performans Değerlendirmesi: Modelin başarısının, R<sup>2</sup> skoru, MAE ve RMSE metrikleri üzerinden değerlendirilmesi.

Geliştirilen makine öğrenimi modelinin ilk testi, verim öznitelik değerini yüksek başarıyla tahmin edebilmiştir. Model, Tablo 2’de yer alan performans metriklerine sahiptir.

Tablo 2. LightGBM tabanlı tahmin modelinin performans metrikleri

Metrik	Train Değer	Test Değer
R <sup>2</sup> Skoru	0.7364	0.7079
MAE	0.004	0.004
RMSE	0.0006	0.0006
MAPE (%)	13.90	15.06

Bu çalışma, güneş enerjisi sistemlerinin planlanmasına ve yatırım süreçlerine katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Ön değerlendirmeler, meteorolojik faktörlerin (özellikle güneş radyasyonu, bulutluluk oranı ve rüzgar) panel verimliliği üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Geliştirilen modelin mevcut performansı oldukça tatmin edici olup, özellikle LightGBM algoritması yüksek başarı göstermiştir. Çalışmanın ileriki aşamalarında, küresel ve yerel ölçeklerde farklı iklim koşullarına sahip bölgelerde güneş paneli verimliliğini önceden tahmin edebilecek genel bir model oluşturmak, NASA verileri ile saha verilerini birleştiren entegre bir verim tahmini mekanizması geliştirmek, enerji sektörü için karar destek sistemi oluşturularak maliyet-etkin yatırımların yapılmasını sağlayacak bir model oluşturmak hedeflenmektedir. Modelin tamamlanmasının ardından, gerçek saha verileriyle doğrulama yapılacak ve farklı coğrafi bölgelerdeki uygulanabilirliği incelenecektir. İlerleyen dönemlerde, yapay zeka destekli gelişmiş tahmin modellerinin (örneğin derin öğrenme tabanlı LSTM ağları) test edilmesi planlanmaktadır.

**Kaynaklar**

- Ataş, T., & Memduhoğlu, A. (2023). Determination of suitable areas for wind power plant installation in Şanlıurfa with GIS and AHP. *Intercontinental Geoinformation Days*, 6, 241-244.
- Benitez, I. B., & Singh, J. G. (2025). A comprehensive review of machine learning applications in forecasting solar PV and wind turbine power output. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 12, Article 54.
- Gündüz, N. K., & Bicil, İ. (2022). Yenilenebilir Enerji Yatırımlarını Belirleyen Faktörler ve Gelir Gruplarına Göre Seçilmiş Ülkelerin Analizi. *Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 7(13), 1-28.
- Haghdadi, N., Copper, J. K., Bruce, A., & Macgill, I. (2016, Kasım). Operational performance analysis of distributed PV systems in Australia. *Proceedings of the Asia Pacific Solar Research Conference*, Canberra, Australia.
- Lari, A. J., Sanfilippo, A. P., Bachour, D., & Perez-Astudillo, D. (2025). Using machine learning algorithms to forecast solar energy power output. *Electronics*, 14(5), 866.
- Miraftebzadeh, S. M., Colombo, C. G., Longo, M., & Foadelli, F. (2023). A Day-Ahead Photovoltaic Power Prediction via Transfer Learning and Deep Neural Networks. *Forecasting*, 5(1), 213-228.
- Nadeem, A., Hanif, M. F., Naveed, M. S., Hassan, M. T., Gul, M., Husnain, N., & Mi, J. (2024). AI-Driven precision in solar forecasting: Breakthroughs in machine learning and deep learning. *AIMS Geosciences*, 10(4), 684-734.
- NASA POWER Project. (2022). "Data Access for Renewable Energy Research." Erişim tarihi: 10 Ağustos 2025, URL: <https://power.larc.nasa.gov>
- Nguyen, H. N., Tran, Q. T., Ngo, C. T., Nguyen, D. D., & Tran, V. Q. (2025). Solar energy prediction through machine learning models: A comparative analysis of regressor algorithms. *PLoS ONE*, 20(1), e0315955.
- PVOutput. (2025). Solar panel system data and production logs. Erişim tarihi: 10 Ağustos 2025, URL: <https://pvoutput.org>

**Anahtar Kelimeler**

Mekânsal Problemlerde Makine Öğrenmesi, NASA POWER, Uzamsal Yapay Zeka, Açık Veri, Güneş Enerjisi Sistemi

# Uzayda Navigasyon

Caner Güney<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

## Özet

Bilim kurgu romanlarında ve filmlerde görülen uzay kurguları ile evrende fiziksel koşullar altında gerçekleştirilebilecek uzay navigasyonu arasındaki farklar büyüktür. Bununla birlikte 20. yüzyıldaki devletler arasındaki uzay yarışları ile özel sektörün de dâhil olduğu 21. yüzyıldaki uzay yarışları arasındaki farklar da büyüktür. Bu doğrultuda uzay endüstrisi bağlamında hem Türkiye'nin politikalar belirlemesi hem de Geomatik / Harita ve Kadastro / Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği sektörünün mesleki yaklaşımlar geliştirmesi gerekmektedir. Dünya genelindeki yarış uzaya bağımsız erişebilmek ve uzay ekonomisinden pay alabilmek üzerine kurulmuştur. Uzay endüstrisi yalnız dünya gezegeni etrafındaki konum belirleme, yer gözlem, haberleşme, meteoroloji uydularını kapsamaktadır. Bu endüstri, uzay madenciliğinden Ay'da ve Mars'ta kolonileşmeye kadar çok geniş bir yelpazede farklı birçok konuyu içine almaktadır. Türkiye henüz kendi uydularını kendi başına yörüngeye yerleştirememektedir. Hem bunu hem de Ay'da kolonileşme gibi yarışlara katılabilmek için bu çalışma kapsamında geomatik mühendisliği sektörünün hangi alanlarda katkı verebileceği üzerinde durulmuştur. Çünkü günümüzde sorun artık uzaya çıkabilmek değil, orada kalıcı olarak kalabilmektir.

## Anahtar Sözcükler

Uzay Misyonları, Navigasyon, Atomik Saat, Nötron Yıldızları, Gök Mekanik

## Abstract

The differences between the space scenarios seen in science fiction novels and films and space navigation that can be achieved under physical conditions in the universe are significant. Furthermore, the gap between the space races between nations in the 20th century and the space races involving the private sector in the 21st century is also significant. In this context, both Turkey and the geomatics engineering sector need to develop policies within the space industry and develop professional approaches. The global race is built on achieving independent access to space and securing a share of the space economy. The space industry encompasses a wide range of topics, from GNSS satellites, Earth observation, communication, and meteorological satellites to space mining and the colonization of the Moon and Mars. Turkey is not yet capable of placing its own satellites into orbit. This study focuses on the areas in which the geomatics engineering sector can contribute to both this and to participating in races such as lunar colonization. Because today the problem is no longer to go into space, but to stay there permanently.

## Keywords

Space Missions, Navigation, Atomic Clock, Neutron Stars, Celestial Mechanics

## 1. Giriş

Uzay eskiden sadece devletlere aitken günümüzde özel şirketlerde bu alana girmeye başlayınca uzay sıradan insanlar için de erişilebilir olmaya başlamıştır. Yakın zaman içerisinde uzaya çıkmanın başka ülkelere uçakla gitmek kadar kolay olacağı ön görülmektedir. Uzay yolculuğu için her ülkede farklı uzay şirketleri bulunacaktır.

Uzay taşımacılığı önemli bir konudur. Ay'da ve Mars'ta kolonileşme için uzay taşımacılığı yani insan ve yük taşımacılığı çok önemlidir. Bunun için uzayda A noktasından B noktasına ulaşabilmenin zaman, enerji ve yük açısından önemi anlaşılmalı ve bundan sonrada buna uygun navigasyon sistemleri tasarlanmalıdır. Tasarlanan sistemlerle uzayın herhangi bir bölümünde uçtan-uca navigasyon hizmeti (*Navigastion as a Service*, NaaS) verilebilmesi önemli bir konu haline gelmektedir.

Dünya'dan bir gezegene veya bir gezegenin uydusuna ya da bir asteroide doğrudan gitmeye kalkarsanız maliyetleriniz çok yüksek olacaktır. Dünya'daki A noktasından uzaydaki B noktasına doğrudan hızlı biçimde gitmek için çok fazla yakıt tüketmek gerekmektedir. Çok fazla yakıt tüketmek çok fazla ağırlık ve bu ağırlık için tekrar çok fazla yakıt yani ekonomik maliyet demektir. Bu nedenle uzayda olabildiğince kütle çekiminden yararlanmak ve her türlü maliyeti düşürmek temel prensip olarak kabul edilmektedir.

Son zamanlarda özellikle Ay'da bir üs/kent kurmak için büyük bir yarışın olduğu görülmektedir. Tasarım projelerinden, devletlerin iş birliği yapmalarına ve hatta bu iş birliklerine özel sektörü dâhil etmelerine kadar birçok gelişme yaşanmaktadır. Ay'da kent kurmak, kolonileşmek bu yarışın ilk aşaması olarak görülmekte ve hemen ardından Ay'dan Mars'a gitmek üzere planlar yapılmaktadır. Ay'ın son zamanlarda bu kadar popüler olmasının nedeni Ay'ın güney kutbunda olması muhtemel su kaynağı, suyun hem oksijen hem de hidrojen olarak kullanılabilir olması ve Ay'ın helyum 3 izotopu açısından zengin olması biçiminde genel olarak özetlenebilir. Ay'da kent kurulabilmesi için öncelikle oraya malzeme taşınabilmeli (uzay taşımacılığı), sonra kurulacak olan kent/üs için yollar, raylar ve kapalı alanlar inşa

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 285 3822  
E-posta: guneycan@itu.edu.tr (Güney, C.)

## Uzayda Navigasyon

edilmelidir. Tüm bunlar için bütün mühendislik dallarının üretim gücüne gereksinim bulunmaktadır. Buradan hareketle Geomatik / Harita ve Kadastro / Jeodezi ve Fotogrametri mühendisleri de öncelikle planlama ve tasarım alanında kullanılabilecek bir Ay Uzamsal Bilgi Sistemi (MoonGIS), sonra navigasyon sistemleri ve en sonunda Ay kenti kurulumuna ilişkin inşaat sistemleri ve projeleri için katkı verebilir. Çalışma kapsamında ayrı ayrı geniş bir kapsama sahip olacak bu konulardan yalnızca uzayda navigasyon konusuna değinilmiştir.

## 2. Roket Tahrik Sistemleri

Bir uzay aracını (*space craft*) hareket ettirmek, yani fırlatmak, yörünge düzeltmeleri, yönelim kontrolü için manevra yaptırmak ve inişini gerçekleştirmek için diğer bir ifadeyle genel olarak itki (*thrust*) sağlamak için farklı verimliliklerde tahrik (*propulsion*) sistemleri kullanılabilir. İtki sistemleri performans, verimlilik, ağırlık, güç tüketimi ve maliyet gibi çok sayıda teknik parametre doğrultusunda geliştirilmekte ve çeşitlendirilmektedir. (Sutton & Biblarz, 2016) Tahrik sistemleri; kimyasal tahrik sistemleri (*chemical propulsion*), elektrikli tahrik sistemleri (*electric propulsion*), nükleer tahrik sistemleri (*nuclear propulsion*) olmak üzere genel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır.

Rus teorik fizikçi Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky; ‘Kozmik Uzayın Tepkili Motorlarla Keşfi (*The Exploration of Cosmic Space by Means of Reaction Devices*)’ eserinde, sıvı yakıtla çalışan yeterince güçlü bir roketin Dünya gezegeninin yerçekiminden kurtularak diğer gezegenlere ulaşabileceğini teorik olarak açıklamıştır. Tsiolkovsky 1903 yılında roket hızının, roket yakıtının yanmasıyla nasıl değiştiğini matematiksel olarak ifade eden ilk kişi olup roket biliminin kurucusu olarak kabul edilmektedir. Tsiolkovsky ayrıca 1911 yılında iyonlaşmış gazlarla itki sağlanabileceğini de öngörmüştür.

Artan kamu ve özel sektör yatırımları, itki sistemleri alanında teknolojik çeşitliliğin ve görev uyumluluğunun önemli ölçüde artmasını beraberinde getirmiştir. Bu gelişmeler, gelecek yıllarda uzay görevlerinin daha esnek, düşük maliyetli ve yüksek verimli hale dönüşmesinin önünü açmaktadır.

### 2.1. Kimyasal Tahrik Sistemleri ve Geleneksel Roket Motorları

Kimyasal tahrik düzeneklerinin genel çalışma ilkesi, geleneksel roket motorlarının yakıtı yakmasıyla ortaya çıkan gazların basınçla dışarı atılması üzerine kuruludur. Yakıt, oksitleyiciyle karıştırılır ve böylece yakıt tutuşturulmuş olur. Tutuşturma sonucunda da büyük bir patlama oluşur. Bu sayede roketin egzozundan çıkan gazlar, Isaac Newton’un 3. Yasası olan etki-tepki ilkesine göre çıkan gazların tersi yönde rokete bir itme kuvveti oluşturmakta diğer bir ifadeyle itki kazandırmaktadır. Sözü edilen bu itki roketi ileri doğru hareket ettirmektedir.

Kimyasal tahrik sistemlerinde roket motorunda kimyasal tepkimelerle büyük miktarda enerji açığa çıkarılmakta ve böylece yüksek itki sağlanabilmektedir. Bununla birlikte gazın çok yüksek hızla atılmasına ve etki-tepki yasasına göre birbirlerine uyguladıkları kuvvet eşit olmasına rağmen çıkan gaza kıyasla roket çok daha yavaş hareket etmektedir. Bunun nedeni de Isaac Newton’un ikinci yasasının sonucunda elde edilen  $\vec{F} = m\vec{a}$  eşitliğidir. Bu eşitliğe göre etki-tepki kuvvetleri birbirine eşit olsa da gaz kütlelerinin kütlesi ile roketin kütlesi arasında bulunan çok büyük fark nedeniyle ivmeler ve dolayısıyla ivmenin türevi olan hızlar farklı biçimde oluşmaktadır.

Kimyasal tepkime ile çalışan geleneksel roket motor türleri aşağıda sınıflandırılmış ve kısaca açıklanmıştır:

- Katı Yakıtlı Roketler (*Solid Propellant Rockets*): Yakıt ve oksitleyici katı halde bir blok içinde bulunmaktadır. Çok güçlü, basit ve güvenilir olarak kabul edilmektedir. Bir kez ateşlendiğinde tepkime kontrol edilememektedir.
- Sıvı Yakıtlı Roketler (*Liquid Propellant Rockets*): Yakıt ve oksitleyici sıvı halde ve ayrı tanklarda bulunmaktadır. Güçlü roketler olarak kabul edilmektedir. İtki kontrolü yapılabilir. Bununla birlikte soğutma gerektirmektedir.
  - SpaceX firmasının Falcon 9 ve Starship roketleri, NASA’nın Apollo misyonlarında kullanmış olduğu Saturn V roketleri, NASA’nın Artemis misyonlarında kullanılacak olan ‘Space Launch System (SLS)’ roketleri, SSCB tarafından kullanılmış olan Soyuz roketleri, BlueOrigin firmasının New Shepherd ve NewGlenn roketleri, ‘United Launch Alliances (ULA)’ın Delta ve Vulcan roketleri örnek olarak gösterilebilir.
  - SpaceX firmasının roketleri Dünya gezegeninin yerçekiminden kurtulmak için sıvı oksijen (*Liquid O<sub>2</sub>*), LOX) ve metan (CH<sub>4</sub>) yakmaktadır. Bunun sonucunda güçlü bir kimyasal tepkime ile anlık olarak 74 milyon Newton gücünde bir itki sağlanmaktadır. Ancak bu yaklaşım yalnızca kalkışta kullanılmakta ve yaklaşık 3 dakika içerisinde yakıt tükenmektedir.
- Karma Roketler (*Hybrid Rockets*): Yakıt katı, oksitleyici sıvı formda bulunmaktadır. Güvenli ve kontrol edilebilir olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte çalışma şekli karmaşıktır.

Kimyasal tepkime ile çalışan geleneksel roketler yakıtlarını hızlı biçimde tüketmektedir. Bununla birlikte rokette bulundurulabilecek roket miktarı da sınırlıdır. Bu durumda Ay’a veya Mars’a yapılan yolculuklarda genellikle uzay aracı sürüklenerek (*drifting*) ilerlemektedir. Buradaki sorun, gerekli miktarda itkiyi üretebilmek için hem kütle hem de hacim olarak çok miktarda itki üreten maddeye (*propellant*) gereksinim bulunmasıdır. İtki üreten madde miktarı arttıkça roketin taşıyacağı yük miktarı da (*payload*) artmakta ve daha fazla yük daha fazla yakıt kısır döngüsü oluşmaktadır. Oysaki çok daha küçük kütleden ve hacimden oluşup enerji üretimi açısından çok daha üstün olan diğer bir enerji kaynağı yani nükleer güç bulunmaktadır. Bu nedenle nükleer tahrik sistemleri üzerinde çalışılmaktadır.

## 2.2. Elektrikli Tahrik Sistemleri ve Elektrikli Roket Motorları

Elektrikli tahrik sistemleri, daha az yakıt kullanarak uzun süreli itki sağlayabilmektedir. Bu sistemlerin sağladığı itki; kimyasal tepkimeli olanlara göre daha düşük seviyede olmasına rağmen çok daha verimlidir.

Elektrikli tahrik sistemlerinde elektrik enerjisinin üretilmesi için aşağıdaki gibi iki farklı yöntem kullanılabilir:

- Güneş Panelleri (*Solar Arrays*): Özellikle iç güneş sistemindeki (*inner solar system*) görevlerde en yaygın kullanılan yöntemdir. Güneşten uzaklaştıkça verimi düştüğü için üretebileceği elektrik gücü azalacaktır. Örneğin Jüpiter gezegeni ötesinde bu yöntemin verimi düşecektir. Dawn, DeepSpace-1, Psyche misyonlarında elektrik enerjisi, güneş panelleriyle elde edilmiştir.
- Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörü (RTG): Güneşten bağımsız çalışabildiği için özellikle derin uzay görevlerinde kullanılan yöntemdir. Voyager 1, Voyager 2, New Horizons misyonlarında kullanılan yöntemdir. Bu yöntemin zayıflıkları; sınırlı güç barındırabilmesi, reaktör güvenliğinin sağlanmasındaki zorluklar ve fırlatma sırasındaki radyoaktif risktir.

Yukarıdaki yöntemlerden biri kullanılarak uzay aracında elektrik enerjisi üretildikten sonra aşağıdaki tahrik teknolojilerinden biri kullanılarak itki elde edilebilmektedir. Elektrikli tahrik sistemi kapsamında kullanılan motor türleri aşağıda kısaca ifade edilmiştir:

- İyon motorları (*ion thrusters*): Çalışma ilkesi ksenon (*xenon*) gazının iyonize edilmesi ve hızlandırılarak dışarı atılması biçimindedir. Genellikle uzay sondalarında ve uydularda kullanılmaktadır. Uydu gravimetrisinde kullanılan GOCE uydusunda da iyon iticiler kullanılmıştır.
- Plazma motorları (*Hall Effect Thrusters, HET*): Çalışma ilkesi plazma halindeki iyonların manyetik alan ile hızlandırılarak itki oluşturması biçimindedir. Genelde mavi renkteki ksenon plazması kullanılmaktadır. Bunun yanında argon ve kripton gibi soy gazlar da kullanılabilir. Bu iticiler, SpaceX firmasının Starlink uydularında kullanılmaktadır. Ayrıca ESA'nın SMART-1 Ay misyonunda kullanılması planlanmaktadır. Psyche asteroidine giden uzay aracında da Hall iticileri kullanılmaktadır. Rosatom ve Roscosmos tarafından manyetik plazma hızlandırıcıya dayalı olarak geliştirilen motorun en az 6 Newton gücünde bir itkiye ve en az 100 kilometre/saniye özgül itkiye ulaşabildiği iddia edilmektedir. Ruslar bu plazma motorunun prototipini yaptıklarını 7 Şubat 2025 tarihinde açıklamışlardır (URL 1; URL 2).

Plazma ve iyon motorlarının üstünlüğü uzun süreli ve sürekli hızlanma sağlayabilmeleridir. Bununla birlikte bu motorlar, Dünya gezegeninde yerçekimini yenip kalkış yapabilecek güce sahip değildir. Ayrıca plazma motorları doğrudan dünya atmosferinde çalıştırıldığında iyonlar havadaki moleküllerle çarpışarak hızlarını kaybetmektedir. Bu nedenle plazma motorları uzayda yani vakumda çalıştırılmak için tasarlanmaktadır.

Plazma motorları ile iyon motorları arasındaki temel fark itki üretme yöntemleri arasındaki ayrışmadır. İyon motorları genellikle neon veya ksenon gibi soy gazları iyonlaştırmakta, elektrostatik alanlarla hızlandırmakta ve uzaya fırlatarak itki oluşturmaktadır. Plazma motorları ise manyetik ve elektrik alanları kullanarak plazmayı hızlandırmaktadır yani elektromanyetik hızlandırmadan yararlanmaktadır. Bu fark sayesinde plazma motorları, iyon motorlarına göre daha yüksek itki sağlayabilmektedir. Başka bir deyişle plazma motorları, iyon motorlarına göre daha güçlüdür. Bununla birlikte iyon motorları, plazma motorlarından daha verimli çalışmaktadır. Bununla birlikte her iki motor da kimyasal tepkime ile çalışan geleneksel motorlardan daha verimlidir.

'NASA Solar Electric Propulsion Technology Applications Readiness (NSTAR)', NASA tarafından geliştirilen ilk operasyonel iyon motorudur. Derin uzaydaki asteroidler ve kuyruklu yıldızları incelemek için gönderilen DeepSpace-1 (DS1) uzay aracında NSTAR motoru kullanılmıştır. 24 Ekim 1998 tarihinde başlayan ve 18 Aralık 2001 tarihinde sona eren DeepSpace-1 misyonu elektrikli tahrik teknolojisinin uzayda başarılı bir şekilde çalıştığını kanıtlamıştır.

Gezegen oluşumunun erken evrelerini anlamak için iki büyük asteroit olan Vesta ve Ceres'in yapılarını ve bileşimlerini incelemek için NASA tarafından gönderilen Dawn uzay aracı üç adet NSTAR tabanlı iyon motoru ile düşük seviyede yakıt kullanarak uzun süreli bir misyon gerçekleştirmiştir. 27 Eylül 2007 tarihinde göreve başlayan Dawn uzay aracı, 16 Temmuz 2011 ve 5 Eylül 2012 tarihleri arasında Vesta asteroidini, 6 Mart 2015 tarihinden itibaren de Ceres asteroidini incelemeye başlamıştır. Böylece iki ayrı asteroide ulaşan ilk uzay aracı olmuştur.

NASA tarafından geliştirilen bir sonraki nesil iyon motoru 'NASA Evolutionary Xenon Thruster (NASA NEXT)' tahrik teknolojisi. NEXT tahrik sisteminin amacı NSTAR iticisinin performansını aşarak gelecekteki derin uzay misyonları (*deep space missions*) için daha güçlü ve verimli bir motor geliştirilmesinin sağlanmasıdır.

## 2.3. Nükleer Tahrik Sistemleri

Nükleer tahrik sistemleri, uzay araçlarını hareket ettirmek için nükleer enerji kullanan sistemlerdir. Bu tür tahrik sistemleri nükleer enerjiyi, kimyasal tepkimeli roketlerde olduğu gibi patlama biçiminde değil aşağıda ifade edildiği üzere ısı kaynağı veya elektrik üretimi olarak iki farklı yaklaşımla kullanılmaktadır. Bu iki ana yaklaşımın dışında nükleer füzyon kaynaklı ve anti-madde kaynaklı tahrik sistemleri de kuramsal olarak çalışılmaktadır.

- Nükleer Isıl Tahrik (*Nuclear Thermal Propulsion, NTP*) Sistemleri: Nükleer fisyon reaktörü; uranyum, plütonyum gibi bir yakıtla ısı üretmektedir. Bu ısı, sıvı hidrojen gibi itki üreten maddeyi (*propellant*) çok yüksek sıcaklığa

## Uzayda Navigasyon

getirmektedir. Sıcaklığı artan gaz dışarı fırlatılarak bir itki oluşturulmaktadır. Bu sistemleri kullanan roketler, kimyasal tepkimeli roketlerden daha verimli çalışmaktadır. NASA'nın DARPA ile iş birliği yaptığı fisyon tabanlı 'Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO)' projesi roketinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin zayıflıkları arasında reaktör güvenliğinin sağlanmasındaki zorluklar ve fırlatma sırasındaki oluşabilecek radyoaktif risk bulunmaktadır.

- Nükleer Elektrikli Tahrik (*Nuclear Electric Propulsion, NEP*) Sistemleri: Bu yöntemde nükleer fisyon reaktörü elektrik üretmektedir. Bu elektrik iyon veya plazma motorlarında itki elde edebilmek için kullanılmaktadır. Bu yaklaşımla uzay aracı düşük bit itkiye sahip olur. Ancak elde ettiği itki verimlidir. Uzay aracı bu yaklaşımla yavaş hızlanır ve bu nedenle yakıt uzun süre dayanabilir. Böylece bu yöntem, uzayda uzun süre çalışmak ve derin uzay misyonları için uygun bir seçenek haline gelmektedir.
- Nükleer Füzyon Kaynaklı Tahrik Sistemleri (*Nuclear Fusion Rocket*): Güneş gibi hidrojen füzyonu ile çalışan tahrik sistemleridir. Bu yöntemin bazı örnekleri aşağıda verilmiştir.
  - Ad Astra firması tarafından geliştirilen NASA Vasimr roketi.
  - Pulsar Fusion firması tarafından Sunbird projesi kapsamında geliştirilen roket. Bu yaklaşımda döteryum-helyum füzyonu kullanılarak 10 ila 100 Newton arasında bir itki elde edilmesi beklenmektedir. Döteryum-helyum füzyonu ile çok hızlı hareket eden protonlar ortaya çıkmaktadır. Bu protonlar güçlü manyetik alanlarla yönlendirmekte ve roketten dışarı doğru fırlatılmaktadır. 2025 yılında testlere başlayacak olan Pulsar firması, 2027 yılında ilk prototipini uzayda denemeyi planlamaktadır.
- Anti-madde Kaynaklı Tahrik Sistemleri: Madde ve anti-maddenin yok olmasıyla ortaya çıkan enerjiyi kullanan tahrik sistemleridir. Yaklaşık olarak ışık hızının %90'ı gibi çok büyük hızlara ulaşılacağı düşünülmektedir. Bu yaklaşımın zayıflığı anti-madde üretiminin çok pahalı olması ve depolanmasının imkânsız gibi görünmesidir.

#### 2.4. Nasıl Bir Tahrik Sistemi Kullanmak Gereklidir?

Yakıtını hızla tüketerek kısa sürede çok hızlanan kimyasal tepkimeli roketlerin yakıtı bittikten sonra bir daha hızını artırma olasılığı bulunmamaktadır. Plazma motorları ise çok daha az yakıt kullanarak uzun süre boyunca itki sağlayabilmektedir. Böylece zaman içerisinde çok daha yüksek hızlara ulaşmaları olasıdır. Bu durumda Ay'a ve Mars'a gitmek için kimyasal tepkimeli roketler kullanılamaz ya da kullanılması durumunda yakıt ikmali yapmaları gerekmektedir. Onun yerine kimyasal roketlerden çok daha verimli olan plazma motorlarının kullanılması daha mantıklıdır. Diğer taraftan yaklaşık 10 Newton gücünde itki sağlayan plazma motorlu bir roketle Dünya gezegeninin yerçekiminden kurtulmak olası değildir. Bu durumda plazma motor teknolojili roketi uzaya çıkarmak için kimyasal tepkimeli roket kullanmak gerektiği açıktır.

NASA Glenn Research Center araştırma merkezinde 'Pulse Fission-Fusion Propulsion System (PuFF)' adında yeni bir tahrik sistemi tasarlanmaktadır. Bu sistem, hem fisyon hem de füzyon tepkimelerini birleştirerek hem yüksek itki hem de yüksek özgül itki sağlayan ve derin uzay için önemli bir potansiyel barındıran yenilikçi bir tahrik sistemidir. Bu tahrik sistemi plazma motor ve atımlı (*pulse*) çalışma gibi tahrik teknolojilerini kullanması planlanmaktadır. PuFF sisteminin çalışma ilkesi temelde fisyonla tetiklenen füzyon tepkimesi ve bunun sonucunda da plazma püskürtmesidir. Bu nedenle itki türü nükleer termal ve plazma füzyon olarak kabul edilebilir. Atımlı çalışma biçimi sürekli çalışmayı değil, kısa süreli ancak yüksek enerjili patlamalar halinde ortaya çıkan itkiyi ifade etmektedir. Böylece hem verimlilik artmakta hem de sistemin soğuması için zaman kazanılmaktadır. PuFF gibi sistemlerle Mars gezegenine yolculuk süresi aylardan haftalar seviyesine inebilir.

Roketlerde, uzay tahrik sistemlerinde verimlilik konusu genelde 'özgül itki (*specific impulse*)' kavramı ile tanımlanmaktadır. Özgül itki, bir motorun yakıtını ne kadar verimli kullandığını ifade etmektedir. Daha net bir ifadeyle, bir roketin 1 kilogram yakıtla ne kadar itki sağlayabildiğini belirtmek için kullanılmaktadır. Genelde süreye veya hıza bağlı olarak iki biçimde ifade edilmektedir: lsp (saniye) ve lsp (metre/saniye). lsp (saniye); bir roketin 1 kilogram yakıtla Dünya'nın yerçekimi altında ne kadar süre boyunca itki sağlayabildiğini göstermektedir. Özgül itki (lsp) yüksekse, uzay aracı daha az yakıtla daha çok iş yapmaktadır. Başka bir deyişle yüksek özgül itki; daha hafif roket ve daha uzun görev süresi demektir. Bu da uzay yolculukları için çok önemlidir.

Farklı kurumlarda geliştirilen iyon ve plazma motorları özgül itkiler özelinde karşılaştırıldığında Rosatom-Roscosmos manyetik plazma hızlandırıcısı 100 km/s, NASA NEXT 41 km/s, NASA NSTAR 31 km/s, NASA Dawn 29 km/s, ESA SMART 16 km/s değerlerine ulaşabildikleri açıklanmıştır.

#### 2.5. Warp Yörüngesi ve Warp Motoru

Warp motoru Albert Einstein'ın Genel Görelilik kuramı çerçevesinde önerilmiş uzay zamanın doğrudan kendisini kullanan kuramsal bir motor türüdür.

Bu yaklaşımda bir uzay aracı yerelde hiçbir zaman ışık hızını aşmadan yalnız uzay zamanı bükerek kendisini ışık hızından daha hızlı biçimde hedefe ulaştırabilir. Bu yaklaşıma göre aslında hareket eden uzay gemisi değil, uzay zamanın kendisidir. Warp motoru geminin önündeki uzayı bükerek arkasındaki uzayı ise genişleterek çalışmaktadır. Bu iki etkinin

arasında kalan uzay aracı, uzay zamanın sabit kaldığı bir bölge olan warp balonunun içinde yer almaktadır. Warp motoru uzay-zamanı bükme için özel bir enerji türü olan negatif enerji kullanmaktadır. (Alcubierre, 1994)

### 3. Klasik Mekanikten Gök Mekaniğine ve Yörünge Mekaniğine İlerleyiş

Gök mekaniği (*celestial mechanics*); yıldızlar, gezegenler, uydular, asteroitler gibi doğal gök cisimlerinin yörüngelerini inceleyen bir fizik dalıdır, yörünge mekaniği (*orbital mechanics*) yapay uydular, roketler ve uzay araçları gibi yapay cisimlerin hareketlerini inceleyen bir fizik dalıdır. Bu iki mekanik yaklaşım; gezegenler, kuyruklu yıldızlar, asteroitler ve uzay araçları dâhil olmak üzere güneş sistemindeki ve ötesindeki her şeyin hareketini belirli bir doğrulukla tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Bir cismin Dünya gezegeninin çekim etkisinden kurtulabilmesi için sahip olması gereken ilk hıza kaçış hızı (*escape velocity*) denilmektedir. Eşitlik 1’de görüldüğü üzere kaçış hızını hesaplamak için cismin sahip olduğu kinetik enerjinin kütle çekim kaynaklı potansiyel enerjiye eşit olmasından hareket edilir. Eşitlik 2’de bu hız değerinin nasıl hesaplandığını gösterilmektedir. Eşitlik 1 ve 2’de kullanılan  $R$  değeri gezegen yarıçapını,  $G$  evrensel kütle çekim sabitini,  $M$  gök cisminin kütlesini göstermektedir.

$$\frac{1}{2} m_{\text{roket}} V_{\text{kacis}}^2 = \frac{G \cdot M_{\text{DUNYA}} \cdot m_{\text{roket}}}{R} \quad (1)$$

$$V_{\text{kacis}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot R} \quad (2)$$

Yörünge eşik hızı (*orbital velocity*), bir cismin bir gezegen veya uydu etrafında kararlı bir yörüngeye girebilmesi için ulaşması gereken minimum hızdır. Bu hız, cismin yerçekimine karşı koyarak uzaya düşerken aynı zamanda yörüngede kalmasını sağlamaktadır. Eşitlik 3’te gösterildiği üzere yörünge hızı, çekim alanının gücüne ve yörünge yarıçapına bağlıdır. Eşitlik 3’teki  $r$  değeri; yapay cismin gök cisminin merkezinden olan yörünge yarıçapını göstermektedir. Bu değer gök cisminin yarıçapı ile yörünge yüksekliğinin toplamı ( $r=R+h$ ) olarak hesaplanmaktadır.

$$V_{\text{yorunge}} = \sqrt{\frac{G \cdot M_{\text{DUNYA}}}{r}} \quad (3)$$

Eğer bir cismin/roketin fırlatma hızı, yörünge hızını aşarsa, roket gezegenin kütle çekiminden kurtulabilir ve uzaya düşebilir. Diğer bir ifadeyle kaçış hızı, yörünge hızının  $\sqrt{2}$  katı olduğunda roket uzaya kaçabilir. Amaç uzaya gitmek değil de yapay cisim, gök cismi etrafında bir yörüngeye yerleştirmek ise o zaman roketin fırlatma hızı, hedef yörüngeye ulaşmak için yeterli olmalıdır. Örneğin Dünya gezegeninde ‘Alçak Dünya Yörüngesi (*Low Earth Orbit, LEO*)’ne ulaşmak için en az  $\sim 7.8$  km/s hız gerekirken, Dünya gezegenin kütle çekiminden kurtulabilmek için gerekli kaçış hızı  $\sim 11.2$  km/s’dir. Cismin, Güneş’in kurtulma hızına ulaşmış, Güneş Sistemi’ni terk edebilmesi için ise 42.1 km/s’lik sürata ulaşması gerekmektedir.

Isaac Newton’un 1728 yılında yayınladığı ‘Dünya Sisteminin Bilimsel Bir İncelemesi (*A Treatise of the System of the World*)’ adlı kitabında bahsettiği düşünsel deneylerinden biri olan ‘Newton top güllesi (*Newton’s cannonball*)’ne göre farklı fırlatma hızlarına göre aşağıdaki durumlardan biri oluşmaktadır:

- Eğer bir roket yörünge eşik hızından düşük bir hızla fırlatılırsa gezegene düşecektir.
- Eğer bir roket yörünge eşik hızına eşit bir hızla fırlatılırsa gezegen etrafında sabit bir çember şeklinde bir yörünge izleyecektir.
- Eğer bir roket yörünge eşik hızından büyük ama kaçış hızından düşük bir hızla fırlatılırsa gezegenin etrafında eliptik bir yörünge izleyecektir.
- Eğer bir roket kaçış hızına eşit veya kaçış hızından büyük bir hızla fırlatılırsa gezegenden ayrılacak ve uzaya doğru yol alacaktır.

Herhangi bir gök cisminin başka bir gök cismi etrafında yörüngede hareket halindeyken iki cismin birbirine en çok yaklaştığı konuma periapsis, en uzak oldukları konuma apoapsis denilmektedir. Bu durum güneş ve dünya ikili sistemi için perihelion-aphelion, dünya ve ay ya da dünya ve yapay uydu ikili sistemleri için perigee-apogee, bir gök cismi ve bir yıldız için ise periastron-apoastron gibi özel isimler almaktadır. Dünya merkezli örnekteki perigee ifadesi yerberi, apogee ifadesi yeröte olarak da kullanılmaktadır. Johannes Kepler tarafından geliştirilen ikinci yasaya göre bir gök cismi etrafında eliptik bir yörüngede bulunan diğer gök cisminin hızı periapsis konuma yaklaştıkça hızlanmakta ve apoapsis konumuna yaklaştıkça yavaşlamaktadır. Bu durumda uzay araçlarının kaçış hızına ulaşmış Dünya gezegeninden ayrılabilmesi için gezegenden kaçışı perigee konumundayken gerçekleştirmesi daha verimli olacaktır. Bunun nedeni zaten yüksek hızdayken daha çok hızlanabilmek için perigee konumunun üstünlüğünün kullanılması ve apogee gibi uzaktaki bir konumdan hızlanmaya göre daha düşük yakıt harcayacak olmasıdır.

Hermann Julius Oberth 1927 yılında, uzay aracının bir gök cismine en yakın olduğu noktada yani hızının en yüksek olduğu noktada yakıt harcamasının diğer konumlardaki ateşlemesine kıyasla daha fazla kinetik enerji sağlayacağını ifade etmiştir. Bunun nedeni kinetik enerjinin hızın karesi ile doğru orantılı olmasıdır. Aynı miktar yakıttan daha fazla enerji üretilmesine Oberth Etkisi (*Obert Effect*) denilmektedir.

Uzay araçları gezegenler arası yolculuklarda da eliptik bir yörünge/yol (*trajectory*) izlemekte, aslında sürüklenmektedir (*drift*). Böylece uzay araçları yakıt harcamadan ya da çok az yakıt harcayarak hedef noktalarına ulaşmaya çalışırlar. Varmak istedikleri gezegene veya gezegenin uydusuna ulaştıklarında, bu gök cisminin yörüngesine

## Uzayda Navigasyon

girmek için yine kütle çekiminden yararlanırlar. Ters yönde itki üreterek hareket halindeki uzay aracı yavaşlatılabilmektedir.

‘Yer Eş Zamanlı (*geosynchronous*) Yörünge’ ve onun ekvator düzlemiyle çakıştırılmasıyla özelleştirilmiş hâli olan ‘Yer Durağan (*geostationary*) Yörünge’ periyotları bir yıldız günü olan yörüngelerdir. Bu yörüngelerdeki cisimlerin açısız hızları Dünya gezegeninin kendi etrafındaki dönüş hareketinin açısız hızına eşittir.

Örneğin bir uydunun yer durağan yörüngeye yerleştirilebilmesi için roketin fırlatmadan sonra önce alçak dünya yörüngesine ulaşması sonra apogee uzunluğu artırılarak yörüngenin eliptik bir şekil almasının sağlanması gerekmektedir. Böylece geotransfer yörüngeye (*GeoTransfer Orbit*, GTO) ulaşılmış olacaktır. Ardından az miktarda yakıt yakılarak uydu yer eş zamanlı yörüngeye ve biraz daha yakıt yakılarak yer durağan yörüngeye ulaşılmaktadır. Sözü edilen bu yörüngeler arası geçişlerde ‘Hohmann Transfer Yörüngesi (*Hohmann Transfer Orbit*)’ manevraları kullanılmaktadır.

1925 yılında Alman fizikçi Walter Hohmann tarafından geliştirilen Hohmann transferi; merkezlerinde aynı gök cisimi bulunan ve aynı düzlem üzerinde yer alan farklı yarıçaplı yörüngeler arasında en az miktarda yakıt harcarak geçiş yapılmasını sağlayan manevradır. Bu manevra yönteminde ilk ateşleme uzay aracını eliptik bir transfer yörüngesine sokarken, ikinci ateşleme hedef yörüngeye ulaşıldığında yapılır ve uzay aracı yeni yörüngede kalır.

Benzer biçimde Dünya gezegeninden Mars gezegenine gitmek için de Hohmann Transfer Yörüngesi kullanılabilir. Ancak bu geçiş istenildiği her an gerçekleştirilemez. Dünya ile Mars gezegenleri eliptik yörüngeleri nedeniyle her 26 ayda bir birbirlerine en yakın konuma gelmektedir (~54.6M km). Bu nedenle Hohmann transferi yapılacak zaman aralığı 26 ayda bir denk gelmekte ve sadece bir kaç saat sürmektedir. Belirlenen zaman aralığında araç herhangi bir nedenle kalkış yapamazsa bir sonraki zaman aralığını (*launch window*) beklemek zorunda kalmaktadır.

İkili Eliptik Transfer (*Bi-elliptical transfer*), Hohmann transfer yöntemine benzer, ancak daha uzun menzilli yörüngeler için optimize edilmiştir. İlk ateşlemede çok büyük bir eliptik yörüngeye geçiş yapılır. İkinci ateşlemede uzak noktada (apoapsis) bir başka ateşleme ile daha büyük bir yörüngeye geçilir. Üçüncü ateşleme son hedef yörüngeye oturmak için yapılır. Bu yöntem, yüksek enerji gerektiren yörünge değişikliklerinde daha verimli olabilir. Çok büyük yarıçaplı yörüngelerde yani uzak mesafelerde Hohmann yönteminden daha az yakıt harcar. Bu modelin zayıflığı daha büyük bir yörüngeye çıkmak gerektiği için daha uzun zaman almıştır.

Düşük itki transferi yöntemi (*low thrust transfer method*) ve gezegenler arası ulaşım ağı (*interplanetary transport network*) gibi Hohmann yönteminden daha uzun süreli ve daha verimli başka yöntemler de bulunmaktadır.

Voyager 1 ve Voyager 2 sondaları; 175 yılda bir yaşanan Jupiter, Uranus, Neptün gezegenlerinin hizalanmasından yararlanmışlardır. Voyager sondaları burada Hohmann transfer manevrası değil, ‘kütle çekimsel sapan hareketi (*gravitational slingshot*)’ yapmıştır. Cassini sondasında ve Mariner 10 sondasında da benzer etkiden yararlanılmıştır. Kütleçekimsel sapan hareketi zamandan ve yakıttan tasarruf etmek için kullanılan bir manevradır. (Minovitch, 2010) Eğer uzay aracı gezegenin hareket yönünde ilerlerse hızı artmakta, gezegenin hareket yönünün tersinde ilerlerse hızı azalmaktadır. Uzay aracı bu yöntemle yönünü de değiştirebilmektedir. Bu manevra yönteminde yakıt kullanılmaz. (Zander, 1925) Bu yöntem ve gezegenlerin hızlanması sayesinde 1977 yılında fırlatılan Voyager 2 uzay sondası, 40 yıl gibi bir sürede dört dış gezegeni ziyaret edip 17 milyar kilometreden fazla yol kat etmiştir. En hızlı uzay araçlarından biri olan New Horizons sondasının Dünya gezegeninden Plüton asteroidine ulaşması yani yaklaşık 5 milyar kilometrelik mesafeyi kat etmesi dokuz yıl sürmüştür.

Yörüngede Buluşma (*Orbital Rendezvous*) manevrası; iki uzay aracının yörüngelerini senkronize ederek buluşmasını sağlayan manevradır. Özellikle uzay istasyonları ve uzay araçları arasında modülleri birleştirmek için kullanılmaktadır. ‘Uluslararası Uzay İstasyonu (*International Space Station*, ISS)’na insanlı veya insansız araç gönderirken, Apollo görevlerinde Ay modülü ile ana modülün buluşması sırasında bu manevra kullanılmıştır. Çalışma ilkesi düşük yörüngede olan uzay aracı, yüksek yörüngedeki bir hedefe ulaşmak için faz farkı ve hız farkını hesaplayarak manevralar yapması üzerine kuruludur.

Uzay aracının yörüngesinin eğimini (*inclination*) değiştirmek için Düzlem Değiştirme Manevrası (*Plane Change Maneuver*) yöntemi kullanılır. Genellikle kutupsal yörüngeye veya ekvator yörüngesine geçiş için kullanılmaktadır. Bu yöntemin zayıflığı yakıt tüketiminin çok fazla olmasıdır.

Çok genel olarak manevralar yörünge ve derin uzay olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Bu durumda yukarıda ifade edilen Hohmann Transfer, İkili Eliptik Transfer gibi yöntemler yörünge (*orbit*) manevraları, kütle çekimsel sapan hareketi, Oberth etkisi gibi yöntemler derin uzay manevraları olarak kabul edilebilir. Yakıt verimliliği önemli ise Hohmann Transfer, çok büyük mesafeler söz konusu ise İkili Eliptik Transfer, zamanın önemli olmadığı ve yakıtın az olduğu durumlarda Düşük İtli Transferi yöntemi, gezegenler arası yolculukta hız kazanmak için kütle çekim yardımı, iki uzay aracını birleştirmek için Rendezvous, farklı bir yörünge eğimine geçiş için yörünge değiştirme manevraları kullanılabilir.

$\Delta V$  (Delta-v) uzayda bir yörüngeye oturmak, bir yörüngeden farklı bir yörüngeye geçmek, rota değiştirmek için kullanılması gereken yakıtın bir ölçütüdür. Başka bir deyişle bir uzay aracının yapabileceği hız değişikliğinin skaler karşılığıdır. Manevralar  $\Delta V$  ölçütüne göre Büyük Delta-v Gerektiren Manevralar, Orta Delta-v Gerektiren Manevralar ve Küçük Delta-v Gerektiren Manevralar biçimde sınıflandırılabilir.

Farklı uzay misyonları için hangi manevralarının seçileceği; yakıt, zaman ve misyonun amacına bağlıdır. Ayrıca tahrik sistemi ile manevra ilişkisi de göz önünde bulundurulması gereken bir konudur.

Geleneksel kimyasal roketler yerine elektrikli tahrik sistemleri ile uzun süreli yavaş yörünge değişiklikleri yapılmasını sağlayan yöntem düşük itki transferi yöntemidir. Bu iyon ve plazma motorlarının kullanıldığı görevlerde kullanılmaktadır.

### 3.1. Ay Yörüngeleri

Ay'ın kütle çekim alanına giren uzay araçlarının bilimsel keşifler, gözlemler ve iniş görevleri gibi amaçlarla kullandıkları farklı yüksekliklerdeki Ay yörüngeleri bulunmaktadır. Bu yörüngeler aşağıda belirtilmiştir:

- Alçak Ay Yörüngesi (*Low Lunar Orbit, LLO*)
- Orta Ay Yörüngesi (*Medium Lunar Orbit, MLO*)
- Yüksek Ay Yörüngesi (*High Lunar Orbit, HLO*)
- Kutupsal Yörünge (*Polar Orbit*)
- Ay Yakalama Yörüngesi (*Lunar Capture Orbit*)
- Halo Yörünge (*Halo Orbit*): Doğrusala Yakın Halo Yörüngesi (*Near-Rectilinear Halo Orbit, NRHO*)

Alçak Ay Yörüngesi, Ay'dan yaklaşık 20 km ile 200 km arasındaki yükseklikte bulunan bir yörünge, genellikle Ay yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerinin ve veri kümelerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ay yüzeyine yakınlık, yüzey özelliklerini detaylı incelemek için avantaj sağlamaktadır. Ayın detaylı gözlemleri bilimsel araştırmalar için kullanılmaktadır. 'Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)', 'Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)' gibi misyonlarda kullanılan uzay araçları bu yörüngede faaliyet göstermiştir. 2011-2012 yılları arasında gerçekleştirilen GRAIL misyonu 55 km yükseklikte Ay yüzeyine oldukça yakın mesafede gerçekleştirilmiştir. Bu yörünge, Ay'ın düzensiz kütle dağılımı (Mascon etkisi) nedeniyle yörünge bozulmalarının oluşması ve bu bozulmalar nedeniyle sürekli yörünge düzeltmesi gerektirir.

Alçak Ay Yörüngesi, Alçak Dünya Yörüngesi (LEO) gibi düşünülebilir. Ancak Ay'ın kütle çekiminin Dünya'da yer çekiminin %16'sı kadar olduğundan Alçak Ay Yörüngesinde yörüngede kalma dinamikleri biraz farklıdır. Ay'ın kütle çekimi Dünya'ya göre daha düşük olduğu için Alçak Ay Yörüngesinin periyodu (dönme süresi) yaklaşık 2 saat veya daha az sürmektedir.

Orta Ay Yörüngesi, Ay'dan yaklaşık 500-1000 km yükseklikte bulunan bir yörünge, genellikle Ay çevresinde uzun süreli gözlem yapacak uzay araçları için kullanılmaktadır. Bu yörüngede yapılan gözlemler daha düşük çözünürlüklüdür ancak daha geniş bölgeyi kapsamaktadır.

Yüksek Ay Yörüngesi, yüksekliği 1000 km'nin üzerinde olan bir yörünge, uzun süreli gözlemler, harita üretimi ve Ay'ın çevresinde enerji toplama gibi görevler için kullanılmaktadır.

Ay çevresinde kutupsal yörüngeler, uzay aracının Ay'ın kuzey ve güney kutuplarından geçerek dönel hareket yapmasını sağlamaktadır. Ay'ın tüm yüzeyini gözlemlemek için çok etkili bir yöntemdir. Bu yörüngede bir uzay aracı, Ay'ın her iki kutbunu da geçer ve tüm yüzeyin haritasının üretilmesine olanak tanır.

Ay Yakalama Yörüngesi, uzay aracının Ay'ın kütle çekimi ile Ay'ın kütle çekim alanına girmesini sağlamak için kullanılan bir yörünge, Ay'a yaklaşan bir uzay aracı, hızını düşürerek Ay çevresinde bu yörüngeye girmektedir. Ay'a iniş yapacak araçlar için ya da uzun süreli gözlem görevleri için kullanılır. Bu manevra, uzay aracının hızını düşürerek Ay çevresinde stabil bir yörüngeye oturmasını olanaklı hale getirmektedir. Genellikle Ay'a iniş yapacak araçlar bu yörüngeye girdikten sonra, yüzeye iniş için hazırlık yapmaktadır.

Doğrusala yakın halo yörüngesi, Artemis projesi kapsamında *Lunar Gateway* gibi uzay istasyonlarının Ay çevresinde daha az enerji harcayarak uzay araçlarının uzun süre Ay çevresinde kalmasına olanak tanıyan yörünge, Ay'ın kütle çekim alanına girmesini sağlamak için kullanılan bir yörünge, Ay'a yaklaşan bir uzay aracı, hızını düşürerek Ay çevresinde bu yörüngeye girmektedir. Ay'a iniş yapacak araçlar bu yörüngeye girdikten sonra, yüzeye iniş için hazırlık yapmaktadır.

### 3.2. Kütle Çekim Hesabı

Uzayda, herhangi bir noktada kütle çekimini daha teknik olarak kütle çekim alanını veya kütle çekim ivmesini hesaplamak için temelde Isaac Newton'un 'Evrensel Kütle Çekim Yasası (*Universal Gravitation*)' kullanılmaktadır. Bunun yanında özellikle çok güçlü kütle çekim alanları veya çok yüksek hassasiyet gerektiren durumlar için Albert Einstein'ın 'Genel Görelilik Teorisi (*General Relativity*)' daha doğru bir açıklama sunmaktadır. Kara delik gibi aşırı kütleli cisimlerin yakınında Newton'un kütle çekim yasası yetersiz kaldığından bu durumlarda Einstein'ın genel görelilik teorisi kullanılmaktadır.

Eğer uzay aracının bulunduğu konumda bir gezegen, uydu veya yıldız gibi tek bir kütle varsa kütle çekim alanı o gök cisminin kütle çekim alanına göre hesaplanmaktadır. Eğer birden fazla gök cismi varsa, her bir gök cisminin kütle çekim alanı o noktaya uyguladığı çekim kuvveti ayrı ayrı hesaplanmakta ve ardından tüm bu kuvvetlerin vektörel toplamı alınmaktadır. Kuvvetlerin vektörel toplamı hesaplanırken, her bir kuvvetin yönü ve büyüklüğü doğru bir şekilde belirlenmelidir. Kütle çekim kuvveti mesafenin karesi ile ters orantılı olduğundan, uzaktaki kütlelerin etkisi genellikle ihmal edilebilir. Yakındaki büyük kütleler hesaplama için daha önemli olarak kabul edilir.

Örneğin bir Ay misyonunda uzay aracına etki eden toplam çekim kuvveti Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$\vec{F}_{TOPLAM} = \vec{F}_{GÜNEŞ} + \vec{F}_{DÜNYA} + \vec{F}_{AY} + \dots \quad (4)$$

Bir uzay aracına etki eden Dünya ve Ay'ın çekim kuvvetlerinin birlikte nasıl hesaplanabileceği ise Eşitlik 5'te gösterilmiştir. Eşitlik 5'teki  $\theta$  iki kuvvet arasındaki açıyı göstermektedir.

## Uzayda Navigasyon

$$\begin{aligned}
F_{DUNYA} &= G \frac{M_{DUNYA} m_{ARAC}}{r_{DUNYA-ARAC}^2} \\
F_{AY} &= G \frac{M_{AY} m_{ARAC}}{r_{AY-ARAC}^2} \\
F_{TOPLAM} &= \sqrt{F_{DUNYA}^2 + F_{AY}^2 + 2 F_{DUNYA} F_{AY} \cos \theta} \quad (5)
\end{aligned}$$

Bu yöntemle tüm evren hesaba katılmasa da o noktaya yani uzay aracına etki edebilecek cisimlerin kütle çekimleri dikkate alınmaktadır. Uzay ajansları yörünge tasarımı, manevra planlama ve yörünge belirleme gibi konularda bu tür hesaplamaları yapmak için Spacecraft Trajectory Kernel (STK), General Mission Analysis Tool (GMAT) gibi yazılımlar kullanılmaktadır.

#### 4. Uzayda Yol Bulma ve Uzay Aracı Navigasyon Sistemi

Uzay aracını bir yerden başka bir yere, bir gezegenden diğer gezegene hareket ettirmek için güneş sisteminin ve evrenin doğru bir uzamsal zamansal (*spatiotemporal*) modeline gereksinim bulunmaktadır. Bu model yalnız gezegenlerin Güneş'e göre değil, aynı zamanda birbirlerine ve kuyruklu yıldızlar ve asteroidler gibi diğer gök cisimlerine göre ne zaman nerede olacağını göstermelidir. İnsanoğlu bu bilgiyi gök günlükleri (*ephemeris*) üzerinden yayınlamakta ve gök haritaları (*celestial maps*) üzerinde göstermektedir. Bir gök cisminin, hangi saat, hangi dakika, hangi saniyede, hangi açı ve yükseklikte bulunabileceği MÖ 1000'li yıllarda Babilliler'den itibaren gözlemleyip kayıt edilmektedir (yıldız katalogları). Avrupa Uzay Ajansı tarafından gönderilmiş olan Gaia uydusu, Samanyolu galaksisinin en doğru gök haritasını oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu gök günlükleri uzayın dinamik yapısından ve düzensizliklerden (*perturbation*) dolayı sürekli değişiklik gösterebilmektedir. Dolayısıyla uzay aracının uzayda yol alabilmesi için gök cisimlerinin konum bilgileri çok önemli olup uzay aracının yörüngesini planlayabilmek için bu bilgiye gereksinim bulunmaktadır.

Çekim kuvvetinin uzay araçlarını nasıl etkilediği, uzay yolculuğu için bu çekim kuvvetinin nasıl kullanılabileceği, uzay araçlarının çekim kuvvetleri ile nasıl hareket edeceği ve gök cisimlerinin uzayda ne zaman hangi konumda oldukları bilindikten sonra uzay aracının A noktasından B noktasına ulaşabilmesi en uygun rota (geçki, güzergâh, *course*, yörünge, *trajectory*) oluşturulabilir.

Uzay aracı için hedef noktasına ilişkin rota oluşturulduktan sonra sıradaki görev bu rotaya bağlı kalarak uzay aracının hareket etmesi/yol almasıdır (*Guidance, Navigation and Control, GNC*). Bunun için uzay aracında navigasyon sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca rota ne kadar iyi planlanırsa planlansın uzayın dinamik hali birçok şeyin değişmesine neden olabilir. Örneğin güneş rüzgârı, güneşten gelen yüklü parçacıkların akışı gibi kütle çekimi kaynaklı olmayan düzensizlikler (*perturbation*) zamanla bir uzay aracının rotasını kademeli olarak değiştirebilir. Bu durumda navigasyon sisteminin (*dynamic positioning and navigation*) önemi daha da artmaktadır. (URL 3)

Uzay araçlarında jiroskoplardan, ivmeölçerlerden ve diğer sensörlerden oluşan eylemsizlik sistemleri kullanılmaktadır. Sürekli hataya (*drift*) açık olan bu cihazlarla çok uzun mesafeler alındığı için uzay aracının hareketinin izlenmesine ilişkin başka tür bir referans sistemine gereksinim bulunmaktadır. Bu referans sistemi yıldızlar gibi gök cisimlerinin konum bilgileriyle (yıldız katalogları) oluşturulmaktadır. Uzay aracındaki kameralar, yıldız izleyiciler gibi optik sistemler bu iş için kullanılmaktadır.

Dünyada NASA tarafından işletilen 'Derin Uzay Ağı' (*Deep Space Network, DSN*)'nin uzay aracı izleme istasyonları da uzay aracının ne zaman nerede olduğunu radyo sinyalleri ile takip etmektedir. Bu ağ; dünya ile uzay aracı arasında radyo dalgaları kullanarak uzay aracının ne kadar uzakta olduğu ve ne hızla hareket ettiği bilgisinin türetilmesine olanak sağlamaktadır. Derin Uzay Ağı; Kaliforniya (Goldstone), İspanya (Madrid) ve Avustralya (Canberra) olmak üzere yaklaşık 120 derece boylam farkıyla yerleştirilmiş üç ana tesisten oluşmaktadır. Bu stratejik konumlar Dünya dönerken uzay araçlarıyla sürekli iletişim kurulmasını sağlamakta ve telemetri verilerini almak için kullanılmaktadır.

Bu ağ, hassas bir şekilde zaman etiketi eklenmiş radyo sinyallerini uzay aracına göndermekte ve uzay aracından geri gelen sinyalleri kaydetmektedir. Böylece sinyalin gidiş-dönüş sırasında geçen zamanı ölçerek uzay aracının uzaklığını (*range*) belirlemekte ve ardından uzay aracının 3B konum bilgisini hesaplamaktadır. Bu aşamada geçen zamanı belirlemek için hassas bir atom saati kullanılmaktadır. Sinyalin gidiş-dönüş süresi ölçülerek uzay aracının Dünya gezegenine olan uzaklığının hesaplandığı bu yöntem iki-yönlü takip denilmektedir. Hesaplamalarda radyo sinyallerinin frekansındaki değişiklikler yani Doppler kayması ölçülerek uzay aracının sürati (*rate*) belirlenmektedir. Uzay aracının herhangi bir anda nerede olduğu yani 3B konum bilgisi, sürati ve hareket yönü biliniyorsa nereye doğru ilerlediği hesaplanabilmektedir. Eğer uzay aracı rotasında değilse, uzay aracına yörüngesini düzeltmesine yönelik sinyaller gönderilmekte ve manevra yapması beklenmektedir. Ancak uzay araçları dünyadan uzaklaştıkça örneğin 'Dış Güneş Sistemi' (*Outer Solar System*)'ne gittikçe sinyallerdeki gecikmeler artmaktadır.

##### 4.1. Yeni Nesil Navigasyon Teknolojileri

Deep Space 1 ve Dawn misyonlarında, uzay araçlarının otonom olarak gezegenler, asteroidler ve diğer hedeflerle karşılaştıklarında kendilerini yönlendirebilmesi için geliştirilen 'Otonom Navigasyon Sistemi' (*Autonomous Navigation, AutoNav*) kullanılmıştır. NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından geliştirilen AutoNav sistemi, Dünya

gezegeninden gelen sürekli komutlara bağımlı olmadan uzay aracının çevresindeki gök cisimlerini tanımlayarak, kendi konum bilgisini hesaplamasını ve gerekli rota düzeltmelerini yapmasını sağlamaktadır.

AutoNav sisteminde yıldız izleyici (*star tracker*) ve kamera gibi görsel veri kaynaklarını kullanarak uzay aracının çevresindeki yıldızlar, asteroidler veya kuyruklu yıldızlar gibi gök cisimleri tanımlanmaktadır. Bu tanımla işlemi için referans bir veritabanı kullanılmaktadır. Ardından uzay aracı çevresindeki bu gök cisimlerine bağlı olarak kendi konum bilgisini ve hızını hesaplamakta, yönünü belirlemektedir. Bu haliyle AutoNav bir tür 'Optik Navigasyon (*Optical Navigation*, OpNav)' sistemi olarak tanımlanabilir. Eğer uzay aracının rotasında bir sapma varsa veya hedefe ulaşmak için gerekli düzeltmelerin yapılması gerekiyorsa, AutoNav sistemi tahrik sistemlerini otomatik olarak ateşleyerek minimum düzeltme manevralarını kullanarak rotasını ayarlayabilmektedir. Böylece Dünya'ya, Derin Uzay Ağı'na bağımlı olmayan bir navigasyon sisteminin uzayda kullanılabilmiştir.

## 4.2. Derin Uzayda Tek Yönlü Navigasyon

Derin uzay misyonlarında (*deep space missions*) kullanılan uzay araçları, Güneş yıldızından çok uzakta yolculuk ettiği için güneş panellerinden Dünya gezegeninin etrafındaki yörüngede dolanan uydular kadar enerji alamayacağı açıktır. Mesafe çok uzun olduğundan uzay aracı ile Dünya gezegeni arasındaki radyo iletişimi de zayıf olmaktadır. Uzay aracının ilettiği zayıf radyo sinyallerinin Dünya gezegenine ulaşması hem saatler almakta hem de arka plan gürültüsünün temizlenmesi gerekmektedir.

Güneş Sistemi içerisinde gezegenler arası yolculuklarda uzay aracının temel yörüngesi Güneş'in çekim kuvveti tarafından belirlenmektedir. Ancak derin uzay misyonlarında yörüngeyi etkileyebilecek diğer gezegenlerin ve gezegen uydularının kütle çekim etkileri daha hassas biçimde dikkate alınması gerekmektedir.

Bir uzay aracı Güneş'ten uzaklaştıkça, yıldızların gözlemlenen konumları ve hızları, paralaks, sapma ve Doppler etkisi nedeniyle Dünya'da oluşturulmuş yıldız kataloglarından farklılık gösterecektir. Yıldız çiftleri arasındaki açısal uzaklıklar ölçülür, bunlar yıldız kataloglarıyla karşılaştırılır ve ancak tekrar modellenilebilirse uzay aracının konum bilgisi daha hassas biçimde üretilebilir.

Bu durumda İç Güneş Sistemi'nde (*inner solar system*) ve genel olarak Güneş Sistemi'nde kullanılan navigasyon çözümleri yıldızlar arası (*interstellar*) yolculuklarda örneğin Proxima Centauri B öte gezegenine ulaşmakta yeterli olmayacaktır. Bu nedenle civa temelli atomik saatler ve X-ışını navigasyonu gibi yeni yöntemlere gereksinim bulunmaktadır. Bu ve benzeri sistemler sayesinde uzay aracının 3B konumu gerçek zamanlı ve otonom olarak belirlenebilir.

### 4.2.1. Nötron Yıldızlarının X-ışınlarıyla Navigasyon (X-ray Pulsar Navigation XNAV)

Çok yüksek manyetik alana sahip olan genç nötron yıldızları manyetik kutuplarından yüksek enerjili parçacıklar ve radyasyon (X-ışını) yayabilmektedir. Kendi etrafında çok hızlı dönen Nötron yıldızları olan pulsarların yaydığı X-ışınlarını algılayan sistemler kullanılarak uzay araçlarının navigasyonları sırasında konumlarının belirlenmesine olanak sağlayacak çalışmalar başlatılmıştır. Pulsarlar, aynı enerji düzeyinde periyodik bir şekilde yayılan X-ışınları sayesinde gök küredeki diğer yıldızlardan çok daha kolay ayrılabilirlerdir.

NASA tarafından 2017 yılında Uluslararası Uzay İstasyonu'na yerleştiren '*Neutron Star Interior Composition Explorer* (NICER)' X-ışını teleskobu yerleştirmiştir. NICER, X-ray Timing Instrument (XTI) adı verilen 56 adet X-ışını yoğunlaştırıcı optik ve silikon sürüklenme dedektöründen (X-ışını dedektöründen) oluşmaktadır. NICER ile başlayan çalışmalarla 78 farklı nötron yıldızı sinyalinin zamanlaması ölçülmüştür. Diğer bir ifadeyle uzayda nirengi noktalarının konumları yaklaşık  $\pm 5$  km doğrulukla belirlenmiştir. Bunun için bir devrini milisaniye ölçeğinde tamamlayan pulsardan yayılan radyasyon atımları arasındaki zaman farkı belirlenmiştir. Işık hızı bilindiğinden uzaydaki bir noktanın bu pulsarlara olan uzaklıkları hesaplanabilmektedir. 2017 yılında çalışmaya başlayan X-ışını teleskopu NICER'in veri kümesi, bu teleskoba bağlı çalışan XNAV yazılımı '*Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology* (SEXTANT)' kullanılarak 2018 yılında Uluslararası Uzay İstasyonu'nun konumu  $\pm 7$  km doğrulukla hesaplanmıştır. Benzer biçimde konumları bilinen pulsarlardan gelen sinyallerin varış zamanları, herhangi bir uzay aracının konumunu hesaplamak için kullanılabilir. Böylece uzay aracının navigasyonu Dünya gezegeninden yönetilmesine gerek kalmadan, uzay aracı uzaydaki kendi konumunu gerçek zamanlı olarak belirleyebilecek ve hareketini kendi otonom biçimde gerçekleştirebilecektir.

Pulsarlardan gelen X-ışınlarına, uçuş süresi (*Time of Arrival*, ToA) temel denklemi uygulanmaktadır. Eşitlik 6 uzay aracının konum vektörünü bulmak için kullanılan uçuş süresi temelli eşitliktir. Bu eşitlikte  $t_i$  pulsarın sinyalinin uzay aracına varış zamanını,  $t_0$  sinyalin gönderildiği zamanı,  $\vec{r}$  uzay aracının bilinmeyen konum vektörünü,  $\vec{r}_i$  pulsarın konum vektörünü ve  $c$  ışık hızını göstermektedir.

$$t_i = t_0 + \frac{|\vec{r} - \vec{r}_i|}{c} \quad (6)$$

Eşitlik 6, pulsardan gelen sinyalin ne kadar sürede araca ulaştığını ifade etmektedir. Eğer üç veya üçten fazla farklı pulsardan sinyal alınır, bu denklem sistemi çözülerek bir uzay aracının 3B konum bilgisi üretilebilir. Başka bir deyişle; zaman farklarından, mesafe farklılıklarına, mesafe farklılıklarından konum bilgisine geçiş çözümü yapılabilir.

## Uzayda Navigasyon

Bir pulsar kendi çevresinde ne kadar hızlı dönerse pulsarın konumu da o kadar yüksek doğrulukla belirlenebilir. Bugün milisaniye pulsarların uzaydaki konumları belirlenmekte, yakın gelecekte mikrosaniye pulsarların konumunun belirlenmesi planlanmaktadır. Böylece konum doğruluğu da artacaktır. 10  $\mu$ s altında zamanlama hassasiyetiyle pulsar sinyallerini kaydedilerek navigasyon için ideal veri sağlanabileceği düşünülmektedir.

Rusya (Roscosmos) & Almanya (DLR) ortak teleskop misyonu olan ve 2019 yılında uzaya fırlatılan Spektr-RG; evreni X-ışını bandında taramakta ve X-ışınına dayalı gök haritası oluşturmak için kullanılmaktadır. Lagrange 2 (L2) noktasında gözlem yapan SRG uydusu (X-ışını gözlem evi) Ruslar tarafından sert X-ışınları için geliştirilen ART-XC ve Almanlar tarafından yumuşak X-ışınları için geliştirilen eROSITA olmak üzere iki X-ışını teleskobundan oluşmaktadır. 0.2-10 keV enerji aralığında çalışan eROSITA yüksek çözünürlüklü X-ışını görüntüleme ve spektroskopi görevlerini yerine getirmektedir. 5-30 keV enerji aralığında çalışan ART-XC yüksek enerjili kaynakları incelemektedir.

Spektr-RG'nin gözlemleri X-ışını navigasyonu için kullanılmaz. Yalnızca bir X-ışını gözlem evi/teleskobu olan Spektr-RG misyonunun amacı bilimsel astrofiziksel veri üretmek ve X-ışını katalogları oluşturmaktır. Spektr-RG uzayı tararken bilinen nötron yıldızları haricinde yeni nötron yıldızlarını belirleyebilme olasılığı bulunmaktadır. Bu yeni keşfedilen veya daha iyi karakterize edilen nötron yıldızları, gelecekteki X-ışını navigasyon sistemleri için potansiyel referans noktaları olarak kullanılabilir.

2015 yılında Hindistan tarafından gönderilen çok dalga boylu uzay gözlemevi AstroSat, 'Large Area X-ray Proportional Counter (LAXPC)' gibi X-ışınlarını yüksek zamanlama hassasiyetiyle ölçebilen cihazlara sahiptir. AstroSat'ın birincil amacı navigasyon olmasa da, yaptığı pulsar gözlemleri XNAV için gerekli olan pulsar zamanlama verilerinin elde edilmesine katkıda bulunabilir ve bu alandaki araştırmalar için kullanılabilir.

Kasım 2016 tarihinde 'Çin Uzay Ajansı (China National Space Administration, CNSA)' tarafından Dünya yörüngesinde X-ışını pulsar navigasyonunu test etmek için 'X-ray Pulsar NAVigation satellite 1 (XPNAV-1)' uydusu kullanılmıştır. 5 kg'lık mini bir uydusu üzerinde X-ışını detektörleri ve zamanlama algoritmaları bulunmaktadır. X-ışını dedektörleriyle pulsarların düzenli sinyallerini algılayarak uzay aracının konumunu hesaplanabilmiştir. Ancak doğruluğu NICER/SEXTANT kadar yüksek değildir. Crab Nebula Pulsarı (PSR B0531+21) ve Vela Pulsarı (PSR B0833-45) kullanarak yaklaşık  $\pm 100$  km doğruluk elde edilebilmiştir.

2017 yılında Çin Uzay Ajansı tarafından fırlatılan Insight-HXMT (*Hard X-ray Modulation Telescope*) adlı uzay gözlemevi X-ışını zamanlama yeteneklerine sahiptir. Ana görevi astrofizik çalışmalar olsa da, özellikle pulsarlar üzerine yaptığı detaylı gözlemler, XNav teknolojisinin geliştirilmesi için değerli bilgiler sağlayabilir ve bu alandaki yetenekleri test etmek için kullanılabilir.

#### 4.2.2. Derin Uzay Atomik Saatleri

Uzay keşif çalışmalarında konum bilgisi, kütle çekim ivmesi bilgilerine ek olarak diğer önemli ve temel bilgi zamandır. Zamanın yüksek presizyonlu belirlenmesi önemlidir. Presizyonlu zaman belirlemek içinde atomik saatler kullanılmaktadır. Örneğin GNSS ile konum belirlemede zaman önemli bir bileşendir, bu nedenle GNSS uydularında da atomik saatler kullanılmaktadır. Uzay navigasyonunda zaman belirlemedeki hatalar çok uzun mesafeler söz konusu olduğu için yüz binlerce kilometrelik sapmalara neden olabilmektedir.

NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından geliştirilen 'Derin Uzay Atomik Saati (*Deep Space Atomic Clock, DSAC*)'; ultra hassas, minyatürleştirilmiş bir civa-iyon (Hg<sup>+</sup>) atom saatidir. Sezyum ve rubidyum atomları yerine elektrik yüklü civa atomları kullanılması hem saatin boyutlarını düşürmüştür hem de duyarlılığı arttırmıştır. Bu atomik saatin ağırlığı 17 kg olup uzay araçlarında görece az yer kaplayacağı düşünülebilir. GNSS uydularında bulunan atomik saatlerden daha hassas olan bu saatin duyarlılığı  $10^{-16}$  düzeyindedir. DSAC, bir teknoloji gösterim misyonu olarak planlanmıştır. Derin Uzay Atomik Saati 2019 yılının Haziran ayında NASA tarafından bir SpaceX Falcon Heavy roketiyle uzaya gönderilmiş ve General Atomics firmasının Orbital Test Bed uydusuna entegre edilmiştir. 2021 yılının Eylül ayında son bulan görevi süresince beklentilerin çok üzerinde bir performans gösterdiği ifade edilmiştir. DSAC haftalar boyunca saniyenin sadece milyarda biri kadar sapma yaparak Dünya gezegenindeki en iyi atom saatleriyle yarışacak düzeyde olduğunu göstermiştir. Diğer bir ifadeyle, teknolojinin uzay görevleri için uygunluğunu başarıyla kanıtlamıştır. Test sonuçları, Derin Uzay Atomik Saati'nin uzay araçlarının konumlarını  $\pm 5$  km doğrulukla belirleyebildiğini ortaya koymuştur. Bu doğruluk, derin uzay navigasyonu için önemli bir ilerlemedir.

DSAC gibi son derece kararlı atomik saatlerin yeni nesil uzay araçlarında kullanılabilmesi durumunda uzay araçları Derin Uzay Ağından talimat almadan, kendi başına uzayda güvenli yolculuk yapabilecektir. Dünya'daki atom saatleriyle senkronize olmaya gerek kalmadan, uzay aracının kendi zamanını hassas bir şekilde takip etmesi, özellikle uzun mesafelerde ve yüksek hızlarda doğru konum belirleme için hayati öneme sahiptir. Ayrıca yalnızca uzay araçlarında değil Mars gibi diğer gök cisimlerindeki misyonlarda da kullanılacaktır.

Benzer biçimde Çin ve Japon uzay ajanslarının 'Uzay Atomik Saati (*Space Atomic Clock, SAC*)' projeleri ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA)'nın 'Atomic Clock Ensemble in Space, ACES' projesi bulunmaktadır.

#### 4.3. Ay ve Mars gibi Gök Cisimleri Yüzeyinde Navigasyon

'Araziye Göre Konum Belirleme (*Terrain Relative Navigation, TRN*)' özellikle gezegenlere veya uydulara iniş aşamasında kullanılacak bir sistemdir. Uzay aracının iniş sırasında çektiği gerçek zamanlı görüntüleri veya lazer, radar

kaynaklı veri kümelerini, önceden yüksek çözünürlüklü haritalarla karşılaştırarak aracın konumunu ve hızını yüksek bir doğrulukla belirlemesini sağlamaktadır. Bu sayede, iniş bölgesindeki tehlikelerden kaçınılabilir ve hassas inişler gerçekleştirilebilir. NASA'nın Mars gezegenindeki Perseverance gezgini bu teknolojiyi başarıyla kullanmaktadır.

## 5. Sonuç

Uzayda kullanılacak en gelişkin otomatik navigasyon sistemi ya da yapay zekâ tabanlı navigasyon sistemi (*AI-based space navigation system*), farklı misyonların gereksinimine göre şekillenen ve çeşitli ileri teknolojileri bünyesinde barındıran bir yaklaşım ve teknolojiler bütünüdür.

En gelişkin sistemler genellikle eylemsizlik ölçüm birimleri, yıldız izleyiciler, güneş sensörleri, GPS/GNSS alıcıları (Dünya yörüngesinde), lidar, radar, optik kameralar vb. sensörlerden gelen veri kümelerini karmaşık algoritmalarla veya yapay zekâ modelleri ile birleştirerek daha güvenilir ve doğru bir navigasyon çözümü sunmaya çalışmaktadır. Bu sayede, tek bir sensöre özel olan sınırlar aşılabilmekte ve sistemin genel performansı artırılmaktadır.

Bu çalışmada uzayda navigasyonunu iyileştirmek için derin uzay atomik saati ile X-ışını veri kümelerinin birlikte kullanılabilmesi yönünde bir tasarım üzerinde durulmuştur. Özellikle derin uzayda yol bulmak için XNav teknolojisinin kullanılacağı görülmektedir. Bu nedenle X-ışını tabanlı navigasyon için donanım, pulsar sinyallerinin zayıflığı ve uzun mesafelerdeki gecikmeler üzerine matematiksel modeller ve gerçek zamanlı işleme için algoritmalar geliştirebilmek önemli bir konudur. Bunun için özellikle sinyal işleme, gürültü filtreleme ve çoklu pulsar entegrasyonu gibi konularda çalışılmalıdır. X-ışını navigasyonu için bir protokol geliştirilmesi üzerine yoğunlaşılmalıdır. Bir sonraki adım da X-ışını navigasyonun, optik yöntemlere ve radyo sinyalleri ile birleştiren karma bir navigasyon sisteminin nasıl tasarlanacağı ve geliştirileceği olmalıdır. Sonuç olarak, ultra hassas atomik saatlerle derin uzay navigasyonunu iyileştirilebilir. Derin uzay atomik saati ile X-ışını veri kümesi birlikte kullanılabilir.

## Kaynaklar

Alcubierre, M. (1994) The warp drive: hyper-fast travel within general relativity. *Classical and Quantum Gravity* 11 (5).

Minovitch, M.A. (2010) The invention that opened the solar system to exploration. *Planetary and Space Science* 58 (6).

Sutton, G. P., Biblarz, O. (2016) *Rocket Propulsion Elements* (9th Edition). Wiley.

[URL 1] <https://atommedia.online/en/2025/02/07/uchenye-rosatoma-zavershili-razrabo/> [Erişim tarihi: 26 Ağustos 2026].

[URL 2] <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-scientists-developed-prototype-plasma-rocket-engine-for-deep-space-missions/> [Erişim tarihi: 26 Ağustos 2025].

[URL 3] <https://medium.com/@canerguney/uzayda-yol-bulma-navigating-in-space-ce40f746f1c0> [Erişim tarihi: 13 Eylül 2025].

Zander, F. (1925) Problems of flight by jet propulsion: interplanetary flights.



## Güzergâh Optimizasyonunda ÇKKV ve Bir Grafik Sinir Ağı Yaklaşımının Karşılaştırmalı Analizi

Korcan ALPAN\*, Firdevs TURAN, Hüseyin PEHLİVAN

Gezbe Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli.

### Özet

*Bu çalışma, İstanbul ili Çatalca ilçesinde planlanan bir rüzgâr türbini için en uygun erişim yolunun belirlenmesini amaçlamaktadır. İlk aşamada, yalnızca topografik eğim dikkate alınarak klasik sıfır poligonu yöntemiyle temel bir güzergâh oluşturulmuştur. Ardından, çalışma kapsamında güvenlik, maliyet ve konfor ana başlıkları belirlenmiş ve bu başlıklar öncelik sırasına göre değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, çalışmada kullanılacak toplam 14 farklı parametre tanımlanmış; her parametre için ArcMap aracılığıyla uygunluk haritaları üretilmiş ve 0–1 aralığında uygunluk puanları hesaplanmıştır. Parametrelerin değerlendirilmesi için iklim, sismik risk, maliyet ve genel uygunluk olmak üzere dört farklı senaryo hazırlanmıştır. Bu senaryolar kapsamında MATLAB ortamında geliştirilen özgün bir algoritma ile AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi), TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği) ve GNN (Basitleştirilmiş Bir Grafik Sinir Ağı Yaklaşımı) yöntemleri uygulanmış, böylece sıfır poligon yönteminden elde edilen temel güzergâh dahil olmak üzere toplam 13 alternatif güzergâh oluşturulmuştur. Bulgular, GNN yönteminin mekânsal süreklilik, güvenlik ve konfor açısından daha tutarlı güzergâhlar sunduğunu göstermiştir. Yol maliyeti açısından en uygun sonuç, iklim odaklı senaryonun GNN güzergâhı tarafından sağlanmış; ancak güvenlik öncelikli olduğundan, sismik risk odaklı senaryonun GNN güzergâhı tercih edilmiştir. Çalışmada belirlenen temel güzergâh, farklı önceliklendirmeler doğrultusunda değiştirilebilir olup diğer senaryolardan elde edilen alternatifler de değerlendirilebilir durumdadır. Sonuç olarak, bu araştırma klasik yöntemlerin CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ve yapay zekâ destekli çok kriterli karar verme yöntemleriyle bütünleşerek; güvenlik, maliyet ve konfor ölçütlerini birlikte ele alan özgün bir model ortaya koyduğunu göstermektedir.*

### Anahtar Sözcükler

Güzergâh Planlama, ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme), AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi), TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği), GNN (Basitleştirilmiş Grafik Sinir Ağı).

### Abstract

*This study aims to determine the most suitable access route for a planned wind turbine in the Çatalca district of Istanbul, Türkiye. Initially, a baseline route was generated using the classical zero-polygon method, considering only topographic slope. Subsequently, three main criteria—safety, cost, and comfort—were defined and prioritized. Within this framework, fourteen parameters were identified, and suitability maps for each were produced in ArcMap with normalized scores between 0 and 1. Four strategic scenarios—climate-oriented, seismic risk-oriented, cost-oriented, and general suitability-oriented—were developed for evaluation. Under these scenarios, a custom MATLAB algorithm was used to apply three decision-making methods: AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), and a simplified GNN (Graph Neural Network) approach. In total, thirteen alternative routes were generated, including the baseline route. Results indicate that the GNN-based approach produces more consistent routes in terms of spatial continuity, safety, and comfort. The lowest-cost result was achieved by the GNN route under the climate-oriented scenario; however, the GNN route from the seismic risk-oriented scenario was selected due to safety considerations. The baseline route can be adjusted based on different priorities, and alternatives from other scenarios remain applicable. Overall, the study demonstrates that integrating traditional methods with GIS (Geographic Information Systems) and AI-supported multi-criteria decision-making techniques provides a novel model that jointly addresses safety, cost, and comfort in route optimization.*

### Keywords

Route Planning; MCDM (Multi-Criteria Decision Making); AHP (Analytic Hierarchy Process); TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution); GNN (Simplified Graph Neural Network)

### 1. Giriş

Ulaşım ağları; antik çağlardan günümüze, medeniyetlerin gelişiminde ve toplumların sosyoekonomik yapısının şekillenmesinde her zaman temel bir rol oynamıştır (Rodrigue, 2020). Günümüzde, bir karayolu güzergahının doğru belirlenmesi, bir projenin yalnızca teknik ve ekonomik sonuçlarını değil, aynı zamanda yıllar boyunca sürecek çevresel etkilerini de kalıcı olarak belirleyen kritik bir karardır. Bu süreç, sadece en kısa mesafeyi bulmaktan çok daha öte; jeolojik yapı, eğim, afet riski, mülkiyet durumu ve ekolojik hassasiyetler gibi birbiriyle çelişen çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir optimizasyon problemidir (FHWA, 2021; World Bank, 2023). Geleneksel olarak, mühendislik pratiğinde sıfır poligonu gibi, sabit eğim esasına dayalı geometrik yöntemler, arazideki geçiş olasılıkları için temel bir çerçeve sunmuştur. Ancak bu klasik yaklaşımlar, günümüzün çok boyutlu planlama

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (532) 485 51 58

E-posta: k.alpan2022@gtu.edu.tr (Alpan K.), f.turan2022@gtu.edu.tr (Turan F.), hpehlivan@gtu.edu.tr (Pehlivan H.)

zorlukları karşısında genellikle tek başlarına yetersiz kalmaktadır. Bu karmaşıklığa yanıt olarak, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ve ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) tekniklerinin entegrasyonu, güzergâh seçim süreçlerini daha sayısal, şeffaf ve sistematik hale getirerek alanda önemli bir dönüşüm sağlamıştır (Eastman, 1999; Malczewski, 1999). Bu modern yaklaşımlar sayesinde, afet riski, çevresel sürdürülebilirlik ve zemin güvenliği gibi faktörler, analizlere bütüncül bir şekilde dahil edilebilmektedir (IEA, 2022).

Bu ilerlemeler, özellikle yenilenebilir enerji alanında optimal rüzgâr ve güneş santrali yer seçiminde yaygın olarak kullanılmakta ve karar verme süreçlerine disiplinler arası bir perspektif kazandırmaktadır (Nassar vd., 2025). Ancak, bir santralin yeri belirlendikten sonra, ağır ve hassas bileşenlerin taşınacağı lojistik erişim yollarının tasarlanması, kendine özgü zorluklar içeren ve literatürde daha az ele alınmış kritik bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mevcut çalışmaların çoğu, güzergâhların değerlendirilmesinde CBS tabanlı ÇKKV yöntemlerini öne çıkarırken, güzergâh üretiminde klasik geometrik yaklaşımlar ile modern karar destek yöntemlerini bütünlükten kapsamlı çerçevelere daha az yer vermektedir (Jato-Espino vd., 2014; Tobler, 1970; Wu vd., 2021; Yildirim & Yomralıoğlu, 2007). Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Bu amaçla, klasik sıfır poligonu yöntemiyle elde edilen temel güzergâh, güvenlik, maliyet ve konfor ana başlıkları çerçevesinde; iklim, sismik risk, maliyet ve genel uygunluk olmak üzere dört stratejik senaryo altında; AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi), TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıralama Tekniği) ve GNN'den (Basitleştirilmiş Bir Grafik Sinir Ağı) esinlenen yenilikçi bir mekânsal analiz yaklaşımıyla üretilen 12 alternatif güzergâh ile karşılaştırılmıştır. CBS teknolojilerini veri hazırlama ve mekânsal analiz için bir araç olarak kullanarak hazırlanan bu çalışma, klasik geometrik tasarımı, modern karar analizleriyle bütüncül bir yapıda bir araya getirmekte ve güzergâh planlamasına disiplinler arası, senaryo tabanlı yeni bir model sunmaktadır.

## 2. Metodoloji

Bu çalışmada, en uygun güzergâhı belirlemek amacıyla, klasik bir geometrik yaklaşım ile ÇKKV yöntemlerini birleştiren bütüncül bir çerçeve geliştirilmiştir. Süreç: ilk olarak vaka analizi için anlamlı parametrelerin üretilmesi, devamında bu parametrelerin üç farklı analitik yöntemle uygunluk yüzeylerine dönüştürülmesi ve son olarak bu yüzeyler üzerinde en düşük maliyetli güzergâhların bulunarak karşılaştırılması olmak üzere üç ana adımdan oluşmaktadır. Analizler, ArcMap ile CBS tabanlı veri hazırlığı ve özel geliştirilmiş bir MATLAB algoritması ile modelleme adımlarını içermektedir.

### 2.1. Kriterler ve Senaryolar

Güzergâh optimizasyonu, birbirine çelişen mühendislik, ekonomik, sosyal ve çevresel faktörler arasında bir denge kurma işlemidir (FHWA, 2021). Bu dengeyi modellemek amacıyla, karar problemi üç ana başlık altında yapılandırılmıştır: Güvenlik (doğal afet risklerini minimize etme), Konfor (kullanıcı deneyimini iyileştirme) ve Maliyet (ekonomik uygulanabilirlik). Bu üç ana başlığı temsil etmek üzere, Tablo 1'de listelenen 14 adet detaylı parametre tanımlanmıştır. Bu çalışmada, karar problemini nicel olarak modelleyen dört temel parametre katmanı, interaktif bir MATLAB kodu kullanılarak üretilmiştir.

Tablo 1: Çalışmada Kullanılan Parametreler

Bitiş Noktasına Uzaklık	Mülkiyet Durumu
Sıcaklık	Fay Hatlarına Uzaklık
Yıllık Ortalama Yağış Miktarı	Diğer Yollara Uzaklık
Baki	Binalara ve Yerleşim Alanlarına Uzaklık
Rakım (Deniz Seviyesinden Yükseklik)	Tarım Alanlarına Uzaklık
Eğim	Su Kaynaklarına Uzaklık
Zemin Türü	Korunan Alanlara Uzaklık

Farklı planlama önceliklerinin sonuçlar üzerindeki etkisini test etmek için, bu parametreler dört farklı stratejik senaryo altında ağırlıklandırılmıştır:

1. **İklim Odaklı Senaryo:** Meteorolojik faktörlerin etkisini önceliklendirir.
2. **Sismik Risk Odaklı Senaryo:** Bölgenin deprem riskini önceliklendirir.
3. **Maliyet Odaklı Senaryo:** İnşaat ve kamulaştırma maliyetlerini önceliklendirir.
4. **Genel Uygunluk Senaryosu:** Tüm parametreleri dengeli bir şekilde dikkate alan bütüncül bir yaklaşım sunar.

### 2.2. Analiz Süreci ve Yöntemler

Her bir senaryo için analiz süreci aşağıdaki adımları izlemiştir:

1. **Uygunluk Haritalarının Üretimi:** İlk olarak, her bir 14 parametre için, çalışma alanındaki her bir düğüm noktasının uygunluğunu [0,1, 1.0] aralığında puanlayan ayrı bir uygunluk haritası CBS ortamında üretilmiştir.

2. **Ağırlıklandırma ve Agregasyon:** Analizin bu aşamasında, her bir senaryo için, o senaryonun önceliklerine göre kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bu ağırlıklar kullanılarak, bireysel uygunluk haritaları birleştirilmiş ve her senaryo için nihai bir maliyet yüzeyi oluşturulmuştur. Kriterlerin görece önemini belirlemek için, karar vericinin yargılarını sistematik bir şekilde nicelleştiren AHP tekniği kullanılmıştır (Saaty, 1980). Bu süreçle elde edilen kriter ağırlıkları, üç farklı karar verme felsefesini temsil eden yöntem girdi olarak sunulmuştur.
3. **Güzergâh Üretimi ve Karşılaştırma:** Son aşamada, bu maliyet yüzeyleri üzerinde, üç farklı optimizasyon yöntemi kullanılarak alternatif güzergâhlar üretilmiştir:
  - **Klasik Yaklaşım (Sıfır Poligonu):** Sadece eğim kısıtını dikkate alan temel bir geometrik güzergâhtır.
  - **AHP:** En temel ÇKKV yaklaşımı olarak, her bir düğümün nihai uygunluk puanı, AHP ile belirlenen ağırlıkların, standartlaştırılmış uygunluk puanlarıyla çarpılıp toplanmasıyla (ağırlıklı toplam) hesaplanmıştır. Bu yöntem, bir kriterdeki düşük bir performansın, başka bir kriterdeki iyi bir performansla telafi edilebileceğini varsaymaktadır (Malczewski, 1999).
  - **TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlık):** Bu mesafe tabanlı yöntem, AHP'den gelen ağırlıkları kullanarak, her bir düğümü teorik olarak en iyi (pozitif ideal çözüm) ve en kötü (negatif ideal çözüm) noktalara olan göreceli yakınlığına göre puanlar. Amacı, ideale en yakın ve en kötüden en uzak olan dengeli alternatifi bulmaktır (Hwang & Yoon, 1981).
  - **GNN Tabanlı Yaklaşım (Mekânsal Yayılım):** Bu yenilikçi yaklaşım, diğer yöntemlerin mekânsal körlüğünü gidermeyi hedefler. AHP'nin ağırlıklı toplamıyla elde edilen skorları bir başlangıç noktası olarak kullanarak, her bir düğümün uygunluk puanını, komşularının puanlarından etkilenerek iteratif olarak günceller. Bu mesaj yayma süreci, sadece tekil noktaların değil, bütünsel koridorların ve bölgelerin uygunluğunu yansıtan, coğrafi olarak daha tutarlı ve pürüzsüz bir uygunluk yüzeyi oluşturur.

Bu süreç sonucunda elde edilen toplam 13 güzergâh alternatifi, bir sonraki bölümde nicel ve görsel olarak karşılaştırılmaktadır.

### 2.3 Klasik Güzergâh Yaklaşımı: Sıfır Poligonu Yöntemi

Modern ÇKKV yaklaşımlarıyla üretilen güzergâhların performansını değerlendirmek için, öncelikle bir karşılaştırma temeli oluşturulmuştur. Bu amaçla, karayolu mühendisliğinde temel bir geometrik tasarım aracı olan sıfır poligonu yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, sadece tek bir kritere, yani sabit eğime dayalı bir güzergâh üretir. Sıfır poligonu, bir topografik harita üzerinde, başlangıç ve bitiş noktalarını, önceden belirlenmiş sabit bir eğimi aşmayacak şekilde birleştiren bir dizi kırık çizgidir. Yöntem, eş yükseklik eğrileri arasında, pergel açıklığı ( $lp$ ) olarak bilinen sabit bir yatay mesafeyi koruyarak ilerler. Bu mesafe, eş yükseklik eğrileri arasındaki dikey mesafe ( $\Delta h$ ) ile hedeflenen yüzdesel eğim ( $\%S$ ) arasındaki ilişkiyle hesaplanır:

$$lp = \frac{\Delta h}{\%S} \quad (1)$$

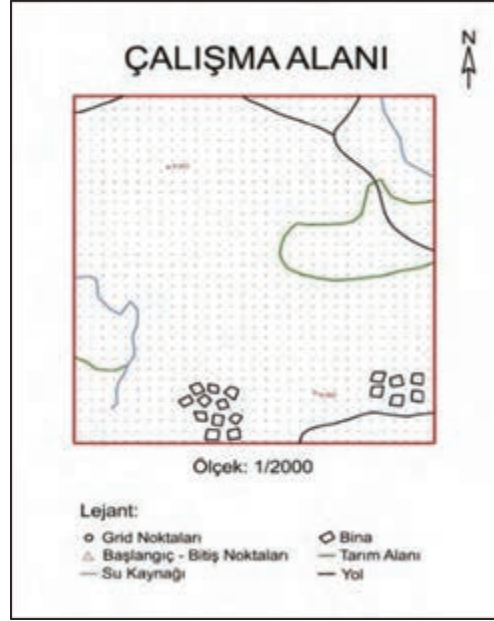
Bu analizde, sabit eğim kullanılarak bir sıfır poligonu güzergâhı üretilmiştir. Bu güzergâh, sadece topografik kısıtları dikkate alan, ancak diğer çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri göz ardı eden geleneksel bir mühendislik çözümünü temsil etmektedir. Bu temel güzergâh, sonraki bölümlerde sunulan çok kriterli alternatiflerin sunduğu katma değeri ve stratejik farklılıkları ortaya koymak için bir referans noktası olarak kullanılacaktır.

### 2.4 Ağ Analizi ve Yol Bulma

Her bir yöntemin ürettiği üç farklı uygunluk yüzeyi, birer maliyet arazisi olarak kullanılmıştır. Bu araziler üzerinde, mühendislik kısıtları uygulanarak geçilebilir bir ağ grafiği oluşturulmuş ve Dijkstra algoritması ile başlangıç ve bitiş noktaları arasında en düşük maliyetli güzergâhlar bulunmuştur.

## 3. Deneysel Uygulama

Bu çalışmada önerilen metodolojiyi test etmek ve farklı optimizasyon yaklaşımlarını karşılaştırmak amacıyla, İstanbul'un Çatalca ilçesindeki temsili bir rüzgâr türbini inşası için gerekli olan yol güzergâhının analizi için dört farklı stratejik senaryo test edilmiştir. Her bir senaryo, farklı bir planlama önceliğini modellemektedir. Çalışma alanını oluşturan yaklaşık 10.385 hektarlık bölge; değişken topoğrafyası, yoğun tarım arazileri ve dağınık yerleşim dokusu gibi özellikleriyle, çok kriterli karar vermeyi zorunlu kılan karmaşık bir gerçek dünya senaryosunu temsil etmekte ve Şekil 1'de sunulmaktadır.

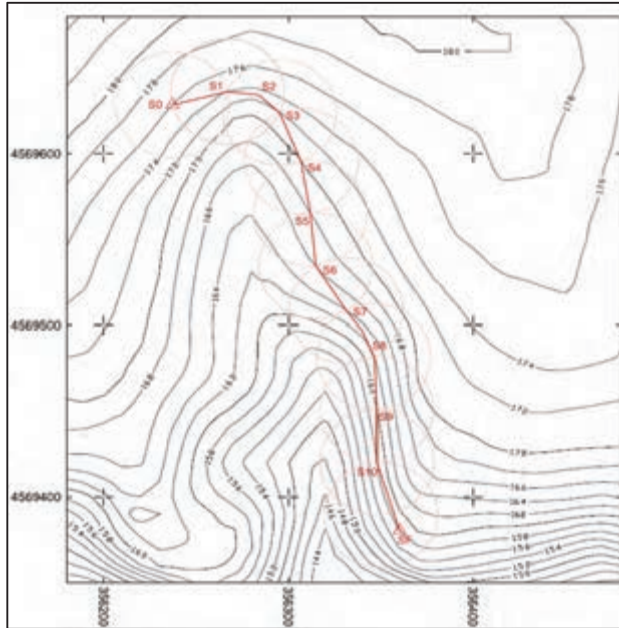


Şekil 1: Çalışma Alanı

Analiz süreci, iki ana yaklaşımla ele alınmıştır. İlk olarak, geleneksel bir mühendislik çözümünü temsil eden bir karşılaştırma temeli oluşturulmuş, ardından bu temel, çok kriterli modern yaklaşımlarla üretilen alternatiflerle karşılaştırılmıştır.

### 3.1. Karşılaştırma Temeli: Klasik Güzergâh Tasarımı

Referans bir güzergâh oluşturmak amacıyla, ilk olarak sadece tek bir kritere, yani eğime dayalı klasik sıfır poligonu yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla, araziye ait yükseklik verilerinden eş yükselti eğrilerini çıkaran ve kullanıcı tanımlı bir başlangıç ile bitiş noktası arasında, sabit bir eğim prensibiyle ilerleyen bir yol taslağı üreten özel bir MATLAB algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen güzergâh, sadece topografik kısıtları dikkate alan, ancak diğer çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri göz ardı eden temel bir mühendislik çözümünü temsil etmekte ve Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2: Klasik Yöntemle Elde Edilen Güzergâh Alternatifi

### 3.2. Senaryo Tabanlı Analiz Çerçevesi

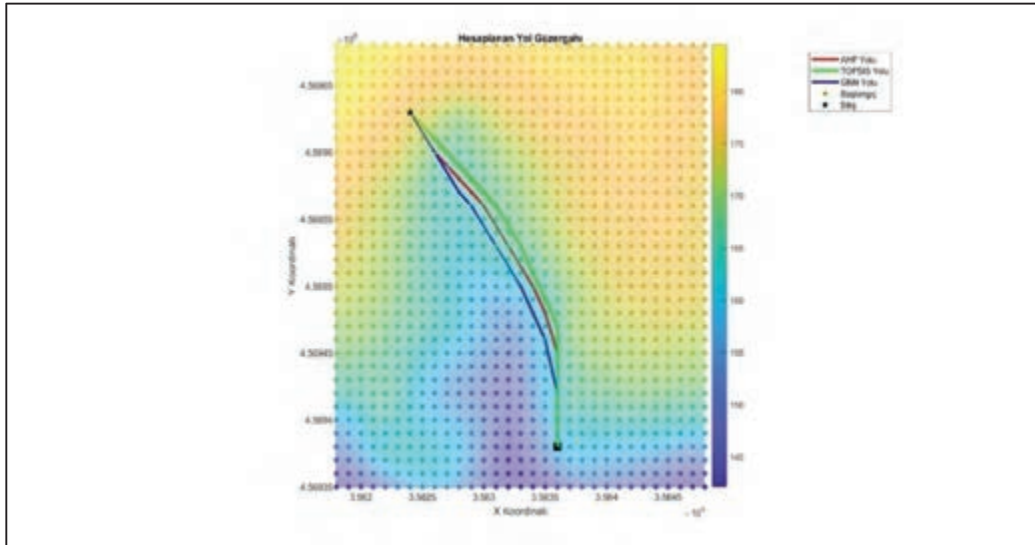
Klasik yaklaşımın sınırlılıklarını aşmak için, dört ana başlık altında yapılandırılmış dört farklı stratejik senaryo altında çok kriterli bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar için gerekli parametre katmanları, CBS ortamında üretilmiştir. Bu çalışmada, güzergâh optimizasyonu tek bir doğru cevap olarak değil, farklı önceliklere göre değişen bir problem olarak ele alınmıştır. Bu amaçla, 14 farklı coğrafi ve mühendislik parametresi, dört ana senaryo altında farklı ağırlıklarla değerlendirilmiştir:

1. **İklim Odaklı Senaryo:** Operasyonel sürekliliği hedefleyerek; yağış, sıcaklık ve bakı gibi meteorolojik faktörlere en yüksek önceliği verir.
2. **Sismik Risk Odaklı Senaryo:** Güzergâhın yapısal güvenliğini önceliklendirerek, fay hatlarına uzaklık, zemin türü ve eğim gibi jeoteknik riskleri minimize etmeyi amaçlar.
3. **Maliyet Odaklı Senaryo:** Projenin ekonomik fizibilitesine odaklanarak, güzergâh uzunluğu, mülkiyet durumu ve inşaat zorluğunu en aza indirmeyi hedefler.
4. **Genel Uygunluk Senaryosu:** Tüm 14 parametreyi dengeli bir şekilde dikkate alarak bütüncül bir optimum arar.

Her bir senaryo için kriter ağırlıkları, uzman bilgisine dayalı olarak AHP ile belirlenmiştir. Bu senaryolar ve ağırlıklar altında, üç farklı yöntemle (AHP, TOPSIS ve GNN tabanlı yaklaşım) toplam 12 adet alternatif güzergâh ve ek olarak klasik sıfır poligonu yöntemiyle bir referans güzergâh üretilmiştir.

### 3.3. Karşılaştırmalı Sonuçların Analizi

Farklı senaryolar ve yöntemlerle güzergâh alternatifleri elde edilmiştir. İklim odaklı senaryo kapsamında elde edilen güzergâh alternatifleri, Şekil 3'te görsel olarak karşılaştırılmıştır. Bu senaryoda her yöntemin ürettiği sonuçların farklarını ve eğilimlerini değerlendirmek amacıyla, en dikkat çekici bulgular Tablo 2'de nicel olarak özetlenmiştir.



Şekil 3: İklim Odaklı Senaryonun Güzergâh Alternatifleri

Tablo 2: İklim Odaklı Senaryonun Güzergâh Alternatifleri İçin Yol Düşümleri ve Yol Maliyeti Tablosu

Yöntem	Yol Düşümleri	Yol Maliyeti
AHP	813 → 722 → 692 → 662 → 632 → 542 → 512 → 421 → 329 → 205	338.266866
TOPSIS	813 → 722 → 692 → 601 → 541 → 450 → 328 → 205	348.636819
GNN	813 → 722 → 692 → 662 → 632 → 602 → 572 → 542 → 451 → 390 → 298 → 205	295.64039

Bulgular, birkaç önemli noktayı ortaya koymaktadır:

- **Senaryo Duyarlılığı:** Her üç modern yöntem de (AHP, TOPSIS, GNN), senaryonun öncelikleri değiştiğinde ürettikleri güzergâhları anlamlı bir şekilde değiştirmiştir. Örneğin, Maliyet Odaklı Senaryo için üretilen yollar, Sismik Risk Odaklı Senaryo için üretilen yollara göre belirgin şekilde daha kısa ve daha az maliyetli arazilerden geçme eğilimindedir.
- **GNN'in Tutarlı Üstünlüğü:** Tüm senaryolarda GNN tabanlı yaklaşım, diğer yöntemlere kıyasla genellikle daha dengeli ve operasyonel olarak verimli sonuçlar üretmiştir. Geleneksel ÇKKV yöntemleri bazen parametrik olarak en güvenli ama fiziksel olarak en uzun yolu seçerken, GNN'in mekânsal farkındalığı, genellikle hem kısıtlara uyan hem de fiziksel olarak daha kısa ve daha az engebeli olan akıllı kestirmeler bulmasını sağlamıştır.
- **Klasik Yöntemin Sınırlılıkları:** Sıfır poligonu ile üretilen güzergâh, engebeli arazide geometrik olarak mümkün bir yol sunsa da diğer tüm sosyal, çevresel ve ekonomik faktörleri göz ardı ettiği için, ÇKKV yöntemleriyle üretilen alternatiflere kıyasla açıkça daha az optimal bulunmuştur.

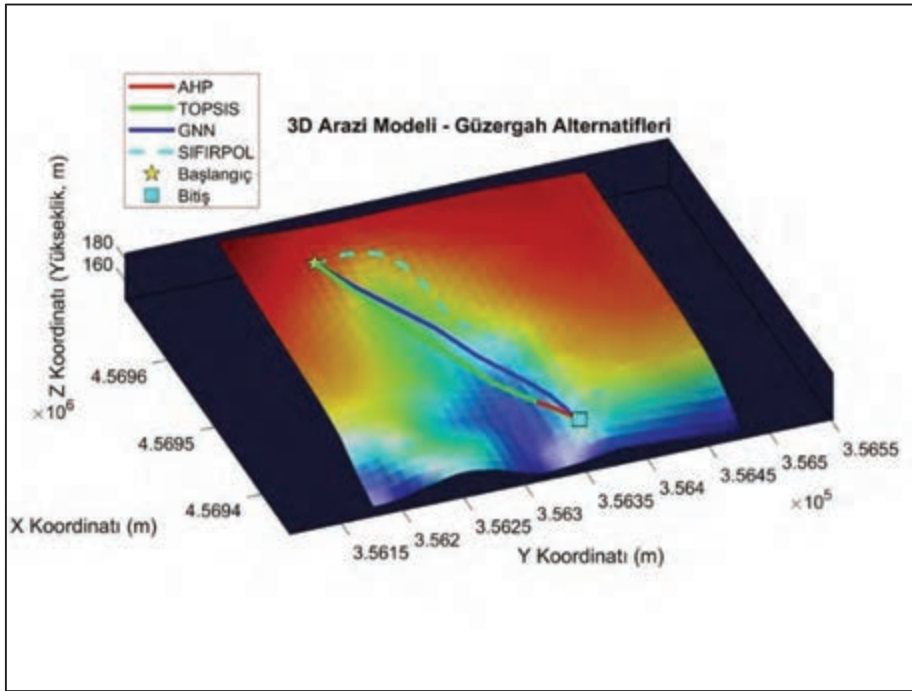
Bu sonuçlar, senaryo tabanlı ÇKKV'nin güzergâh planlamasına getirdiği esnekliği ve GNN tabanlı yaklaşımların mekânsal bağlamı dikkate alarak nasıl daha sağlam ve pratik çözümler üretebileceğini göstermektedir.

## 4. Sonuçlar ve Tartışma

Her bir stratejik senaryo ve optimizasyon yöntemi, birbirinden belirgin şekilde farklı güzergâh alternatifleri üretmiştir. Bu bölümde, bu alternatifler hem görsel hem de nicel olarak karşılaştırılmakta ve nihai olarak en uygun güzergâh seçimi gereklendirilmektedir.

### 4.1. Güzergâh Alternatiflerinin Karşılaştırılması

Toplam 13 güzergâh alternatifi (12'si ÇKKV, 1'i klasik yöntem), Şekil 4'te 3D arazi modeli üzerinde bir arada sunulmuştur. Her bir alternatifin, kendi senaryosu içinde hesaplanan algoritmik yol maliyetlerine göre genel sıralaması Tablo 3'de özetlenmektedir.



Şekil 4: Kullanılan Yöntemler İçin En Uygun Güzergâh Alternatiflerinin 3D Arazi Modeli

Tablo 3: Kullanılan Yöntemlerin ve Elde Edilen Güzergâh Alternatiflerinin Yol Maliyeti Değerleri

ID	Senaryo No	Yöntem	Yol Maliyeti
Alt3_I_GNN	1	GNN	295.64
Alt9_M_GNN	3	GNN	303.08
Alt6_D_GNN	2	GNN	315.02
Alt1_I_AHP	1	AHP	338.27
Alt2_I_TOPSIS	1	TOPSIS	348.64
Alt7_M_AHP	3	AHP	378.32
Alt4_D_AHP	2	AHP	432.47
Alt8_M_TOPSIS	3	TOPSIS	453.38
Alt12_U_GNN	4	GNN	473.82
Alt10_U_AHP	4	AHP	489.75
Alt5_D_TOPSIS	2	TOPSIS	499.41
Alt11_U_TOPSIS	4	TOPSIS	502.41

Tablo 3'deki sıralama, dikkat çekici bir eğilimi ortaya koymaktadır: Dört farklı senaryoda da GNN tabanlı yaklaşımla üretilen güzergahlar, tutarlı bir şekilde en düşük maliyetli (en uygun) ilk üç sırayı almıştır. Bu bulgu, GNN'in mekânsal bağlamı anlama yeteneğinin, farklı öncelik setleri altında bile, diğer yöntemlere kıyasla daha dengeli ve optimize edilmiş sonuçlar üretmede üstün olduğunu göstermektedir. TOPSIS yöntemi ise, bu analizde genellikle daha yüksek maliyetli ve dolayısıyla daha az uygun güzergahlar üretme eğiliminde olmuştur. Genel uygunluk odaklı senaryodan elde edilen güzergâh alternatifleri daha yüksek yol maliyeti vermiştir. Bunun sebebi, diğer senaryolardaki gibi birkaç parametrenin farklı ağırlıklarda değerlendirilmesi yerine bütün parametrelerin eşit ağırlıklarda değerlendirilmesidir.

#### 4.2. Optimum Güzergâh Seçimi ve Değerlendirme

En uygun güzergahı seçmek, sadece en düşük maliyetli olanı belirlemek değildir; aynı zamanda projenin temel hedefleriyle en uyumlu olanı seçmektir. Bu çalışmada, en düşük maliyetli alternatifin (Alt3\_I\_GNN – 295.64) iklim odaklı senaryodan geldiği görülmüştür. Ancak, çalışma alanının İstanbul gibi sismik riski yüksek bir bölgede yer alması, sadece iklim veya maliyet odaklı bir kararın yetersiz kalacağını göstermektedir.

Bu nedenle, nihai karar verilirken hem maliyet etkinliği hem de güvenlik kısıtları arasında en iyi dengeyi kuran alternatif aranmıştır. Bu bağlamda, sismik risk odaklı senaryo altında GNN ile üretilen Alt6\_D\_GNN güzergahı, en uygun çözüm olarak öne çıkmıştır. Her ne kadar maliyeti en düşük ikinci seçenektense de sismik güvenlik gibi projenin uzun vadeli sürdürülebilirliği için hayati bir kriteri önceliklendirmesi, onu en sağlam ve en savunulabilir tercih haline getirmektedir. Bu sonuç, güzergâh optimizasyonunun tek boyutlu bir maliyet minimizasyonu olmadığını, aksine, projenin özel bağlamına ve risk toleransına göre şekillenen stratejik bir karar verme süreci olduğunu güçlü bir şekilde vurgulamaktadır.

#### 5. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, rüzgâr türbini lojistiği gibi karmaşık bir güzergâh optimizasyonu problemi için, klasik bir mühendislik yaklaşımını, çoklu senaryolar altında çalışan modern ÇKKV yöntemleriyle karşılaştıran bütüncül bir çerçeve sunmuştur. Elde edilen bulgular, güzergâh seçiminin tek boyutlu bir maliyet minimizasyonundan ibaret olmadığını, aksine, projenin önceliklerine göre şekillenen karmaşık bir dengeleme süreci olduğunu güçlü bir şekilde teyit etmiştir.

Analizler, her bir ÇKKV yönteminin farklı bir karar verme stratejisi ürettiğini göstermiştir. Ancak en dikkat çekici sonuç, GNN'den esinlenen mekânsal yayılım yaklaşımının, tüm senaryolarda tutarlı bir şekilde daha dengeli ve operasyonel olarak daha verimli güzergahlar üretmesidir. Bu, mekânsal bağlamı ve komşuluk ilişkilerini karar sürecine dahil etmenin, sadece parametrik olarak değil, aynı zamanda fiziksel olarak da daha sağlam çözümler bulmada ne denli kritik bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Nihai güzergâh seçimi (Alt6\_D\_GNN), en düşük maliyetli alternatif olmamasına rağmen sismik güvenlik gibi hayati bir mühendislik kriterini önceliklendirmiştir. Bu durum, en ucuz seçeneğin her zaman en doğru seçenek olmadığını ve bütüncül karar destek modellerinin, bu tür stratejik ödünleşimleri şeffaf bir şekilde ortaya koymadaki önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, sunduğu senaryo tabanlı karşılaştırmalı model ile literatüre ve Türkiye'deki benzer planlama projelerine pratik bir katkı sunmayı amaçlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu bildiride sunulan GNN tabanlı yaklaşımın teorik temelleri daha da detaylandırılacak ve öğrenme tabanlı GNN mimarileriyle entegrasyon potansiyeli araştırılacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışmayı gerçekleştiren yazarlar olarak, Gebze Teknik Üniversitesi ve Harita Mühendisliği Bölümü'ne sağladıkları destek için teşekkür ederiz. Ayrıca çalışmaya katkıda bulunan değerli hocalarımıza ve bildirimizi kabul ederek yayımlayan TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'na minnettarız.

## Kaynaklar

- Eastman, J. R. (1999, June). Multi-criteria evaluation and GIS. Paper presented at the International Conference on GIS and Environmental Modeling, Banff, Canada.
- FHWA. (2021). Highway design manual (7th ed.). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag.
- IEA. (2022). Global EV outlook 2022: Securing supplies for an electric future. International Energy Agency.
- Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162.
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. Wiley.
- Nassar, R., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Design an optimum highway route... *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 19(1), 115-128.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems* (5th ed.). Routledge.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(Supplement), 234–240.
- World Bank. (2023). *Transport infrastructure finance: New approaches*. World Bank Group.
- Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., & Yu, P. S. (2021). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(1), 4-24.
- Yıldırım, V., & Yomralıoğlu, T. (2011). NABUCCO pipeline route selection through Turkey: Comparison of a GIS-based approach to a traditional route selection approach. *Oil & Gas European Magazine*, 37(1), 20–24.

## Destekçilerimiz

 BOĞAZIÇI ÜNİVERSİTESİ 1863	 GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	 HACETTEPE University		 ih ihtiyaç haritası
 İTÜ	 BOĞAZIÇI ÜNİVERSİTESİ KANDILLI OBSERVATORY AND RESEARCH INSTITUTE	 KTÜ 1955	 KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ 1992	 KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ 1970
 Topu ve Kadastro Genel Müdürlüğü	 AYGM Alyea Yatırımları Genel Müdürlüğü	 YTÜ YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ		

## Sponsorlarımız

 GANKARA GNSS	 ATAY	 BAYTEKİN	 CHCNAV	 CMT CMT MÜHENDİSLİK TEK. HİZ. VE SAN. TİC. LTD. ŞTİ.
 DEHA harita	 ELYA Teknoloji Sanayi Tic. A.Ş.	 KESC MÜHENDİSLİK	 esri Türkiye THE SCIENCE OF WHERE™	 genesis Ölçme Teknolojileri
 Geomap	 GEOPLUS HARİTA TEKNİK CİHAZLARI	 GeOTEKNİK	 GEOTİM Teknik Cihazlar ve Harita Tic. Ltd. Şti.	 GRAFTEK
 KAYA HARİTA	 Lider Yazılım	 Mapsis	 MESÇİOĞLU Mühendislik ve Hizmetler A.Ş.	 netcad
 PAKSOY	 SİSTEM A.Ş.	 SURVEY GROUP	 SİSTEM HARİTA	 Trimble.



[www.hkmo.org.tr](http://www.hkmo.org.tr)



[twitter.com/TMMOBHKMO](https://twitter.com/TMMOBHKMO)



[facebook.com/TMMOBHKMO](https://facebook.com/TMMOBHKMO)



[@tmmobhkmo](https://instagram.com/@tmmobhkmo)



[@tmmobhkmo](https://youtube.com/@tmmobhkmo)



[flickr.com/tmmobhkmo](https://flickr.com/tmmobhkmo)



[linkedin.com/company/tmmobhkmo](https://linkedin.com/company/tmmobhkmo)

Mustafa Kemal Mahallesi 2129. Sokak No:1 / 7-8-9 Çankaya / ANKARA

T: +90 312 232 57 77 F: +90 312 230 85 74 @: hkmo@hkmo.org.tr