T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARAJ SU SEVİYESİ DEĞİŞİMLERİNİN YÜZEY ALANLARINA DAYALI OLARAK UZAKTAN ALGILAMA VE MAKİNE ÖĞRENME İLE ANALİZİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Gamze KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Uzaktan Algılama ve CBS Programı

Danışman

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

İkinci Danışman

Doç. Dr. Osman Salih YILMAZ

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARAJ SU SEVİYESİ DEĞİŞİMLERİNİN YÜZEY ALANLARINA DAYALI OLARAK UZAKTAN ALGILAMA VE MAKİNE ÖĞRENME İLE ANALİZİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Gamze KARA tarafından hazırlanan tez çalışması 12.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Uzaktan Algılama ve CBS Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Doç. Dr. Osman Salih YILMAZ Manisa Celal Bayar Üniversitesi İkinci Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fatih GÜLGEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Füsun BALIK ŞANLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ahmet Özgür DOĞRU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Fatih GÜLGEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Baraj Su Seviyesi Değişimlerinin Yüzey Alanlarına Dayalı Olarak Uzaktan Algılama Ve Makine Öğrenme İle Analizi: İstanbul Örneği" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gamze KARA

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren, her aşamada değerli katkılarını ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih GÜLGEN'e ve eş danışmanım Sayın Doç. Dr. Osman Salih YILMAZ'a içtenlikle teşekkür ederim. Sağladıkları akademik rehberlik bu tezin bilimsel niteliğinin gelişmesinde belirleyici olmuştur.

Sağladığı akademik altyapı ve teknik imkânlar için Yıldız Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve destek sağlayan aileme teşekkür ederim. Ayrıca arkadaşlarıma lisans sonrası eğitime devam etmemde beni cesaretlendirdikleri ve destek sağladıkları için minnettarım.

Gamze KARA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xii

TABLO LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 3
1.2 Tezin Amacı 13
1.3 Hipotez 13

2 KAVRAMSAL ÇERÇEVE 15

2.1 Baraj 15
2.2 Uzaktan Algılama 16
2.3 Google Earth Engine (GEE) 18
2.4 Makine Öğrenmesi (MÖ) 19

3 MATERYAL VE YÖNTEM 21

3.1 Çalışma Alanı 22
3.2 Veri Kaynakları 23
3.3 Su Çıkarma İndeksleri 26
3.3.1 Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (NDWI) 27
3.3.2 Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI) 27
3.3.3 Otomatik Su Çıkarma İndeksi (AWEI) 27
3.4 Eşik Belirleme 28
3.5 Doğruluk Değerlendirmesi 29

3.6 ERA5-Land Veri Seti 30
3.7 Mann-Kendall Trend Analizi 30
3.8 Rastgele Orman Algoritması 32
4 BULGULAR **36**
4.1 Su Çıkarma İndekslerinin Başarı Düzeylerinin Belirlenmesi 36
4.2 Mann-Kendall Trend Analizi 41
4.2.1 Ömerli Barajı Değişim Grafikleri 41
4.2.2 Elmalı Barajı Değişim Grafikleri 43
4.2.3 Sazlıdere Barajı Değişim Grafikleri 45
4.2.4 Terkos Barajı Değişim Grafikleri 47
4.2.5 Alibey Barajı Değişim Grafikleri 49
4.2.6 Büyükçekmece Barajı Değişim Grafikleri 51
4.2.7 Darlık Barajı Değişim Grafikleri 53
4.3 Makine Öğrenme İle Su Seviyesi Tahmini 55
4.3.1 Ömerli Barajı Su Seviyesi Tahmini 55
4.3.2 Elmalı Barajı Su Seviyesi Tahmini 60
4.3.3 Sazlıdere Barajı Su Seviyesi Tahmini 66
4.3.4 Terkos Barajı Su Seviyesi Tahmini 72
4.3.5 Alibey Barajı Su Seviyesi Tahmini 78
4.3.6 Büyükçekmece Barajı Su Seviyesi Tahmini 84
4.3.7 Darlık Barajı Su Seviyesi Tahmini 89
5 SONUÇ **94**
KAYNAKÇA **97**
A HATA MATRİSLERİ **114**
B YAKINLIK ANALİZLERİ **118**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **138**

SİMGE LİSTESİ

p	Anlamlılık Değeri
r_i	Artan Sırada Düzenlenmiş Sıralar
T	Eğitim Veri Seti
U′(t)	Geri Seri
p(i)	Gri Seviyesinin Oluşma Olasılığı
ha	Hektar
hm^3	Hektometre Küp
ω(t)	Histogramın Sıfırıncı Derece Momenti
U(t)	İleri Seri
h(i)	i Seviyesindeki Piksel Sayısı
y_i^g	İSKİ'den Alınan Baraj Su Seviyesi Verileri
K	Kelvin
km	Kilometre
km^2	Kilometre Kare
r	Korelasyon
m	Metre
m^3	Metre Küp
mm	Milimetre
μT	Orijinal Görüntünün Toplam Ortalama Seviyesi
X_i	Orijinal Seri
$y_i^{\bar{g}}$	Ortalama Gerçek Su Seviyesi
$y_i^{\bar{t}}$	Ortalama Tahmini Su Seviyesi
$\sigma_B^2(t^*)$	Otsu Eşik Değeri
C_i	Rastgele Seçilen Bir Pikselin Ait Olduğu Sınıf

ºC	Santigrat Derece
y_i^t	Tahmin Edilen Baraj Su Seviyesi Verileri
$E(t_i)$	Test İstatistiğinin Beklenen Değeri
N	Toplam
n	Toplam Ölçü Nokta Sayısı
$\mu(t)$	t'inci Seviyeye Kadar Olan Birinci Dereceden Kümülatif Momentler
$Var(t_i)$	Varyans
d	Yatay Konum Farkı

KISALTMA LİSTESİ

API	Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)
AWEI	Otomatik Su Çıkarma İndeksi (Automated Water Extraction Index)
$AWEI_{nsh}$	Gölgesiz Alanlar İçin Otomatik Su Çıkarma İndeksi (Automated Water Extraction Index – Non-Shadow)
$AWEI_{sh}$	Gölgeli Alanlar İçin Otomatik Su Çıkarma İndeksi (Automated Water Extraction Index – Shadow)
BOA	Atmosfer Altı (Bottom of Atmosphere)
CART	Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (Classification and Regression Tree)
CPU	Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
DAHITI	İç Su Kütlelerine Ait Hidrolojik Zaman Serileri Veritabanı (Database for Hydrological Time Series over Inland Waters)
DVM	Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine – SVM)
ERS-2	European Remote Sensing Satellite-2
ESA	Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency)
EW	Ekstra Geniş Şerit Modu (Extra Wide Swath)
GA	Güven Aralığı
GD	Genel Doğruluk
GEE	Google Earth Engine
GFO	Follow-On
GN	Gerçek Negatif
GP	Gerçek Pozitif
GRD	Tespit Edilen Zemin Aralığı (Ground Range Detected)
GS	Gri Seviye
HO	Hareketli Ortalamalar
ICOLD	The International Commission on Large Dams
IDE	Etkileşimli Geliştirme Ortamı (Integrated Development Environment)
IRS	Indian Remote Sensing

ISODATA	Tekrarlı Veri Analizi Yöntemi (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)
IW	Interferometrik Geniş Şerit Modu (Interferometric Wide Swath)
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
K	Kappa Katsayısı
LDA	Doğrusal Diskriminant Analizi (Linear Discriminant Analysis)
LSM	Kara Yüzeyi Modeli (Land Surface Model)
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)
MBES	Çok Huzmeli Yankı İskandili (Multibeam Echo Sounder)
MLC	Maksimum Olasılık Sınıflandırması (Maximum Likelihood Classification)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MNDWI	Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (Modified NDWI)
MÖ	Makine Öğrenmesi (Machine Learning - ML)
NDWI	Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (Normalized Difference Water Index)
NIR	Yakın Kızılötesi (Near Infrared)
OCN	Okyanus (Ocean)
RGB	Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue)
RMSE	Karesel Ortalama Hata (Root Mean Square Error)
RO	Rastgele Orman (Random Forest – RF)
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)
SLC	Tek Bakış Kompleks (Single Look Complex)
SM	Şerit Harita Modu (Strip Map)
SOLS	Service d'Observation des Lacs par Satellite
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SQMK	Sıralı Mann-Kendall (Sequential Mann-Kendall)
SWI	Hassas Su İndeksi (Superfine Water Index)
SWIR	Kısa Dalga Kızılötesi (Short-Wave Infrared)
TOA	Atmosfer Üstü (Top of Atmosphere)
T/P	TOPEX/Poseidon
UA	Uzaktan Algılama
WV	Dalga Modu (Wave)
YN	Yanlış Negatif

YP	Yanlış Pozitif

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Baraj tipleri **16**
Şekil 2.2 UA sistemi **16**
Şekil 2.3 UA sensörleri **18**
Şekil 2.4 GEE kod düzenleyici **19**
Şekil 3.1 İş akış diyagramı **22**
Şekil 3.2 Çalışma alanı **23**
Şekil 3.3 RO akış şeması **32**
Şekil 4.1 İndekslere göre belirlenen baraj yüzey alanları **36**
Şekil 4.2 Ömerli Barajı değişim grafikleri **41**
Şekil 4.3 Elmalı Barajı değişim grafikleri **43**
Şekil 4.4 Sazlıdere Barajı değişim grafikleri **45**
Şekil 4.5 Terkos Barajı değişim grafikleri **47**
Şekil 4.6 Alibey Barajı değişim grafikleri **49**
Şekil 4.7 Büyükçekmece Barajı değişim grafikleri **51**
Şekil 4.8 Darlık Barajı değişim grafikleri **53**
Şekil 4.9 Ömerli Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **55**
Şekil 4.10 Ömerli Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **56**
Şekil 4.11 Ömerli Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **56**
Şekil 4.12 Ömerli Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **57**
Şekil 4.13 Ömerli Barajı özellik önem derecesi **57**
Şekil 4.14 Ömerli Barajı tahmin hatalarının dağılımı **58**
Şekil 4.15 Ömerli Barajı rezidüel grafiği **59**
Şekil 4.16 Ömerli Barajı test seti zaman serisi grafiği **59**
Şekil 4.17 Elmalı Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **60**
Şekil 4.18 Elmalı Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **61**
Şekil 4.19 Elmalı Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **61**
Şekil 4.20 Elmalı Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **62**
Şekil 4.21 Elmalı Barajı özellik önem derecesi **63**
Şekil 4.22 Elmalı Barajı tahmin hatalarının dağılımı **63**

Şekil 4.23 Elmalı Barajı rezidüel grafiği **64**
Şekil 4.24 Elmalı Barajı test seti zaman serisi grafiği **65**
Şekil 4.25 Sazlıdere Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **66**
Şekil 4.26 Sazlıdere Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **67**
Şekil 4.27 Sazlıdere Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **67**
Şekil 4.28 Sazlıdere Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **68**
Şekil 4.29 Sazlıdere Barajı özellik önem derecesi **69**
Şekil 4.30 Sazlıdere Barajı tahmin hatalarının dağılımı **70**
Şekil 4.31 Sazlıdere Barajı rezidüel grafiği **71**
Şekil 4.32 Sazlıdere Barajı test seti zaman serisi grafiği **71**
Şekil 4.33 Terkos Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **72**
Şekil 4.34 Terkos Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **73**
Şekil 4.35 Terkos Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **74**
Şekil 4.36 Terkos Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **74**
Şekil 4.37 Terkos Barajı özellik önem derecesi **75**
Şekil 4.38 Terkos Barajı tahmin hatalarının dağılımı **76**
Şekil 4.39 Terkos Barajı rezidüel grafiği **76**
Şekil 4.40 Terkos Barajı test seti zaman serisi grafiği **77**
Şekil 4.41 Alibey Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **78**
Şekil 4.42 Alibey Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **79**
Şekil 4.43 Alibey Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **79**
Şekil 4.44 Alibey Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **80**
Şekil 4.45 Alibey Barajı özellik önem dereceleri **81**
Şekil 4.46 Alibey Barajı tahmin hatalarının dağılımı **81**
Şekil 4.47 Alibey Barajı rezidüel grafiği **82**
Şekil 4.48 Alibey Barajı test seti zaman serisi grafiği **83**
Şekil 4.49 Büyükçekmece Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **84**
Şekil 4.50 Büyükçekmece Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **85**
Şekil 4.51 Büyükçekmece Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **85**
Şekil 4.52 Büyükçekmece Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri **86**
Şekil 4.53 Büyükçekmece Barajı özellik önem derecesi **86**
Şekil 4.54 Büyükçekmece Barajı tahmin hatalarının dağılımı **87**
Şekil 4.55 Büyükçekmece Barajı rezidüel grafiği **88**
Şekil 4.56 Büyükçekmece Barajı test seti zaman serisi grafiği **88**

Şekil 4.57 Darlık Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası **89**
Şekil 4.58 Darlık Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon **90**
Şekil 4.59 Darlık Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması **90**
Şekil 4.60 Darlık Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri..... **91**
Şekil 4.61 Darlık Barajı özellik önem derecesi **91**
Şekil 4.62 Darlık Barajı tahmin hatalarının dağılımı **92**
Şekil 4.63 Darlık Barajı rezidüel grafiği **92**
Şekil 4.64 Darlık Barajı test seti zaman serisi grafiği **93**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydularının özellikleri **24**
Tablo 3.2 Görüntü tarihleri **25**
Tablo 3.3 Hata matrisi **29**
Tablo 4.1 İndekslerin doğruluk değerlendirmeleri **37**
Tablo 4.2 En başarılı indeksler **40**
Tablo 4.3 Sentinel-1 görüntüsü kullanılan ay sayıları **40**

ÖZET

Baraj Su Seviyesi Değişimlerinin Yüzey Alanlarına Dayalı Olarak Uzaktan Algılama ve Makine Öğrenme İle Analizi: İstanbul Örneği

Gamze KARA

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Osman Salih YILMAZ

Bu tez kapsamında, İstanbul'da yer alan yedi barajın (Ömerli, Elmalı, Sazlıdere, Terkos, Alibey, Büyükçekmece ve Darlık) su yüzey alanlarının uzaktan algılama (UA) yöntemleri ile bulunmasını ve hacim değişimlerinin UA, hidro-meteorolojik veriler ve makine öğrenme (MÖ) yöntemleri kullanılarak analiz edilmesini amaçlamaktadır. İlk aşamada, farklı çevresel ve morfolojik özelliklere sahip barajlar için normalleştirilmiş fark su indeksi (Normalized Difference Water Index-NDWI), değiştirilmiş NDWI (Modified NDWI-MNDWI), otomatik su çıkarma indeksi gölgeli (Automated Water Extraction Indeks Shadow-$AWEI_{sh}$) ve otomatik su çıkarma indeksi gölgesiz (Automated Water Extraction Indeks Non Shadow-$AWEI_{nsh}$) su çıkarma indekslerinin performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve barajlara özgü en uygun indeksler belirlenmiştir. Sonuçlar, tek bir indeksin tüm barajlar için yeterli olmadığını göstermiştir. İkinci aşamada, 2017–2025 dönemine ait su yüzey alanı, hacim, su seviyesi ve meteorolojik değişkenlere Mann–Kendall trend analizi uygulanmıştır. Analizler, Elmalı Barajı dışında diğer

barajların büyük çoğunluğunda su yüzey alanı ve hacimde %95 güven aralığı düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı azalış eğilimleri bulunduğunu ortaya koymuştur. Buna karşın yağış serilerinde uzun vadeli anlamlı bir trend tespit edilmemiş; buharlaşma ve sıcaklık serilerinde ise kısa süreli değişimlerin ardından durağan bir yapı gözlenmiştir. Son aşamada ise geliştirilen rastgele orman (RO) tabanlı su seviyesi tahmin modeli, UA temelli yüzey alanı değişkenlerinin, gecikmeli verilerin ve hareketli ortalamaların su seviyesi tahmininde en güçlü belirleyiciler olduğunu göstermiştir. Genel olarak çalışma, İstanbul barajlarının hidroklimatik baskı altında olduğunu ve RO tabanlı yaklaşımların su kaynakları yönetimi için etkili bir karar destek aracı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İstanbul, NDWI, MNDWI, AWEI, Google Earth Engine, rastgele orman, Mann-Kendall.

ABSTRACT

Analysis of Dam Water Level Changes Based on Surface Area Data Using Remote Sensing and Machine Learning: The Case of Istanbul

Gamze KARA

Department of Geomatic Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fatih GÜLGEN
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman Salih YILMAZ

Within the scope of this thesis, it is aimed to determine the water surface area of seven reservoirs located in Istanbul (Omerli, Elmali, Sazlidere, Terkos, Alibey, Büyükcekmece, and Darlik) using remote sensing (RS) methods, and to analyse volume variations by integrating RS data, hydro-meteorological variables, and machine learning (ML) techniques. In the first stage, the performances of the Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified NDWI (MNDWI), Automated Water Extraction Index for shadowed areas ($AWEI_{sh}$) and Automated Water Extraction Index for non-shadowed areas ($AWEI_{nsh}$) water extraction indices were comparatively evaluated for reservoirs with different environmental and morphological characteristics, and the most suitable index for each reservoir was determined. The results demonstrated that a single index is not sufficient for all reservoirs. In the second stage, the Mann–Kendall trend analysis was applied to water surface area, volume, water level, and meteorological variables for the period 2017–2025. The analyses revealed statistically significant decreasing trends at the 95% confidence level in water surface area and volume for the

majority of reservoirs, except for Elmali Reservoir. In contrast, no long-term significant trend was detected in precipitation series, while evaporation and temperature series exhibited a stationary structure following short-term variations. In the final stage, the developed Random Forest (RF)-based water level prediction model demonstrated that RS-derived surface area variables, lagged data, and moving averages are the strongest determinants in water level prediction. Overall, the study reveals that Istanbul's reservoirs are under hydroclimatic pressure and that RF-based approaches provide an effective decision-support tool for water resources management.

Keywords: Istanbul, NDWI, MNDWI, AWEI, Google Earth Engine, random forest, Mann-Kendall.

1
GİRİŞ

Su, canlı yaşamının sürdürülmesi, ekosistemin devamı için önemli kaynaklardan biridir [1,2]. Sulak alanlar ve sular altında kalan alanlar, karasal su döngüsünün önemli bir bileşenidir ve Dünya'daki toplam su miktarının %1'inden daha azını ve buzsuz kara alanlarının yaklaşık %6'sından daha azını kaplar [3]. Nehirler, göller, rezervuarlar ve göletler yer üstü tatlı su kaynakları olmanın yanısıra, iklim düzenlemesi ve su temini gibi çeşitli ekosistem hizmetlerinde de rol oynar [4]. Ancak yeryüzündeki toplam tatlı su kaynakları sınırlı olup toplam suyun yalnızca %2,5'ini oluşturmaktadır [5]. Temiz su insan yaşamı için temel kaynak olmasına rağmen, 1,1 milyar insanın suya erişemediği, 2,7 milyar insanın yılda en az bir ay su kıtlığı yaşadığı ve 2,4 milyar insanın yetersiz hijyen koşullarından muzdarip olduğu belirtilmiştir [6]. 1984-2015 yılları arasında küresel kalıcı yüzey suyu kaybının %70'inden fazlasının, Kazakistan, Özbekistan, İran, Afganistan ve Irak olmak üzere toplam beş ülkede yoğunlaştığı görülmüştür [7]. Artan nüfus, sanayileşme ve tarımsal faaliyetlerdeki büyük su talebi su kaynakları üzerinde giderek artan bir baskı oluşturmaktadır [8,9]. Örneğin, ülkemizdeki su tüketiminin %73'ü tarım faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır [10]. Ayrıca, 21. yüzyılın en önemli sorunlarından biri kabul edilen iklim değişikliği ve küresel ısınma, hidrolojik döngüyü etkileyerek buharlaşma oranını artırmakta, yağış rejimini değiştirmekte ve su krizinin büyümesine yol açmaktadır [11]. Gölleri besleyen akarsular üzerine inşa edilen barajlar ve su kaynaklarını korumayı önceliklemeyen çeşitli altyapı ve büyük ölçekli yatırım projeleri, havzalar arası su transferleri, kirlilik, kaçak avcılık ve balıkçılık gibi insan faaliyetleri tatlı su kaynaklarının azalmasına neden olan diğer unsurlardır [12].

Küresel ve bölgesel baskıların sonucunda, su kütlelerinin yüzey alanlarında zamanla önemli değişimler meydana gelmektedir. Türkiye'nin su kaynakları

ülkenin coğrafi konumu ve izlenen politikalar bakımından ciddi tehditlerle karşı karşıyadır. Örneğin, Burdur Gölü yüzey alanı son 42 yılda %38,4 oranında azalmıştır [12]. Sakarya Havzası yağış miktarlarında azalma trendi nedeniyle tehdit altındadır [13]. Fırat-Dicle ve Yeşilırmak'ta su debisi azalışları gözlenmektedir [5]. 1987-2005 yılları arasında Tuz Gölü'ndeki su ve tuz rezervi azalmış, su yüzey alanı 18 yıllık dönemde yaklaşık %30 oranında daralmıştır [14]. Diğer taraftan su kaynaklarının insan faaliyetlerinden en fazla etkilendiği bölge, başta İstanbul olmak üzere Marmara Havzasıdır. İstanbul'un önemli tatlı su kaynaklarından biri olan Terkos Gölü, güneybatı Karadeniz kıyılarından yaklaşık 50 metre içeridedir. Uzun yıllar Karadeniz kıyılarında gerçekleştirilen kaçak kum çıkarım faaliyetleri nedeniyle kıyı morfolojisinin doğal dinamik dengesi önemli ölçüde bozulmuş ve Terkos Gölü ciddi çevresel baskılarla karşı karşıya kalmıştır [15]. İstanbul'un içme suyu ihtiyacının %40'ını karşılayan Ömerli Baraj Gölü'nde kentleşmenin etkisi ve sulama faaliyetleri nedeniyle su kalitesi bozulma eğilimindedir [16]. İstanbul'un içme suyu ihtiyacının %15,6'sını karşılayan Darlık Barajı'nın su kalitesi, uzun mesafeli koruma alanlarındaki tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan azot-fosfor yükleri, evsel atıkların akarsularla taşınması ve yağış/erozyonla gelen sedimentler sebebiyle bozulma eğilimindedir [17]. Nüfus, sanayi ve tarımsal yoğunluğun yüksek olduğu bir konumda yer alan Büyükçekmece Gölü, kirletici faktörlerin etkisi altında kaldığından rezervuarın doğal yapısı zamanla bozulmaya başlamıştır [18]. Elmalı Havzası'nın yakınında bulunan TEM otoyolu nedeniyle özellikle kurşun ve çinko değerleri kritik seviyelerin üzerine çıktığından bölgedeki ulaşım kaynaklı ağır metal kirliliği üst seviyeye ulaşmıştır [19]. Küçükçekmece Havzası içerisinde bulunan Sazlıdere Barajı'nın su kalitesi, derelerden ve yağmur sularından taşınan kirleticilerden etkilenmekte ve barajdaki mikrobiyolojik kirlilik sınır değerlerin üzerinde seyretmektedir [20]. İstanbul'un içme suyu ihtiyacının %3,6'lık küçük kısmını karşılayan Alibey Barajı'nın etrafı yerleşim ve sanayi alanlarıyla kaplandığı için çevresel kirlilik alarm seviyesine ulaşmıştır [21].

Su kaynakları üzerindeki sorunları önlemek için koruma ve su yönetimi planlamalarının bütüncül bir yaklaşımla ele alınması; meteorolojik süreçlerin, çevresel kirliliğin, su yönetim politikalarının ve enerji üretim süreçlerinin birlikte planlanması gerekmektedir [22]. Tarımsal faaliyetler kapsamında çitfçilere damlama sulama sistemi konusunda gerekli bilgilendirmelerin yapılması elzemdir

[23]. Su yönetimi konusunda zaman içinde meydana gelecek değişimler izlenmeli, hedef kitleler bilinçlendirilmeli, değişen beklentiler, sosyo-ekonomik koşullar ve yeni yaklaşımlar doğrultusunda stratejiler güncellenmelidir [24]. Fosfor içeren atıksuların ileri arıtma yöntemleriyle arıtılması sağlanmalıdır [25]. Hassas ekosistemlerde tarım arazilerinin terk edilerek sazlık ve bataklıkların doğal ekosistem döngüsüyle geri kazandırılması planlanmalıdır [26].

Yukarıda bahsedilen koruma önerileri bağlamında, canlı yaşamı için temel kaynak olan tatlı su kütlelerinin yüzey alanlarındaki zamansal değişimlerin izlenmesi, doğal ekosistemlerin korunabilmesi ve insani ihtiyaçların sürdürülebilir şekilde karşılanması açısından oldukça önemlidir [27,28]. Uzun vadeli zaman serisi analizi, bir su kaynağının geçmişi ve mevcut durumu hakkında ayrıntılı bilgi sağlar ve su yönetimi için çok önemli olan değişim mekanizmasını araştırmak için kullanılır [29]. Su kütleleri, geleneksel yerinde gözlemler, hava fotoğrafları, Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) ve kara yüzeyi modeli (Land Surface Model-LSM) gibi çeşitli veri kaynakları kullanılarak izlenebilse de bu yöntemler maliyetli ve zaman alıcıdır [30-32]. Bu koşullar altında, geniş alan kapsamı, makul mekansal çözünürlükleri, iyi tekrarlayan döngüsü ve az maliyet gerektirmesi nedeniyle uzaktan algılama (UA) kıyı şeritlerinin periyodik olarak izlenmesi için potansiyel bir veri kaynağıdır [33].

Belirli bir su kütlesi için yerinde gözlemlenen su seviyesi ile UA görüntülerinden elde edilen yüzey alanı arasında ilişki kurulması mümkündür [34]. Bu ilişki, alan, hacim ve su seviyesi gibi bir değişken verildiğinde başka bir değişkeni tahmin etmek için kullanılabilir [29,35]. Tahmin çalışmaları, zaman serilerindeki eksik verileri doldurmak için kritik öneme sahiptir [36].

1.1 Literatür Özeti

Su yüzey alanı tahmini, su kaynaklarının yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerinin analiz edilebilmesi açısından hayati öneme sahiptir [37]. Yüzey alanını bulmak için 1950'li yıllarda hava fotoğraflarının kullanımı başlamış, bu yöntem özellikle baraj inşaatı sonrası rezervuarların genişliğinin belirlenmesinde uygulanmıştır [38]. Hava platformlarından elde edilen verilerin geometrik düzeltilmesi ve zemin kontrolü özel ekipman gerektirir. Bunun yanında kıyı şeridinin görüntülerden manuel olarak çıkarılması, çeşitli yorumlama hatalarına yol

açabilir [39]. Geleneksel arazi ölçme yaklaşımlarının yüksek maliyetli olması, yoğun iş gücü gerektirmesi ve geniş alanlarda yeterli duyarlıkta zamansal bilgi üretilememesi, uydu sistemlerini küresel izleme çalışmaları için vazgeçilmez kılmıştır [40].

Son yıllarda yüzey su dağılım desenlerinin bölgesel ölçekte, dinamik, sürekli ve düşük maliyetli izlenmesi, zamansal değişimlerin daha iyi anlaşılması için UA teknolojilerinden sıklıkla faydalanılmaktadır [41]. UA teknolojilerinin temel prensipleri, yeryüzündeki materyallerin elektromanyetik radyasyona karşı gösterdikleri yansıtma ve soğurma özelliklerine dayanır [42]. Su yüzey alanlarının küresel ölçekte tahmini için farklı kaynaklardan elde edilen farklı uydu görüntüleri kullanılabilir [43]. 1972'deki fırlatılışından bu yana sürekli olarak yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntü veri seti sağlayan Landsat zamansal bağlamda en değerli platformdur [44]. Landsat görüntü serisinin tekrarlama periyodu geleneksel olarak 16 gündür [45]. Ancak bu frekans, 31 Mayıs 2003'te Landsat 7 uydusundaki tarama hattı düzelticisinin (Scan Line Corrector-SLC) arızalanması ve bulutluluk gibi atmosferik etkiler sebebiyle aylık dinamik haritalama çalışmalarında veri yetersizliğine yol açmıştır [46]. Frazier ve Page [47], Landsat 5 verileriyle su kütlelerinin belirlenmesinde uygulanan tek bantlı yoğunluk dilimleme yönteminin %96,9 genel doğruluk (GD), 6 bantlı Maksimum Olasılık Sınıflandırmasının (Maximum Likelihood Classification-MLC) ise %97,4 doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Battal vd. [48], Landsat 8 ve Sentinel-1 görüntülerini entegre ederek yaptıkları çalışmada göl alanının 2015 ve 2016 yılları arasında ortalama olarak 664,92 ha büyüdüğü tespit etmişlerdir. Zhou vd. [49], Landsat 7 ve Landsat 8 ile yaptığı su kütlesi haritalandırma çalışmasında Landsat 7'in %97,3, Landsat 8'in ise %95,7 GD sağladığını ortaya koymuştur.

Diğer bir platform olan, Fransızların Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) serisi uyduları, yan-bakış yeteneği ile stereo-görüntü alımına olanak tanır. Ancak bu stereo-çiftlerin çekim zaman aralığı günlerden mevsimlere kadar uzayabildiği için radyometrik farklılıklar nedeniyle eşleştirme sorunlarına yol açar [50]. Fisher ve Danaher [51], Yeni Güney Galler (Avustralya) genelinde su kütlelerini sınıflandırmak için SPOT 5 görüntülerini ile yaptıkları çalışmada Doğrusal Diskriminant Analizi (Linear Discriminant Analysis - LDA) kullanarak çok boyutlu bir su indeksi geliştirmişler ve %98 GD elde etmişlerdir. Zhang vd.

[52], Zhujiangkou bölgesinde SPOT-5 çok spektrallı görüntülerini (10 m) kullanarak su ürünleri yetiştiriciliği için kullanılan kıyı alanlarının tespiti için nesne tabanlı bölge büyütme ve kenar tespiti entegrasyonuna dayalı otomatik bir yöntem geliştirmiş ve piksel hassasiyetinde doğruluk elde etmişlerdir.

2000 yılından sonra kullanılmaya başlanan Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) gibi çok kaynaklı sensörler, yüksek zamansal çözünürlük avantajı sunar ve Dünya yüzeyini günde iki kez kapsayabilme yeteneğine sahiptir [53,54]. d'Andrimont ve Defourny [55], MODIS verilerinden yararlanarak Afrika genelinde 2004–2010 dönemine ait su kütlelerini 10 günlük periyotlarla izlemiş, renk uzayı tabanlı çok bantlı su tespit yöntemiyle mevsimsel ve kalıcı su alanlarını başarıyla haritalamış ve %6'nın altında hata elde edildiğini göstermiştir. Sharma vd. [56], MODIS verilerini kullanarak küresel ölçekte su yüzeylerini haritalamak için hassas su indeksi (Superfine Water Index-SWI) adı verilen yeni bir indeks geliştirerek karlı alanlarda modelin toplam varyansın yaklaşık %95'ini açıklayabildiği tespit etmişlerdir.

Misyona göre değişen okyanus bilimi uygulamaları için tasarlanmış radar altimetri platformları, TOPEX/Poseidon (T/P) ve Jason misyonları 10 günlük, Geosat Follow-On (GFO) misyonu 17 günlük ve European Remote Sensing Satellite-2 (ERS-2) ile ENVISAT misyonları ise 35 günlük bir tekrarlama periyoduna sahiptir [57]. Calmant vd. [57], Victoria Gölü üzerinde yapılan çalışmada; GFO, Envisat, T/P ve Jason verilerinin birleştirilmesiyle göl seviyesinin ayda yaklaşık 20 kez örneklenebildiği göstermişlerdir. Birkett vd. [58], T/P verileri ile Amazon ana kolundaki su yüzeyi eğiminin mekânsal ve zamansal değişimlerini (aşağı havzada 1,5 cm/km'den yukarı havzada 4,0 cm/km'ye kadar) ortaya koymuş ve geçici taşkın dalgalarını izleyebilmiştir. Sima vd. [59], Jason-1 ve Jason-2 verilerinin T/P ve diğer uydularla birleştirdikleri çalışmalarında, Urmiye Gölü'nün su seviyesi değişimleri izlemiş olup radar altimetresi verileri, yer istasyonu verileriyle karşılaştırıldığında 0,99 gibi çok yüksek bir belirleyicilik katsayısı (R^2) elde etmişlerdir.

Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 2014 yılında Copernicus Sentinel-1 uydusunun fırlatılmasıyla birlikte, ücretsiz ve herkesin erişimine açık veriler, Sentetik Açıklıklı Radar'ın (SAR) çeşitli araştırma alanlarında daha sık uygulanmasını mümkün hale getirmiştir [60]. Sentinel-1A ve 2016 yılında fırlatılan

Sentinel-1B uyduları Avrupa üzerinde 6 günlük tekrarlama döngüsü ve Kuzey Amerika üzerinde 12 günlük tekrarlama döngüsü sunarak yüzey suyu kapsamının sürekli izlenmesine olanak tanır [61]. Dirscherl vd. [62], Antartika'da buz üstü göllerde SAR görüntüleri kullanarak yaptıkları çalışmada %93 F1-skor elde ederek başarı sağlamışlardır. Shen vd. [63], Çin'in en büyük tatlı su gölü olan Poyang Gölü'ndeki su kütlesi değişimlerini izlemek için 2014-2021 yılları arasındaki uzun zaman serili Sentinel-1 verilerini kullanmışlar ve su alanı ile su seviyesi arasında 0,92'ye varan korelasyon elde etmişlerdir. Akgül'ün [64], çalışmasında, Mersin'de 2016–2017 arasındaki taşkınları Sentinel-1 SAR verileriyle incelenmiş ve bulutluluk koşullarında dahi taşkın sınırları başarıyla belirlenerek 05.01.2017 tarihinde taşkın alanının 715,02 ha ve hacminin 4,23 hm^3 olduğu hesaplanmıştır. Babagiray ve Kalkan [65], Adana'daki tarım alanlarında aşırı yağışların neden olduğu göllenmeleri Sentinel-1 verileriyle analiz ederek göllenmelerin %92'sinin eğimin %1'in altında olduğu alanlarda gerçekleştiğini belirtmiştir. 2015 yılında fırlatılan Sentinel-2A uydusu, Dünya yüzeyinin küresel ölçekte her 10 günde bir taranmasına olanak sağlar [66]. Sentinel-2A ve 7 Mart 2017 tarihinde fırlatılan Sentinel-2B uydularının birlikte faaliyeti sayesinde Sentinel-2 küresel olarak 5 günlük yüksek bir zamansal çözünürlüğe ulaşılmıştır [67]. Sentinel-2'nin yüksek tekrarlı kapsamı, aylık ölçekte zaman serisi analizi çalışmalarında kullanılma potansiyelini arttırmıştır [68]. Miura vd. [69], Sentinel-2 ve Landsat-8 görüntüleriyle 2019–2021 dönemine ait küresel aylık yüzey suyu haritaları üretmiş ve Sentinel-2'nin 10–20 m mekânsal çözünürlüğü sayesinde yüzey suyu değişimlerinin güvenilir biçimde izlenebildiğini göstermiştir. Bhangale vd. [70], Sentinel-2 görüntülerinden hesaplanan yüzey suyu alanları ve mevcut resmi su envanterleri arasında mekânsal tutarsızlıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Lock vd. [71], Sentinel-2 verileri kullanılarak klorofil-a ve bulanıklık gibi su kalitesi göstergelerinin tahmin edilebildiğini, ancak sonuçların göl ve yıllara bağlı olarak değiştiğini ve tek tip bir algoritmanın her su kütlesi için yeterli olmadığını göstermiştir. Abrahim vd. [72], Sentinel-2'nin çok bantlı yapısını kullanan ve parçacık sürü optimizasyonu ile geliştirilen yeni bir su indeksi yaklaşımının, geleneksel indekslere kıyasla daha yüksek doğrulukla su yüzeylerini belirlediğini göstermiştir. Portalés-Julià vd. [73], Sentinel-2 optik verilerinin taşkın tespitinde yüksek doğruluk sağladığını ancak bulutluluk nedeniyle sınırlamalar içerdiğini,

Sentinel-1 ile Sentinel-2 verilerinin birlikte kullanılmasıyla daha güvenilir sonuçlar elde edildiğini ortaya koymuştur.

UA yöntemleri, zamansal olarak yüksek çözünürlükte veri sağlamasının yanında, veri olmayan veya sınırlı veri olan bölgelerdeki verileri artırmak için de kullanılır. Ancak elde edilen veri kümelerini analiz etmek için kapsamlı bir veri işleme süreci gerekir [74]. Bu kapsamda büyük ölçekli uydu görüntüsü analizleri için bulut platformları geliştirilmiş ve kullanımları hızla yaygınlaşmıştır [75]. Özelikle, ücretsiz bir şekilde kullanılabilen Google Earth Engine (GEE) platformu, büyük hacimli jeo-uzamsal verilere kolay erişim imkânı sağlar [74]. Web'deki JavaScript veya Python algoritma geliştirme araçları ile kapsamlı veriler çevrimiçi olarak işlenebilir ve görselleştirilebilir [76]. Uzun vadeli küresel yüzey suyu haritalamasına yönelik bir uzman sistemin, tek bir merkezi işlem biriminde (Central Processing Unit-CPU) yürütülmesi durumunda yaklaşık 1.212 yıl sürecek bir analiz GEE altyapısında 10.000 işlem birimi kullanılarak yaklaşık 45 gün içinde tamamlanabilir [7]. GEE, kentsel arazi örtüsünün ve tarım ürünlerinin izlenmesi, sulak bölgelerin tespiti, ormanların haritalanması ve su yüzeylerinin belirlenmesi gibi büyük ölçekli çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [76]. Aynı zamanda ERA5-Land gibi küresel ölçekli veri setleri yardımıyla sıcaklık ve buharlaşma gibi iklimsel faktörler de bölgesel olarak GEE yardımıyla bulunabilir [77,78]. Chen ve Zhao [79], GEE'de SAR verileri kullanılarak geliştirilen otomatik sel haritalama yöntemi ile; düzlük arazilerde %96,21 doğruluk ve 0,87 F1-skor, dağlık arazilerde ise %98,61 doğruluk ve 0,89 F1-skor elde etmiştir. Li vd. [80], GEE ile yerel ortamda eğitilen derin öğrenme tabanlı modelleri entegre ederek Baykal Gölü Havzası'ndaki su kütlelerinin doğruluklarını 2013, 2017 ve 2021 yılları için sırasıyla %92,9, %92,7 ve %92,4 olarak hesaplamıştır. Mashala vd. [81], GEE ortamında çok zamanlı Sentinel-2 görüntülerini ve peyzaj metriklerini kullanılarak yüzey suyu kütlelerinin mevsimsel ve mekânsal değişimi %96–100 doğruluğunda haritalamış, yarı kurak bölgelerde su varlığının kuru ve yağışlı mevsimler arasında beklenmedik farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Condetça vd. [82] yaptıkları çalışmada, GEE kullanılarak 1984–2019 dönemine ait Landsat verileriyle baraj su yüzeyi ve hacimleri otomatik olarak hesaplamış, 0,96–0,99 korelasyon ile başarı sağlamıştır.

UA görüntülerinden su alanlarının belirlenmesi için veri işleme aşamasında sıklıkla piksel tabanlı sınıflandırma yöntemleri kullanılmaktadır [83]. Bunlar denetimli ve denetimsiz sınıflandırma olarak iki ana grupta ele alınır [84]. Denetimli sınıflandırmada kullanıcı, sınıflandırma işlemine başlamadan önce her sınıfa ait örnek pikselleri belirlemekte ve bu veriler algoritmaya eğitim verisi olarak sunulmaktadır. Sonrasında tüm görüntüdeki pikseller kullanılan algoritma yardımıyla uygun sınıflara atanır [85]. MLC, Destek Vektör Makineleri (DVM) (Support Vector Machine-SVM) ve Rastgele Orman (RO) (Random Forest-RF) gibi algoritmalar denetimli sınıflandırmanın yaygın örnekleridir [86,87]. Mondal vd. [88] tarafından yapılan çalışmada, Landsat uydu görüntüleri kullanılarak elde edilen sonuçlarda, DVM algoritmasının %91,67 GD ile %78,33 GD gösteren MLC'ye göre daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Ancak MLC'nin tek başına kullanıldığı başka bir çalışmada, Sisodia vd. [89], Landsat görüntüleri üzerinde MLC ile %93,75 GD ve %90,52 Kappa doğruluğu elde etmiş, bu yöntemin yanlış sınıflandırma ihtimalinin düşük olduğunu belirtmişlerdir. Akça [90], Sentinel-2A görüntüleri kullanarak yaptıkları çalışmada RO algoritmasının %99,15 GD, DVM'nin ise %98,65 GD sonuçlarını verdiğini raporlamıştır. Raza vd. [91] yaptıkları çalışmada, RO'nun eğitim süresinin 60 dakika, DVM'nin ise 350 dakika olduğunu RO'nun çok kısa sürede eğitildiğini belirtmişlerdir. Denetimsiz sınıflandırma, önceden tanımlanmış eğitim verisi gerektirmez. Bu yaklaşımda pikseller yansıma benzerliklerine göre otomatik olarak küme adı verilen gruplara ayrılır. Bu gruplar daha sonra kullanıcı tarafından tematik sınıflarla eşleştirilir [92]. En yaygın kullanılan denetimsiz yöntemler; K-Ortalama (K-Means) ve Tekrarlı Veri Analizi Yöntemi (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique-ISODATA) algoritmalarıdır [93]. Erbaş ve Varlık [94] tarafından yapılan çalışmada, Tuz Gölü'nün yüzey alanı değişimini belirlemek için Landsat 8 görüntüleri üzerinde ISODATA yöntemi kullanılarak gölün yüzey alanının 2014 yılında 997,977 km²'den, 2015 yılında 923,737 km²'ye düştüğü, 2023 yılında ise 1062,172 km²'ye çıktığı belirlenmiştir. Afshinfar vd. [95] tarafından yapılan çalışmada, İran'da yer alan Tar ve Havir gölleri üzerinde yapılan çalışmada, K-Ortalama ve ISODATA %75,9704 GD ile su ve toprak sınıflarını ayırmada yetersiz kalmasına rağmen DVM %99,26 ile üstün bir performans sergilemiştir.

Geleneksel piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi pikselin gri değerine bağlı olarak detayların çıkarımını gerçekleştirdiği için spektral bilgi sınıflandırma aşamasında etkin olarak kullanılır [96]. Nesne tabanlı sınıflandırma, yüksek çözünürlüklü görüntülerin sınıflandırılmasında, tekil pikseller yerine homojen nesneleri analiz ettiği için piksel tabanlı yöntemlere daha başarılıdır [97]. Nesne tabanlı sınıflandırma, segmentasyon ve sınıflandırma olarak adlandırılan iki adımda gerçekleştirilir [98]. Klasik segmentasyon algoritmaları; eşik tabanlı, kenar tabanlı, bölge tabanlı ve kümeleme tekniklerine dayanır [99]. Obje tabanlı sınıflandırmada bulanık mantık uygulamalarını destekleyen eCognition yazılımı yaygın olarak kullanılır [98,100,101].

Su yüzeylerinin belirlenmesi konusunda öne çıkan yaklaşımlardan biri UA görüntülerin spektral bantlarından hesaplanan su indeksleridir [102]. İki veya daha fazla bandın cebirsel işlemlerle birleştirilmesine dayanana indeksler, su kütleleri ile diğer arazi örtüsü türleri arasındaki yansıma farklarını belirginleştirerek sınıflandırma sürecinde zıtlığın artırılmasını sağlamaktadır [103]. Literatürde yaygın olarak kullanılan su çıkarma indeksleri arasında normalleştirilmiş fark su indeksi (Normalized Difference Water Index-NDWI), değiştirilmiş NDWI (Modified NDWI-MNDWI) ve otomatik su çıkarma indeksi (Automated Water Extraction Indeks-AWEI) yer almaktadır [104-106]. AWEI indeksinin gölgeli alanlar için Automated Water Extraction Indeks Shadow ($AWEI_{sh}$) ve gölgesiz alanlar için ise Automated Water Extraction Indeks Non Shadow ($AWEI_{nsh}$) olmak üzere iki farklı versiyonla uygulanabilmektedir [106]. Fisher vd. [107], Landsat verileriyle test edilen yedi farklı su indeksinin tamamının yüksek doğruluk sağladığını, ancak özellikle $AWEI_{sh}$ indeksinin %98 üzerindeki doğruluk değerleriyle hem saf hem de karışık piksellerde en başarılı ve dengeli sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Zhou vd. [49], 10 farklı su indeksinin karşılaştırıldığı kapsamlı çalışmada, açık su yüzeyleri için MNDWI indeksiyle %95,2, karmaşık arazilerde $AWEI_{nsh}$ ile %96,4 ve gölgeli alanlarda $AWEI_{sh}$ ile %95,8 doğruluk değerlerini elde etmiştir. Ogilvie vd. [108] tarafından yapılan çalışmada, altı farklı su indeksi karşılaştırılmış ve MNDWI indeksinin küçük su kütlelerinde en iyi performansı göstererek %80'in üzerinde GD elde ettiği, AWEI'nin ise dört gölde GD'nin %60'ın altına düşmesine neden olduğu bulunmuştur. Reguerio vd. [109]

İspanya'daki kıyı sulak alanlarında yaptıkları çalışmada, -0,30 eşik değeri ile NDWI'nın 0,89 GD ile en iyi performansı gösteren indeks olduğunu belirtmiştir.

Görüntü işlemenin temel konularından biri olan eşikleme (thresholding), çoğunlukla gri düzeyli görüntüde farklı homojenlik özelliklere sahip bölgeleri ayırmak için kullanılır. Ayrıca renkli görüntülerin segmentasyonunda da yaygın olarak uygulanmaktadır [110]. Basitliği ve etkinliği nedeniyle Otsu eşik değer sistemi, bir görüntünün arka plan ve ön plan olmak üzere, optimum şekilde iki sınıfa sahip olmasını sağlayan etkin bir yaklaşımdır [111]. Elmi ve Ahrari [112] tarafından yapılan çalışmada, MODIS görüntülerine uygulanan Otsu dinamik eşikleme yöntemiyle Şubat 2000'den günümüze kadar küresel ölçekte su alanı zaman serileri üretmiş, 40 göl ve rezervuar üzerinde yapılan doğrulamalarda su alanı ile altimetrik su seviyesi verileri arasında ortalama 0,89 korelasyon elde edilmiş ve vaka analizlerinde Hazar Denizi'nin 2000–2024 döneminde yaklaşık 12.000 km² su alanı kaybettiği ortaya konmuştur. Lan vd. [113], Landsat görüntülerine uygulanan NDWI ve Otsu eşikleme yöntemleriyle Poyang Gölü'nün 1987–2023 dönemindeki su alanı değişimini incelemiş, %92,12 GD ile yüksek doğruluk elde etmiş ve gölün ortalama aylık alanının 2421,3 km² olduğu, yıllık −2,67 km² oranında azaldığı ve en geniş alanına Temmuz 2016'da, en dar alanına ise Ekim 2022'de ulaştığı sonucuna varmıştır. Yorulmaz [114] tarafından Otsu yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, Burdur Gölü'nün alanının 2018'de 126,76 km^2 iken 2025'te 115,17 km^2'ye düştüğü tespit edilmiştir.

Geçmişten günümüze farklı tarihlerde elde edilen uydu görüntülerinden hesaplanan spektral indeksler kullanılarak, tematik olarak ayrıştırılan su yüzeylerinin zamansal değişimleri nicel biçimde izlenebilmektedir. Bu yaklaşım, su yüzey alanlarına ilişkin ardışık gözlemlerden oluşan zaman serilerinin türetilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, uzun dönemli eğilimlerin ve değişim dinamiklerinin analizinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel yöntemler arasında Mann–Kendall trend analizi öne çıkmaktadır. Eksik gözlemler ve tespit sınırının altına düşen değerlerle başa çıkabilme yeteneği, Mann–Kendall trend analizinin çok sayıda akademik çalışmada tercih edilmesini sağlamıştır [115]. Galbadrakh vd. [116], Moğolistan'ın batısındaki Khar-Us, Khar ve Durgun göllerinin 1992–2022 dönemindeki alan ve iklim verilerini Mann–Kendall testiyle analiz etmiş, her üç gölde de istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir alan azalması tespit etmiş ve bu

daralmanın temel nedenlerinin artan hava sıcaklığı ve azalan yağış eğilimleri olduğunu ortaya koymuştur. Yayla vd. [117], Eğirdir Gölü çevresindeki beş meteoroloji istasyonunun 1984–2024 dönemine ait verilerine uyguladıkları Mann–Kendall analizi sonucunda, %95 güven düzeyinde tüm istasyonlarda özellikle minimum ve ortalama sıcaklıklarda belirgin ve istatistiksel olarak anlamlı bir artış eğilimi tespit ederek bölgedeki kıyı çizgisi değişimlerinin güçlü bir ısınma sinyaliyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Shah vd. [118], buzul beslenimli Mavi Ay Gölü'nde hava sıcaklığı, su sıcaklığı ve su seviyesi verilerine uyguladıkları Mann–Kendall testiyle anlamlılık değeri (p) < 0,00001 düzeyinde son derece güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı trendler tespit ederek, gölde belirgin bir ısınma ve buna eşlik eden su seviyesi değişimlerinin varlığını ortaya koymuştur.

Su kaynaklarının yönetiminde kullanılan en önemli veri kaynaklarından biri de batimetri ölçüleridir [119]. Zorlu iklim koşullarında farklı topografik özelliklere sahip barajlarda düşük teknolojili yöntemler ile batimetri ölçülerini toplamak oldukça zordur [35]. Veri toplama yöntemleri arasında en çok kullanılanlardan biri; rezervuar çevresine yerleştirilen dereceli su seviye tahtalarının belirli aralıklarla gözle okunmasına dayanan manuel ölçümdür. Bu yöntemin maliyeti düşük ve uygulanması kolaydır. Buna karşın, okuma hataları ve çevresel etkiler nedeniyle doğruluk ve süreklilik açısından sınırlılıklar taşımaktadır [35]. Yerinde ölçüm istasyonları ise özellikle suyun nehir kanallarındaki hareketini izlemede oldukça başarılıdır. Ancak, taşkın alanlarındaki ve sulak bölgelerdeki karmaşık dinamiklerin izlenmesindeki eksiklikleri nedeniyle yüzey suyu değişimlerinin takibinde kullanımı sınırlıdır [120]. Çok huzmeli yankı iskandili (Multibeam Echo Sounder-MBES) gibi geleneksel batimetrik ölçüm yöntemleri ise yüksek maliyet gerektirmesi, sığ denizlerde ve deniz koruma alanlarında araştırma yapamaması, yoğun iş gücü talep etmesi ve veri toplama sürecinin zaman alıcı olması nedeniyle uygulanabilirliği sınırlıdır [121]. Ahmad vd. [122] tarafından Rupat Boğazı'nda yürütülen çalışmada, batimetrik veriler kullanılarak 2021–2024 döneminde bazı kesimlerde 6,6 m'ye varan sığlaşma ve 17 m'ye ulaşan derinleşme, su seviyesinde ise −2,36 m ile +6,28 m arasında aşırı gelgit dalgalanmaları tespit edilmiş; bu hızlı morfolojik değişimlerin yoğun gemi trafiği ve doğal süreçlerin birlikte etkisiyle tortu birikimi, yeni adacık oluşumu ve seyir güvenliği açısından ciddi izleme ve yönetim zorlukları yarattığı ortaya konmuştur. Diğer taraftan günümüzde kullanılan

UA sistemleri yerel altyapının olmadığı uzak bölgelerde bile su seviyesi zaman serilerinin tahmin edilmesine olanak sağlar [123]. Radar altimetresi mekânsal çözünürlük sınırlamalarına rağmen uzaydan su seviyesi değişimlerini ölçmede en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir [43]. Bu bağlamda, Crétaux vd. [124] tarafından geliştirilen Service d'Observation des Lacs par Satellite (SOLS) isimli veri tabanı altimetri ve yüzey alanı bilgilerini kullanarak su seviyelerine bağlı hacim değişimlerini açıklayan örnek bir bilgi sistemidir. Ayrıca, iç su kütlelerine ait hidrolojik zaman serileri veritabanı (Database for Hydrological Time Series over Inland Waters-DAHITI), T/P, Jason-1/2, ERS-1/2, Envisat ve SARAL/AltiKa dahil olmak üzere çok görevli altimetre verilerini birleştirerek su seviyesi zaman serilerini depolayan diğer bir örnek sistemdir [123].

Zaman serilerine bağlı analiz çalışmalarında kullanılan doğrusal regresyon, ölçülere dayalı bağımsız değişkenler ile bağımlı bir değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ortaya koyan istatistiksel tahmin yöntemidir. Baraj su hacimlerinin tahmin edilmesi çalışmalarında da doğrusal regresyon istatistiği sıklıkla kullanılmaktadır. Buna karşın, günümüzde çok boyutlu ve doğrusal olmayan veri setlerinde gizli kalmış örüntüleri ve ilişkileri ortaya çıkarma konusunda yüksek doğruluk sunan çeşitli makine öğrenme (MÖ) yaklaşımları ön plana çıkmaktadır [125]. RO, su seviyesi tahmininde yaygın olarak kullanılan ve genellikle yüksek doğruluk sunan bir MÖ modelidir [126]. Zakaria vd. [127]'ne göre RO, doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği sayesinde geçmiş verilerdeki temel kalıpları yakalayarak daha doğru tahminler yapmayı sağlamaktadır. Yeniden örnekleme ve torbalama (bagging) yaklaşımı sayesinde RO aşırı uyumu (overfitting) azaltır [128]. Bu bağlamda Şen [125], dört farklı MÖ modelini karşılaştırarak günlük su seviyesi tahmini yaptığı çalışmada RO'nun daha dengeli sonuçlar ürettiğini belirlemiştir. Gaborone ve Bokaa Barajları'ndaki su seviyesi tahminleri için gerçekleştirilen bir başka çalışmada yine RO, su seviyeleri ile iklim faktörleri ve iklim endeksleri arasındaki önemli korelasyonları yakalamıştır [126]. Rathbun ve Murray göllerinde su seviyesindeki boşlukları doldurmak için yine RO'nun kullanıldığı bir başka çalışma daha yapılmıştır [36]. Yavuzdoğan ve Tanır Kayıkçı [129], Ege Denizi'ndeki Bodrum ve Menteş mareograf istasyonlarında anlık deniz seviyesi tahmininde RO algoritmasının en yüksek performansı sağladığını ortaya koymuştur. Nhu vd.[130], Zrebar Gölü'nün günlük su seviyesi tahmininde

kullanılan RO algoritmasının test aşamasında $R^2 = 0.9697$ belirleyicilik katsayısı ile yüksek doğruluk sağladığını, ancak performans açısından diğer modellere göre daha az başarı sağladığını ortaya koymuştur. Guo vd. [131], RO algoritmasını kullanarak Qinghai Gölü'nün su yüzeyi çıkarımında %1'in altında bağıl alan hatası elde etmiş; iklimsel etki analizinde ise RO değişken önem sıralamasına göre rüzgâr hızının %31,3, yağışın %22,3, radyasyonun %20,8, sıcaklığın %17,7 ve özgül nemin %7,8 oranlarında göl hacmi değişimini açıkladığını ve modelin yüksek doğrulukla göl değişimlerini temsil ettiğini ortaya koymuştur.

Tatlı su kaynaklarının izlenmesi ve zamansal değişimlerinin belirlenmesinde yukarıda sunulan literatür incelemesi, UA tabanlı yaklaşımların ve modern istatistiksel analiz araçlarının etkin şekilde kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, artan nüfus ve arazi kullanımındaki hızlı değişimler nedeniyle su kaynakları üzerinde ciddi baskıların bulunduğu İstanbul gibi bir metropolde, UA teknolojilerindeki gelişmelerin kentin içme suyu barajları özelinde sağlayabileceği olanakları ele alan sistematik ve kapsamlı bir çalışmanın henüz literatürde yer almadığı anlaşılmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, İstanbul gibi yoğun nüfus ve arazi kullanım baskısı altındaki bir metropolde yer alan içme suyu barajlarının su yüzey alanlarında meydana gelen uzun dönemli değişimleri ortaya koyarak, UA tabanlı izleme ve analiz yaklaşımlarının su kaynaklarının izlenmesine yönelik karar süreçlerinde sağlayabileceği analitik olanaklara ve henüz yeterince değerlendirilmeyen potansiyeline ilişkin karar vericilere bütüncül ve yeni bir bakış açısı kazandırmaktır.

1.3 Hipotez

UA temelli su çıkarma indekslerinin doğruluk düzeyleri, barajın spektral yansıtım farklılıkları ile fiziksel ve çevresel özelliklerine göre değişim gösterebilir.

Mann-Kendall trend analizi ile, barajların alan, hacim, su seviyesi parametreleri ile sıcaklık, buharlaşma ve yağış gibi iklimsel verilerin artış ve azalış eğilimleri ilişkilendirilebilir.

Baraj su seviyesi tahminleri RO algoritmasıyla, yağış, sıcaklık ve buharlaşma gibi iklimsel değişkenler ve su alanı gibi hidrolojik parametreler kullanarak yüksek doğrulukla tahmin edilebilir.

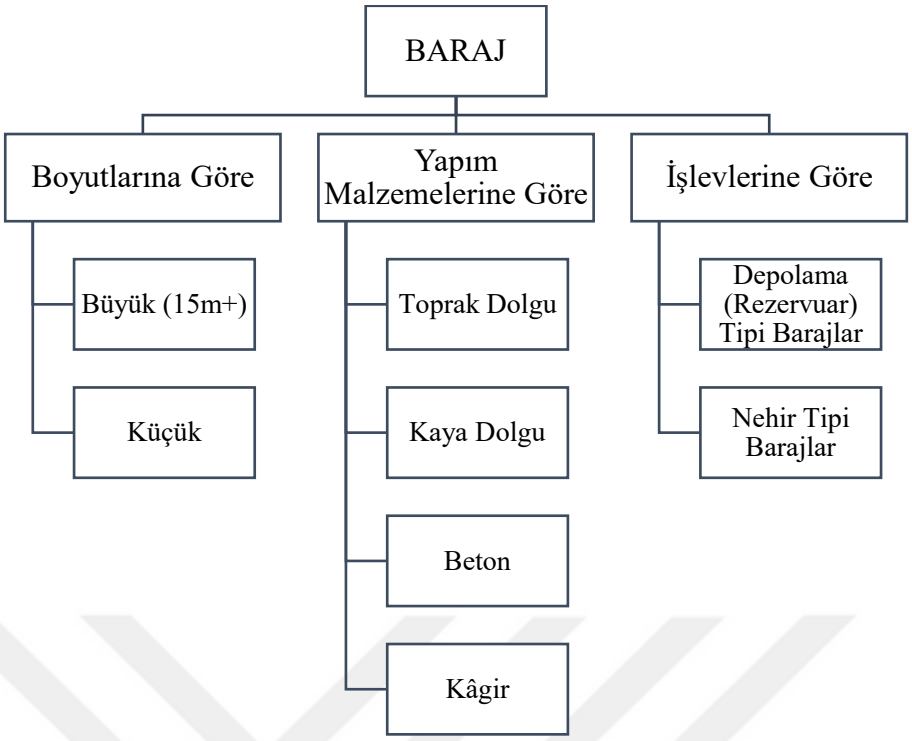
2
KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde, çalışmada ele alınan temel kavramlar kuramsal bir çerçevede açıklanmakta ve araştırmanın kavramsal altyapısını oluşturan unsurlara ilişkin bilgilere yer verilmektedir.

2.1 Baraj

Kritik mühendislik yapılarından biri olan barajlar, suyu biriktirmek, sulama, içme ve enerji üretme gibi birçok görevi yerine getirir [132]. Barajlarda rekreasyonel kullanım, hızlı kentleşme, yaşam koşullarındaki değişimler, büyük şehirlerde zaman kısıtlılığı ve sosyo-ekonomik faktörlere bağlı olarak değişmektedir [133]. Buna karşın baraj çevresinin plansız ve yanlış kullanımlarının canlılara ve doğal çevreye zarar verdiği bilinmektedir [134]. Sürekli alıcı ortam nitelikleri nedeniyle baraj gölleri çevresel kirleticilere yüksek düzeyde maruz kaldığında, ekosistemdeki biyotik unsurları bozan etkiler ortaya çıkmakta ve bunlar besin zinciri aracılığıyla insan sağlığına zarar verebilmektedir [135]. Diğer taraftan, enerji üretimi açısından sahip oldukları avantajlar nedeniyle baraj gölleri, termik ve nükleer enerji santrallerine kıyasla daha çok tercih edilir bir seçenek olarak öne çıkmıştır. Bu doğrultuda, Türkiye'de enerji üretimini desteklemek amacıyla yaklaşık 700 baraj ile 500'ün üzerinde hidroelektrik santral inşa edilmiştir [136].

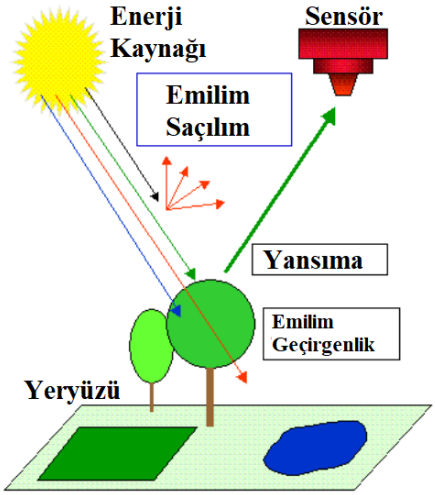
Barajlar, boyutlarına, yapım malzemelerine ve işlevlerine göre üçe ayrılır (Şekil 2.1)[137]. The International Commission on Large Dams (ICOLD) tanımına göre, büyük barajlar temelden itibaren 15 metre veya daha yüksek olmalı ya da 5 ila 15 m yükseklik aralığında bulunmalarına karşın 3 milyon m^3'ten fazla depolama hacmine sahip olmalıdır [137]. Dünya genelindeki büyük barajların yaklaşık %13'ü, 75'ten fazla ülkede taşkın yönetimi amacıyla kullanılmaktadır [137].



Şekil 2.1 Baraj tipleri

2.2 Uzaktan Algılama

Dünya yüzeyindeki her element, yapısal özelliklerine göre farklı yüzdelerden gelen radyasyonun bir kısmını yansıtır, emer veya iletir [138]. Nesnelerle doğrudan fiziksel temas kurmadan, elektromanyetik enerji aracılığıyla yeryüzü ve atmosfer hakkında bilgi elde etme süreçlerinin tümü UA olarak tanımlanabilir. Şekil 2.2'de UA sistemlerinin basit bir görseli yer almaktadır.



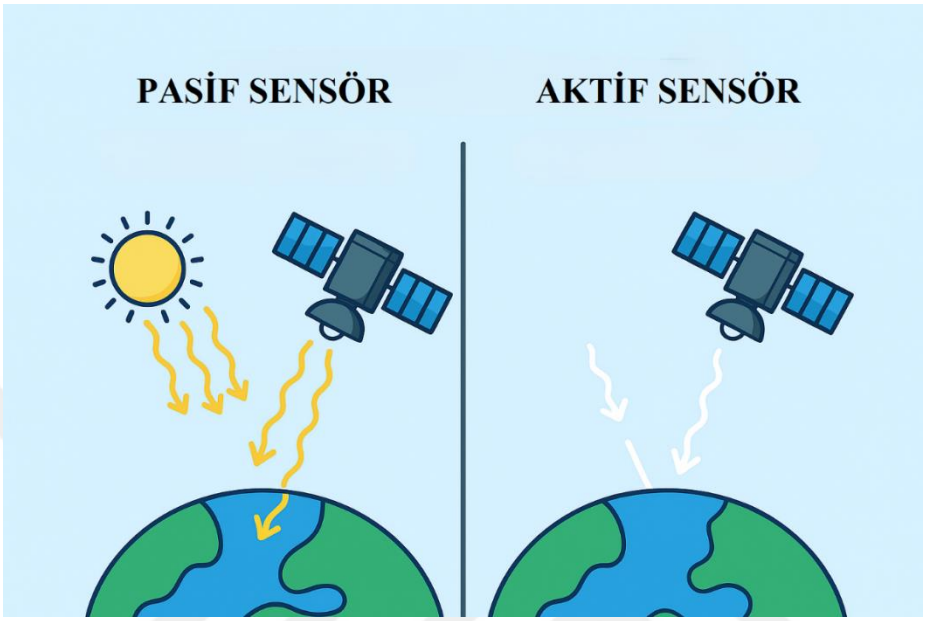
Şekil 2.2 UA sistemi

UA, elektromanyetik spektrumun çeşitli bölümlerindeki enerjinin ölçülmesine dayanmaktadır. Görünür ışığı da kapsayan elektromanyetik spektrum, gama ışınlarından (en yüksek frekans ve en kısa dalga boyu) radyo dalgalarına (en düşük frekans ve en uzun dalga boyu) kadar uzanan sürekli bir elektromanyetik radyasyon aralığını ifade eder. Uydu tabanlı UA'da, görünür ışık, yansıyan ve yayılan kızılötesi ile mikrodalga bölgeler incelenir. Bu radyasyonun ölçümü, spektral bantlar olarak adlandırılan belirli dalga boyu aralıklarında gerçekleştirilmektedir. Bu bantlar aracılığıyla farklı yüzey özellikleri tanımlanabilmekte ve çevresel parametreler nicel olarak analiz edilebilmektedir [139].

UA'da bir görüntüdeki bilgi detayını belirleyen en temel parametre çözünürlüktür. Genel olarak mekânsal, zamansal, radyometrik ve spektral çözünürlük olmak üzere dört ana kategoriye ayrılmaktadır. Mekansal çözünürlük, uydu görüntüsünde bir pikseli oluşturan zemin yüzey alanı olarak tanımlanabilir, zamansal çözünürlük, ise bir sensörün Dünya yüzeyinin aynı kısmını tekrar ziyaret ettiği tekrar döngüsünün veya sıklığının bir ölçüsüdür [139]. UA görüntülerinin mekansal çözünürlüğü ile yorumlama doğruluğu nicel olarak hesaplanabilir [140]. Radyometrik çözünürlük görüntünün gri değer aralığıdır; spektral çözünürlük bir algılayıcının elektromanyetik spektrumda kaydedebildiği belirli dalga boyu aralığıdır, aralık daraldıkça spektral çözünürlük artar [141].

UA terimi ilk defa 1960 yılında literatüre girmiştir [142]. UA teknolojileri, su kalitesi, tarım yönetimi, ormansızlaşma takibi ve kentsel ısı adası çalışmaları gibi çevresel izleme alanlarında yeni ufuklar açmıştır [143]. UA uydularının ciddi bilimsel çalışmalardaki ilk başarısı meteorolojide olmuştur. İlk başarılı hava durumu uydusu, 1 Nisan 1960'ta NASA tarafından fırlatılan TIROS-1 olarak kabul edilir [144]. 23 Temmuz 1972'de Landsat'ın fırlatılması ile UA uydularının kullanımı hız kazanmıştır [142]. UA alanında ticari uyduların ortaya çıkmasıyla, 1980'li yıllar önemli bir dönüm noktası haline gelmiştir. Bu dönemde Fransa tarafından geliştirilen SPOT programı ve Hindistan'ın IRS (Indian Remote Sensing) uyduları, önceki sistemlere kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlükte veri sağlamış ve özellikle arazi örtüsü sınıflandırması, doğal kaynak yönetimi ve tarımsal izleme gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, UA'nın yalnızca bilimsel bir araştırma aracı olmaktan çıkıp, ticari ve operasyonel uygulamalarda da kullanılabilir hale gelmesini sağlamıştır [38,145].

UA sistemleri aktif ve pasif sensörler olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.3). Aktif sensörler güç kaynağına ihtiyaç duyarken, pasif sensörler çevresinden kaynaklanan optik alana tepki veren cihazlardır [146]. Aktif sensörlere SAR, pasif sensörlere Landsat serisi örnek olarak verilebilir [146].



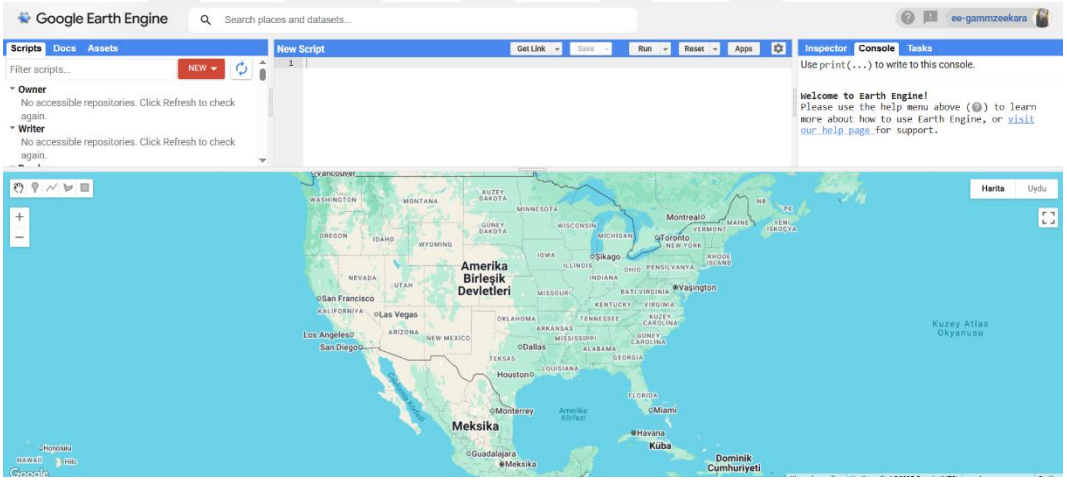
Şekil 2.3 UA sensörleri

2.3 Google Earth Engine (GEE)

GEE, Google tarafından 2010 yılında başlatılan bir bulut bilişim platformudur [147]. Piyasaya sürülmesinden bu yana bilimsel üretimde hızla büyümüş ve 2020 yılında GEE ile ilgili yayın sayısı (299), Google Earth ile ilgili yayın sayısını aşmıştır [148]. GEE'nin temel amaçları arasında, büyük ölçekli algoritmaların geliştirilmesini kolaylaştıran dinamik bir platform sunmak, ücretsiz ve açık erişim sağlayarak yüksek etkili araştırmaları teşvik etmek ve küresel talep ile büyük veri yönetimi çözümlerine katkıda bulunmak yer alır [149]. Platform, geleneksel UA uzmanlarının yanı sıra, geleneksel süper bilgisayarları veya büyük ölçekli bulut bilişim kaynaklarını kullanma kapasitesine sahip olmayan daha geniş bir kitleye hitap eden entegre yapısıyla öne çıkmaktadır [150]. GEE, bugüne kadar Landsat, MODIS ve Sentinel ürünleri de dahil olmak üzere son 40 yıla ait halka açık UA görüntü verilerinin çoğunu depolayarak kullanıcılara küresel ölçekte UA bulut bilişim hizmetleri sunmaktadır. Geleneksel masaüstü yazılımlar (ERDAS, ENVI), UA teknolojilerindeki hızlı ilerlemeleri, büyük hacimli Dünya gözlem verilerinin birikmesini beraberinde getirerek büyük veri miktarını işleme konusunda yetersiz

kalmaktadır. Bu bağlamda, GEE, bulut tabanlı mimarisi sayesinde büyük verilerin hızlı işlenmesi, analiz edilmesi ve paylaşılmasında önemli bir dönüşüm sağlamıştır. GEE, küresel ölçekte uzun dönemli analizlere olanak tanıyarak uzaktan algılamada veri, algoritma ve ürün paylaşımını teşvik eden yeni bir dönemin öncüsü haline gelmiştir [151].

Platforma erişim genellikle eğitim ve araştırma amaçlı olarak ücretsizdir. Kullanıcılar, GEE'ye internet üzerinden erişilebilen bir Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface-API) ve web tabanlı Etkileşimli Geliştirme Ortamı (Integrated Development Environment-IDE) aracılığıyla erişim sağlayabilmektedir. Kod düzenleme bölümünde kullanıcılar JavaScript veya Python gibi popüler kodlama dillerini çalışabilirler (Şekil 2.4) [152]. Bu yapı, araştırmacılara veri indirme gereksinimi olmaksızın, geniş zaman ve mekân ölçeklerinde analiz gerçekleştirme olanağı tanımaktadır [149].



Şekil 2.4 GEE kod düzenleyici

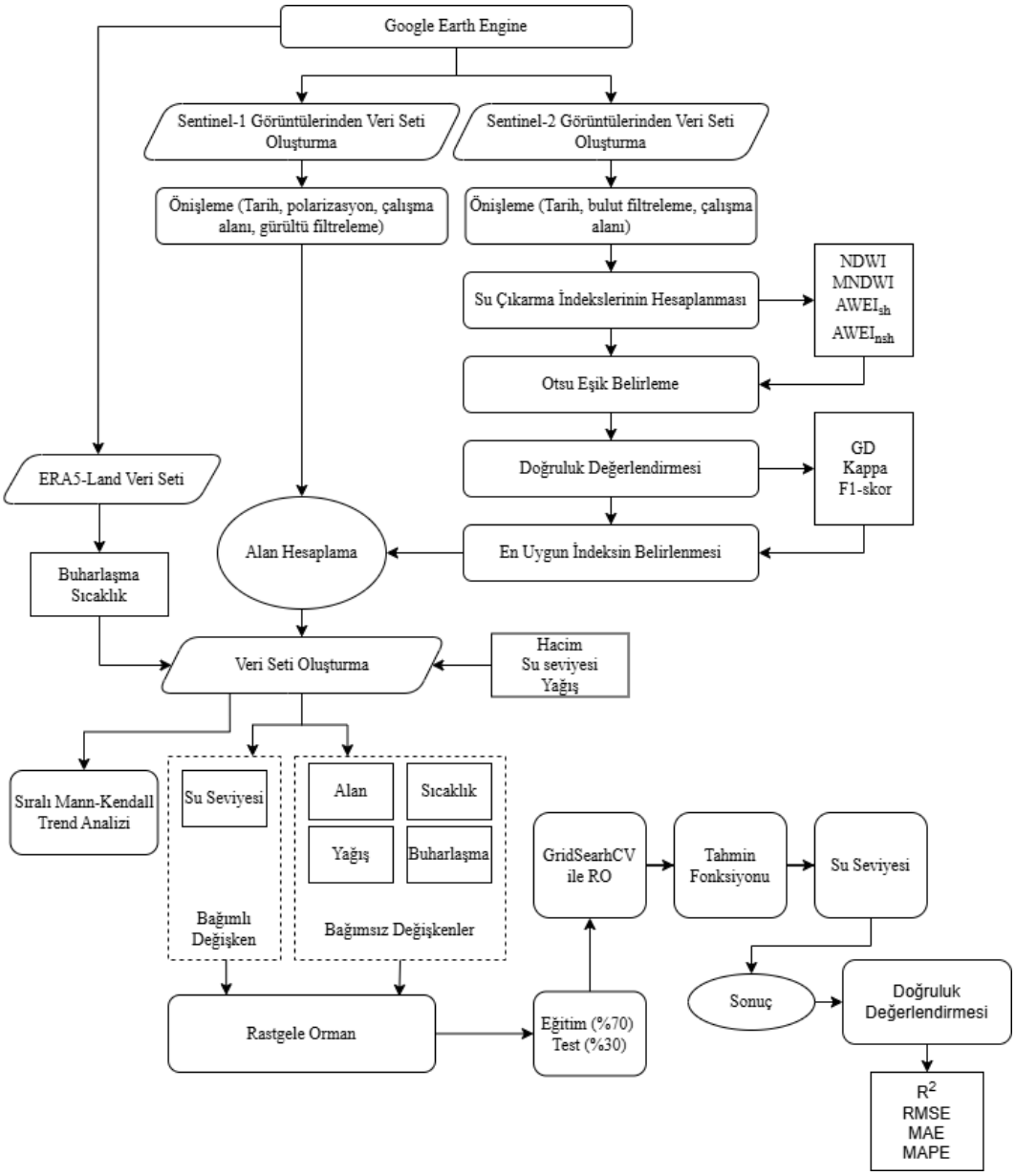
2.4 Makine Öğrenmesi (MÖ)

MÖ, bilgisayarların açıkça programlanmadan veriden örüntü ve bilgi çıkarılmasını amaçlayan bir yapay zekâ alt alanıdır [153]. MÖ, UA gibi alanlarda büyük veri zorluklarının üstesinden gelmek için kritik bir araç haline gelmiştir. MÖ, yüksek boyutlu ve karmaşık veri setlerini işleme, karmaşık örüntüleri tanıma ve geçmiş ve gerçek zamanlı verilerden öğrenme yetenekleri sayesinde geniş bir popülerlik kazanmıştır [154]. MÖ uygulamaları kullanıcı etkileşimleri ile gelişir. Verilerin yapısına ve hedeflenen sonuca göre kullanılan dört farklı öğrenme modeli vardır: denetimli, denetimsiz, yarı denetimli veya pekiştirmeli. Bu modellerin her birinde,

kullanılan veri setlerine ve hedeflenen çıktılara göre bir ya da daha fazla algoritmik yöntem uygulanabilir. MÖ algoritmaları, esasen olayları sınıflandırmak, örnekleri tanımlamak, sonuçları tahmin etmek ve bilinçli kararlar almak için geliştirilmiştir. Karmaşık ve daha tahmin edilemez veriler ile karşılaşıldığında en iyi doğruluk için, algoritmalar tek başlarına veya bir arada kullanılabilir [155].

3
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında UA verisi olarak Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Tüm veriler GEE platformunda işlenerek önemli su kaynakları olan barajların uzun dönemli değişim dinamikleri kapsamlı biçimde ortaya konulmuştur. Kullanılan uydu görüntülerindeki sorunları ortadan kaldırmak için ilk olarak verilere önişleme uygulanmış; ardından Sentinel-2 görüntülerinden NDWI, MNDWI, $AWEI_{sh}$ ve $AWEI_{nsh}$ su indeksleri hesaplanarak Otsu eşikleme yöntemi ile su yüzeylerini tanımlayan iki sınıflı veri setleri elde edilmiştir. Üretilen su yüzeylerinin doğruluğunu kontrol etmek için önce Google Earth Pro ortamında QuickBird, WorldView ve GeoEye görüntüleri üzerinden referans veri oluşturulmuş ve bu veri setine dayalı olarak GD, Kappa katsayısı (K) ve F1-skor değerleri hesaplanmıştır. Ardından, türetilen sınırlar İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından sağlanan 1:5.000 ölçekli ortofotolardan sayısallaştırılan sınırlar ile karşılaştırılmış ve türetilen veri setleri için karesel ortalama hata (Root Mean Square Error-RMSE) değerleri hesaplanmıştır. Böylece kontrol sonuçlarına dayalı olarak baraj sınırlarını en uygun şekilde türeten indeks belirlenmiştir. Sonrasında, Ocak 2017–Haziran 2025 dönemine ait baraj alanları türetilmiş; hedef su yüzeyinin optic görüntülerde bulut kaplamasından dolayı tespit edilemeyen tarihlerde baraj yüzey alanı hesaplaması için Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılarak tamamlanmıştır. Ardından, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) tarafından sağlanan yağış, baraj hacmi ve su seviyesi verileri, ERA5-Land veri setinden elde edilen sıcaklık ve buharlaşma verileri ile su indekslerden elde edilen baraj alanları, Sıralı Mann-Kendall trend analizi ile işlenmiştir. Bunun yanında, RO algoritması ile baraj alanları, meteorolojik değişkenler ve hidrolojik parametrelerden yararlanılarak su seviyesi verilerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya ait iş akış diyagramı Şekil 3.1'de görülmektedir.

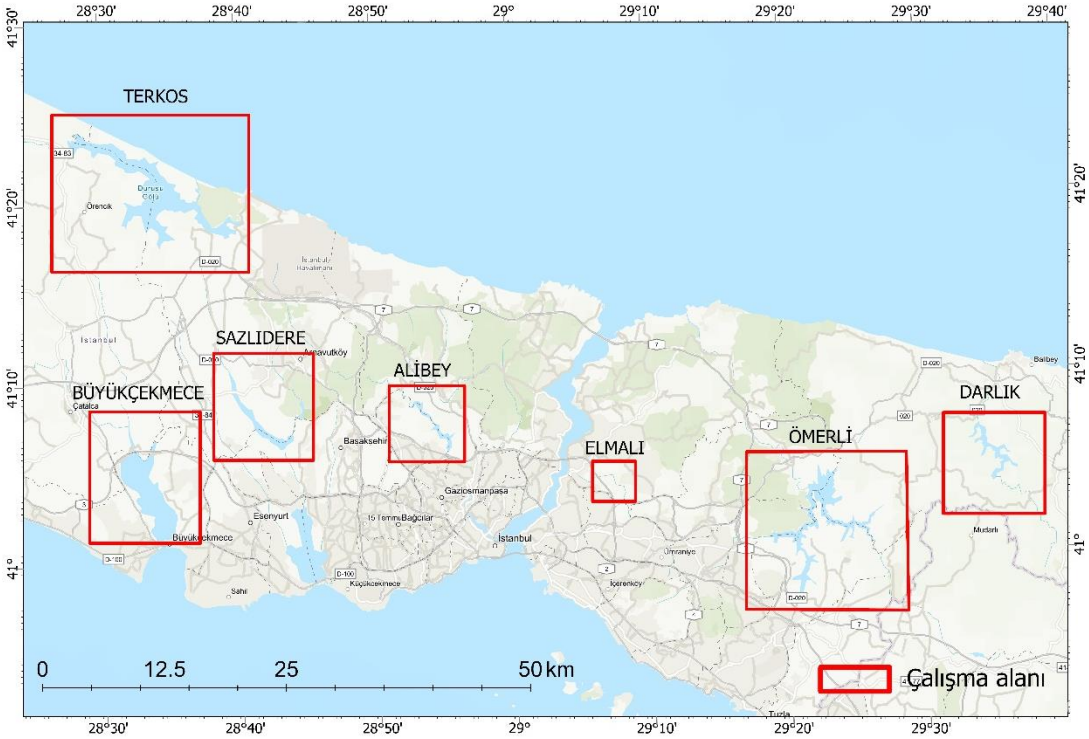


Şekil 3.1 İş akış diyagramı

3.1 Çalışma Alanı

Çalışma İstanbul'un içme suyu havzalarının bulunduğu, Darlık, Ömerli, Elmalı, Sazlıdere, Terkos, Alibey ve Büyükçekmece barajları üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Darlık Barajı, 1985–1989 yılları arasında Darlık Deresi üzerinde kurulmuş olup kentin su ihtiyacının yaklaşık %15'ini karşılamaktadır. 207 km²'lik bir havzadan beslenen yaklaşık 6 km² yüzey alanına sahiptir [156,157]. Ömerli Barajı, 1968–1972 yılları arasında içme suyu temini amacıyla Çayağız Deresi üzerinde inşa edilmiştir. İstanbul'un su ihtiyacının yaklaşık %23'ünü karşılamaktadır ve 23,1 km²'lik alanda $2{,}2\times10^{6}$ m³ depolama kapasitesine sahiptir

[158,159]. Elmalı Barajı, yılda 15 milyon m^3 su sağlama kapasitesiyle % 2,5' lik oranla İstanbul'a su sağlayan kaynaklar arasında en küçük paya sahiptir [160]. Sazlıdere Barajı, Terkos ve Küçükçekmece gölleri arasında yer almakta olup 165 km^2 drenaj alanına sahiptir. Yılda yaklaşık 55 milyon m^3 su sağlamaktadır [161,162]. Alibey Barajı, 1975–1983 yılları arasında kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. 30 m yüksekliğe, 67 hm^3 normal su kotu hacmine ve yaklaşık 5 km^2 göl alanına sahiptir [163]. Karadeniz'e yakın konumlanan Terkos Barajı, 12 km uzunluğunda ve 5 km genişliğindedir [164], [165]. Son olarak, doğal kıyı girintisine sahip Büyükçekmece Gölü, 10 km^2'lik yüzölçümüyle yaklaşık 162 milyon m^3 depolama kapasitesindedir [166,167].



Şekil 3.2 Çalışma alanı

3.2 Veri Kaynakları

Çalışmada temel veriseti olarak GEE platformu üzerinden çekilen 10 m mekansal çözünürlüklü Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Görünür bölge, yakın kızılötesi (Near Infrared-NIR) ve kısa dalga kızılötesi (Shortwave Infrared-SWIR) bantları olmak üzere 13 spektral banda sahip olan görüntüler, kırmızı, yeşil, mavi (Red, Green, Blue - RGB) ve NIR bantlarında 10 m, NIR ile kırmızı spektral bant arasındaki geçiş bölgesi (Red-Edge) ve SWIR bantlarında 20 m ile aeresolda 60 m

mekansal çözünürlüğe sahiptir [168,169]. Bu veriler iki ayrı seviyede tutulur. Seviye-1C (Level-1C-L1C) verileri atmosfer üstü (Top of Atmosphere-TOA) yansıtım değerlerini içeren ham görüntülerdir. Seviye-2A (Level-2A-L2A) verileri atmosferik düzeltme uygulanmış ve atmosfer altı yansıtım (Bottom of Atmosphere-BOA) değerlerini sunan analiz için hazır görüntü formatıdır [170]. Bu çalışmada atmosferik koşullardan etkilenmemek için BOA görüntüleri kullanıldı. Diğer taraftan, bazı tarihlerde baraj yüzeyleri olumsuz hava koşulları nedeniyle Sentinel-2 BOA görüntülerinden çıkarılamamıştır. Bu tarihlerdeki eksiklikleri gidermek için meteorolojik etkenler ve ışık değişimlerinden bağımsız olarak kesintisiz görüntü imkanı sağlayan Sentinel-1 uydusunun 5.405 GHz frekansında çalışan C-band SAR sensöründen yararlanılmıştır [171]. Böylece Sentinel-2 görüntülerinden ile elde edilemeyen baraj yüzeyleri Sentinel-1 verisetinden hesaplanmıştır.

Sentinel-1, şerit harita (Strip Map-SM), dalga (Wave-WV), interferometrik geniş şerit (Interferometric Wide Swath-IW) ve ekstra geniş şerit (Extra Wide Swath-EW) modu olmak üzere 4 modda çalışır. Bunlardan SM ve WV 5x5 m, IW modunda 5x20 m, EW modunda 20x40 m mekansal çözünürlüğe sahiptir. Seviye 0'da ham veri, seviye 1'de tek bakış kompleks (Single Look Complex-SLC) ve tespit edilen zemin aralığı (Ground Range Detected-GRD) verileri, seviye 2'de okyanus (Ocean-OCN) verileri üretir [172]. Bu çalışmada Sentinel-1'in varsayılan modu olan IW kullanılmıştır. Bu uydulara ait bilgiler Tablo 3.1'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydularının özellikleri

Özellik	**Sentinel-1**	**Sentinel-2**
Program	Copernicus Programı (ESA)	Copernicus Programı (ESA)
Uydular	Sentinel-1A (2014), Sentinel-1B (2016; 2022'de devre dışı), Sentinel-1C	Sentinel-2A (2015), Sentinel-2B (2017)
Sensör Tipi	Aktif Radar (SAR)	Pasif Optik Multispektral Sensör (MSI)
Spektral Bantlar	Tek bant: C-Band SAR (5.405 GHz)	13 Spektral Bant (Görünür, NIR, SWIR)
Mekansal Çözünürlük	SM ve WV modunda 5x5 m IW modunda 5x20 m EW modunda 20x40 m	10 m (RGB + NIR), 20 m (Red-Edge + SWIR), 60 m (Aeresol)

Tablo 3.1 Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydularının özellikleri (devamı)

Yeniden Ziyaret Süresi	6 gün (1A + 1B aktifken), tek uyduyla 12 gün	5 gün (2A + 2B birlikte)
Kapsama Alanı	Tüm hava koşullarında görüntüleme (bulut varlığından etkilenmez)	Bulut varlığından etkilenir
Çalışma Prensibi	Aktif algılama: Mikrodalga sinyali gönderip yansıma ölçer	Pasif algılama: Güneş ışığı yansımalarını kaydeder
Veri Formatı	Seviye 0 ham veri Seviye 1 SLC Seviye 1 GRD Seviye 2 OCN	L1C (TOA), L2A (BOA)
Yörünge Tipi	Güneş eşzamanlı (Polar orbit)	Güneş eşzamanlı (Polar orbit)
Yörünge Yüksekliği	693 km	786 km
Veri Erişimi	Ücretsiz	Ücretsiz

Su çıkarma indekslerinin doğruluğunu değerlendirmek için Sentinel-2 görüntüleriyle tarihsel olarak uyumlu olacak şekilde İBB'ye ait 1:5.000 ölçekli 20 adet ortofoto ArcGIS Pro ortamında baraj sınırları esas alınarak sayısallaştırılmıştır (Tablo 3.2). Ek B'de sayısallaştırılan sınırlar verilmiştir.

Tablo 3.2 Görüntü tarihleri

Pafta Adı	**Ortofoto Üretim Tarihi**	**Sentinel-2 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

Tablo 3.2 Görüntü tarihleri (devamı)

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

1950'den günümüze kadar saatlik ve günlük zamansal çöüzünürlük ve 11132 m'lik mekansal çözünürlüğe sahip olan küresel kara yüzeyi ERA5-Land veri seti kullanılarak GEE platformunda barajların sıcaklık ve buharlaşma değerleri hesaplanmıştır [78]. Her bir baraj için oluşturulan alanlar, sıcaklık ve buharlaşma değerleri, İSKİ'nin sağladığı hacim, su seviyesi ve yağış verileri kullanılarak veri seti oluşturulmuştur.

3.3 Su Çıkarma İndeksleri

Su yüzey alanını çıkarmak ve diğer arazi kütlelerinden ayırt edebilmek için birçok spektral indeks geliştirilmiş ve kullanılmıştır [173]. Spektral su indeksleri, NIR ve SWIR dalga boylarında enerjiyi emme kabiliyetinden yararlanmaktadır [174].

3.3.1 Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (NDWI)

Su yüzeyi haritalaması için en yaygın kullanılan ve en eski indekslerden biri olan NDWI McFeeters (1996) tarafından su yüzey alanlarının tespitini yapabilmek adına geliştirilmiştir [104]. Su yüzeylerinin görünür kırmızı ve NIR spektrumunda düşük yansıma oranına sahip olmasına karşılık, yeşil spektrumda daha yüksek yansıma oranı vardır ve bu da NIR bandıyla daha düşük bir korelasyona sahip olmasına neden olur [175]. Bu yüzden NDWI, NIR ve yeşil bandın yansıma değerlerini kullanır [176]. -1 ile 1 arasında değerler alan NDWI'da su yüzeyleri pozitif değerler alırken, toprak ve karasal bitki örtüsü özellikleri sıfır veya negatif değerleri alır [177]. NDWI Eşitlik (3.1) ile tanımlanır.

$$NDWI = \frac{YEŞİL - NIR}{YEŞİL + NIR} \tag{3.1}$$

NDWI, bulanık su yüzeylerini tespit etme yeteneğine sahip olmasına rağmen, temel bir dezavantajı, su kütlelerinden ve yerleşim alanlarından gelen sinyali yeterince baskılayamayıp su alanlarının doğru şekilde çıkarılmasını güçleştirmektedir [178]. Yapılaşmış alanların NIR yansıtımı, yeşil yansıtımından daha düşük olduğu için, tıpkı su gibi pozitif NDWI değerlerine sahip olabilirler ve bu durum su alanlarının fazla tahmin edilmesine neden olur [179].

3.3.2 Değiştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI)

Xu (2006) yapılaşmış alanları su yüzeylerinden ayrılmasındaki güçlüğü aşmak için NDWI'da kullanılan NIR bandını SWIR bandıyla değiştirerek MNDWI'ı önermiştir [105]. Bant değiştirme işleminden sonra, bitki örtüsü ve toprak hâlâ negatif değerleri korumaktadır; çünkü SWIR bant spektral değerleri hâlâ yeşil bant değerlerinden büyüktür [180]. MNDWI Eşitlik (3.2)'deki gibi ifade edilir.

$$MNDWI = \frac{YEŞİL - SWIR}{YEŞİL + SWIR} \tag{3.2}$$

3.3.3 Otomatik Su Çıkarma İndeksi (AWEI)

MNDWI'ın, yerleşim alanlarına karşı dayanıklı olmasına rağmen düşük yansıtımlı kentsel yüzeyler ve gölgeleri sudan ayırt etmekte zorlandığı belirtilmiş olup, bu yanlış sınıflandırmaları azaltmak için Feyisa vd. (2014) tarafından AWEI geliştirilmiştir [106]. Farklı bant kombinasyonları ve çeşitli katsayılar ile bu indeks

elde edilir [181]. Katsayıların, çeşitli arazi örtüsü türleri için saf piksellerden oluşan veri kümesinde gözlemlenen yansıma desenlerine dayanarak belirlenen ampirik sonuçlar olduğu belirtilmiştir [182]. Su dışı pikselleri 0'ın altında, su dışı pikselleri ise 0'ın üzerinde tutarak su ve su dışı pikselleri ayırt etmek için kullanılan 0 eşiği sabitlenir [183]. AWEI $AWEI_{sh}$ve $AWEI_{nsh}$ olarak iki şekilde tanımlanmıştır [184]. $AWEI_{nsh}$, kentsel alanlarda koyu, yerleşim yüzeyleri de dahil olmak üzere su olmayan pikselleri etkili bir şekilde ortadan kaldıracak şekilde formüle edilmiştir ve $AWEI_{sh}$, $AWEI_{nsh}$'in tam olarak ortadan kaldıramayabileceği gölge pikselleri de çıkararak doğruluğu daha da artırır [185]. $AWEI_{sh}$ Eşitlik (3.3)'teki gibi mavi, yeşil, NIR ve SWIR bantlarını kullanılarak elde edilir. $AWEI_{nsh}$ Eşitlik (3.4)'teki gibi yeşil, NIR ve SWIR bantlarını kullanılarak elde edilir.

$$AWEI_{sh} = MAVİ + 2.5 \cdot YEŞİL - 1.5 \cdot (NIR + SWIR_1) - 0.25 \cdot SWIR_2 \quad (3.3)$$

$$AWEI_{nsh} = 4 \cdot (YEŞİL - SWIR_1) - (0{,}25 \cdot NIR + 2{,}75 \cdot SWIR_2) \quad (3.4)$$

3.4 Eşik Belirleme

İndekslerle hesaplanan görüntülerden su yüzeyini çıkartmak için bir eşik belirleme yönteminin kullanılması gerekir. Otsu bu kapsamda en yaygın kullanılan eşik belirleme yaklaşımıdır. İlk olarak Otsu (1979) tarafından denetimsiz ve parametrik olmayan bir otomatik eşikleme yöntemi olarak sunulmuştur [186]. Bu yöntem, iki sınıfın varyanslarının ağırlıklandırılmış toplamı olarak tanımlanan sınıf içi varyansı en aza indiren eşiği arayan, sınıflandırmaya dayalı bir yöntemdir [187]. Tek bir eşik değeri belirleyerek pikselleri gri seviyelerine göre ön plana ya da arka plana atan yöntem, uzun yıllar boyunca gri tonlamalı görüntülerin ikilileştirilmesinde temel yaklaşım olarak tercih edilmiştir [188]. Belirli bir görüntünün piksellerinin L gri seviyesi [0,1,2,...,L-1] ile temsil edildiği varsayılarak, *i* seviyesindeki piksel sayısı *h(i)* ile toplam piksel sayısı ise *N* ile gösterilir [189]. Gri seviye (GS) histogramı normalleştirilerek bir olasılık dağılımı olarak kabul edilir ve her gri seviyesinin oluşma olasılığı *p(i)* Eşitlik (3.5) ile formülize edilir [189].

$$p(i) = h(i)/N\,, p(i) \geq 0, \sum_{i=0}^{L-1} p(i) = 1 \quad (3.5)$$

Histogramın sıfırıncı *ω(t)* ve t'inci seviyeye kadar olan birinci dereceden kümülatif momentleri *μ(t)* ve orijinal görüntünün toplam ortalama seviyesi μ_T sırası ile Eşitlik (3.6), Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8) ile elde edilir [189].

$$\omega(t) = \sum_{i=0}^{t} p(i) \tag{3.6}$$

$$\mu(t) = \sum_{i=0}^{t} i \cdot p(i) \tag{3.7}$$

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot p(i) \tag{3.8}$$

Optimal eşik değeri *t**, Eşitlik (3.9)'un Eşitlik (3.10)'da yerine koyulması ile hesaplanır [189].

$$\sigma_B^2(t) = \frac{[\mu_T \omega(t) - \mu(t)]^2}{\omega(t)[1 - \omega(t)]} \tag{3.9}$$

$$\sigma_B^2(t^*) = \max_{t \in GS} \sigma_B^2(t) \tag{3.10}$$

3.5 Doğruluk Değerlendirmesi

Doğruluk değerlendirmesi iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada, Google Earth Pro görüntüleri referans veri olarak kullanılmıştır. Baraj yüzey alanlarının büyüklükleri dikkate alınarak rastgele örnekleme yöntemiyle noktalar seçilmiş ve bu noktalar su bulunan alanlar için 1, su bulunmayan alanlar için 0 şeklinde etiketlendirilmiştir. Bu referans etiketlemeler doğrultusunda her bir baraj için Tablo 3.3'teki gibi hata matrisleri oluşturulmuş ve GD, Kappa istatistiği (K) ve F1-skor değerleri hesaplanmıştır. Sırası ile Eşitlik (3.11), Eşitlik (3.12) ve Eşitlik (3.13)'te bu değerlerin matematiksel modeleri verilmiştir.

Tablo 3.3 Hata matrisi

	Su	**Su Olmayan**
Su	Gerçek Pozitif (GP)	Yanlış Negatif (YN)
Su Olmayan	Yanlış Pozitif (YP)	Gerçek Negatif (GN)

$$GD = \frac{GP + GN}{N} \tag{3.11}$$

GD Eşitlik (3.11) ile ifade edilir. Buradaki N toplam değeri ifade eder.

$$K = \frac{\frac{GP}{GP + YP} - \frac{(GP + YP) * (GP + YN) + (YN + GN) * (YP + GN)}{N^2}}{1 - \frac{(GP + YP) * (GP + YN) + (YN + GN) * (YP + GN)}{N^2}} \tag{3.12}$$

$$F1 - skor = \frac{2 * GP}{(2 * GP + YP + YN)} \tag{3.13}$$

Doğruluk değerlendirmesinin ikinci aşamasında, İBB ortofotolarından elde edilen referans sınırlar ile indeks tabanlı su çıkarım sonuçları karşılaştırılarak yakınlık analizi uygulanmıştır. Hata miktarını belirlemek için RMSE değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 3.14). [146]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n}} \tag{3.14}$$

Bu eşitlikte, d değeri yatay konum farkını, n değeri ise toplam ölçü nokta sayısını temsil etmektedir [190].

3.6 ERA5-Land Veri Seti

Aylık sıcaklık ve buharlaşma verilerinin zamansal değişimini incelemek amacıyla ERA5-Land veri seti kullanılmıştır. Analizde, çalışma alanı önceden tanımlanan baraj ile sınırlandırılmış ve 2017–2025 dönemine ait veriler seçilmiştir. ERA5-Land veri setinden hava sıcaklığı ve buharlaşmayı temsil eden bantlar elde edilmiştir. Buharlaşma değerleri m cinsinden sağlanan ham verilerden mm birimine dönüştürülmüş, sıcaklık verileri ise K'den ºC'ye çevrilmiştir. Tüm değişkenler aylık zaman adımında işlenmiş ve her bir ay için bölge genelindeki ortalama değerler hesaplanmıştır.

3.7 Mann-Kendall Trend Analizi

İSKİ'nin yayımladığı baraj hacmi, su seviyesi ve yağış verileri; hesaplanan baraj yüzey alanları, sıcaklık ve buharlaşma verileri kullanılarak elde edilen veri setine Mann-Kendall trend analizi uygulandı. Bu analizle, barajların su döngüsünün yıllar

içindeki değişim yönünü ortaya koyarak, hidrolojik ve meteorolojik değişkenlerin baraj su kaynakları üzerindeki uzun vadeli etkisini değerlendirmeyi amaçlandı.

Mann-Kendall trend analizi, Mann (1945) tarafından ortaya atılan ve Kendall (1975) tarafından geliştirilen yaygın bir parametrik olmayan testtir [191,192]. Mann-Kendall testi, bir zaman serisinde monotonik (artan veya azalan) bir trendin varlığını tespit etmek için kullanılır [193]. Bu yaklaşım, çoğunlukla iklimsel zaman serilerinde gözlenen eğilimlerin rastgeleliğini test etmek için yaygın olarak kullanılmıştır [194]. Veri kümelerinde önemli eğilimlerin başlangıcını belirlemek için sıralı Mann-Kendall (Sequential Mann-Kendall-SQMK) testi kullanılır [195]. Bu test, orijinal zaman serisine ve geriye dönük bir göstergeye dayalı olarak U(t) ve U′(t) olarak adlandırılan iki gösterge tanımlanır [196]. U(t) serisi, zaman içindeki eğilimleri, U'(t) serisi ise ters yönde hesaplanarak eğilimlerin ne zaman başladığını ortaya koyar [197]. İki eğrinin kesiştiği ve 95% güven aralığını (GA) (±1.96) geçtiği nokta trendin başladığı yıl olarak kabul edilir [198]. Orijinal seri X_i içindeki değerler, artan sırada düzenlenmiş sıralarına (r_i) dönüştürülür. r_i değerlerinin büyüklükleri, r_j(j = 1, 2, …, i − 1) ile karşılaştırılır ve her karşılaştırmada $r_i > r_j$ durumunun sağlandığı sayı n_i olarak kaydedilir. Eşitlik (3.15), t_i istatistiğini tanımlar.

$$t_i = \sum_{k=1}^{i} n_k \tag{3.15}$$

Eşitlik (3.16) ile test istatistiğinin beklenen değeri ve varyansı hesaplanır.

$$E(t_i) = \frac{i \cdot (i-1)}{4}, \qquad Var(t_i) = \frac{i \cdot (i-1)(2i+5)}{72} \tag{3.16}$$

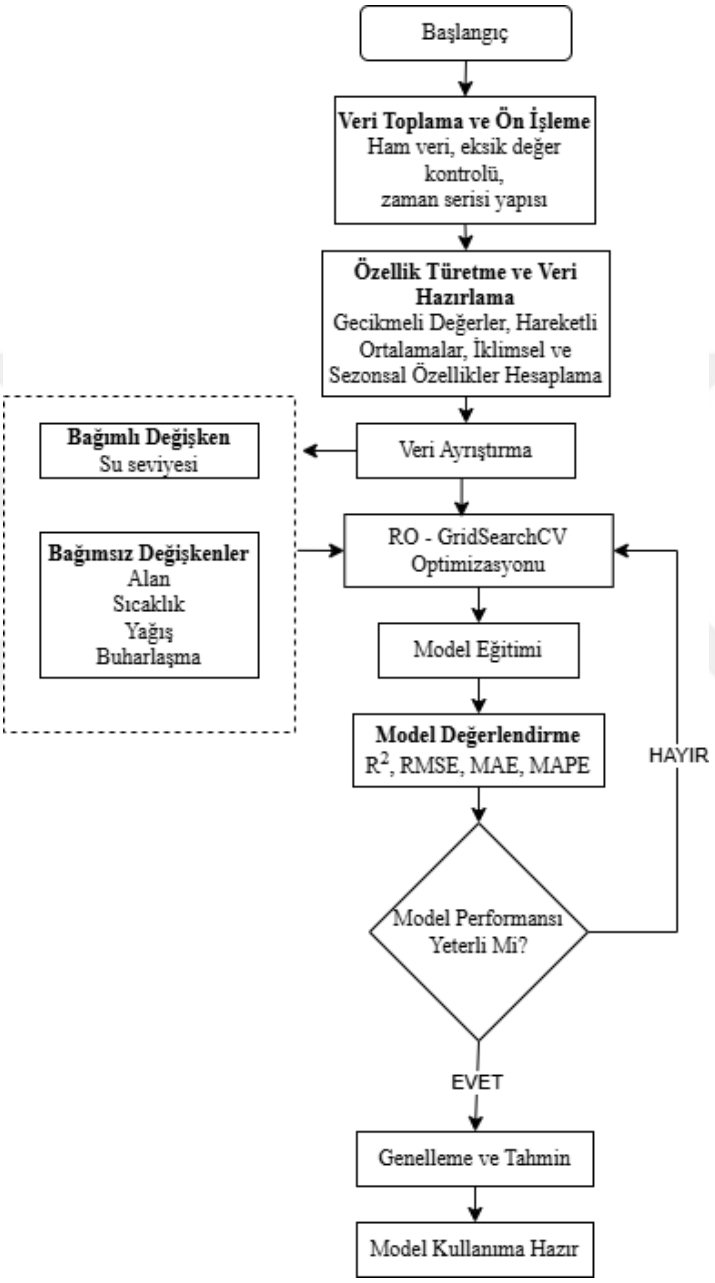
$U(t_i)$ değeri Eşitlik (3.17) ile hesaplanır.

$$U(t_i) = \frac{t_i - E(t_i)}{\sqrt{Var(t_i)}} \tag{3.17}$$

Aynı işlem, serinin sonundan başlanarak geri yönde uygulandığında geri yönlü seri $U'(t)$ elde edilmiş olur [198].

3.8 Rastgele Orman Algoritması

Su seviyesi tahmini için; alan, sıcaklık, buharlaşma bağımsız değişkenleri ile su seviyesi bağımlı değişkeni kullanılarak RO algoritması kullanıldı. Python dilinde oluşturulan RO modelinin detaylı akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 RO akış şeması

RO ilk olarak 2001 yılında Leo Breiman tarafından tanımlanmıştır, ancak kökenleri 1996 yılında tanıtılan torbalama yöntemlerine dayanır [199]. Algoritmanın önemli avantajları diğer makine öğrenmesi algoritmalarının temelini oluşturması, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde çözüm sağlayabilmesi olarak

sıralanabilir [200]. RO birden fazla ağaç yapılı sınıflandırıcıdan (karar ağaçlarından) oluşan bir kombinasyon algoritmasıdır [201]. Bu topluluklarda, topluluktaki her ağaç rastgele bir vektörün gerçekleştirilmesine göre büyütülür [202]. Topluluk üzerinde toplama (oylama) yapılarak ve genellikle eşit ağırlıklar kullanılarak nihai tahminler elde edilir, her ağacın eğitim verilerinden alınan ve yerine yenisi eklenen bir önyükleme örneğinden oluşturulduğu erken bir örneği temsil eder [203,204]. Regresyon olarak bilinen sürekli bir yanıta veya sınıflandırma gibi kategorik bir yanıt değişkenine uygulanabilir [205]. RO'nun temel amacı, birden fazla tahmin edici versiyonu oluşturmak ve bunları birleştirerek daha doğru bir toplu tahmin edici elde etmektir [203]. Bu yaklaşım, aşırı uyum (overfitting) riskini azaltarak modelin genelleme yeteneğini artırır, ayrıca dengesiz veri setleri ve eksik değerler içeren durumları etkili biçimde yönetebilir [206]. RO algoritmasında ağaç sayısı ve ağaç yapısının oluşturulması için her düğümde kullanılacak değişken sayısı m olmak üzere kullanıcıdan iki parametre istenir [207]. Parametreler seçildikten sonra test için ayrı bir veri seti yoksa eğitim veri setinin 2/3'ü öğrenme verisi, 1/3'ü test verisi olarak belirlenir [207]. Her bir düğüm noktasında rastgele değişken seçimi yapılır [208]. Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (Classification and Regression Tree- CART) algoritması kullanılarak en iyi dallanma belirlenir [209]. CART algoritması Gini indeksi ile oluşturulur [210].

$$\sum \sum_{j \neq i} \left(\frac{f(C_i, T)}{|T|} \right) \left(\frac{f(C_i, T)}{|T|} \right) \tag{3.18}$$

Eşitlik 3.18 ile ifade edilen Gini indeksinde T eğitim veri setini temsil ederken, C_i rastgele seçilen bir pikselin ait olduğu sınıfı ve $f(C_i, T)/|T|$ seçilen örneğin C_i sınıfına ait olma olasılığını göstermektedir [211]. Gini indeksi büyüdükçe sınıf heterojenliği artarken, Gini indeksi azaldıkça sınıf homojenliği artar, yani bu bir alt düğümün Gini indeksi bir üst düğümün Gini indeksinden daha az olduğunda o dal başarılıdır demektir [210]. Gini değeri sıfır olduğunda düğüm tamamen homojenleşir [212]. Ağaçlar budanmadan oluşturulur ve nihai sınıflandırma, tüm ağaçların çoğunluk oylaması ile belirlenir [212].

Modelin girdisini, ilgili baraja ait yüzey alanı, yağış, sıcaklık, buharlaşma ve su seviyesi değişkenlerini içeren Excel formatındaki zaman serisi veri seti oluşturmaktadır. Başlangıç Ocak 2017 kabul edilerek aylık frekansta bir tarih dizisi

üretilmiştir. Böylece hem zaman serisi özelliklerinin türetilebilmesi hem de eğitim–test ayrımının kronolojik olarak yapılabilmesi sağlanmıştır. Modelin tahmin gücünü artırmak amacıyla, su seviyesinin zaman içindeki dinamiklerini yakalayan türetilmiş özellikler de oluşturulmuştur.

- Su seviyesinin 1, 2 ve 3 ay gecikmeli değerleri baraj su seviyesinin kendi geçmiş değerlerine olan bağımlılığını modele yansıtmaktadır.
- Kısa ve orta vadeli eğilimleri temsil etmek üzere 3 ve 6 aylık hareketli ortalama (HO) su seviyesi ile ani dalgalanmalar yerine daha yumuşak eğilim bileşenleri modele dâhil edilmiştir.
- Ardışık gözlemler arasındaki seviye değişimini temsil eden su seviyesi değişim değişkeni ile, su seviyesindeki artış veya azalış hızının modele yansıtılmıştır.
- Ay ve çeyrek değişkenlerinin yanı sıra, yaz (Haziran–Ağustos) ve kış (Aralık–Şubat) dönemlerini gösteren ikili değişkenler oluşturulmuştur. Bu sayede, baraj rejimini etkileyen mevsimsel desenlerin model tarafından öğrenilmesi amaçlanmıştır.
- Yağış ve buharlaşma farkını temsil eden net su dengesi hesaplanmış; yağış ve sıcaklık için 3 aylık HO ile buharlaşmanın sıcaklığa oranı değişkenleri oluşturulmuştur. Bu özellikler, hidrolojik döngüdeki etkileşimleri (örneğin yüksek sıcaklık dönemlerinde artan buharlaşma etkisi) daha iyi temsil etmektedir.

Bu işlemler sonrasında, türetilmiş değişkenlerden kaynaklanan eksik değerler veri setinden temizlenmiş ve modelleme aşaması için yeterli sayıda gözlem korunmuştur. Toplamda, 4 temel hidro-meteorolojik değişkene ek olarak, zaman serisi ve mevsimsellikten türetilen çok sayıda yeni özellik ile 18 giriş değişkeninden oluşan bir özellik vektörü elde edilmiştir.

Zaman serisi yapısının korunması amacıyla, klasik rastgele eğitim–test ayrımı yerine TimeSeriesSplit sınıfı ile, kronolojik sırayı bozmayacak şekilde 5 katlı olacak biçimde veri bölünmüştür. Böylece zaman serisi bağlamında gelecek bilgisinin geçmişe sızması engellenmektedir.

Model eğitimine geçmeden önce, tüm giriş özellikleri ortalaması 0 ve standart sapması 1 olacak şekilde standartlaştırılmıştır. Modelin optimizasyonu ise

performansını artırmak için kullanılan sistematik bir hiperparametre arama yöntemi olan GridSearchCV ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, modelden önce belirlenen hiperparametre olan karar ağaçları için olası değer aralıkları bir ızgara şeklinde tanımlanır ve bu değerlerin tüm kombinasyonları çapraz doğrulama ile test edilerek en yüksek başarıyı sağlayan parametre seti seçilir. Böylece, modelin farklı veri alt kümelerinde denenmesi sayesinde aşırı uyum riski azaltılır ve genellenebilirlik daha güvenilir biçimde ölçülür [213].

RO modelinin doğruluğu belirleyicilik katsayısı (R^2), RMSE, Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) değerleri ile değerlendirilmiştir. Bu doğruluk ölçütleri sırası ile Eşitlik (3.19), Eşitlik (3.20), Eşitlik (3.21) ve Eşitlik (3.22) de gösterilmektedir. Bu fomüllerdeki y_i^g baraj su seviyesi verilerini, y_i^t model sonucunda tahmin edilen baraj su seviyelerini, $y_i^{\bar{g}}$ ve $y_i^{\bar{t}}$ ortalama su seviyesi verilerini ve n de toplam veri sayısını temsil etmektedir.

$$R^2 = \frac{\sum(y_i^g - y_i^{\bar{g}})(y_i^t - y_i^{\bar{t}})}{\sqrt{\sum(y_i^g - y_i^{\bar{g}})^2 (y_i^t - y_i^{\bar{t}})^2}} \tag{3.19}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i^g - y_i^t)^2} \tag{3.20}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|(y_i^g - y_i^t)|}{n} \tag{3.21}$$

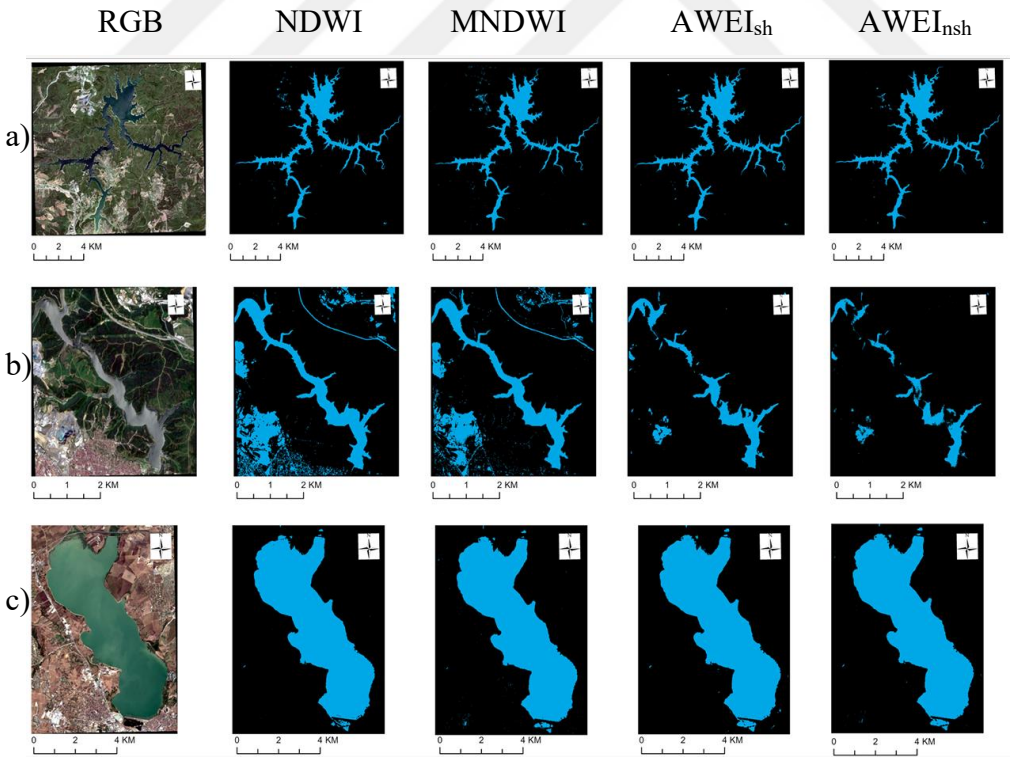
$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i}^{n}\frac{|(y_i^g - y_i^t)|}{|y_i^g|} \tag{3.22}$$

4
BULGULAR

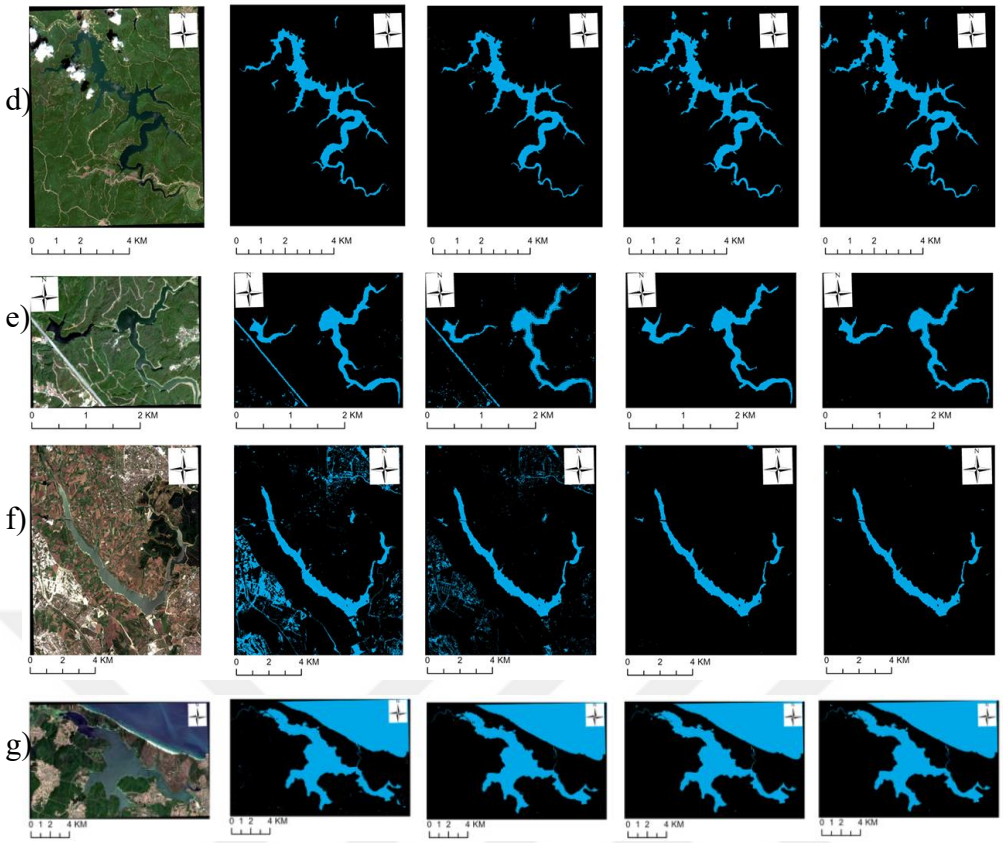
Bu bölümde herbir baraj için su çıkarma indekslerinin başarı düzeyleri irdelenmiş, ardından Mann-Kendall trend analizi ve RO algoritmasının sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1 Su Çıkarma İndekslerinin Başarı Düzeylerinin Belirlenmesi

Barajlara uygulanan su çıkarma indeksleri sonucunda elde edilen yüzey alanları Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 İndekslere göre belirlenen baraj yüzey alanları



Şekil 4.1 İndekslere göre belirlenen baraj yüzey alanları (devamı)

İndekslerin doğruluğu Ek A'da verilen hata matrisleri üzerinden değerlendirilmiştir. Hesaplanan RMSE, GD, K istatistiği ve F1-skor değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 İndekslerin doğruluk değerlendirmeleri

BARAJ	INDEKS	RMSE	OA (%)	K	F1-SKOR (%)
ÖMERLİ	NDWI	21,67	97,38	0,910	92,53
	MNDWI	32,03	93,48	0,772	81,12
	$AWEI_{sh}$	13,46	97,00	0,898	91,58
	$AWEI_{nsh}$	21,56	96,42	0,875	89,69
DARLIK	NDWI	12,40	97,97	0,914	92,53
	MNDWI	28,93	97,63	0,898	91,18
	$AWEI_{sh}$	12,91	97,07	0,882	89,86
	$AWEI_{nsh}$	32,57	96,50	0,859	87,94

Tablo 4.1 İndekslerin doğruluk değerlendirmeleri (devamı)

ELMALI	NDWI	25,74	95,59	0,816	84,14
	MNDWI	20,06	93,54	0,731	76,83
	$AWEI_{sh}$	17,39	97,34	0,886	90,15
	$AWEI_{nsh}$	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
	$AWEI_{sh}$	10,04	99,12	0,940	94,46
	$AWEI_{nsh}$	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
	$AWEI_{sh}$	55,21	99,25	0,985	99,14
	$AWEI_{nsh}$	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
	$AWEI_{sh}$	30,45	94,68	0,792	82,34
	$AWEI_{nsh}$	54,32	91,15	0,612	65,87
BÜYÜKÇEKMECE	NDWI	45,23	98,64	0,969	97,86
	MNDWI	50,60	98,51	0,965	97,64
	$AWEI_{sh}$	43,83	98,82	0,973	98,16
	$AWEI_{nsh}$	44,50	98,61	0,968	97,83

Ömerli Barajı için en başarılı RMSE değeri 13,46 ile $AWEI_{sh}$ indeksinden elde edilmiştir. En başarılı GD değeri, %97,38; en başarılı K istatistiği 0,910; en başarılı F1-skor değeri %92,53 ile NDWI indeksi tarafından sağlanmıştır. $AWEI_{sh}$ indeksinin sonuçları da oldukça başarılıdır. En düşük performansı ise 32,03 RMSE, %93,48 GD, 0,772 K ve %81,12 F1-skor ile MNDWI göstermiştir.

Darlık Barajı'nda NDWI'ın, RMSE değerinin 12,40; GD değerinin %97,97; K istatistiğini 0,914; F1-skor değerinin %92,53 olarak belirlenmesi bu indeksin

sonuçlarının oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak $AWEI_{sh}$ indeksinin de 12,91 RMSE; %97,07 GD; 0,882 K istatistiği; %89,86 F1-skor değeri bu indeksin de başarılı olduğunu göstermektedir. En başarısız sonucu ise 32,57 RMSE; %96,50 GD; 0,859 K istatistiği; %87,94 F1-skor ile $AWEI_{nsh}$ vermiştir.

Elmalı Barajı'nda 17,39 gibi düşük RMSE; %97,34 GD; 0,886 K istatistiği; %90,15 F1-skor değerleri ile $AWEI_{sh}$ indeksi ön plana çıkmaktadır. Düşük F1-skor ve yüksek RMSE değerleri ile MNDWI'ın en başarısız indeks olduğu anlaşılmıştır.

Sazlıdere Barajı'nda indeks performansları arasında belirgin farklar ortaya çıkmıştır. NDWI yöntemi en düşük RMSE = 7,57 değerini vererek oldukça iyi hata toleransı sağlamış, ancak F1-skoru %58,64 ile düşük kalmıştır. MNDWI indeksinde GD %95,55 ve K 0,753 ile oldukça yüksek güvenilir sınıflandırma başarısı sağlanmıştır. Ayrıca %77,64 F1-skor değeri ile bu baraj için en başarılı indeksin MNDWI olduğu anlaşılmıştır.

Terkos Barajı'nda yapılan analiz, tüm indekslerin yüksek doğruluk seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. NDWI ve MNDWI indeksleri %98 üzerinde GD ve F1-skor değerine ulaşmış; K istatistikleri sırasıyla 0,965 ve 0,977 olarak hesaplanmıştır. $AWEI_{sh}$ düşük RMSE değeri ve %99 üzerindeki GD ve F1-skor değerleri ile en başarılı sonucu vermiştir.

Alibey Barajı'nın, diğer barajlara göre daha düşük sınıflandırma doğruluğuna sahip olduğu görülmektedir. NDWI düşük RMSE = 6.42 ve yüksek GD = 99.78 değerleri ile başarılı sonuç göstermiştir.

Büyükçekmece Barajı'nda indekslerin performans profili yüksek doğruluk değerleriyle tutarlıdır. $AWEI_{sh}$ indeksinin RMSE değeri 43,83; K istatistiği 0,973; F1-skoru %98,16 olup bu baraj için en güvenilir indeks olduğu belirlenmiştir. NDWI ve $AWEI_{nsh}$ indeksleri de yüksek doğruluk sağlamalarına rağmen $AWEI_{sh}$ kategorik olarak en üstün sonucu vermiştir.

Her bir baraj için en başarılı indeksler Tablo 4.2'de görüldüğü gibidir.

Tablo 4.2 En başarılı indeksler

Baraj	İndeks
Ömerli	$AWEI_{sh}$
Darlık	NDWI
Elmalı	$AWEI_{sh}$
Sazlıdere	MNDWI
Terkos	$AWEI_{sh}$
Alibey	NDWI
Büyükçekmece	$AWEI_{sh}$

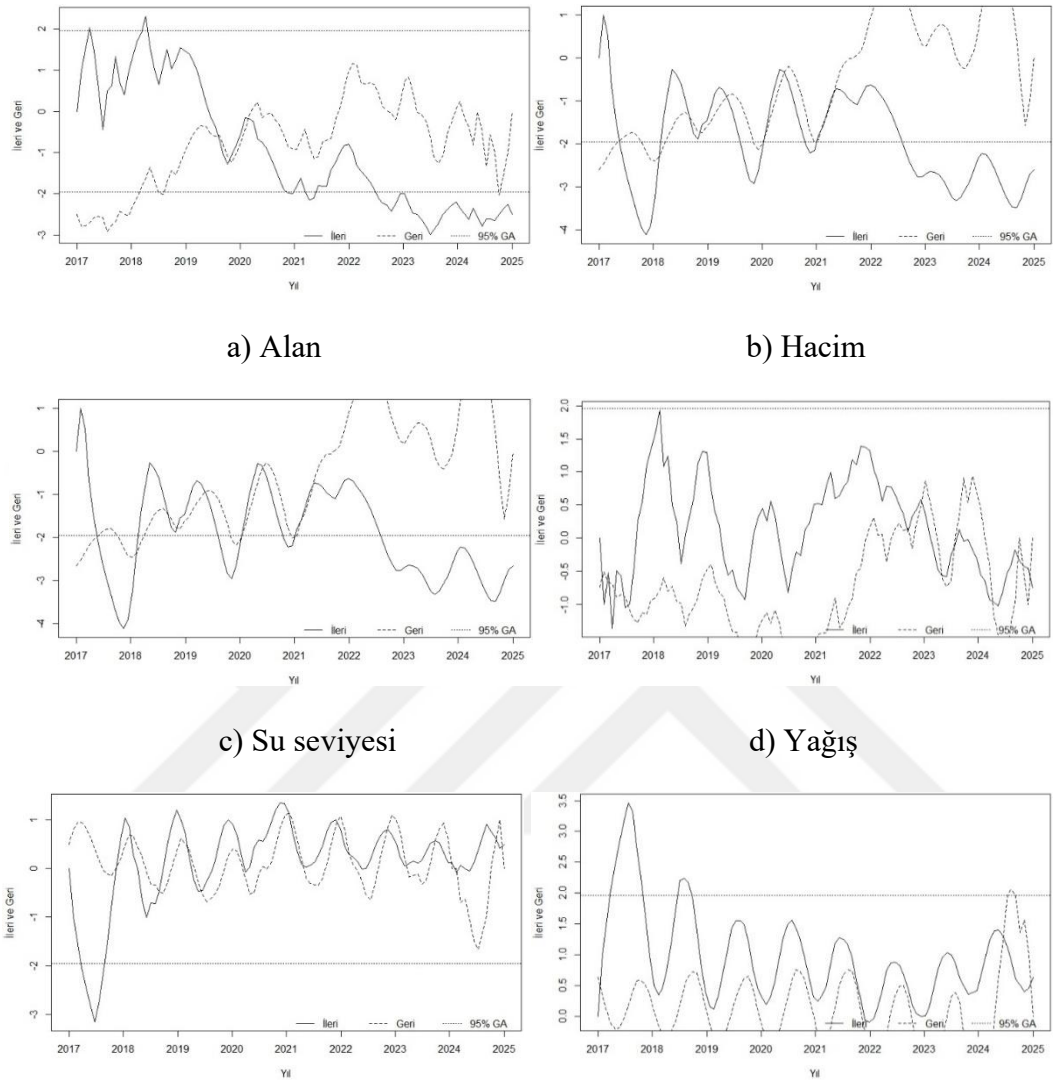
Bu başarılı indeksler yardımıyla her baraj için Ocak 2017 ve Haziran 2025 tarihleri arasındaki baraj alanları Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak GEE platformunda hesaplanmıştır. Sentinel-2 görüntüsünün bulunmadığı aylarda Sentinel-1 görüntüleri kullanılmıştır. Tablo 4.3'te Sentinel-1 görüntülerinin kullanıldığı ay sayıları verilmiştir.

Tablo 4.3 Sentinel-1 görüntüsü kullanılan ay sayıları

Ömerli	Darlık	Elmalı	Sazlıdere	Terkos	Alibey	Büyükçekmece
8	12	7	8	9	7	7

4.2 Mann-Kendall Trend Analizi

4.2.1 Ömerli Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.2 Ömerli Barajı değişim grafikleri

Mann–Kendall trend analizine göre Ömerli Barajı değişim grafikleri Şekil 4.2'de görülmektedir. Ömerli Barajı'nın su yüzey alanında 2017–2019 döneminde anlamlı olmayan zayıf pozitif eğilim gözlenirken, 2019 sonrası trend kırılması yaşanmış ve 2021 yılından itibaren %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma trendi görülmüştür. Özellikle 2021 sonrasında belirginleşen negatif eğilim hidroklimatik kuraklık, artan buharlaşma ve kentsel su talebinin etkisini göstermektedir. Bu sonuçlar, Ömerli Barajı'nın 2022 ve sonrasında hidrik stres

altında olduğunu ve su yönetimi açısından kritik bir döneme girdiğini göstermektedir.

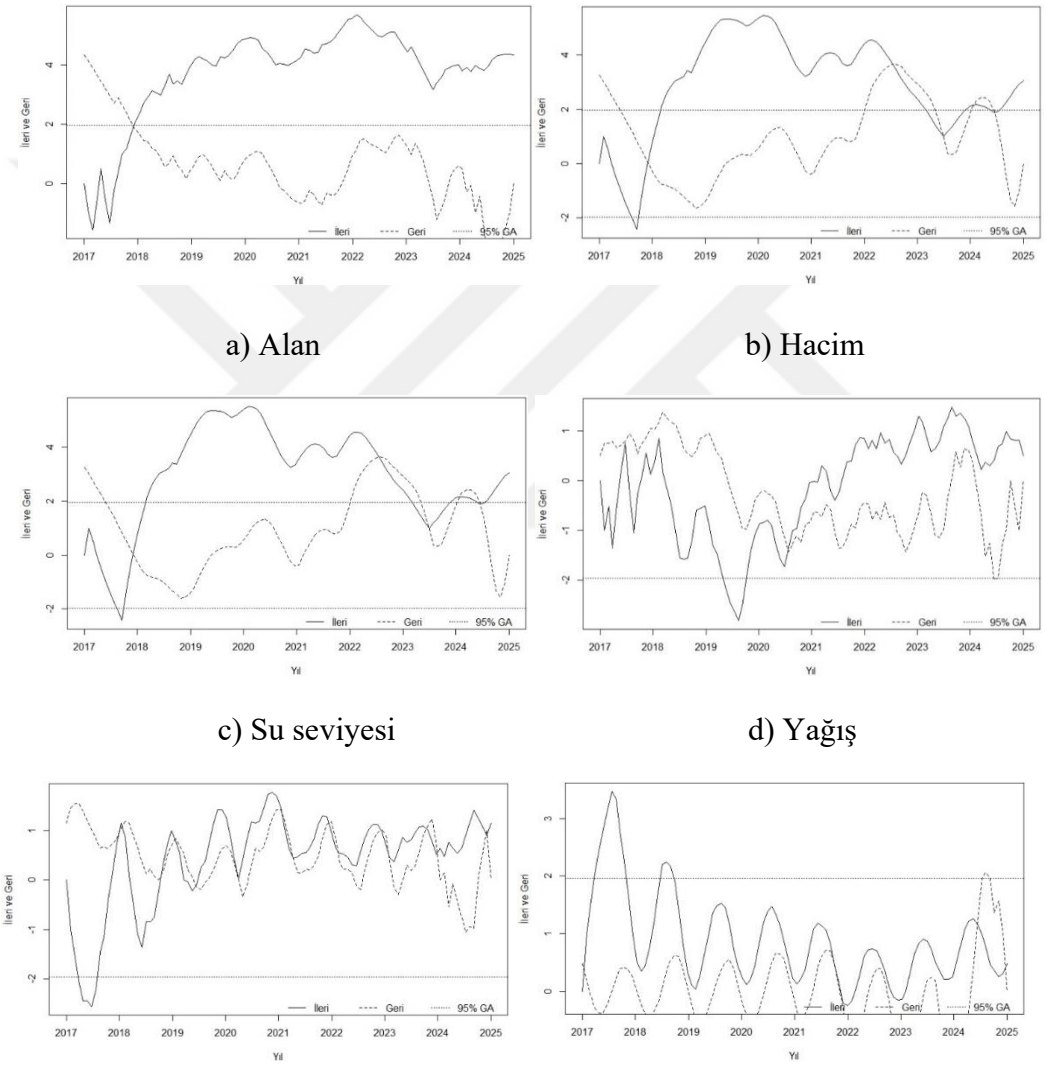
Ömerli Barajı'nın hacim grafiği incelendiğinde 2017–2019 yılları arasında ileri test eğrisinin pozitif ve negatif değerler arasında dalgalandığı**,** 2017-2018 arasında iki trend eğrisinin kesiştiği ve bu dönemde eğrinin -1.96 GA düzeyinin altında kaldığı görülmektedir. 2022–2024 döneminde eğri −3 ile −4 arasında seyrederek hacim azalmasının kararlı ve sürekli bir süreç olduğunu ortaya koymuştur. 2023–2025 döneminde eğride kısmi toparlanma görülmesine rağmen, değerler kritik eşik değerinin üzerinde pozitif bölgeye geçmemiş ve trend yönü değişmemiştir. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

Ömerli Barajı'nın yağış değişim grafiği incelendiğinde yağışlarda 2017–2025 döneminde istatistiksel olarak anlamlı bir trend gözlenmemektedir. 2017'de ileri eğrisinin dalgalanmaları pozitif bölgeye yükselmesine rağmen, %95 GA düzeyini temsil eden ±1.96 sınırını aşmamıştır. İleri ve geri eğrilerinin birbirine yakın seyretmesi, yağış davranışının süreksiz ama tekrarlayan bir yapıda olduğunu ve uzun dönemli yönlü bir değişimden ziyade mevsimsel iklim salınımlarının etkili olduğunu göstermektedir. Eğrinin 2017-2025 yılları arasında pozitif ve negatif değerler arasında düzenli olmayan bir dağılım göstermesi, yağışlarda belirgin bir artış ya da azalış yönü bulunmadığını ve bu dönemde yağışların istatistiksel olarak kararlı kabul edilebilecek bir seviyede seyrettiğini ortaya koymaktadır.

Ömerli Barajı'nın buharlaşma grafiği incelendiğinde ileri eğrisinin 2017 yılının başlarında hızla düşerek alt kritik sınırı olan -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir. Bu durum, incelenen dönemin başında Ömerli buharlaşma verilerinde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir azalış trendinin olduğunu göstermektedir. Bu azalış trendi, 2018 yılı başlarında ileri eğrisinin -1.96 sınırının üzerine çıkmasıyla sona ermiştir. 2018'den 2025'e kadar olan kalan dönemde ise ileri eğrisi %95 GA içerisinde kalmıştır. Eğri, pozitif bölgede +1 civarında dalgalanmalar gösterse de, üst kritik sınırı olan +1.96'yı aşamamıştır. İleri ve geri eğrilerinin özellikle 2024 yılı sonlarına doğru tekrar birbirinden uzaklaşması, yeni bir trend eğilimine doğru potansiyel bir hareketlenme olduğunu ancak henüz anlamlılık kazanmadığını işaret etmektedir.

Sıcaklık değişim grafiğinde ileri eğrisi 2017 yılında hızla yükselerek üst kritik sınırı olan +1.96'yı belirgin bir şekilde aşmış ve yaklaşık +3.4 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, bu dönemde sıcaklık verilerinde %95 GA düzeyinde güçlü ve anlamlı bir ısınma eğiliminin varlığını göstermektedir. Ancak bu anlamlı eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin +1.96 seviyesinden düşerek tekrar GA içine girmesiyle sonlanmıştır. 2018-2019 arasında yeniden bu sınır aşılmıştır. Ancak geri kalan süreçte ileri ve geri eğrileri sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır.

4.2.2 Elmalı Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.3 Elmalı Barajı değişim grafikleri

Elmalı Barajı'nın değişim grafikleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Yüzey alanı grafiğinde 2018 yılı itibarıyla iki eğri kesişmiş ve ileri eğri pozitif yönde hızla yükselerek %95 GA düzeyi olan +1.96 değerini aşmıştır. Bu aşım, 2018 yılından itibaren yüzey

alanında istatistiksel olarak anlamlı bir artış trendinin başladığına işaret etmektedir. 2022 sonrasında ileri eğrisinde düşüş eğilimi görülse de değerler hâlâ pozitif bölgede kalmaktadır. Dolayısıyla, trend yönü zayıflamakla birlikte 2025 yılına kadar pozitif eğilim korunmuştur.

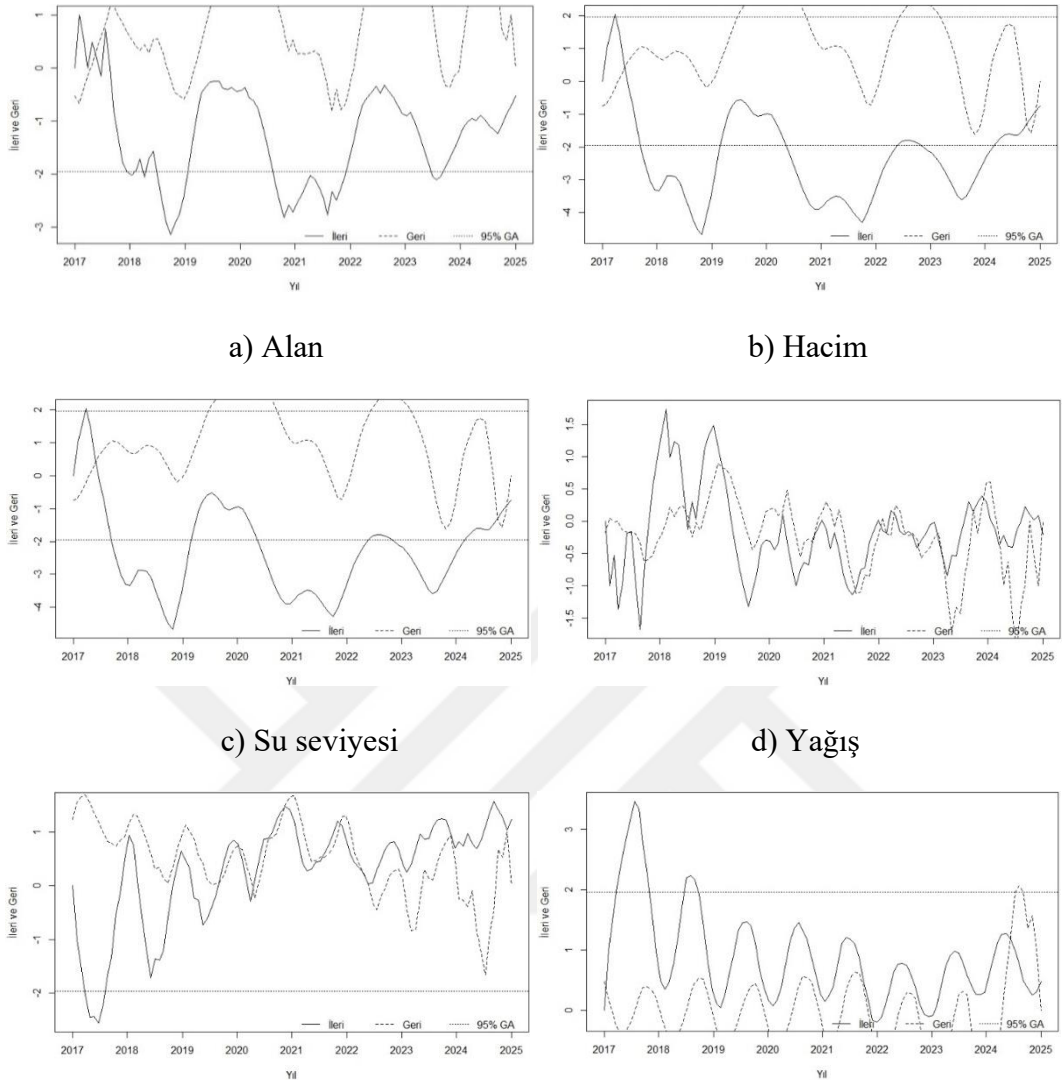
Elmalı Barajı'nın hacmi 2017–2018 döneminde anlamlı bir azalış trendi göstererek -1.96 sınırını geçmiştir. 2018'de iki trend eğrisi kesişmiştir. 2018-2019 aralığında anlamlı %95 GA düzeyi geçilerek bir artış eğilimi başlamıştır. İleri eğrisi uzun süre pozitif bölgede kalmış ve 2021'e kadar anlamlı pozitif trend sürmüştür. 2022 sonrası dalgalanma olsa da trend genellikle pozitif tarafta kalmaktadır. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

Elmalı Barajı'ndaki yağışlarda ileri eğri değerlerinin negatif bölgeye belirgin biçimde geçtiği 2019–2020 yılları arasında, %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalış eğiliminin ortaya çıktığı görülmektedir. Buna karşın, 2020 sonrası trendin yön değiştirerek her iki eğrinin de pozitif değerlere yöneldiği dönemde yağışların göreceli olarak arttığı ancak bu artışın istatistiksel anlamlılık seviyesine ulaşmadığını görülmektedir.

Elmalı Barajı'nın buharlaşma grafiği incelendiğinde, serinin başlangıcında, 2017 yılında ileri eğrisinin hızla düşerek alt kritik sınır -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir. Bu durum, buharlaşma verilerinde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir azalış eğiliminin olduğunu işaret etmektedir. Ancak bu anlamlı eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin tekrar GA içine girmesiyle sonlanmıştır. 2018 ortalarından 2025'e kadar olan kalan dönemde ise ileri ve geri eğrileri sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır. Bu periyotta gözlenen periyodik dalgalanmaların, serinin yüksek doğal değişkenliğe sahip olduğunu göstermesine rağmen, uzun vadeli ve anlamlı bir trend (artış veya azalış) oluşturmadığını kanıtlamaktadır.

Sıcaklık değişim grafiğinde 2017'de %95 GA düzeyini aşan belirgin bir ısınma eğilimi görülmüş, ancak bu eğilim 2018'de sona ermiştir. 2018–2019 arasında kısa süreli bir tekrar yükseliş yaşansa da, sonrasında ileri ve geri eğrileri sürekli olarak GA içinde kalmış ve anlamlı bir eğilim oluşmamıştır.

4.2.3 Sazlıdere Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.4 Sazlıdere Barajı değişim grafikleri

Sazlıdere Barajı'nın değişim grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Sazlıdere Barajı'nın yüzey alan değişimlerinde 2017–2025 döneminde belirgin dalgalanmalar içerdiği görülmektedir. İleri trend eğrisi, 2018 yılı sonundan itibaren keskin bir düşüş sergilemiş ve 2019 yılı dolaylarında %95 güven düzeyinin altındaki -1.96 eşiğini aşmıştır. Bu durum, 2018-2019 arasında Sazlıdere Barajı'nın yüzey alanında istatistiksel olarak anlamlı bir azalış trendinin başladığını açıkça ortaya koymaktadır. Azalış eğilimi 2020–2021 döneminde de görülmüş ve eğri -3 seviyelerine kadar gerilemiştir. 2022 sonrası dönemde ileri eğrisinde kısmi artışlar görülmesine rağmen eğri negatif bölgede kalmaya devam etmektedir.

Sazlıdere Barajı'nın hacim grafiğinde ileri eğri, 2017-2018 arasında hızla negatif bölgeye inerek kritik -1.96 sınırını aşağı yönlü kesmektedir. Bu durum, 2018 yılının başlarından itibaren Sazlıdere Barajı hacminde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma trendinin başladığını göstermektedir. Özellikle 2019, 2021 ve 2022 yıllarında -4 seviyelerinde olan eğri, azalışın şiddetini ortaya koymaktadır. İleri eğrisi, 2019-2020 ve 2022-2023 dönemlerinde kısa süreli ve anlamlı olmayan toparlanmalar yaşamıştır. 2025 yılına ait son değerler, eğrinin negatif bölgede kalmaya devam etmiş hacim azalışını kesinleştirmiştir. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

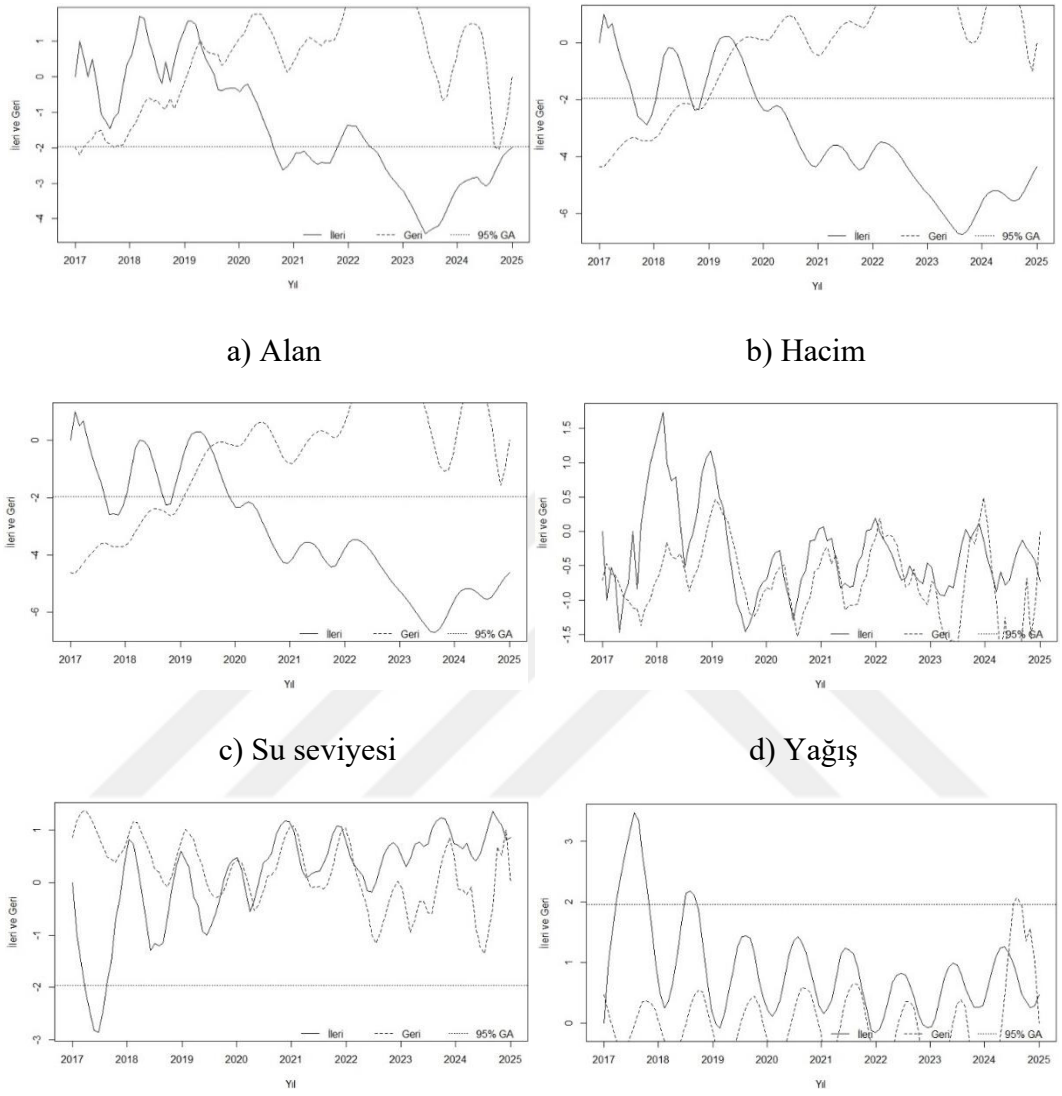
Sazlıdere Barajı'nda 2017-2025 yılları arasında ileri ve geri eğrilerinin neredeyse kesintisiz bir şekilde ±1.96 aralığı içerisinde kaldığı açıkça görülmektedir. İleri eğrisi 2018'de kısa süreliğine +1.5 civarına yükselmesine rağmen üst sınırı aşmamıştır. Bu durum, Sazlıdere yağış verileri serisinde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve sürekli artan veya azalan bir trendin bulunmadığı şeklinde yorumlanmaktadır. Eğrilerin sıfır çizgisinin etrafında sıkça salınım yapması ve ileri ve geri serilerinin bu salınımlar sırasında sürekli kesişmesi, yağış rejiminin yüksek değişkenlik gösterdiğini, ancak bu dalgalanmaların, incelenen kısa zaman dilimi içerisinde uzun vadeli ve kalıcı bir trend oluşturmadığını göstermektedir.

Sazlıdere Barajı'nın buharlaşma grafiği incelendiğinde, 2017 yılında ileri serisinin alt kritik sınırı -1.96'yı aştığı görülmektedir. Bu durum, buharlaşma verilerinde bu dönemde %95 GA düzeyinde güçlü ve anlamlı bir azalış eğiliminin varlığını göstermektedir. Ancak bu anlamlı eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin tekrar GA içine girmesiyle sonlanmıştır. Geri kalan süreçte ise ileri ve geri eğrileri sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır. Genel olarak grafik, çalışma döneminde buharlaşmanın dönemsel değişkenlik gösterdiğini, ancak bu değişkenliğin uzun vadeli yönlü bir trend oluşturacak düzeyde olmadığını ortaya koymaktadır.

Sıcaklık değişim grafiği incelendiğinde, sıcaklığın 2017'de %95 GA üzerine çıkarak belirgin bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Ancak 2018'de eğrinin yeniden GA düzeyine dönmesiyle bu eğilim ortadan kalkmıştır. 2018–2019 döneminde kısa süreli bir yükseliş daha yaşanmış olsa da, sonraki süreçte her iki

eğri de sürekli olarak GA sınırları içinde kalmış ve kalıcı bir trend ortaya çıkmamıştır.

4.2.4 Terkos Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.5 Terkos Barajı değişim grafikleri

Terkos Barajı'nın değişim grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Terkos Barajı'nda 2019-2020 dönemleri arasında trend eğrilerinin kesiştiği ve trend yönünün değiştiği görülmektedir. Bu tarihten sonra ileri eğrisi belirgin bir düşüş göstermiş ve 2020-2021 yılları arasında -1.96 eşik değerini aşarak negatif bölgeye geçmiştir. Bu düşüş, Terkos Barajı yüzey alanında %95 GA düzeyinde anlamlı bir azalma trendinin başladığını göstermektedir. 2022–2024 dönemi boyunca eğri -3 ile -4 seviyelerine kadar düşerek azalış eğilimi göstermiş ve 2024 yılı sonrasında ileri eğrisinde hafif

bir toparlanma görülse de değerlerin hâlâ negatif bölgede kalması sebebiyle trend yönü değişmemiştir.

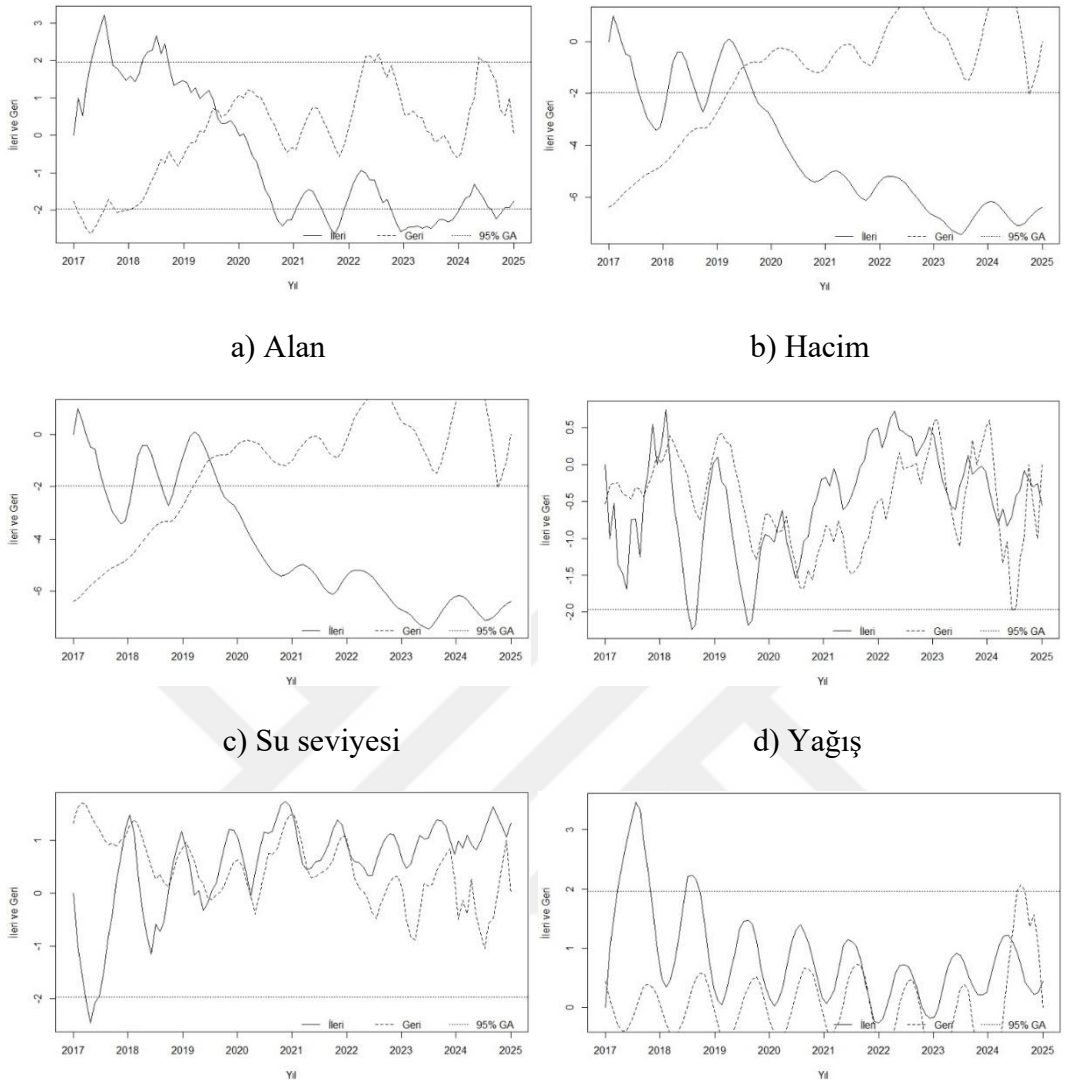
Terkos Barajı'nda ileri eğri, 2017 yılının başlarından itibaren hızla negatif bölgeye inmiş ve 2018-2020 arasındaki yaşadığı yer yer kısa toparlanma dönemi dışında, kritik -1.96 düzeyinin sürekli altında seyretmiştir. Özellikle 2021 ve sonrası eğrinin -6 gibi aşırı düşük değerlere ulaşması, bu dönemlerdeki hacim azalışının şiddetini ve %95 GA düzeyinde istatistiksel gücünü vurgulamaktadır. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

Terkos Barajı'nın yağış rejiminde, genel olarak kısa süreli dalgalanmaların baskın olduğu, özellikle 2018 yılında yağışlarda artış yönlü geçici bir hareketlenme, 2019 ve sonrasında ise dönemsel azalışların meydana geldiğini göstermektedir. Eğrilerin dönem boyunca ±1.96 sınırının içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu durum, Terkos yağış verileri serisinde incelenen dönemde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve sürekli artan veya azalan bir trendin bulunmadığı şeklinde yorumlanır. Bununla birlikte 2021 sonrası dönem daha dengeli bir yapıya işaret etmekte olup yağışlar mevsimsel ve yıllık atmosferik değişimlere duyarlı bir seyir izlemiştir.

Terkos Barajı'nın buharlaşma grafiği incelendiğinde 2017 yılında, ileri eğrisinin düşerek alt kritik sınırı olan -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı ve yaklaşık -3 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, buharlaşma verilerinde bu dönemde %95 GA düzeyinde güçlü ve anlamlı bir azalış eğiliminin varlığını göstermektedir. Ancak bu anlamlı eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin tekrar GA içine girmesiyle sonlanmıştır. Geri kalan dönemde ise iki eğri sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır. Bu periyotta gözlenen periyodik dalgalanmalar, serinin yüksek doğal değişkenliğe sahip olduğunu, ancak uzun vadeli ve anlamlı bir artış veya azalış trendi oluşturmadığını kanıtlamaktadır.

Terkos Barajı'nın sıcaklık değişim grafiği değerlendirildiğinde, 2017 yılında sıcaklık serisinde %95 GA düzeyini aşan belirgin bir artış eğilimi görülmüştür. Ancak 2018'de eğrinin kritik sınırın altına inmesiyle bu eğilim sona ermiştir. 2018–2019 arasında kısa süreli bir yükseliş yeniden ortaya çıkmasına rağmen, devam eden yıllarda ileri ve geri eğrileri GA içinde kalmış ve sıcaklıkta istatistiksel olarak anlamlı, kalıcı bir trend gözlenmemiştir.

4.2.5 Alibey Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.6 Alibey Barajı değişim grafikleri

Şekil 4.5'da Alibey Barajı'nda gözlenen değişim grafikleri yer almaktadır. Alibey Barajı yüzey alanı 2017–2018 döneminde eğri 1.96 sınırını aşarak pozitif yönde %95 GA düzeyinde anlamlı bir artış trendi sergilemiş olup trend yaklaşık 2020 yılından itibaren yön değiştirmiş ve 2021 sonrası %95 GA düzeyinde anlamlı bir azalış eğilimine geçmiştir. 2022–2025 döneminde görülen kısa süreli toparlanmalara rağmen eğri negatif bölgede kalmaya devam etmiş ve uzun vadade su yüzey alanında azalmanın baskın olduğunu göstermiştir.

Alibey Barajı'nda ileri eğri, 2017 yılının başlarından itibaren negatif bölgede seyretmeye başlamış ve kısa süreli toparlanmalar dışında, 2019 yılının sonlarından

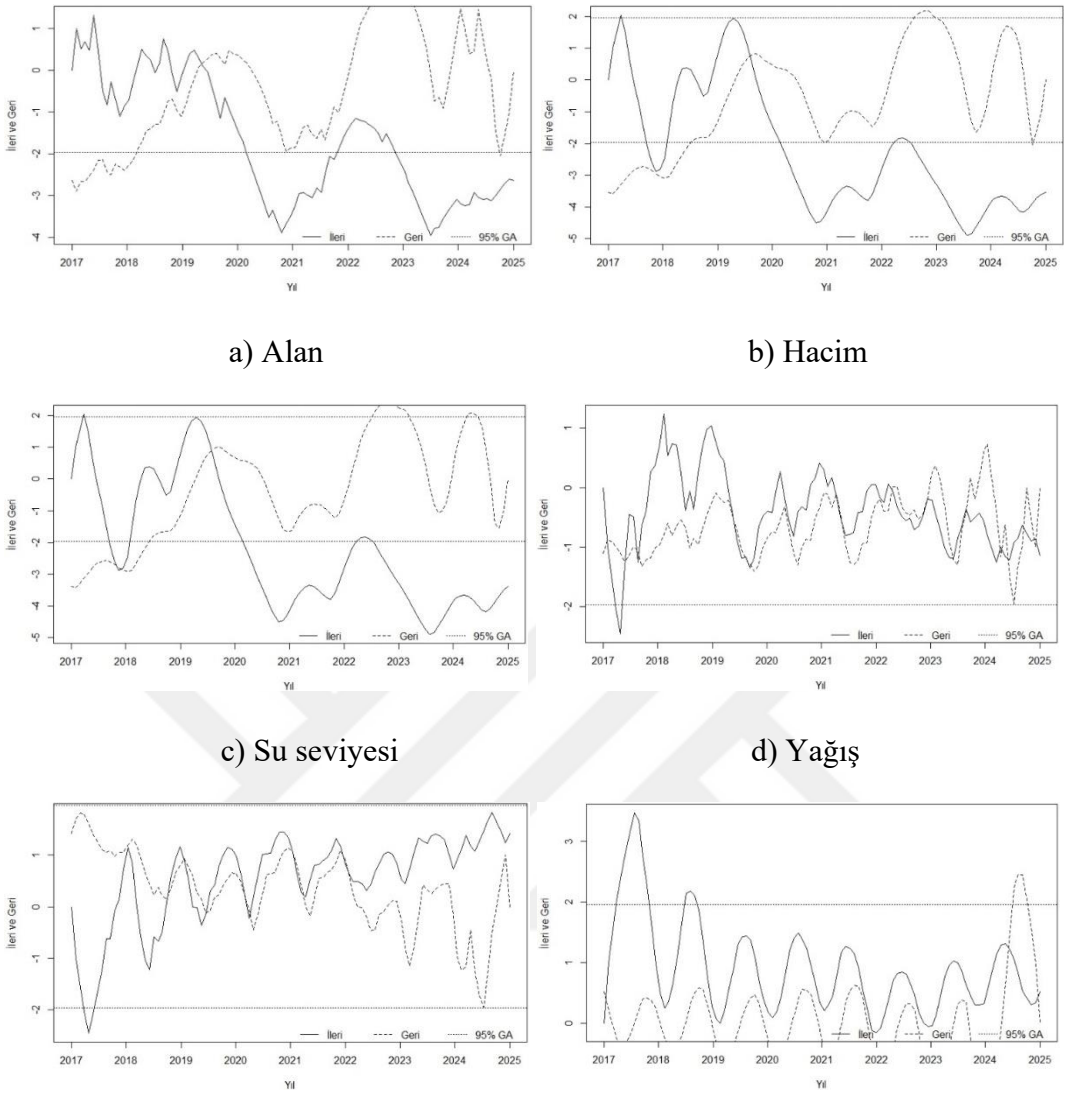
itibaren kritik -1.96 sınırını aşağı yönlü keserek kalıcı bir düşüşe geçmiştir. Bu durum, 2019-2020 itibarıyla Alibey Barajı hacminde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalış trendinin başladığını göstermektedir. Özellikle 2023 yılından itibaren eğrinin -7 seviyelerine yaklaşması, bu dönemdeki hacim kaybının şiddetini göstermektedir. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

Alibey Barajı'nın yağış rejimi 2017-2025 arasında genel olarak ±1.96 sınırının arasında kalmıştır, ancak 2018-2019 arasında ileri eğrisi yaklaşık -2 seviyesinin altına inerek alt kritik sınırı olan -1.96'yı belirgin bir şekilde aşmıştır. Bu durum, 2019 yılının başlarında Alibey yağış serisinde %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve kısa süreli bir azalış eğiliminin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu azalış eğiliminin ardından, 2020 ve sonrasında eğri tekrar GA içine dönmüş ve özellikle 2022-2023 döneminde pozitif bölgede seyrederek artış yönünde dalgalanmalar göstermiştir. Buna rağmen, bu artışlar anlamlılık sınırını geçmemiştir. Son olarak, 2024-2025 arasında geri eğrisi de -2 seviyesine inerek, serinin sonuna doğru da bir azalış eğiliminin yaşandığının sinyalini vermektedir.

Alibey Barajı'nın buharlaşma grafiği incelendiğinde 2017 yılında, ileri eğrisinin düşerek alt kritik sınır -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir. Bu durum, bu dönemde buharlaşma verilerinde %95 GA düzeyinde güçlü ve anlamlı bir azalış eğiliminin varlığını göstermektedir. 2018'de ileri eğrisi yeniden ±1.96 GA içerisine girmiş ve geri kalan dönemde ileri ve geri eğrileri sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır.

Alibey Barajı'nın sıcaklık serisi 2017'de %95 GA düzeyini aşan güçlü bir ısınma eğilimi göstermiş, 2018'de bu eğilim sona ermiş ve 2018–2019 arasında kısa süreli bir artış daha yaşanmıştır. Ancak geri kalan dönemde eğriler GA içinde kalmış, bu nedenle serinin genelinde kalıcı bir trend değil, yüksek değişkenlik içeren durağan bir yapı gözlenmiştir.

4.2.6 Büyükçekmece Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.7 Büyükçekmece Barajı değişim grafikleri

Büyükçekmece Barajı'nın değişim grafikleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Barajın yüzey alanında 2017–2019 döneminde ileri trend eğrisi pozitif bölgede seyretmekte olup kısa süreli dalgalanmalarla hafif bir artış eğilimi göstermiştir. Ancak bu dönem boyunca ileri eğri kritik eşik olan +1.96'yı aşmadığı için trend istatistiksel olarak anlamlı değildir. 2019-2020 yılları arasında eğrinin yön değiştirerek geri eğri ile kesiştiği görülmektedir. 2020 yılından itibaren düşüş devam etmiş ve −1.96 eşik değeri aşılmıştır. Bu durum yüzey alanındaki azalmanın %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. 2022'ye kadar eğri yükselme eğilimi gösterse de yeniden düşüş trendine geçmiş ve 2023'te ileri değerlerinin -3 ile -4 seviyelerine kadar indiği görülmüştür. 2023–2025 döneminde eğride

dönemsel toparlanmalar görülmesine rağmen trend eğrisi negatif bölgede kalmaktadır.

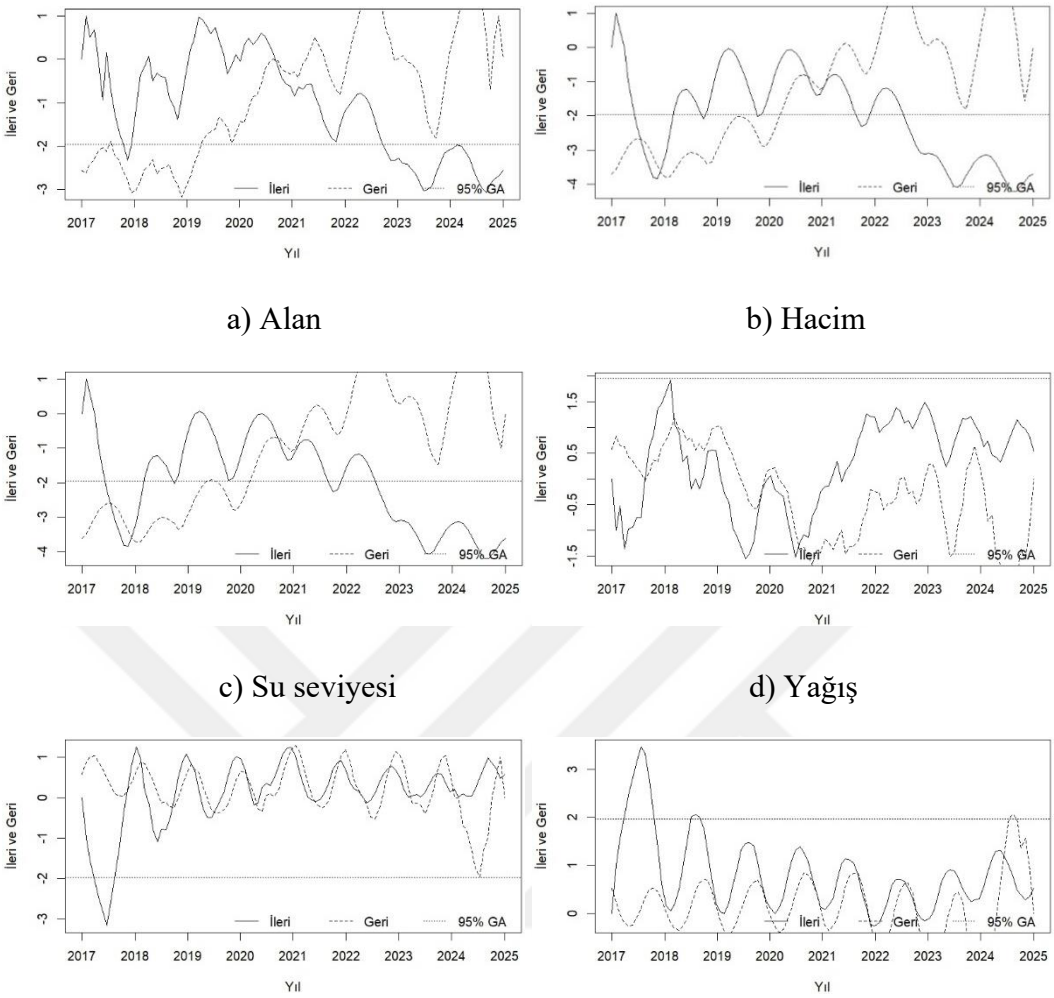
Büyükçekmece Barajı'nın hacim grafiğinde ileri eğri, 2017-2018 arasında -1.96 eşiğini aşağı yönlü keserek ilk kez anlamlı negatif bölgeye girmiştir. 2019-2020 arasında iki trend eğrisi kesişmiş, -1.96 eşiğini kalıcı olarak aşmış ve bu tarihten itibaren anlamlı bir azalma trendi meydana gelmiştir. 2021'den sonra yer yer toparlansa da eğri negatif bölgede kalmaya devam etmiştir. -4 ve -5 seviyelerine yaklaşan eğri değerleri, bu dönemlerdeki hacim kaybının şiddetini ve %95 GA düzeyinde istatistiksel gücünü vurgulamaktadır. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

Büyükçekmece Barajı'nın yağış rejimi incelendiğinde ileri serisinin başlangıcında, yaklaşık 2017 yılında -2.5 seviyesine inerek alt kritik sınırı olan ±1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir. Bu durum, %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve kısa süreli bir azalış eğiliminin ortaya çıktığını göstermektedir. Eğri 2018 ve 2019 yıllarında pozitif bölgede +1 civarına yaklaşmış, ancak üst kritik sınır olan +1.96'yı aşamamıştır. Benzer şekilde, 2024 yılı sonlarında geri eğrisi de -2 seviyesine inerek, serinin sonuna doğru da bir azalış eğiliminin olduğu sinyalini vermektedir.

Büyükçekmece Barajı'nın buharlaşma grafiğinde 2017 yılında, ileri eğrisinin düştüğü ve alt kritik sınırı olan -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir. Bu durum, bu dönemde buharlaşma verilerinde %95 GA düzeyinde güçlü ve anlamlı bir azalış eğiliminin varlığını göstermektedir. Bu anlamlı eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin tekrar GA içine girmesiyle sonlanmıştır. Geri kalan dönemde ise iki eğri de sürekli olarak ±1.96 GA içerisinde kalmıştır. 2024 yılı sonlarında geri eğrisinin -2 seviyesine inmesi, geriye dönük anlamlı bir azalış eğilimi sinyali verse de, ileri eğrisi bu dönemde anlamlılık kazanmamıştır.

Büyükçekmece Barajı'nın sıcaklık serisi 2017'de GA düzeyini aşarak anlamlı bir ısınma eğilimi göstermiş; ancak 2018 sonrasında eğrilerin yeniden ±1.96 sınırları içinde seyretmesiyle bu eğilim kalıcı bir trende dönüşmemiş, seri genel olarak yüksek değişkenlik içeren durağan bir yapı sergilemiştir.

4.2.7 Darlık Barajı Değişim Grafikleri



a) Alan b) Hacim

c) Su seviyesi d) Yağış

e) Buharlaşma f) Sıcaklık

Şekil 4.8 Darlık Barajı değişim grafikleri

Şekil 4.8'de Darlık Barajı değişim grafikleri yer almaktadır. Darlık Barajı'nda 2017–2019 döneminde ileri eğrisi pozitif ile negatif bölgeler arasında salınım göstermekte olup eğilim kararsızdır. 2020-2021 yılları arasında ileri ve geri trend eğrilerinin kesiştiği gözlenmektedir. Bu tarihten sonra ileri eğrisi belirgin bir düşüş eğilimine girmiş ve yaklaşık 2023 yılında kritik sınır olan –1.96 değerinin altına inmiştir. 2023–2025 döneminde eğri –2 ile –3 arasında seyrederek azalış eğiliminin hem kararlı hem de güçlü olduğunu ortaya koymaktadır.

Darlık Barajı'nın hacim grafiğinde ileri eğri, 2017 yılının sonundan itibaren hızla düşerek -1.96 eşiğini aşağı yönlü kesmiş ve 2018 yılının başlarında -4 seviyelerine inmiştir. Bu durum, incelenen dönemin başlarında %95 GA düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı ve şiddetli bir azalma trendinin başladığını teyit etmektedir. İleri

eğri, 2019 ile 2022 yılları arasında -1.96 eşiği civarında salınarak ve zaman zaman bu eşiği yukarı yönlü keserek anlamlı olmayan periyotlar yaşasa da, 2022 yılının ortalarından itibaren tekrar kalıcı bir düşüşe geçmiştir. Eğrinin 2023'ten itibaren yeniden -4 seviyelerine yaklaşması, azalma trendinin şiddetlendiğini göstermektedir. Su seviyelerinin değişimlerinin de hacim değişimleri ile aynı şekilde seyrettiği görülmektedir.

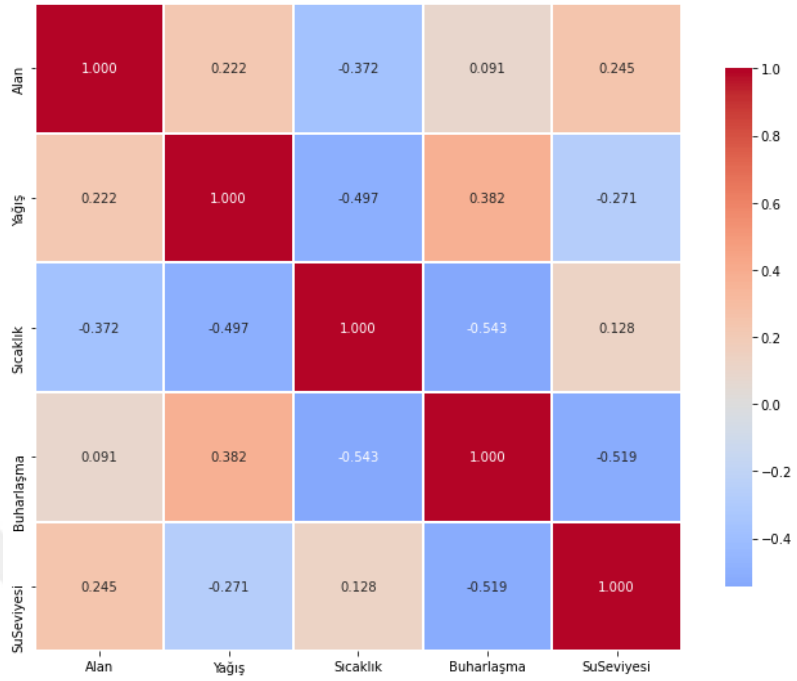
Darlık Barajı'ndaki yağışlar 2017-2025 dönemi boyunca %95 GA ±1.96 sınırı içerisinde kalmıştır. İleri serisi, dönem dönem yaklaşık -1.5 seviyesine inerek bir azalış eğilimine yakınlaşmış, ancak alt kritik sınırı aşarak anlamlılık kazanmamıştır. Benzer şekilde, 2021 sonlarından itibaren sürekli olarak pozitif bölgede seyretmesine ve yaklaşık +1.5 seviyelerinde dalgalanmasına rağmen, üst kritik sınırı geçememiştir. Bu durum, Darlık yağış verileri serisinde incelenen periyotta istatistiksel olarak anlamlı ve sürekli artan veya sürekli azalan bir trendin bulunmadığı anlamına gelmektedir. İleri ve geri eğrilerinin GA içinde kalması ve birbirleriyle sıkça kesişmesi, bölgedeki yağış rejiminin yüksek doğal değişkenlik gösterdiğini, ancak bu dalgalanmaların uzun vadeli bir eğilim oluşturacak kadar güçlü olmadığını akademik olarak desteklemektedir.

Darlık Barajı'nın buharlaşma grafiğinde ileri eğrisinin 2017 yılında düştüğü ve alt kritik sınırı olan -1.96'yı belirgin bir şekilde aştığı görülmektedir ve bu durum %95 GA düzeyinde çok güçlü ve anlamlı bir azalış eğiliminin varlığını göstermektedir. Ancak bu eğilim, 2018 yılında ileri eğrisinin yeniden GA içine dönmesiyle sona ermiştir. 2025 yılına kadar olan süreçte ileri ve geri eğrilerinin tamamının ±1.96 sınırları içerisinde kalması, bu dönemde buharlaşmada istatistiksel olarak anlamlı bir artış ya da azalış eğiliminin bulunmadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Darlık Barajı'nın sıcaklık serisi 2017 yılında %95 GA düzeyini aşarak belirgin bir ısınma eğilimi sergilemiş; ancak 2018'de eğrinin yeniden güven sınırları içerisine dönmesiyle bu eğilim ortadan kalkmıştır. 2018–2019 döneminde kritik sınır kısa süreli olarak tekrar aşılmış olsa da, izleyen yıllarda ileri ve geri eğrileri sürekli ±1.96 güven aralığında kalmış ve seride kalıcı, istatistiksel olarak anlamlı bir trend oluşmamıştır. Bu durum, sıcaklık verilerinin genelinde belirgin bir yönelimden ziyade yüksek değişkenlik gösteren durağan bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

4.3 Makine Öğrenme İle Su Seviyesi Tahmini

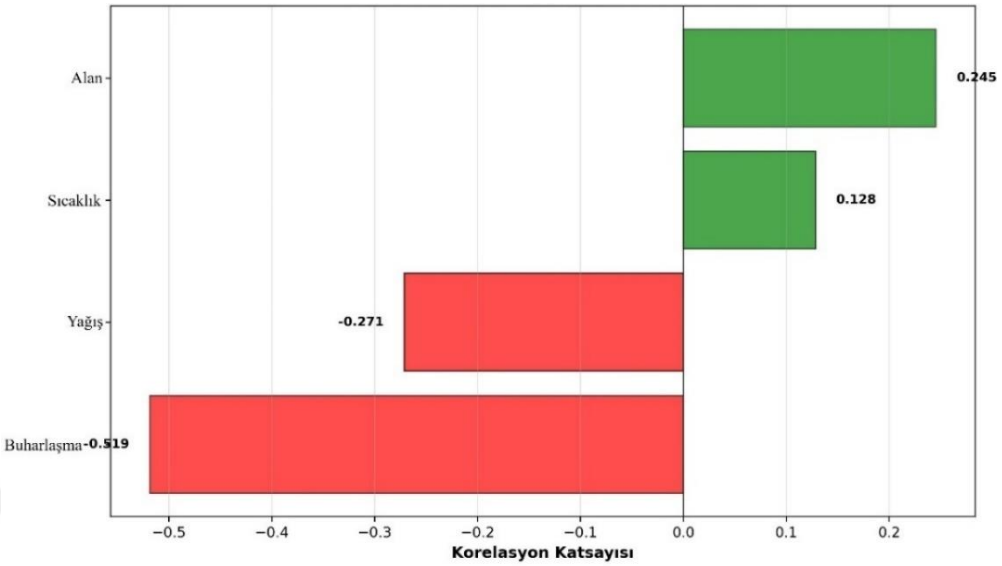
4.3.1 Ömerli Barajı Su Seviyesi Tahmini



Şekil 4.9 Ömerli Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

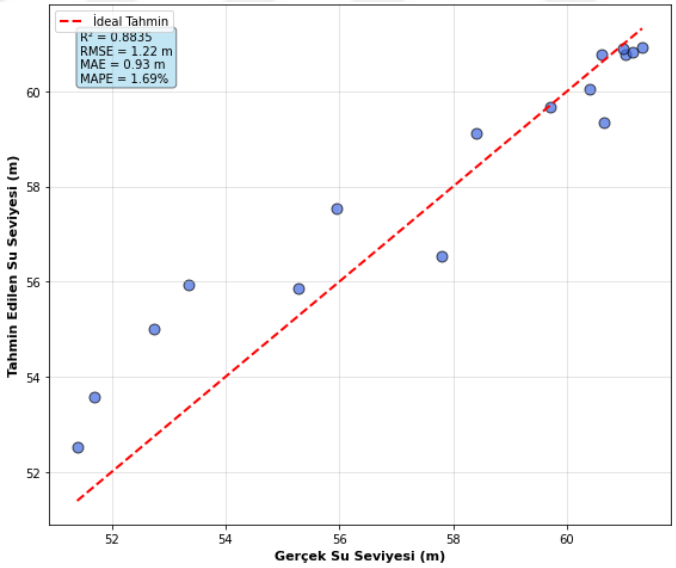
Şekil 4.9'da görülen temel özellikler arası korelasyon ısı haritasında en güçlü ilişkinin r = 0,245 ile alan ve r = -0,519 ile buharlaşma arasında olduğunu vurgulanmaktadır. Alan pozitif korelasyon göstermekte, bu da geniş yüzey alanlarının genellikle daha yüksek rezervuar hacimlerine karşılık geldiğini ortaya koymaktadır. Negatif yöndeki en güçlü ilişki olan buharlaşma, su kütlesinin mevsimsel hava koşullarına duyarlılığını göstermektedir. r = -0,271 değerindeki yağış ve r = 0,128 değerindeki sıcaklık korelasyon değerleri düşük olup, kısa dönem su seviyesi değişimlerinin yağıştan çok birikimli hidrolik girdiler tarafından belirlendiğini doğrulamaktadır. Yağış ile sıcaklık arasında r = -0,497 değerindeki negatif korelasyon, yağışlı dönemlerde sıcaklıkların genellikle düşük seyretmesi ile uyumludur. Buharlaşma ile sıcaklık arasındaki r = -0,543'lük ilişki şaşırtıcı görünse de, analiz döneminde sıcaklığın yüksek olduğu koşulların aynı zamanda yüksek buharlaşmayı doğurduğu; ancak su yüzeyinin geniş alanlara sahip olduğu dönemlerde yağış ve mevsim etkilerinin bu ilişkiyi karmaşıklaştırdığı düşünülmelidir. Genel olarak korelasyon matrisi, su seviyesi değişimlerinin çok boyutlu iklim koşullarıyla ilişkili olduğunu, ancak korelasyon katsayılarının orta

düzeylerde kalması nedeniyle doğrusal olmayan etkileşimlerin ve gecikmeli etkilerin modelleme aşamasında kritik rol oynadığını göstermektedir.

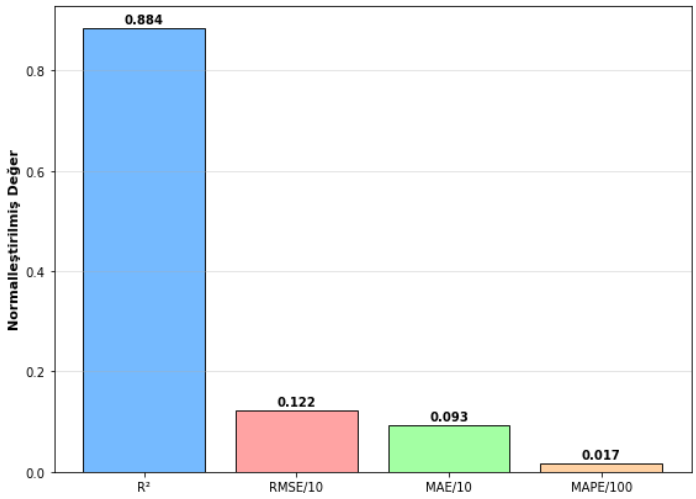


Şekil 4.10 Ömerli Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.10'da da Ömerli Barajı'nın su seviyesi ile temel özellikler arasındaki korelasyonun bar grafiği yer almaktadır.

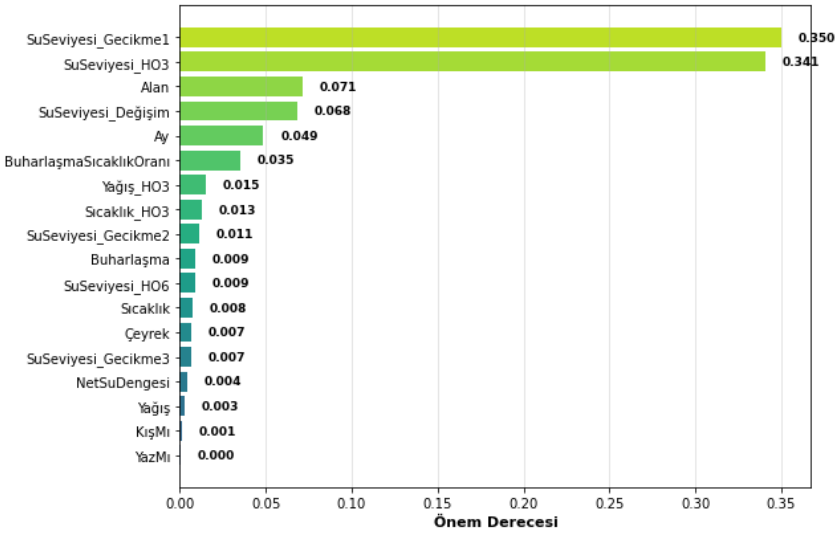


Şekil 4.11 Ömerli Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



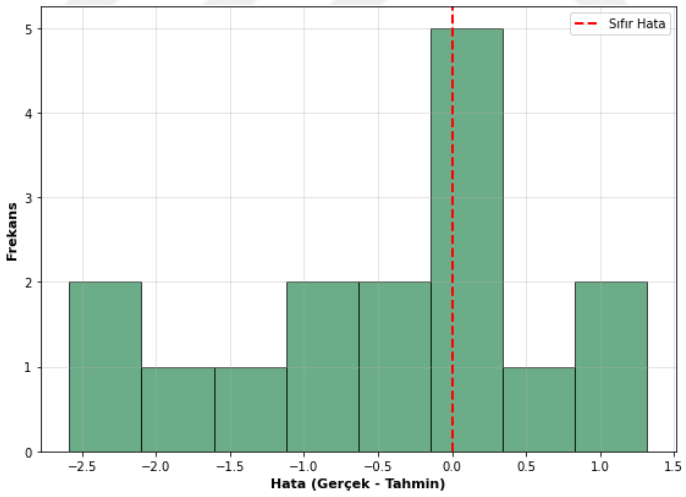
Şekil 4.12 Ömerli Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

Ömerli Barajı'nın gerçek ve tahmin edilen su seviyesi değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.11'de ve performans metrikleri de Şekil 4.12'de verilmiştir. Noktaların 1:1 ideal çizgi etrafında yoğun bir şekilde kümelenmesi, modelin yüksek su seviyelerini oldukça başarılı biçimde tahmin ettiğini ortaya koyarken; düşük su seviyelerinde belirgin sapmalar olduğu görülmektedir. R^2 = 0,8835, modelin su seviyesi varyansının %88'ini açıkladığını ifade etmektedir. RMSE = 1,22 m, MAE = 0,93 m ve MAPE = %1,69 değerleri, tahmin hatalarının hem mutlak hem de göreceli anlamda düşük olduğunu göstermektedir. Özellikle MAPE'nin %2'den düşük olması, modelin operasyonel amaçlarla kullanılabilir olduğu yönünde güçlü bir göstergedir.



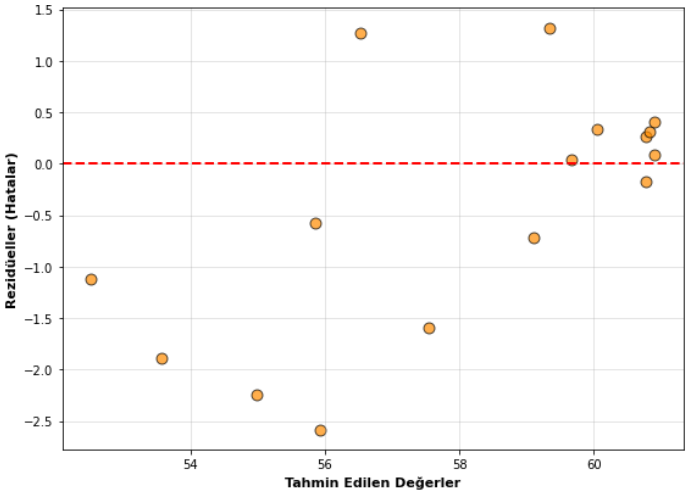
Şekil 4.13 Ömerli Barajı özellik önem derecesi

Şekil 4.13'te verilen grafik, modelde yer alan değişkenlerin su seviyesi tahminine olan katkı derecelerini göstermektedir. Su seviyesi gecikmeli verisi (SuSeviyesi_Gecikme1) 0,350 değeri ile en belirleyici değişken olup, su seviyesinin kendi geçmiş değerlerinin mevcut seviyenin en güçlü belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, hidrolojik süreçlerin dinamik yapısına işaret etmektedir. İkinci sırada yer alan su seviyesini hareketli ortalaması (SuSeviyesi_HO3) değişkeni de 0,341 önem derecesi ile mevsimselliğin ve kısa dönemli geçmiş değişimlerin kritik rol oynadığını göstermektedir. Bunun dışında 0,071 önem derecesine sahip alan ve 0,068 önem derecesine sahip SuSeviyesi_Değişim değişkenlerinin de model performansına anlamlı katkı sağladığı görülmektedir. Düşük önem derecelerine sahip yağış, sıcaklık, buharlaşma, mevsimsel değerler (YazMI, KışMI) su seviyesini etkileyen temel faktörler olmalarına rağmen, kısa dönemli su seviyesi tahminlerinde dolaylı etkilerinin model tarafından daha sınırlı kullanıldığını göstermektedir. Bu bulgu, hidroklimatolojik değişkenlerin su seviyesi üzerinde daha çok uzun vadeli veya birikimli etkiler ürettiğini, gecikmeli su düzeylerinin ise kısa vadeyi belirlediğini desteklemektedir.



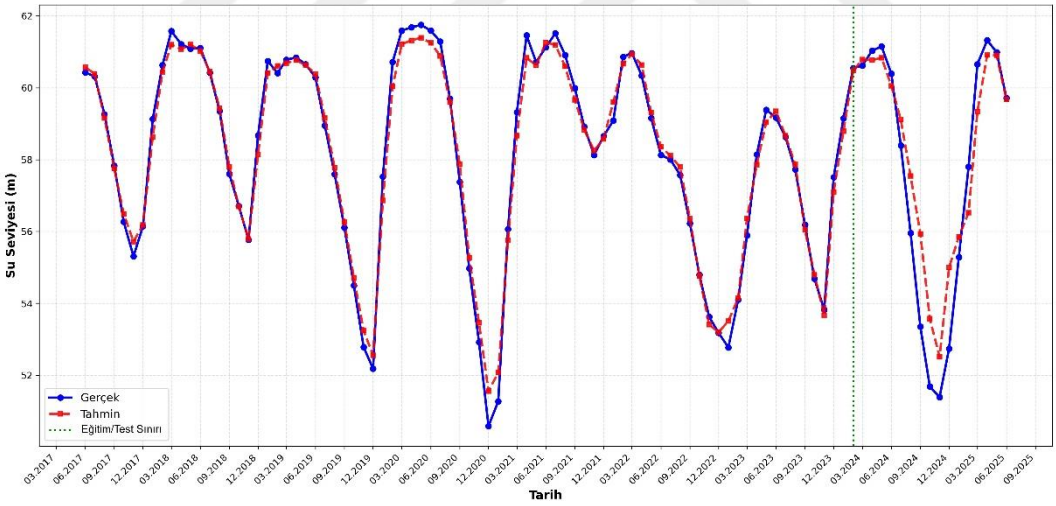
Şekil 4.14 Ömerli Barajı tahmin hatalarının dağılımı

Tahmin hatalarının dağılımını gösteren Şekil 4.14'teki histogram, hataların çift taraflı dağıldığını, ancak hata merkezinin sıfırdan hafif negatif tarafa kaydığını göstermektedir. Bu durum, modelin genel olarak su seviyesini kısmen yüksek tahmin etme eğiliminde olduğunu ifade etmektedir. Ancak uç değerlerin sınırlı olması ve dağılımın dar bir aralıkta yoğunlaşması, model stabilitesi ve genellenebilirliği açısından olumlu bir yapı sunmaktadır.



Şekil 4.15 Ömerli Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.15'te verilen rezidüel grafiği hataların tahmin edilen değerlere göre dağılımını göstermektedir. Düşük su seviyeleri için rezidüellerin genellikle negatif bölgede yoğunlaşması, modelin minimum seviyelere doğru tahmin hatasını artırdığına işaret etmektedir. Bu durum, düşük su rejimi dönemlerinde model karmaşıklığının veya özellik sayısının artırılması gerektiğini gösterir.



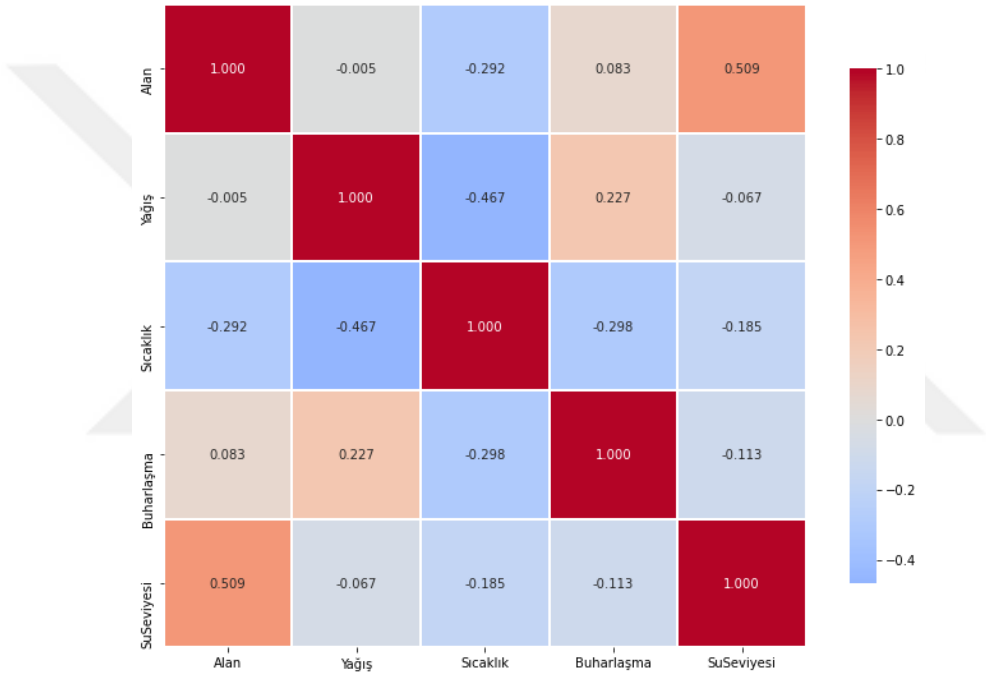
Şekil 4.16 Ömerli Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.16'da test setinin zaman serisi grafiği yer almaktadır. 2017–2025 arasındaki hidrodinamik döngünün büyük ölçüde yakalandığı görülmektedir. Özellikle tepe ve çanak noktalarının başarılı şekilde takip edilmesi, modelin hem ani düşüşlere hem de hızla yükselen su seviyelerine duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Test sınırından itibaren tahmin eğrisi ile gerçek değerler arasında bir miktar sapma olduğu görülmektedir. Bu durum, yağış ve buharlaşma gibi dışsal şokların anlık

etkilerinin modele tam yansıtılamadığı yönünde değerlendirilebilir. Genel uyum yüksek olup zaman serisi yapısının korunması güçlü bir model başarısına işaret etmektedir.

Tüm grafikler birlikte değerlendirildiğinde, su seviyesi tahmini için geliştirilmiş modelin hem doğrusal olmayan hidrodinamik ilişkileri başarılı şekilde yakaladığı hem de operasyonel tahmin süreçleri açısından yüksek güvenilirlik sunduğu görülmektedir. Özellikle gecikmeli su seviyesi değişkenlerinin belirleyici rolü, rezervuar yönetiminde zaman bağımlı eğilimlerin kritik önemini vurgulamaktadır.

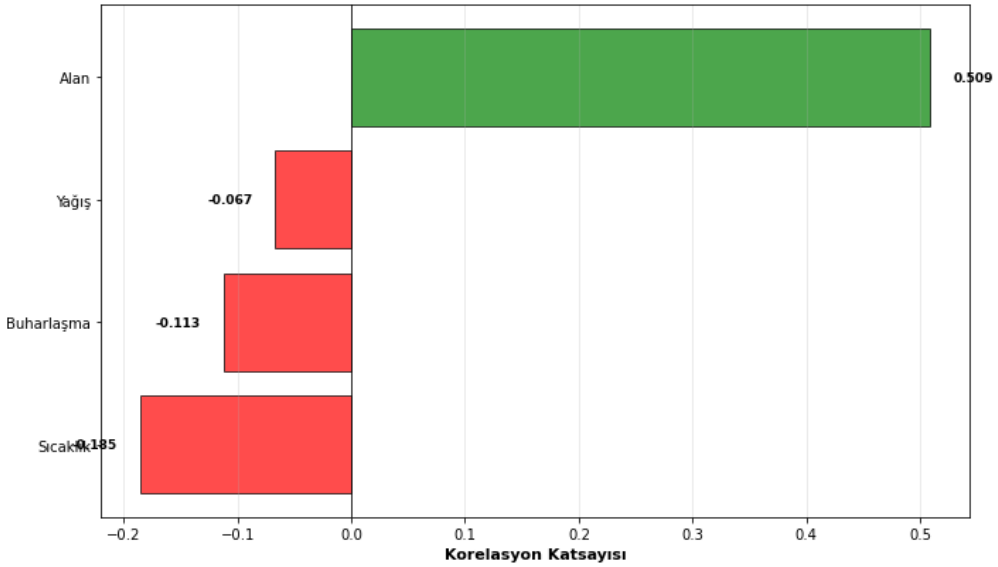
4.3.2 Elmalı Barajı Su Seviyesi Tahmini



Şekil 4.17 Elmalı Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

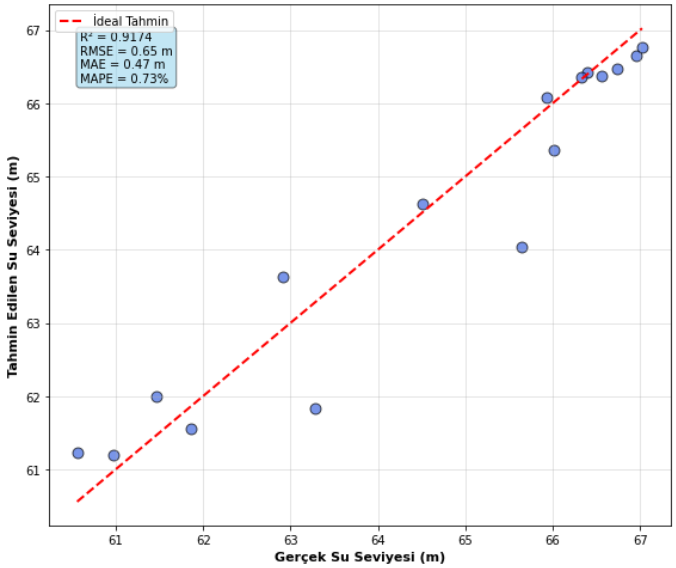
Şekil 4.17'de korelasyon ısı haritası görülmektedir. Su seviyesi değişkeni ile alan arasındaki r = 0,509 değerindeki pozitif ve orta kuvvette korelasyon, yüzey alanının doğrudan su seviyesini etkileyen bir parametre olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, su seviyesi ile yağış, sıcaklık ve buharlaşma arasındaki korelasyonların sırası ile r = -0,067, r = -0,185 ve r = -0,113 değerlerinde düşük ve negatif olması, bu değişkenlerin su seviyesini kısa vadede doğrudan açıklamakta sınırlı kaldığını, etkilerinin daha çok dolaylı ve mevsimsel süreçler üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir. Değişkenler arası ilişkilere bakıldığında, yağış ile sıcaklık arasındaki r = -0,467 değerindeki negatif korelasyon ile sıcak aylarda artan sıcaklık yağışın azalmasına ve buharlaşmanın artmasına neden olduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca alan ile yağış arasındaki r = -0,005 değerinin sıfıra yakın olması, iki değişkenin birbirinden istatistiksel olarak bağımsız olduğunu göstermektedir.

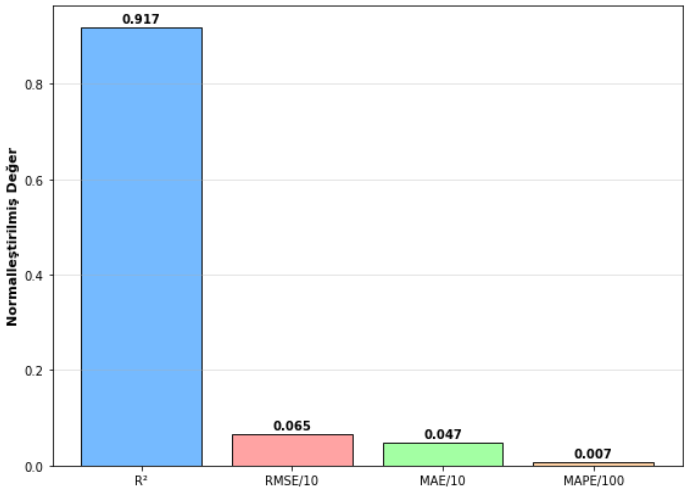


Şekil 4.18 Elmalı Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.18'de özellikler arası korelasyonun bar grafiği yer almaktadır. Genel olarak, su seviyesini açıklamada alanın en güçlü açıklayıcı değişken olduğunu, meteorolojik girdilerin ise gecikmeli etkilerle modelleme aşamasında daha anlamlı hale geldiğini ortaya koymaktadır.

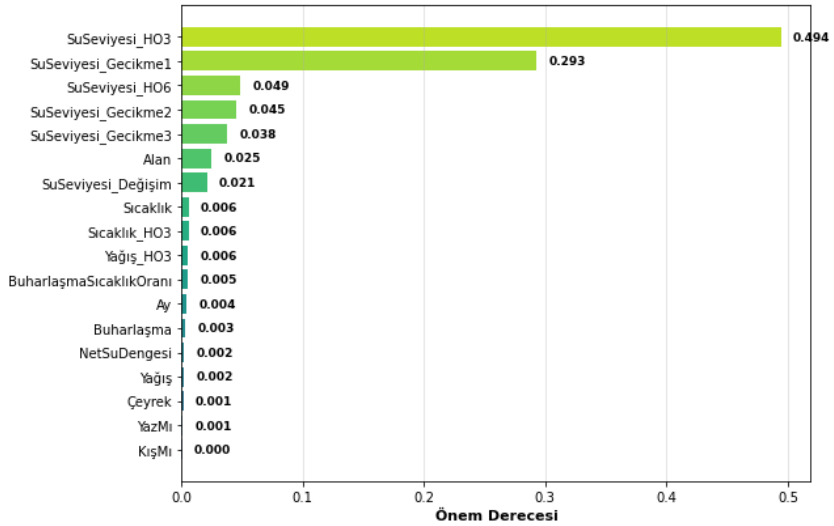


Şekil 4.19 Elmalı Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



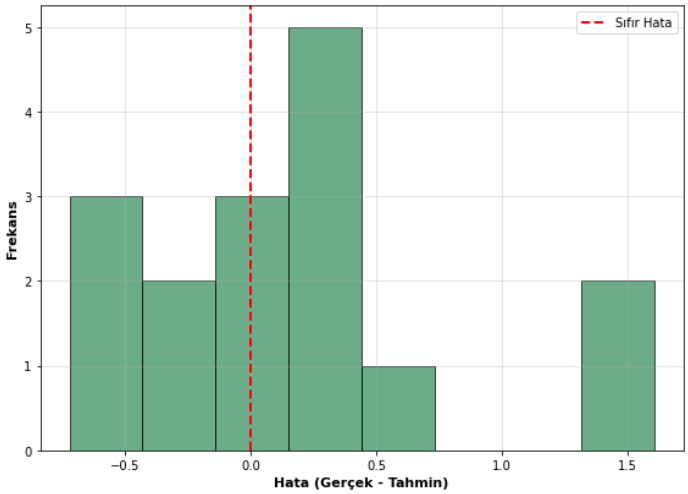
Şekil 4.20 Elmalı Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

Şekil 4.19'da gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması Şekil 4.20'de de normalleştirilmiş performans metrikleri grafiği verilmiştir. Şekil 4.19'da mavi dairelerle temsil edilen tahmin edilen su seviyesi değerleri, ideal 1:1 çizgisinin etrafında oldukça sıkı bir şekilde kümelenmiştir. Bu sıkı kümelenme, modelin tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu ve hem düşük hem de yüksek su seviyesi değerleri için sistematik bir sapmanın olmadığını göstermektedir. Gözlemlenen küçük sapmalar, modelin verideki doğal varyasyonu tamamen yakalayamadığı durumları temsil ederken, bu sapmaların büyüklüğü genel performansı düşürmeyecek kadar küçüktür. $R^2 = 0{,}9174$ değeri, modelin su seviyesi değişiminin %91,74'ünü açıklayabildiğini ve yüksek temsil gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Bu değerin 1'e yakın olması, modelin mükemmel uyum sergilediğine dair güçlü bir göstergedir ve baraj su seviyesi tahmininde yüksek güvenilirliğe işaret eder. RMSE = 0,65 m ve MAE = 0,47 m, model tahmin hatalarının operasyonel baraj seviyeleri için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu işaret etmektedir. MAPE = %0,73, yüzdelik hata düzeyinin oldukça düşük olduğunu göstermekte ve modelin yüksek doğrulukla tahminde bulunduğunu teyit etmektedir. Bu sonuçlar, modelin istatistiksel anlamda yüksek doğrulukla çalıştığına işaret eder.



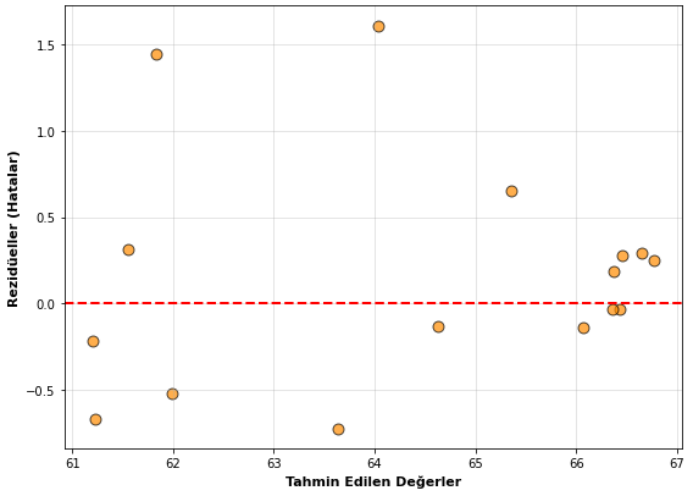
Şekil 4.21 Elmalı Barajı özellik önem derecesi

Şekil 4.19'da verilen özellik önem derecesi grafiği Elmalı Barajı su seviyesi tahmininde kullanılan RO modelinde hangi değişkenlerin ne ölçüde etkili olduğunu nicel olarak ortaya koymaktadır. 0,494 önem derecesindeki SuSeviyesi_HO3 ve 0,293 önem derecesindeki SuSeviyesi_Gecikme1 gibi geçmiş dönem su seviyesi parametrelerinin açık ara baskın olması, su seviyesi tahminlerinde geçmiş değerlerin güçlü otokorelasyon oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Diğer özelliklerin düşük önem skorları (alanın 0,025 derecesinde olması ve sıcaklığın 0,006 derecesinde olması), bu değişkenlerin su seviyesini dolaylı ve zamanla daha zayıf etkilediğini, ayrıca gecikmeli özelliklerin kullanımıyla bu etkinin gölgede kaldığını göstermektedir.



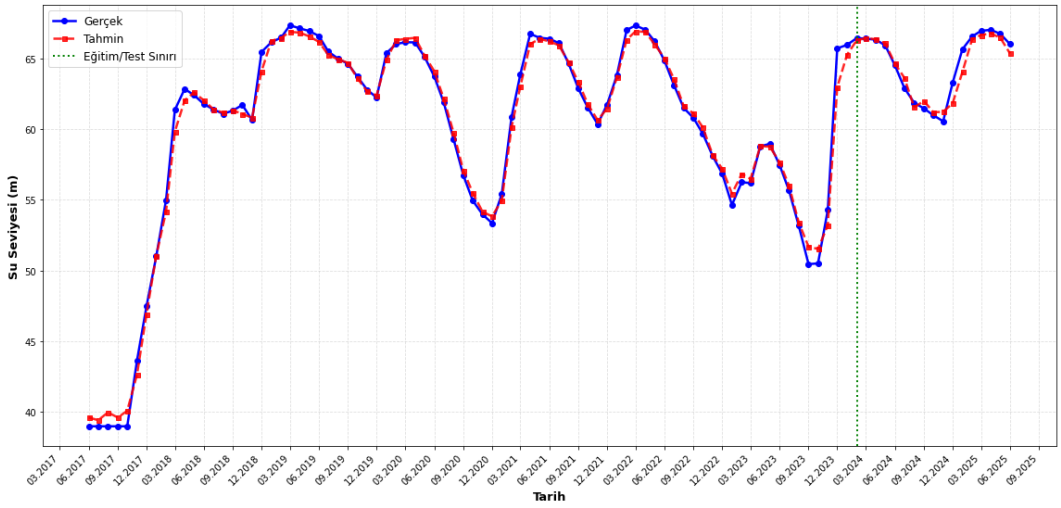
Şekil 4.22 Elmalı Barajı tahmin hatalarının dağılımı

Şekil 4.22'de verilen tahmin hataları histogramı, hataların büyük çoğunluğu -0,5 ile +0,5 m aralığında yoğunlaştığını ve dağılımın sıfır hata ekseni etrafında simetrik olmadığını göstermektedir. Hata dağılımının büyük oranda sıfır noktasının sağında toplandığı gözlemlenmektedir. Bu durum, modelin gerçek değerleri daha düşük tahmin etme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca 1,5 m civarında birkaç uç hata değeri görülmektedir.



Şekil 4.23 Elmalı Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.23'te görülen grafikte, rezidüel noktaların sıfır hata çizgisi etrafında rastlantısal dağılım göstermesi, modelde belirgin bir yapısal yanlılık bulunmadığını göstermektedir. Ancak yüksek tahmin edilen değerlere karşılık küçük pozitif rezidüel kümelenmeleri, su seviyesi yüksekken modelin kısmen daha az isabetli tahminlerde bulunabileceğini ifade etmektedir.



Şekil 4.24 Elmalı Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.24'te verilen zaman serisi grafiğinde, eğitim aşamasında modelin geçmiş verileri başarıyla öğrendiği ve varyans değişimlerine uyum sağladığı gözlemlenmiştir. 2017 sonundaki ani yükseliş ve 2020'deki keskin düşüş gibi kritik kırılma noktalarında modelin gecikme yaşamadan tepki vermesi, modelin dinamik yapısını kanıtlamaktadır. Eğitim/Test sınırı sonrasında, modelin daha önce görmediği veriler üzerindeki performansı oldukça iyi olduğu görülmektedir. Gerçek ve tahmin edilen serilerin test aşamasında da paralel seyretmesi, modelde aşırı öğrenme probleminin olmadığını ve modelin gelecekteki su seviyesi değişimlerini öngörme potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bazı ekstrem noktalarda (örneğin 2023'teki sert düşüş anı) tahmin ve gerçek değerler arasında çok küçük sapmalar gözlemlenmiştir.

Analiz kapsamında kullanılan grafikler bütünsel olarak incelendiğinde, RO algoritmasının su seviyesi tahmininde güçlü bir temsil kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

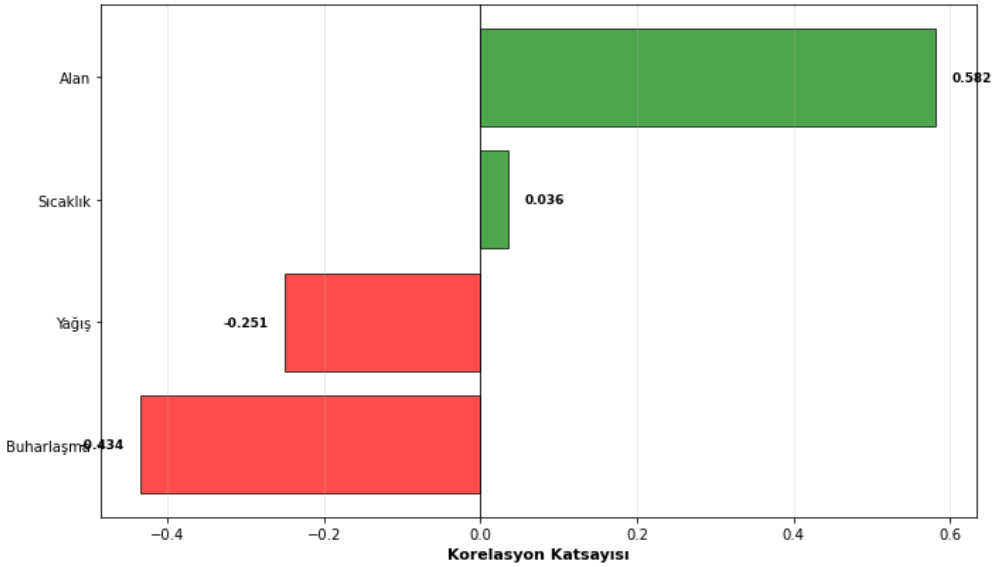
4.3.3 Sazlıdere Barajı Su Seviyesi Tahmini



Şekil 4.25 Sazlıdere Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

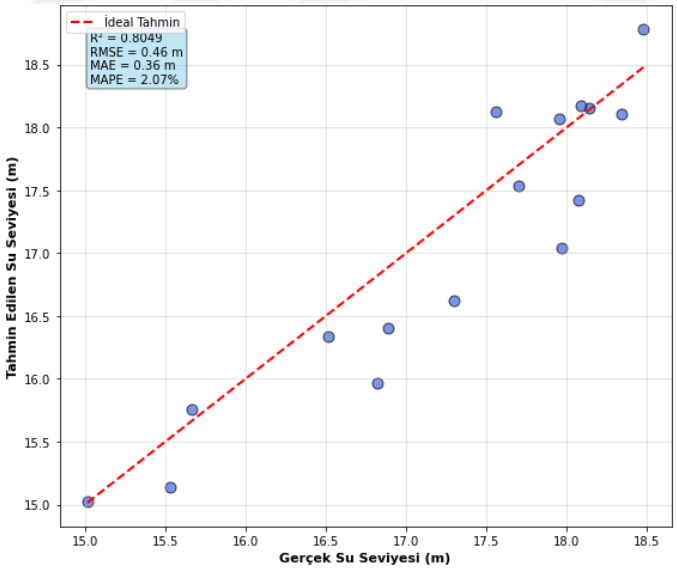
Şekil 4.25'te görülen ısı haritasında, alan ile su seviyesi arasındaki r = 0,582 değerindeki orta düzeyde pozitif korelasyon, su seviyesindeki artışların yüzey alanının genişlemesiyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Yağış r = -0,251 değeri ile su seviyesiyle beklenenin aksine zayıf bir negatif ilişki göstermiştir; bu durum yağışın etkisinin dolaylı ve gecikmeli olabileceğini, doğrudan su seviyesine aynı ay içinde yansımadığını ve havza ölçekli hidrolojik akış dinamiklerinin rol oynadığını düşündürmektedir. Buharlaşmanın su seviyesiyle arasındaki r = -0,434 değerindeki negatif korelasyon ise buharlaşmanın su seviyesinin azalmasında meteorolojik bir sürücü olarak önemli bir faktör olduğunu gösterir. Yağış ile sıcaklık arasındaki r = -0,430 değerindeki orta düzeyde negatif korelasyon, meteorolojik açıdan yağışlı dönemlerin genellikle daha düşük sıcaklıklarla eşleştiğini göstermektedir. Buharlaşma ile su seviyesi arasındaki r = -0,434 değerindeki anlamlı negatif ilişki ise yüksek buharlaşma dönemlerinde su seviyesinin azalmasına işaret ederek fiziksel sürecin beklenen yönünü doğrulamaktadır. Diğer değişkenler arasındaki ilişkilerin görece zayıf veya istatistiksel olarak anlamlandırması düşük olması, su seviyesi dinamiklerinin çoklu faktör etkileşimi altında şekillendiğini göstermektedir. Bu bulgular su seviyesinin

kısa dönemli meteorolojik girdilerden ziyade birikimli hidrolojik süreçlerle şekillendiğini göstermektedir.

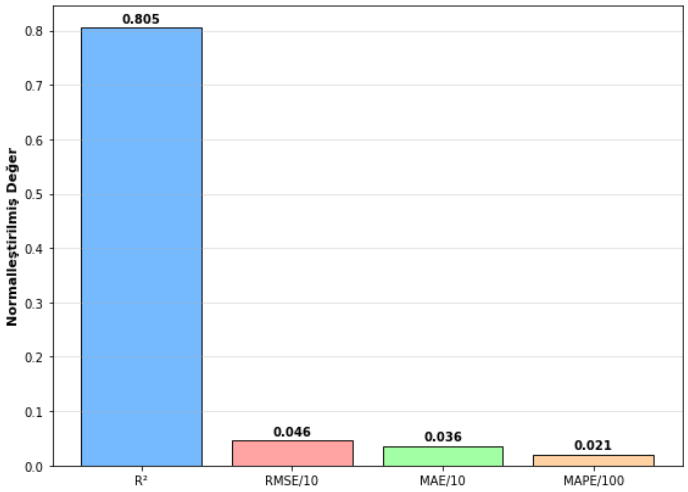


Şekil 4.26 Sazlıdere Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.26'da su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon bar grafiği görülmektedir. Burada alanın en belirleyici pozitif temel özellik olduğu görülmektedir.

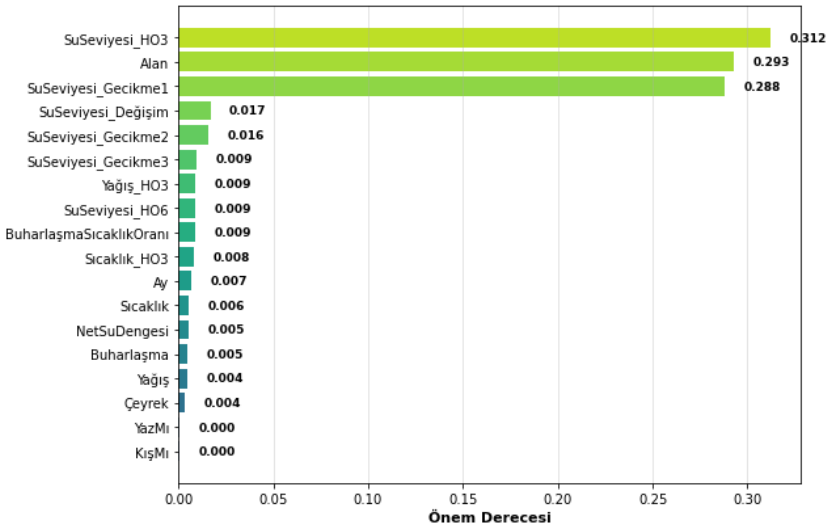


Şekil 4.27 Sazlıdere Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



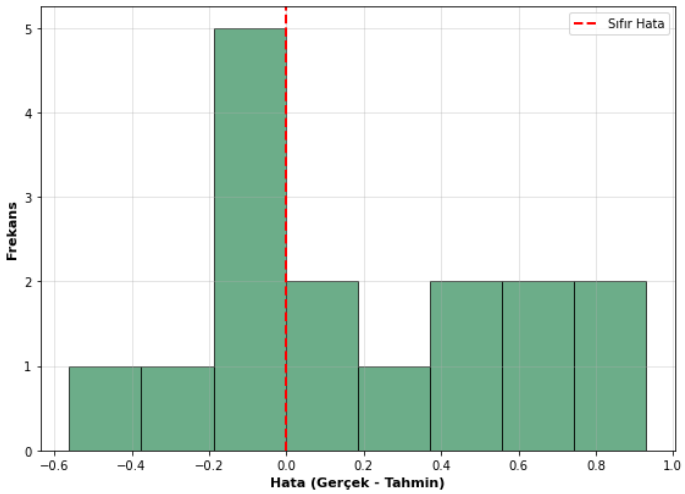
Şekil 4.28 Sazlıdere Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

Şekil 4.27'de gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması ve Şekil 4.28'de de normalleştirilmiş performans metrikleri görülmektedir. Şekil 4.27'deki gerçek ve tahmin edilen su seviyelerinin diyagonal referans çizgisi etrafında dağılımı, modelin yüksek doğrulukta bir uyum sağladığını göstermektedir. Veri noktalarının ideal çizgiden hafifçe uzak olduğu yerler tahmin duyarlılığının bir miktar azaldığını, ancak genel eğilimin korunmaya devam ettiğini göstermektedir. R^2 = 0,8049, su seviyesi varyansının yaklaşık %80'inin model tarafından açıklandığını ifade etmektedir. RMSE = 0,46 m ve MAE = 0,36 m, mutlak hataların düşük olduğunu gösterirken MAPE = %2,07, tahminlerin su seviyesi ölçeğinde oldukça düşük göreceli hatalarla üretildiğini kanıtlamaktadır. Noktaların referans çizgisi etrafındaki simetrik dağılım, modelin sapmasız tahmin eğilimi sergilediğini, ancak uç değerlerde hafif sapmalar olabileceğini ima etmektedir.



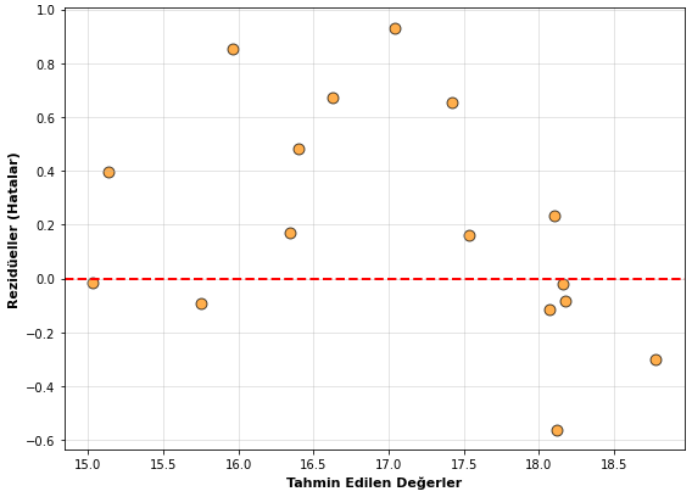
Şekil 4.29 Sazlıdere Barajı özellik önem derecesi

Şekil 4.29'da görülen grafikte, SuSeviyesi_HO3, alan ve SuSeviyesi_Gecikme1'in sırası ile 0,312, 0,293 ve 0,288 önem dereceleri ile model performansını belirleyen üç temel bileşen olduğu görülmektedir. Bu durum, su seviyesi tahmininde gecikmeli seviye bilgilerinin ve fiziksel genişleme parametresinin baskın belirleyiciler olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, meteorolojik değişkenlerin görece daha düşük önem dereceleri, kısa dönemli atmosferik girdilerin su seviyesi üzerindeki etkilerinin dolaylı ve gecikmeli olduğunu göstermektedir. Yaz ve kış aylarının (KışMı, YazMı) önem derecesinin sıfıra yakın çıkması, mevsimsel etkinin doğrudan ay değişkeninden ziyade, geçmiş su seviyesi trendleri ve alan değişimleri üzerinden dolaylı olarak modele dahil edildiğini göstermektedir.



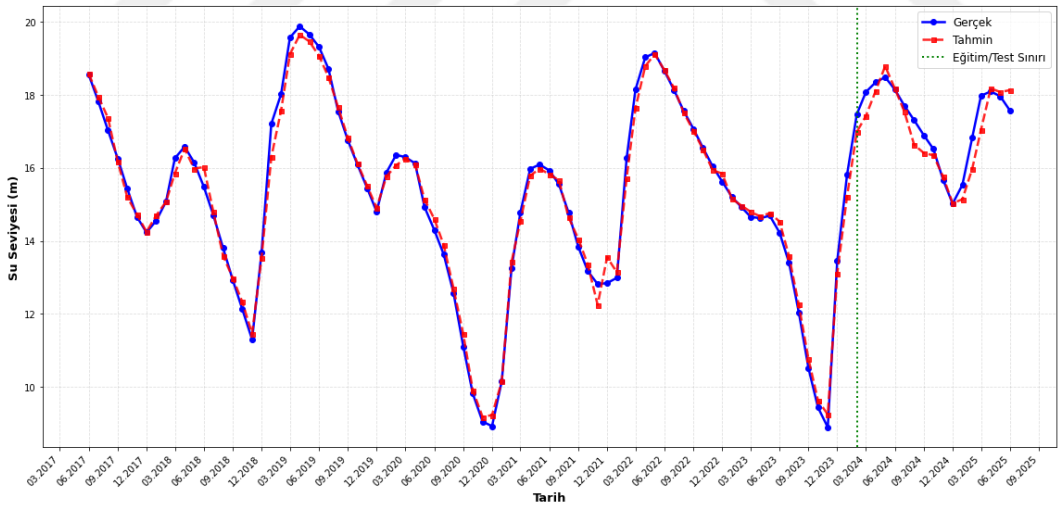
Şekil 4.30 Sazlıdere Barajı tahmin hatalarının dağılımı

Şekil 4.30'da verilen tahmin hatalarının dağılım grafiği, hataların çoğunlukla –0,2 ile 0 m aralığında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, modelin birçok gözlemde gerçeğe çok yakın tahminler ürettiğini ve yansızlık özelliğine yaklaştığını gösterir. Toplam hata aralığının yaklaşık -0,6 m ile +0,95 m arasında sınırlı kalması, modelin uç değerlerde dahi 1 metreden daha az bir yanılma payı ile çalıştığını kanıtlar. Bununla birlikte, pozitif hataların negatif hatalara göre bir miktar baskın olması, modelin bazı dönemlerde su seviyesini azımsama eğiliminde olabileceğine işaret eder. Dağılımın tek modlu yapısı, hataların rastgele dağıldığını ve modelleme varsayımlarının geçerli olduğunu desteklemektedir. Özetle, hata dağılım histogramı, modelin sistematik büyük bir hatadan ziyade, yönetilebilir ve düşük ölçekli tesadüfi hatalar ile çalıştığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.31 Sazlıdere Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.31'de rezidüel grafiği görülmektedir. Veri noktalarının sıfır hata çizgisi etrafında belirli bir belirgin şekil oluşturmadan dağılmış olması, modelin verideki temel ilişkiyi başarıyla yakaladığını ve geriye kalan hataların büyük oranda rastgele hata olduğunu gösterir. Hataların çoğunlukla -0,6 ve +0,9 bandı arasında kalması, modelin tahmin kararlılığını gösterir. 17,0 m civarında yaklaşık +0,9 m'lik bir tepe hatası görülse de, genel dağılım sıfır çizgisine yakın seyretmektedir.



Şekil 4.32 Sazlıdere Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.32'de verilen grafikte, baraj su seviyesindeki periyodik yükseliş ve düşüşlerin model tarafından son derece başarılı bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin zaman ekseni boyunca neredeyse çakışması, modelin sistem dinamiklerini başarıyla öğrendiğini gösterir. Test seti incelendiğinde, modelin daha önce görmediği veriler üzerinde bile kararlı

performansını sürdürdüğü görülmektedir. Bu durum, modelin sadece geçmiş verileri ezberlemediğini, geleceğe yönelik güçlü bir tahmin kapasitesine sahip olduğunu kanıtlar. Model, 2020 sonundaki ekstrem düşük seviyeleri ve 2019 başındaki yüksek seviyeleri yakalamada yüksek hassasiyet göstermiştir. 2021 sonu ve 2024 ortasında çok küçük sapmalar gözlemlense de, tahmin eğrisi gerçek verinin yönelimiyle genel olarak uyumludur.

Genel olarak RO modeli, Sazlıdere Barajı su seviyesi tahmininde yüksek doğrulukla çalışan ve mevsimsel hidrodinamik davranışları başarıyla yakalayan bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Üretilen hata değerlerinin düşük olması, modelin baraj işletme kararlarında kullanılabilecek güvenilir bir tahminleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

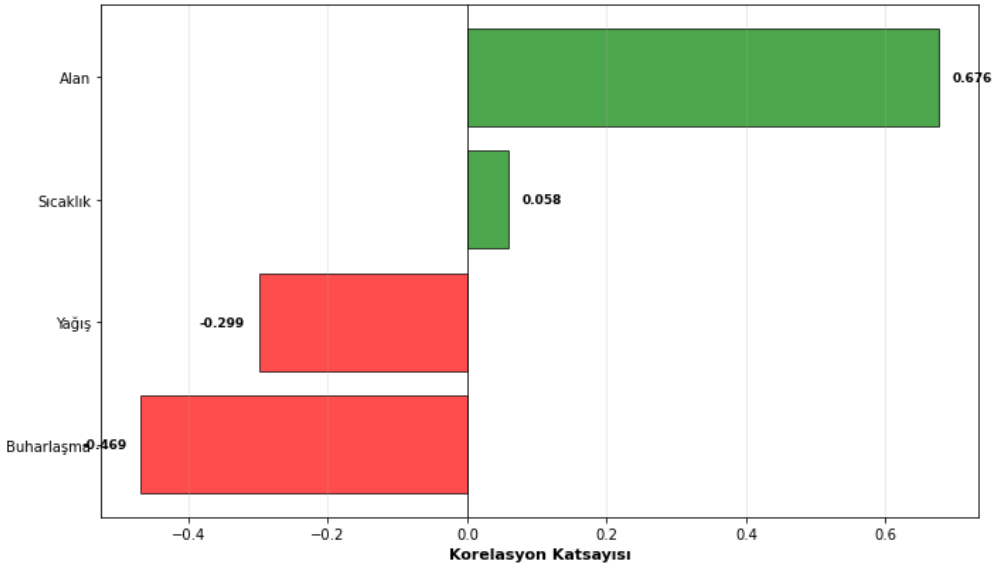
4.3.4 Terkos Barajı Su Seviyesi Tahmini



Şekil 4.33 Terkos Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

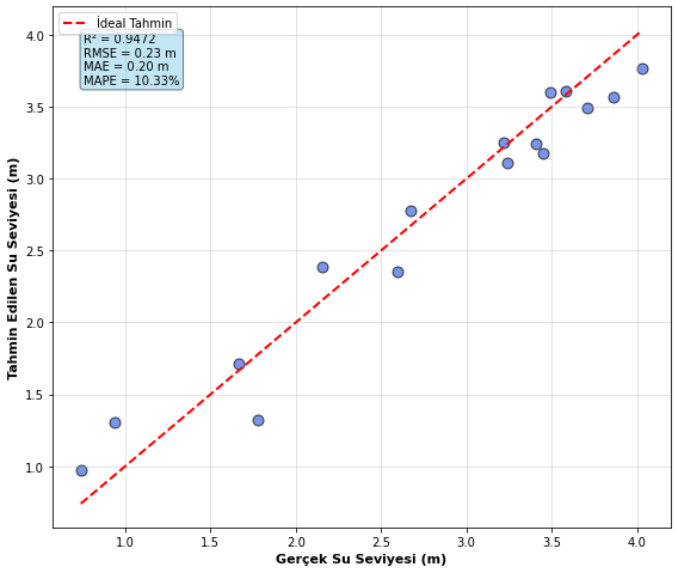
Şekil 4.33'te alan ile su seviyesi arasındaki r = 0,676 değerindeki korelasyon, baraj yüzey alanındaki artışın tipik olarak daha yüksek su seviyesi değerleri ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, baraj su seviyesinin fiziksel olarak alan genişlemesiyle paralel ilerlemesidir. Sıcaklık r = 0,058 korelasyonuyla su seviyesi ile oldukça zayıf ilişki göstermekte olup, tek başına su seviyesi dalgalanmalarını açıklamada düşük açıklayıcılığa sahiptir. Buna karşın buharlaşma ile su seviyesi arasındaki r = -0,469 değerindeki negatif yöndeki ilişki artan buharlaşmanın su

seviyesinde düşüş eğilimi oluşturduğunu göstermektedir. Yağış ile su seviyesi arasındaki r = -0,299 değerindeki negatif ilişki ilk bakışta beklenmeyen bir durum gibi görünse de Terkos Barajı özelinde yağışın kısa vadede belirgin hacim artışı yaratmamasından kaynaklanmaktadır; yağışın baraja doğrudan yansıması zaman gecikmeleri ile şekillenir. Bu nedenle gecikmeli su seviyesi değişkenlerinin modele dahil edilmesi, tahmin performansını anlamlı biçimde artırmaktadır.

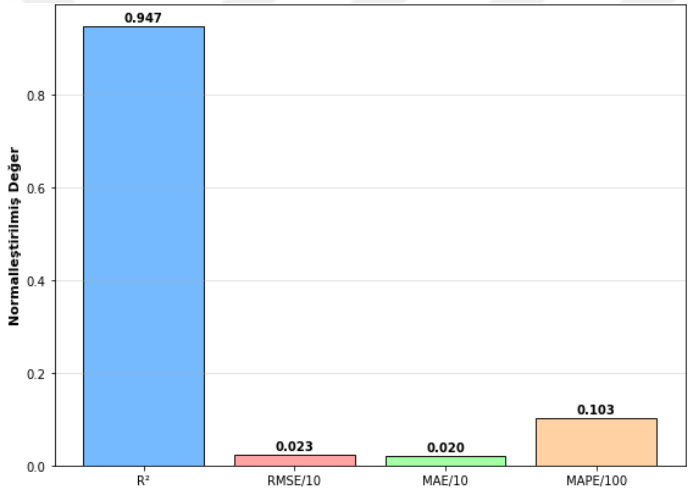


Şekil 4.34 Terkos Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.34'te su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyonun bar grafiği yer almaktadır. Alan değişkeni pozitif ve güçlü korelasyon gösteren tek temel değişken olarak öne çıkmaktadır.



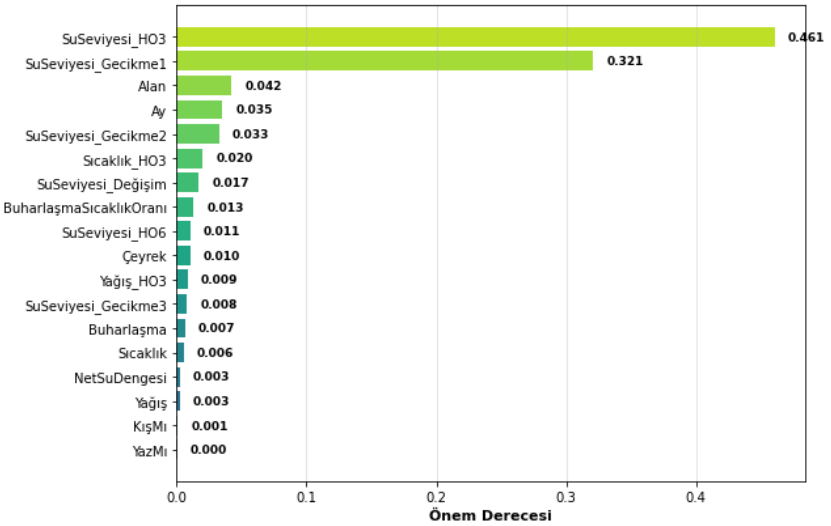
Şekil 4.35 Terkos Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



Şekil 4.36 Terkos Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

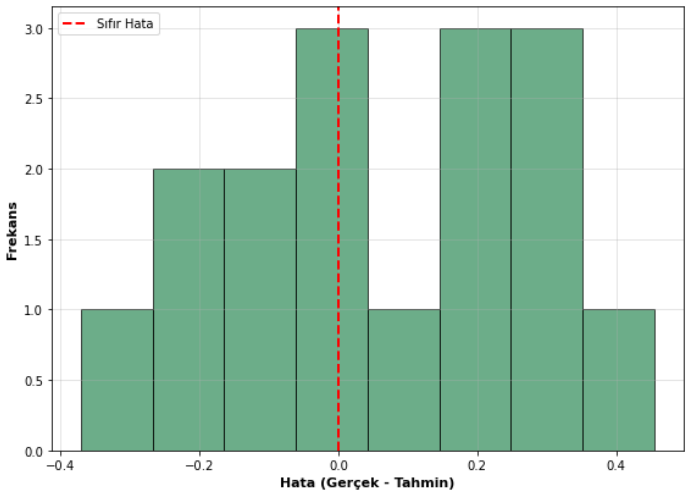
Şekil 4.35'teki dağılım grafiği, model tahminlerinin gerçek ölçümlerle ne derece örtüştüğünü göstermektedir. Noktaların büyük çoğunluğunun ideal tahmin çizgisi etrafında kümelenmesi, sistematik sapmanın sınırlı olduğuna işaret etmektedir. R^2 = 0,947, açıklanan varyansın oldukça yüksek olduğunu ve modelin veri dinamiklerini başarılı bir şekilde öğrendiğini göstermektedir. RMSE = 0,23 m ve MAE = 0,20 m gibi düşük hata değerleri, modelin mutlak hata seviyesinde de güvenilir bir performans sergilediğini doğrulamaktadır. MAPE = %10,33 değeri ise tahminlerin ortalama göreceli hata payının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 4.36'daki grafik ile de modelin en güçlü yönünün R^2 olduğu açıkça görülmektedir. Diğer hata metriklerinin düşük

normalleşmiş değerlerde kalması, modelin yüksek doğruluk-düşük hata bileşimini dengeli bir şekilde sağladığını ortaya koymaktadır.



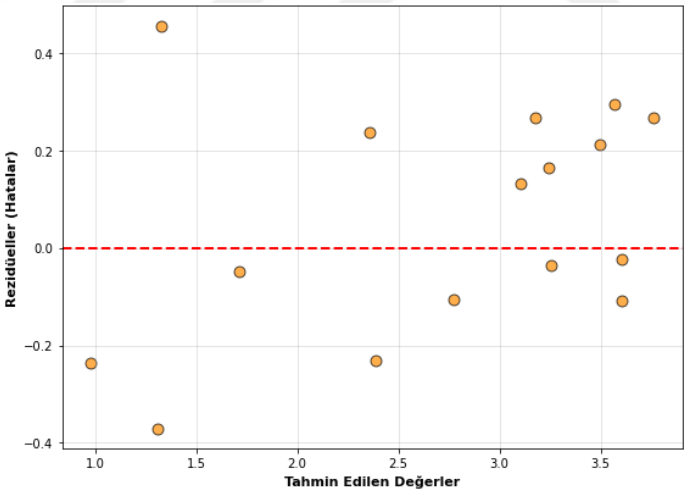
Şekil 4.37 Terkos Barajı özellik önem derecesi

Şekil 4.37 su seviyesi tahmininde kullanılan değişkenlerin model tarafından ne ölçüde kullanıldığını göstermektedir. SuSeviyesi_HO3 ve SuSeviyesi_Gecikme1 toplam önem derecesinin büyük kısmını oluşturarak su seviyesi değişimlerinin zaman bağımlılığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, baraj su seviyesi tahminlerinde geçmiş dönem verilerinin vazgeçilmez olduğunu doğrulamaktadır. Alan değişkeninin 0,042 değerindeki nispeten yüksek önem derecesi, barajın morfolojik yapısının doğrudan su seviyesi değişimlerine yansıdığını göstermektedir. Mevsimsel değişkenler düşük ama tamamlayıcı katkı sağlamış, özellikle sıcaklık ve buharlaşma entegrasyonu modelin mevsimsel davranışı öğrenmesine destek olmuştur.



Şekil 4.38 Terkos Barajı tahmin hatalarının dağılımı

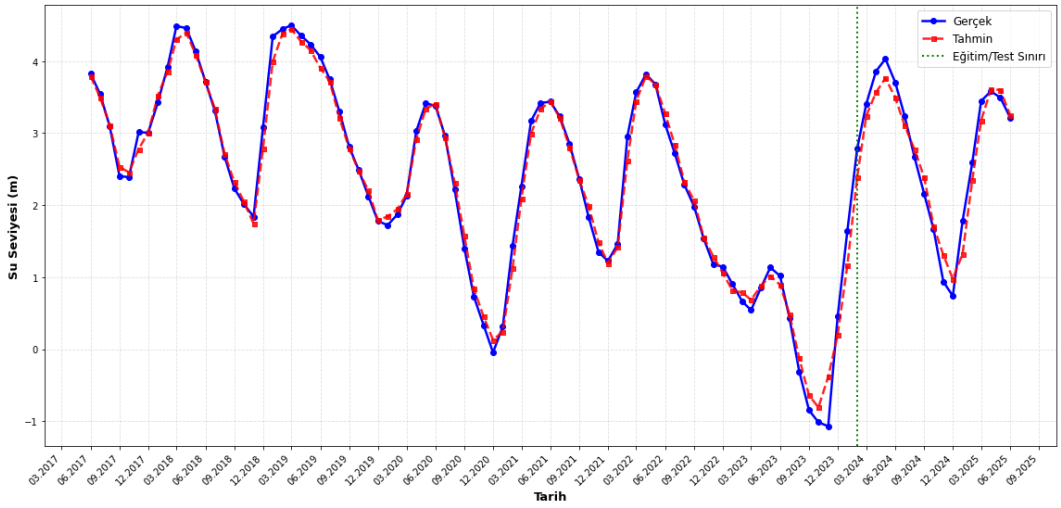
Şekil 4.38'de görülen tahmin hatalarının dağılımı grafiği, hata dağılımının yaklaşık olarak simetrik bir yayılım eğilimi sergilediğini göstermektedir. Hataların büyük çoğunluğu -0,3 ile +0,4 m aralığında yoğunlaşmış olup, sıfır hata çizgisi etrafında dağılan yapı, modelde belirgin bir yanlılık olmadığını kanıtlamaktadır. Bu dağılım, hataların rastgelelik özelliğini destekler niteliktedir ve modelin aşırı öğrenme riski taşımadığını göstermektedir.



Şekil 4.39 Terkos Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.39, rezidüellerin tahmin edilen değerlere göre dağılımı, modelin hatalarında homojenlik varsayımına büyük ölçüde uyduğunu göstermektedir. Hataların çoğunlukla ±0,4 m bandında kalması, tahminlerin dar bir güven aralığında gerçekleştiğini kanıtlar. Rezidüellerde belirli bir trend gözlenmemesi, model performansının farklı su seviyesi aralıklarında dengeli olduğunu ifade etmektedir. Bununla birlikte bazı uç değerlerin tahmin edilen düşük su seviyelerinde daha

yüksek hata ürettiği, su seviyesi minimum dönemlerinde meteorolojik dinamiklerin daha değişken olmasından kaynaklanmaktadır.



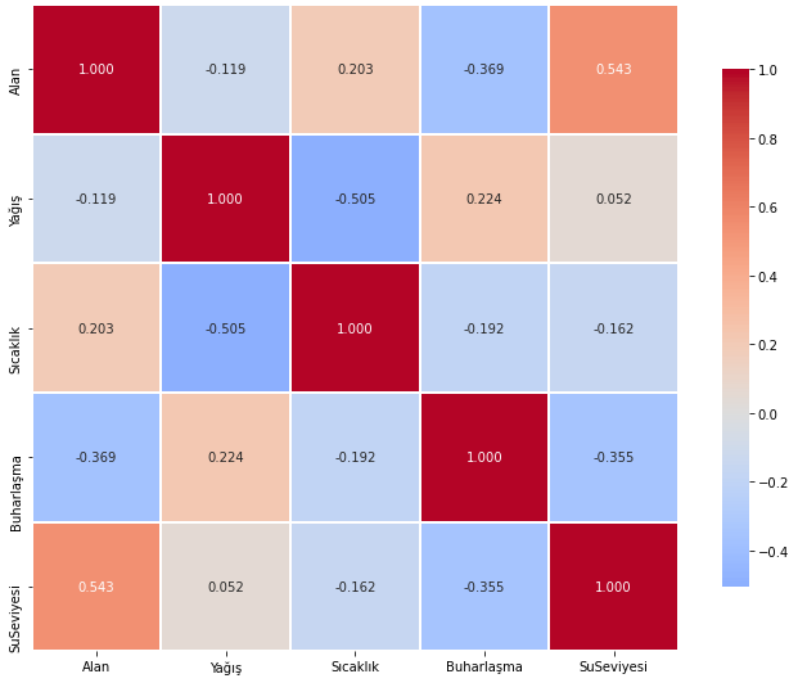
Şekil 4.40 Terkos Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.40 ile modelin, verideki mevsimsel ve yıllık dalgalanmaları yüksek bir doğrulukla yakaladığı görülmektedir. Özellikle su seviyesinin tepe yaptığı 2019 başı ve dip yaptığı 2023 sonu gibi ekstrem dönemlerde, tahmin edilen değerlerin gerçek değerler ile uyumu dikkat çekmektedir. Grafikte 2023 yılının sonunda su seviyesinin sıfırın altına düştüğü ekstrem bir kuraklık veya işletme durumu gözlemlenmektedir. Modelin bu ani ve sert düşüşü, ardından gelen 2024 başındaki hızlı yükselişi herhangi bir zaman gecikmesi yaşamadan tahmin edebilmesi, modelin dinamik karakteristiğinin güçlü olduğunu kanıtlamaktadır. Test bölgesinde, modelin daha önce görmediği güncel veriler üzerindeki başarısı devam etmektedir. 2024 ortasındaki zirve noktası ve 2025 başındaki dalgalanmaların gerçek veriyle paralel seyretmesi, modelin genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu ve gelecekteki değişimleri öngörmede güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir. Tahmin eğrisinin gerçek veriyi takip ederken sergilediği küçük sapmalar, genellikle ani değişim noktalarında yoğunlaşmaktadır. Ancak bu sapmaların büyüklüğü, serinin genel varyansına oranla oldukça düşüktür ve modelin genel trendden kopmadığı gözlemlenmektedir.

Tüm grafikler bir arada değerlendirildiğinde, model Terkos Barajı su seviyesi tahmininde yüksek doğruluk ve istikrar sağlamaktadır. Gecikmeli su seviyesi değişkenlerinin baskın rolü, su seviyesinin otokorelasyon yapısını doğrulamakta; alan, buharlaşma ve yağış gibi hidrolojik faktörler ise mevsimsel dinamikleri

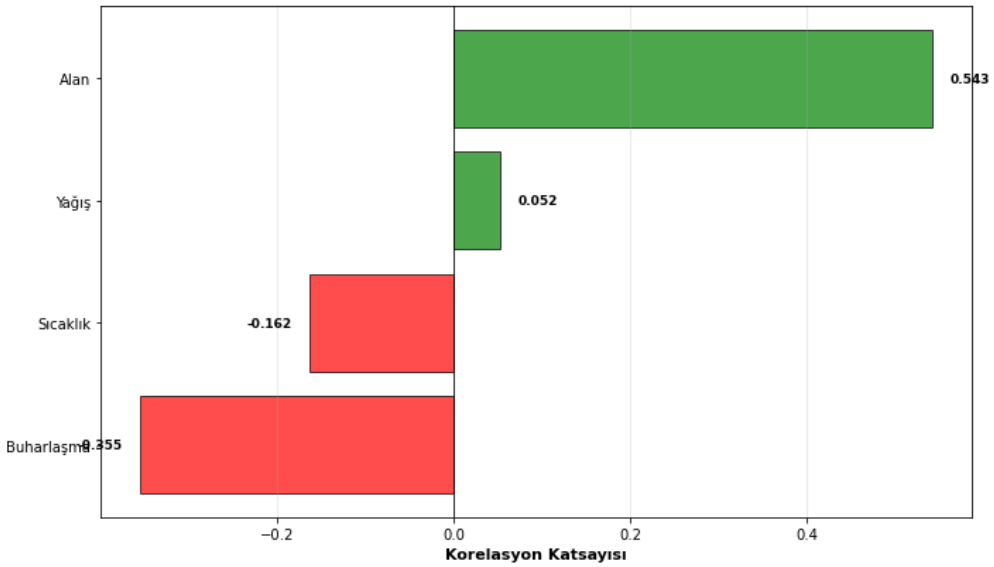
tamamlayıcı şekilde modele katkı sağlamaktadır. Hataların dağılımı ve rezidüel incelemeleri, modelin yapısal sapma göstermediğini ve tahminlerin güvenilir olduğunu desteklemektedir.

4.3.5 Alibey Barajı Su Seviyesi Tahmini



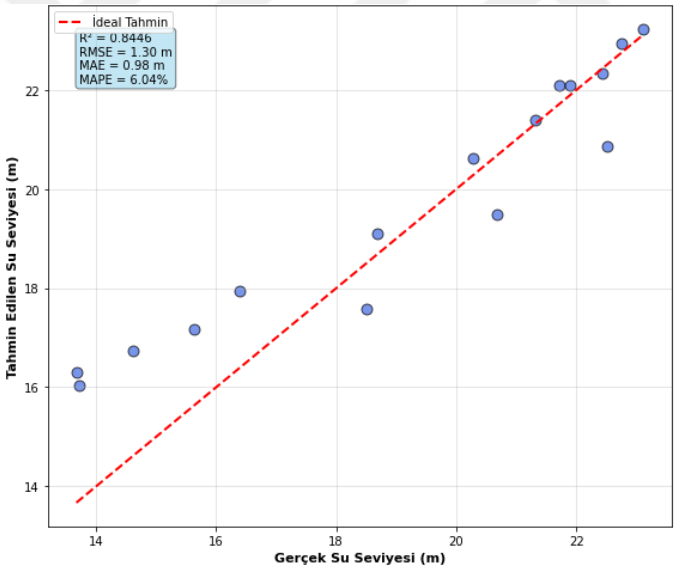
Şekil 4.41 Alibey Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

Şekil 4.41'de temel özellikler arası korelasyon ısı haritası yer almaktadır. Su seviyesi ile baraj yüzey alanı arasında r = 0,543 ile pozitif yönlü orta kuvvette bir korelasyon gözlenmesi, hidrolojik açıdan su seviyesindeki artışların barajın yüzey alanını genişlettiğini göstermektedir. Buna karşın, su seviyesi ile sıcaklık arasındaki r = -0,162 ve su seviyesi ile buharlaşma arasındaki r = -0,355 negatif korelasyonları, yüksek sıcaklık ve buharlaşmanın su kaybını artırdığı ve rezervuar su seviyesini düşürücü yönde etkilediğini göstermektedir. Yağışın su seviyesi arasındaki r = 0,052 değerindeki zayıf korelasyon ise yağışın kısa süreli–yerel etkilerinin su seviyesi üzerinde doğrudan belirleyici olmadığını göstermektedir. Yağış ile sıcaklık arasındaki r = -0,505 değerindeki negatif korelasyon, bölgedeki yağışlı dönemlerin genellikle daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğini göstermektedir.

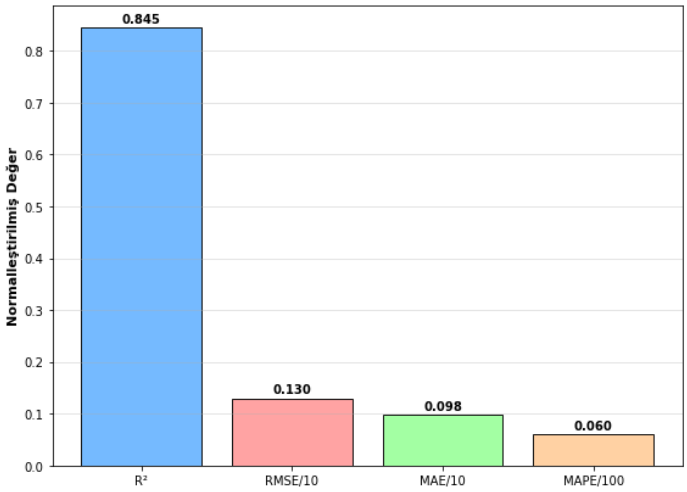


Şekil 4.42 Alibey Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.42'de su seviyesi özelinde yapılan korelasyon analizinde, alan değişkeninin en etkili pozitif belirleyici olduğu görülmektedir.

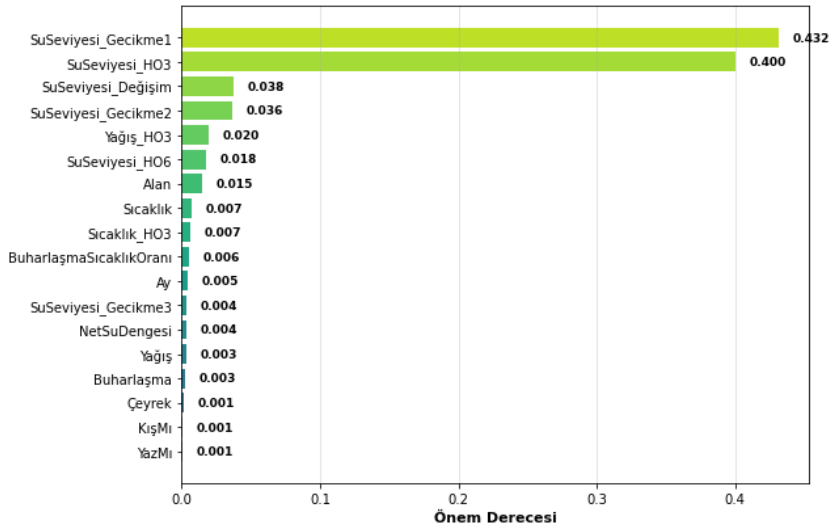


Şekil 4.43 Alibey Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



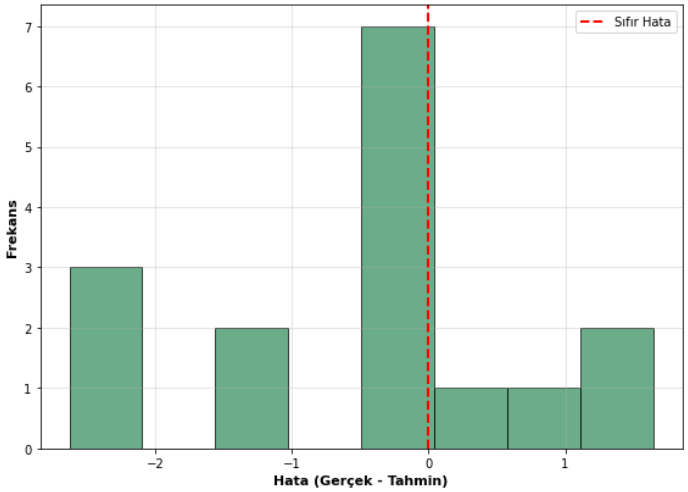
Şekil 4.44 Alibey Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

Şekil 4.43'te gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması ve Şekil 4.44'te normalleştirilmiş performans metrikleri grafiği yer almaktadır. Şekil 4.43'te veri noktalarının ideal tahmin çizgisi etrafında genel bir paralellik sergilediği görülmektedir. Ancak, 14-16 m aralığındaki düşük su seviyelerinde modelin gerçeğin bir miktar üzerinde tahmin yapma eğilimi gösterdiği, 20-23 m gibi yüksek seviyelerde ise ideal çizgiye çok daha yakın ve tutarlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. R^2 = 0,8446 değeri, su seviyesindeki değişimlerin büyük bir kısmının model tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Hata metrikleri incelendiğinde RMSE = 1,30 m ve MAE = 0,98 m gibi düşük hata değerleri modelin uygulama ölçeğinde kabul edilebilir düzeyde performans sergilediğini doğrulamaktadır. MAPE = %6,04 olması, baraj yönetimi açısından operasyonel kullanımda da güvenilir tahmin çıktıları sağlandığını desteklemektedir.



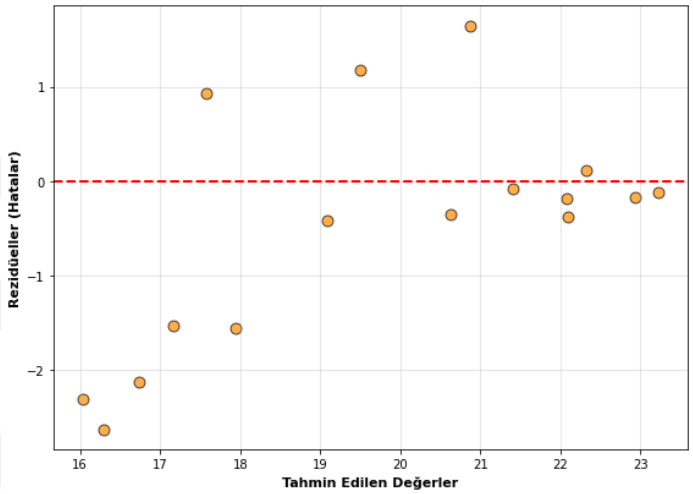
Şekil 4.45 Alibey Barajı özellik önem dereceleri

Şekil 4.45'te verilen özellik önem sıralaması, SuSeviyesi_Gecikme1 = 0,432 ve SuSeviyesi_HO3 = 0,400 değerlerinin modelin ana belirleyicileri olduğunu göstermektedir. Bu durum, Alibey Barajı su seviyesi davranışının zaman serisi iç bağımlılığı ve mevsimselliği yüksek bir hidrolojik sistem olduğunu göstermektedir. Yağış ve sıcaklık gibi meteorolojik bileşenlerin daha düşük önem seviyelerine sahip olması, havzadaki yağışların doğrudan modele yansımadığını ve yüzey akışının gecikmeli etkilerle sisteme dahil olduğunu göstermektedir. Yaz, Kış ve Çeyrek gibi indikatörlerin 0,001 seviyesindeki etkisi, modelin mevsimselliği takvimsel veriden ziyade, suyun fiziksel değişim trendlerinden öğrenmeyi tercih ettiğini işaret etmektedir.



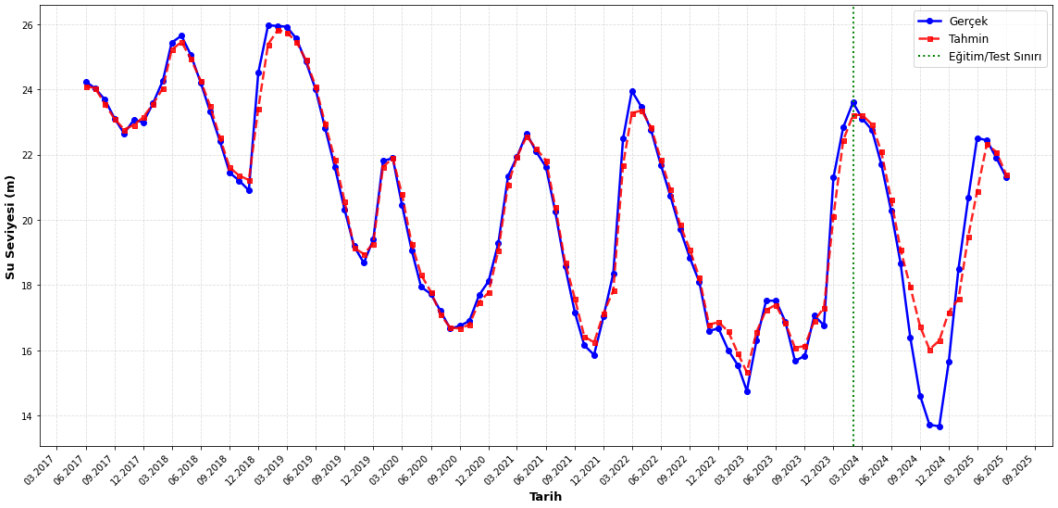
Şekil 4.46 Alibey Barajı tahmin hatalarının dağılımı

Şekil 4.46'daki hata dağılımı grafiği, sıfır hata etrafında asimetrik fakat çoğunlukla düşük genlikli bir dağılım göstermektedir. Hataların büyük kısmının -1 ile +1 m aralığında yoğunlaşması, modelin genel tahmin performansının dengeli olduğunu ortaya koyar. Grafiğin sol tarafında yer alan -2,5 m ve -1,5 m civarındaki düşük frekanslı sütunlar, modelin bazı durumlarda baraj su seviyesini gerçekte olduğundan daha yüksek tahmin ettiğini göstermektedir. +1 m'nin üzerindeki hatalar, modelin bazı gözlemlerde su seviyesini düşük tahmin ettiğine işaret etmektedir.



Şekil 4.47 Alibey Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.47'de verilen grafikte, rezidüellerin tahmin edilen değerlere göre sistematik olmayan bir dağılım göstermesi, modelde belirgin bir otokorelasyon veya eksik değişken sapmasına rastlanmadığını ortaya koymaktadır. 16-18 m arasındaki daha negatif rezidüeller, düşük seviyelerdeki su seviyesi değişimlerinin daha yüksek dalgalanma içerdiğini göstermekte ve muhtemelen düşük seviye dönemlerinde buharlaşma ve insan kaynaklı çekimlerin beklenenden yüksek olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.48 Alibey Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.48'de yer alan zaman serisi grafiğinde, modelin, Alibey Barajı'ndaki mevsimsel dalgalanmaları ve yıllık trendleri genel olarak büyük bir başarıyla takip ettiği görülmektedir. 2023 sonu ve 2024 başındaki düşüş ve ardından gelen hızlı yükseliş evrelerinde modelin gerçek veriye paralel tepki vermesi, sistemin ani hidrolojik değişimlere karşı duyarlı olduğunu kanıtlar. Eğitim/Test sınırı sonrası, modelin daha önce görmediği veriler üzerinde kararlı yapısını sürdürdüğü görülmektedir. Ancak 2024 ortasından itibaren gerçek verideki keskin düşüşte, tahminin gerçek değerin bir miktar üzerinde kaldığı gözlemlenmektedir; bu da histogramda gördüğümüz negatif hataların bu dönemlerde yoğunlaştığını açıklamaktadır.

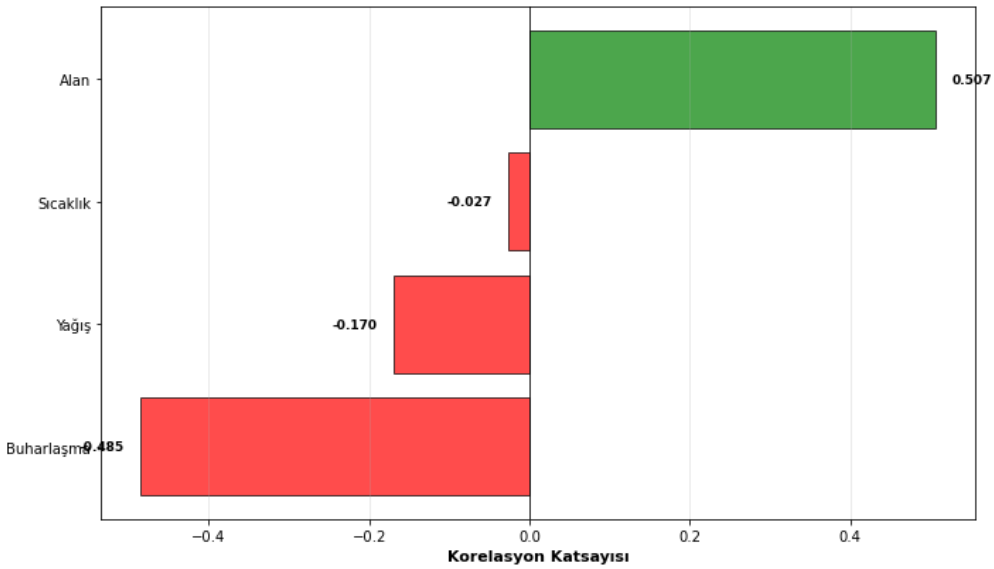
Alibey Barajı için uygulanan RO modeli, su seviyesini etkileyen temel değişkenler arasındaki ilişkileri başarıyla yakalamıştır. Korelasyon sonuçları, özellikle baraj yüzey alanının su seviyesiyle en güçlü pozitif ilişkiye, buharlaşmanın ise en belirgin negatif etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Model performansına bakıldığında, su seviyesinin geçmiş değerlerinin tahmin gücünü büyük ölçüde artırdığı, yani barajdaki su seviyesi değişimlerinin büyük ölçüde kendi geçmiş davranışına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.3.6 Büyükçekmece Barajı Su Seviyesi Tahmini



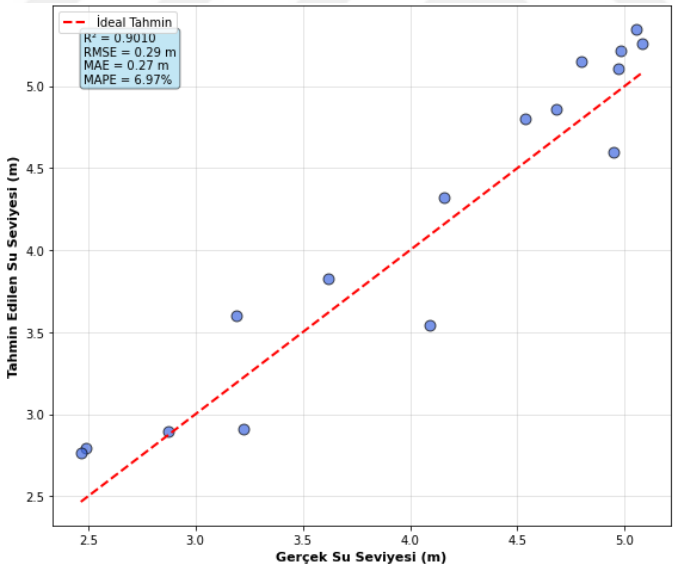
Şekil 4.49 Büyükçekmece Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

Şekil 4.49'da temel özellikler arası korelasyon ısı haritası görülmektedir. Alan ve su seviyesi arasındaki r = 0,507 değerinde pozitif bir ilişki mevcuttur. Bu sonuç, su seviyesi yükseldikçe baraj yüzey alanının genişlediğini ve UA ile hesaplanan alan bilgisinin su seviyesi için anlamlı bir açıklayıcı değişken olduğunu göstermektedir. Buharlaşma ve su seviyesi r = -0,485 arasındaki orta kuvvette ve negatif korelasyon, artan buharlaşmanın su seviyesinde düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Bu buharlaşma değişkeninin hidrodinamik süreçlerde baskın bir kayıp mekanizması olduğunu doğrulamaktadır. Yağış ve su seviyesi arasındaki r = -0,170 değerindeki zayıf ve negatif ilişki, yağışın su seviyesine doğrudan etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Sıcaklık ve su seviyesi arasındaki r = -0,027 değerindeki zayıf ilişki sıcaklığın tek başına değil; buharlaşma gibi türetilmiş değişkenler üzerinden etkili olduğunu göstermektedir.

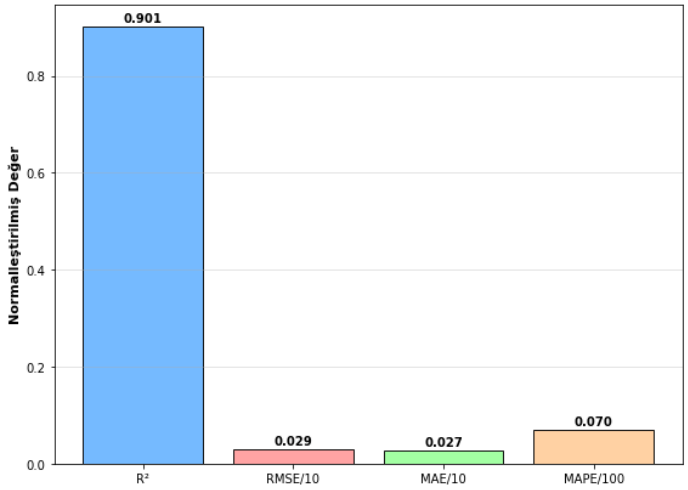


Şekil 4.50 Büyükçekmece Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.50'de su seviyesi ile temel özellikler arasındaki korelasyonun bar grafiği yer almaktadır. Burada en güçlü pozitif korelasyonun alanla, en güçlü negatif korelasyonun ise buharlaşma ile olduğu daha net görülmektedir.

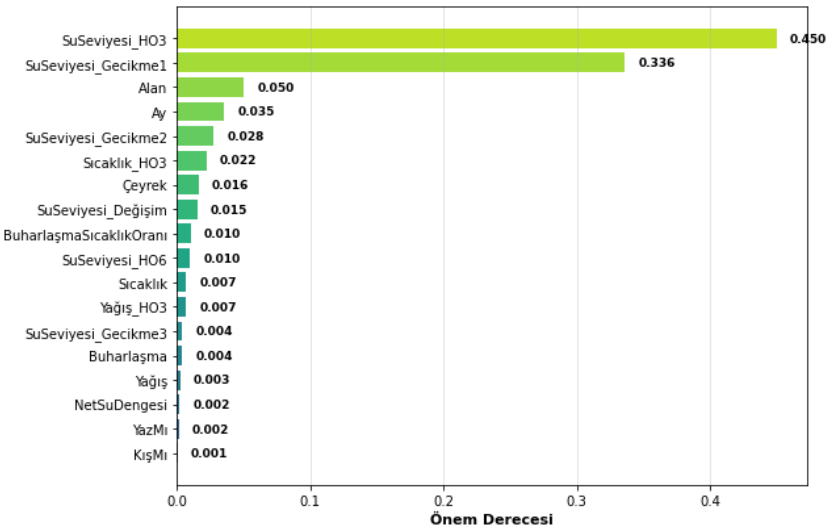


Şekil 4.51 Büyükçekmece Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



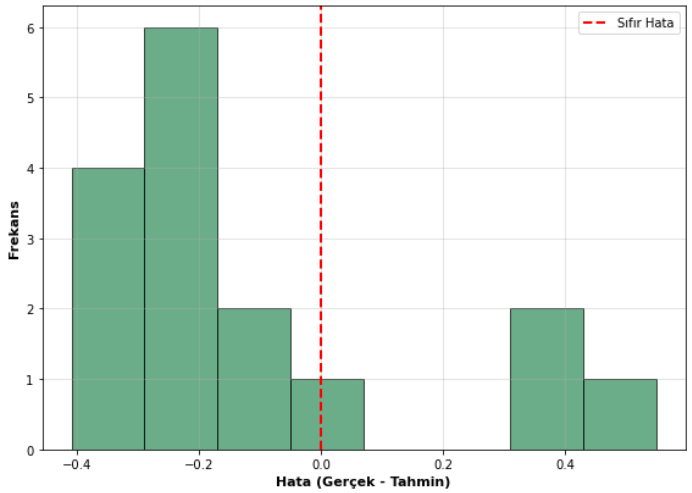
Şekil 4.52 Büyükçekmece Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

Şekil 4.51'de gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması grafiği ve Şekil 4.52'de normalleştirilmiş performans metrikleri grafiği yer almaktadır. Şekil 4.51'de, veri noktalarının ideal tahmin çizgisi etrafında dar bir bantta toplandığı görülmektedir. Modelin genel olarak kararlı olduğu, ancak su seviyesi yükseldikçe sapmanın hafifçe arttığı gözlemlenmektedir. R^2 = 0,901 bağımsız değişkenlerin, hedef değişkendeki varyansın %90,1'ini açıklayabildiğini gösterir. RMSE = 0,29 m, MAE = 0,27 m değerleri hataların hidroljik çalışmalar için düşük ve kabul edilebilir düzeyde olduğunu gösterir. MAPE = %6,97 olması (4.52'de 0.070 olarak normalize edilmiş), tahminlerin gerçek değerlerden ortalama %7 oranında saptığını ifade eder.



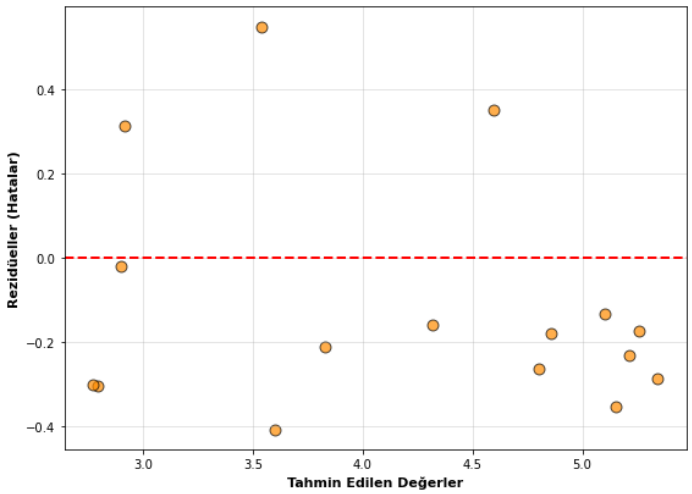
Şekil 4.53 Büyükçekmece Barajı özellik önem derecesi

Şekil 4.53’te modelin başarısının büyük oranda SuSeviyesi_HO3 ve SuSeviyesi_Gecikme1 değişkenlerine dayandığı görülmektedir. Bu iki değişken toplam ağırlığın yaklaşık %78'ini oluşturmaktadır. Bu durum, modelin bir sonraki su seviyesini tahmin ederken en iyi referansın geçmişteki su seviyeleri olduğunu gösterir. Alan 0,050, ay 0,035 ve Sıcaklık_HO3 0,022 değerlerindeki önem dereceleri ile ikincil açıklayıcılardır. Yağış 0,003 ve buharlaşma 0,004 önem dereceleri ile doğrudan değil, dolaylı ve sınırlı katkı sunmaktadır.



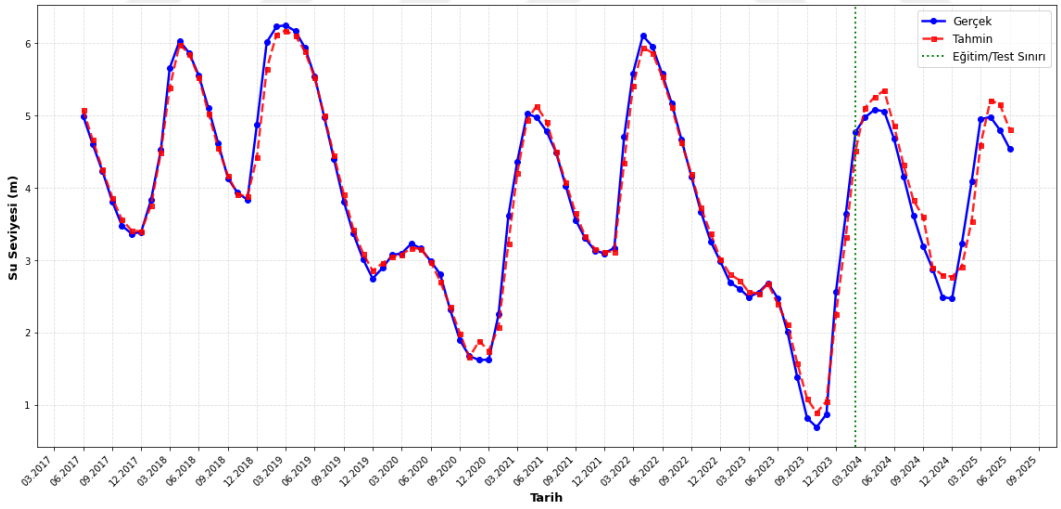
Şekil 4.54 Büyükçekmece Barajı tahmin hatalarının dağılımı

Şekil 4.53’teki grafikte, tahmin hatalarının -0,4 ile -0,1 arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Yani model bir miktar yüksek tahmin etme eğilimindedir. En yüksek frekansa sahip sütun (6 birim), hataların yaklaşık -0,2 ile -0,3 arasında yoğunlaştığını kanıtlar. Grafiğin sağ tarafında, küçük bir grup bulunmaktadır. Bu da modelin belirli uç durumlarda veya ani değişimlerde su seviyesini olduğundan düşük tahmin ettiğini gösterir.



Şekil 4.55 Büyükçekmece Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.55'te verilen rezidüel grafiğinde, noktaların sıfır çizgisi etrafında rastgele dağıldığı görülmektedir. Noktalar arasında belirgin bir desen olmaması, modelin sistematik bir hata yapmadığını doğrular. Hataların sıfır merkezli bir normal dağılıma yakın olmasına rağmen, histogramda sağ tarafta bir miktar yığılma olması, modelin bazı durumlarda gerçek değerden biraz daha yüksek tahmin yapma eğiliminde olduğunu göstermektedir.



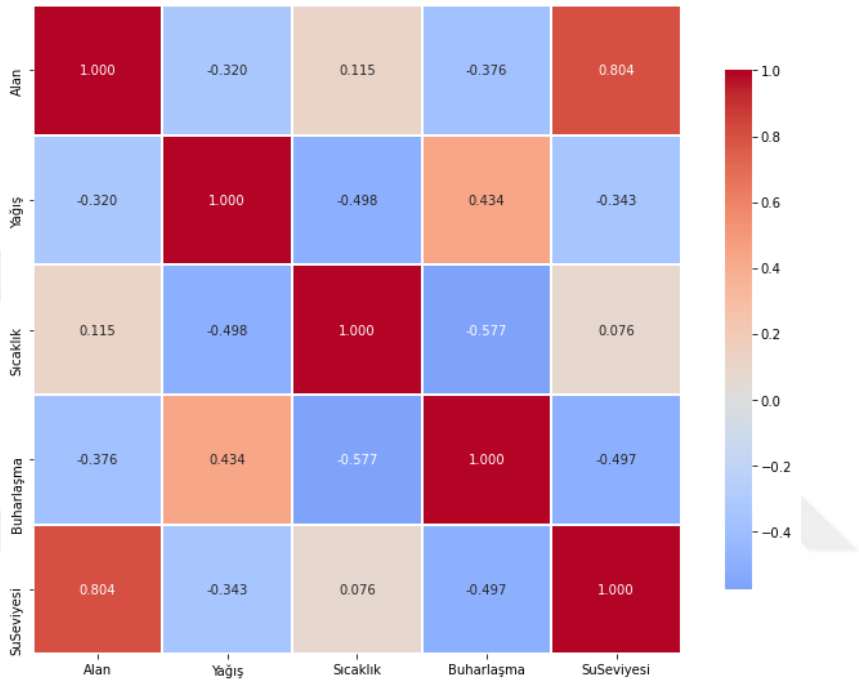
Şekil 4.56 Büyükçekmece Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.55'teki test seti zaman serisi grafiği incelendiğinde, gerçek ve tahmin çizgilerin neredeyse üst üste bindiği görülmektedir. Model, su seviyesinin en yüksek olduğu (yaklaşık 6 m) ve en düşük olduğu (yaklaşık 1 m altı) uç noktaları tahmin etmekte oldukça başarılıdır. Bazı keskin düşüş veya yükseliş anlarında (örneğin 2023 sonundaki ani düşüş) kırmızı çizginin mavi çizgiden çok hafif bir

gecikmeyle veya ufak bir farkla hareket ettiği görülmektedir. Eğitim/Test sınırından itibaren (2024 - 2025 arası) kırmızı çizginin mavi çizgiyi hala çok yakından takip etmesi, modelin ezberlemediğini ve yeni verilere uyum sağladığını gösterir.

Büyükçekmece Barajı'nda uygulanan RO algoritması, barajın mevsimsel hidrolojik döngüleri, zamansal sürekliliği ve çevresel girdilerle olan ilişkisini başarılı bir biçimde öğrenmiştir.

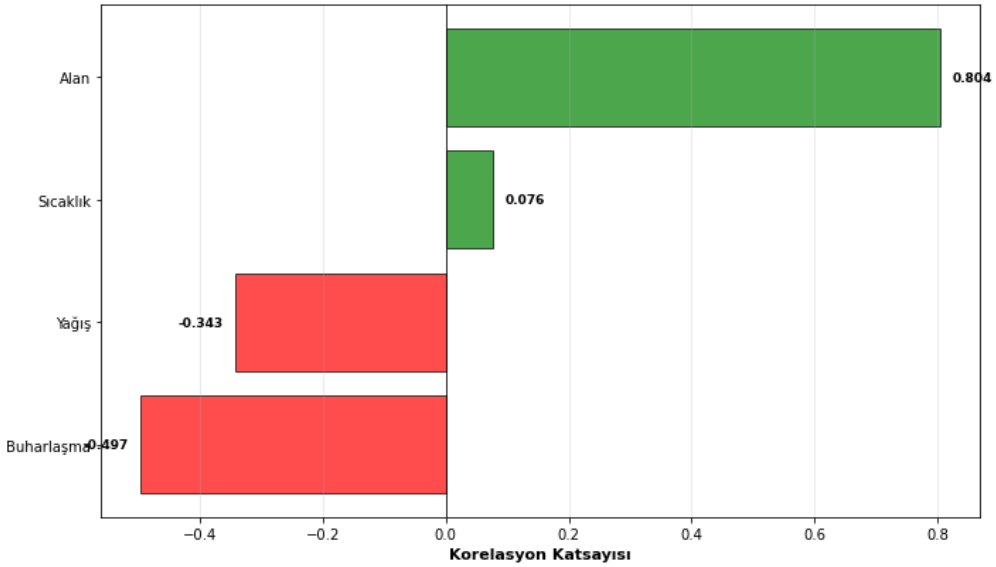
4.3.7 Darlık Barajı Su Seviyesi Tahmini



Şekil 4.57 Darlık Barajı temel özellikler arası korelasyon ısı haritası

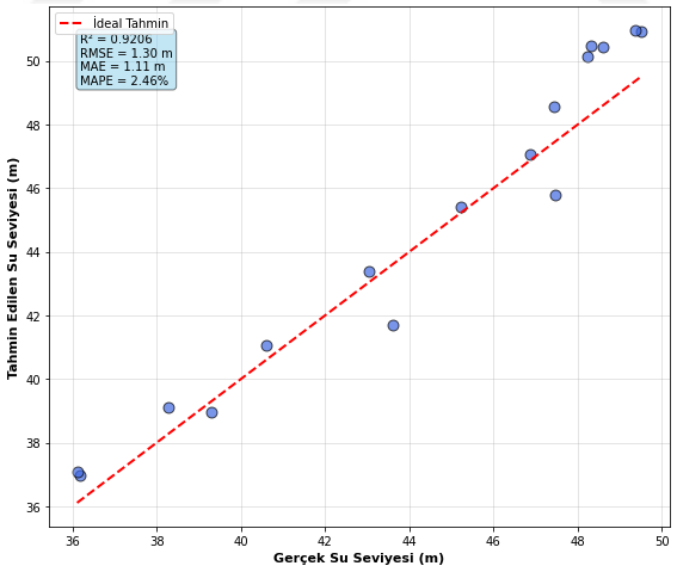
Şekil 4.57'de görülen ısı haritasında en yüksek korelasyonun r = 0,804 ile su seviyesi ve alan arasında olduğu görülmektedir. Su seviyesi ve buharlaşma arasındaki r = -0,497 değerindeki orta kuvvetli negatif ilişki, buharlaşmanın artmasıyla su seviyesinin düşme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Su seviyesi ve yağış arasında r = -0,343 değerinde zayıf-orta düzeyde negatif bir korelasyon gözlenmiştir. Bu durum, yağışın doğrudan etkisinin gecikmeli olması, havza depolama süreçleri ve işletme politikaları ile açıklanabilir. Su seviyesi ve sıcaklık arasındaki r = 0,076 değerindeki zayıf düzeydeki korelasyon, sıcaklığın su seviyesi üzerindeki etkisinin dolaylı (özellikle buharlaşma yoluyla) gerçekleştiğini göstermektedir. Yağış ve buharlaşma arasındaki r = 0,434 değerindeki korelasyon, yağışlı havalarda nemin etkisiyle buharlaşma süreçlerinin varlığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, RO modelinde doğrudan korelasyonlara ek olarak gecikmeli ve türetilmiş değişkenlerin kullanılmasının gerekliliğini desteklemektedir.

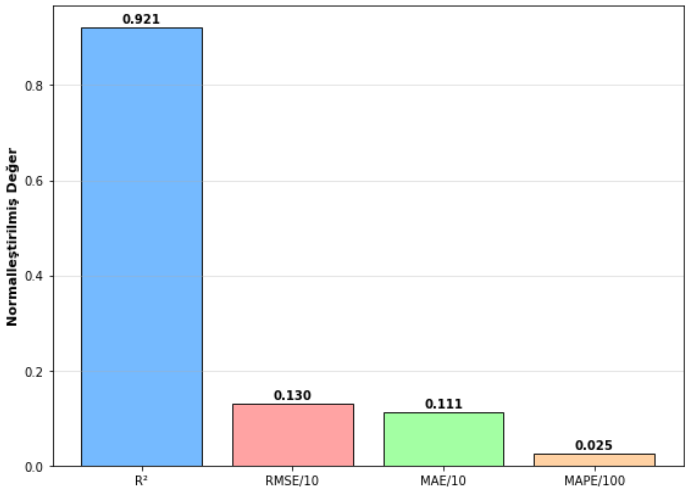


Şekil 4.58 Darlık Barajı su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon

Şekil 4.58'de su seviyesi ile temel özellikler arası korelasyon bar grafiği yer almaktadır. Bu verilere göre alanine su seviyesini belirleyen en temel faktör olduğu görülmektedir.

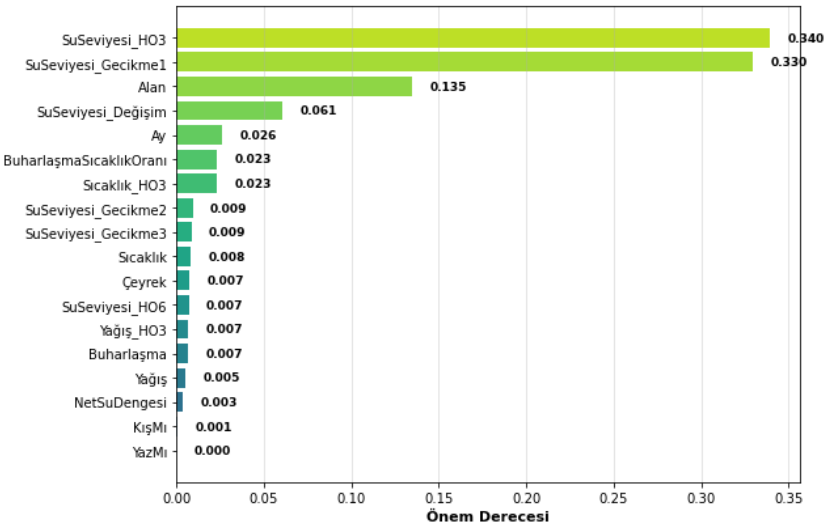


Şekil 4.59 Darlık Barajı gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması



Şekil 4.60 Darlık Barajı normalleştirilmiş performans metrikleri

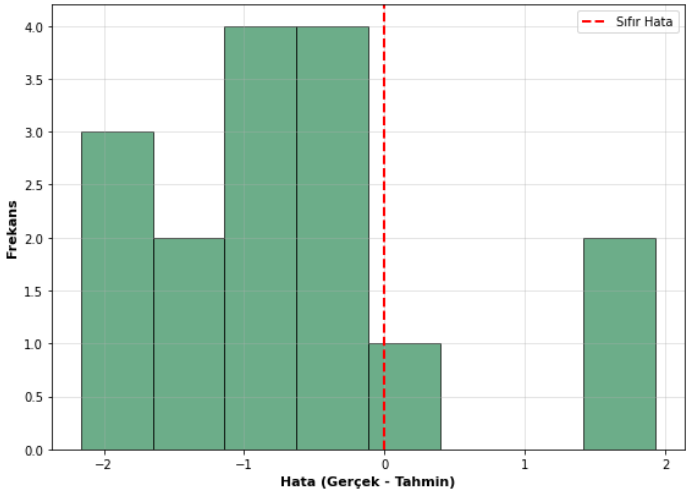
Şekil 4.59'da gerçek ve tahmin edilen değer karşılaştırması grafiği ve Şekil 4.60'ta noırmalleştirilmiş performans metrikleri grafiği görülmektedir. Şekil 4.59'da verilen grafikte noktaların büyük çoğunluğunun ideal tahmin çizgisi etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. R^2 = 0,9206, modelin su seviyesi değişkenindeki varyansın yaklaşık %92'sini açıkladığını göstermektedir. RMSE = 1,30 m, MAE = 1,11 m ve MAPE = %2,46 değerleri, model hatalarının hidrolik uygulamalar açısından kabul edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.61 Darlık Barajı özellik önem derecesi

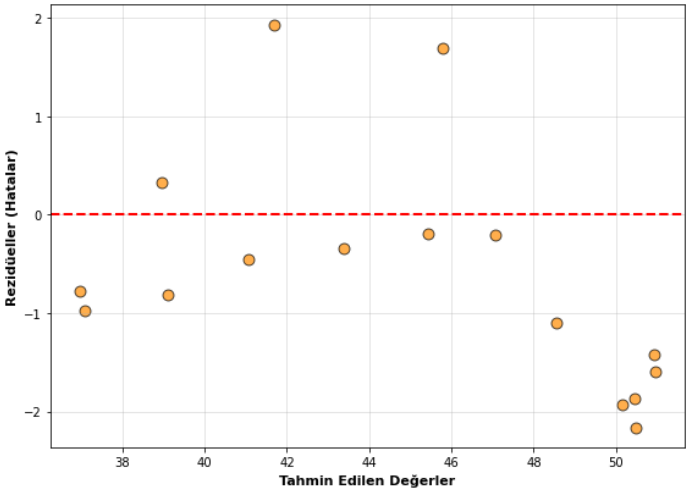
Şekil 4.61'de verilen grafikte, su seviyesi tahmini için en yüksek öneme sahip değişkenlerin SuSeviyesi_HO3 ve SuSeviyesi_Gecikme1 olduğu görülmektedir. Bu iki değişkenin modelin %67'sini açıkladığı görülmektedir. Alan değişkeni, 0,135 değerindeki önem derecesi ile geçmiş su seviyelerinden sonra en etkili

üçüncü değişken olarak öne çıkmaktadır. Yağış, sıcaklık ve buharlaşma gibi meteorolojik değişkenlerin doğrudan katkısının daha sınırlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.62 Darlık Barajı tahmin hatalarının dağılımı

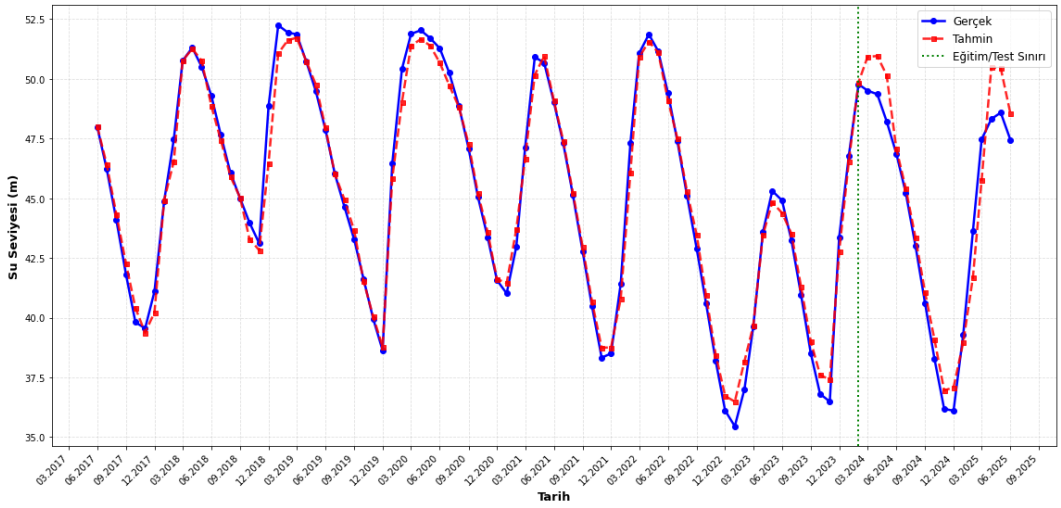
Şekil 4.62'de verilen grafikte, hataların çoğunun -1 ile 0 arasında toplanmış olduğu görülmektedir. Bu, modelin bazen gerçek değerden biraz daha yüksek tahmin yapma eğiliminde olduğunu gösterir. Grafiğin en sağında (+1 ile +2 arası) yer alan sütun, modelin nadiren de olsa gerçek seviyenin altında kaldığı ani su çekilmeleri veya veri hataları gibi özel durumlar olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.63 Darlık Barajı rezidüel grafiği

Şekil 4.63'teeki rezidüel grafiğinde, rezidüellerin belirli bir trend göstermemesi, modelin doğrusal olmayan yapıları da başarılı şekilde yakaladığını göstermektedir. Ancak su seviyesi yükseldikçe (50 m civarı) hataların negatif yönde arttığı (tahminlerin gerçeğin üzerinde kaldığı) görülmektedir. Bu, yüksek su seviyelerinde

modelin zorlandığını işaret eder. Bu durum, ileri çalışmalar için uç değerleri daha iyi yakalayabilecek hibrit modellerin değerlendirilebileceğini göstermektedir. Grafiğin üst kısmında, sıfır çizgisinin üzerinde kalan iki belirgin nokta (41,5 m ve 45,8 m civarı) bulunmaktadır. Bu noktalarda modelin, su seviyesini gerçeğinden yaklaşık 1-2 m daha düşük tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 4.64 Darlık Barajı test seti zaman serisi grafiği

Şekil 4.64'te verilen grafikte, su seviyesinin her yıl düzenli olarak Mart-Haziran döneminde zirve yaptığını, yıl sonunda ise minimum seviyeye indiği görülmektedir. Model, su seviyesindeki bu ani yükseliş ve düşüş döngülerini oldukça yüksek bir doğrulukla yakalamıştır. 2024 ve 2025 yılının ilk aylarında, gerçek su seviyesi önceki yıllara göre daha düşük bir zirve yaparken, model seviyenin daha fazla yükseleceğini tahmin etmiştir. Bu durum, modelin geçmişteki yüksek zirveleri referans alarak bu yıl için de benzer bir yükseliş beklediğini, ancak o dönemdeki çevresel faktörlerin (yağış azlığı vb.) buna izin vermediğini gösterir. Bu, rezidüel grafiğinde görülen yüksek değerlerdeki negatif hata durumunun zaman serisindeki yansımasıdır.

Darlık Barajı'nda geliştirilen RO tabanlı su seviyesi tahmin modeli, barajın hidrolojik ve zamansal dinamiklerini yüksek doğrulukla temsil eden başarılı bir performans sergilemiştir. Modelin genel başarısı, hem istatistiksel performans metrikleri hem de grafiksel analizler aracılığıyla bütüncül olarak değerlendirilmiştir.

5
SONUÇ

Çalışma İstanbul'da bulunan yedi baraj üzerinde yapılmıştır. Her baraj bitki yoğunluğu, şehirleşme ve zemin tipi çevresel, spektral ve fiziksel olarak farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle herhangi bir su çıkarma indeksinin tüm barajlarda çok iyi sonuç vermesi beklenemez. Bu doğrultuda çalışmanın ilk aşamasında, farklı barajların farklı çevresel koşullarda su indekslerinin performanslarına dair karşılaştırmalı bir bakış açısı sunulmuştur. Bu sebeple, tek indeks kullanımı yerine, çoklu indeks değerlendirmesi yapılarak daha doğru kararlar verilebilir. Yedi baraj üzerinden yapılan çalışmada, $AWEI_{sh}$ indeksi Ömerli, Elmalı, Terkos ve Büyükçekmece barajlarında başarılı sonuç vererek en başarılı indeks olmuştur. NDWI indeksi de Darlık ve Alibey barajlarında en iyi sonucu vermesine karşın Ömerli Barajı'nda da oldukça başarılı sonuç verdiği görülmüştür. MNDWI indeksi sadece Sazlıdere Barajı'nda başarılı sonuç vermiş, $AWEI_{nsh}$ indeksi ise bu çalışmada başarılı sonuçlar üretememiştir.

İkinci aşamada oluşturulan veri setine uygulanan Mann–Kendall trend analizi sonuçları, 2017–2025 döneminde İstanbul'daki barajların büyük bölümünde su yüzey alanı, hacim ve su seviyesi değişkenlerinde istatistiksel olarak anlamlı ve kalıcı azalış eğilimlerinin hâkim olduğunu ortaya koymuştur. Ömerli, Sazlıdere, Terkos, Alibey, Büyükçekmece ve Darlık barajlarında yüzey alanı trendlerinde ileri ve geri eğrilerin %95 GA düzeyinde kesiştiği ve özellikle 2019–2021 sonrası dönemde eğrilerin −1,96 eşik değerinin altına inerek negatif bölgede kalıcılaştığı belirlenmiştir. Hacim trend analizleri de yüzey alanı sonuçlarıyla yüksek düzeyde uyum göstermiş; söz konusu barajlarda hacim kayıplarının erken dönemlerde başlayarak 2020 sonrasında şiddetini ve sürekliliğini artırdığı görülmüştür. Su seviyesi değişimleri ise hacim trendleriyle paralel bir seyir izleyerek hidrolik sistemin bütüncül bir azalış davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. Elmalı Barajı,

diğer barajlardan ayrışarak 2018 itibarıyla yüzey alanı ve hacimde istatistiksel olarak anlamlı bir artış trendi göstermiş; bu pozitif eğilim 2022 sonrasında zayıflamakla birlikte çalışma dönemi sonuna kadar tamamen tersine dönmemiştir. Yağış serilerinde ise barajların büyük çoğunluğunda uzun vadeli ve istatistiksel olarak anlamlı bir artış ya da azalış trendi tespit edilmemiş; gözlenen dalgalanmaların mevsimsel ve yıllık iklim salınımlarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Buharlaşma ve sıcaklık serilerinde, çalışma döneminin başında kısa süreli ve güçlü değişimler görülmesine karşın, bu eğilimlerin kalıcılık kazanmadığı ve 2018 sonrasında serilerin büyük ölçüde durağan bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Genel olarak elde edilen bulgular, yağış rejiminde uzun vadeli belirgin bir değişim olmamasına rağmen, İstanbul barajlarının son yıllarda hidroklimatik kuraklık, artan buharlaşma etkileri ve yoğun kentsel su talebi altında önemli bir hidrik stres sürecine girdiğini ve bölgesel su kaynakları yönetimi açısından kritik bir dönemin yaşandığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen RO tabanlı su seviyesi tahmin modellerinin performansı; gerçek ve tahmin edilen zaman serileri, hata dağılımları ve performans metrikleri birlikte değerlendirilmiştir. Hidrometeorolojik, morfolojik ve çevresel özellikleri bakımından farklılık gösteren barajlarda, RO algoritmasının genel olarak yüksek doğrulukta ve kararlı tahminler ürettiği belirlenmiştir. Model başarısında, baraj su seviyesi ile doğrudan fiziksel ilişki içerisinde olan yüzey alanı verileri ile zaman serisinin belleğini temsil eden gecikmeli su seviyesi değişkenleri ve kısa–orta vadeli eğilimleri yumuşatarak temsil eden HO özelliklerinin kritik rol oynadığı görülmüştür. Yüzey alanı verileri, baraj havzasındaki doluluk durumunu ve morfolojik yapıyı modele entegre ederek su seviyesi değişimlerinin fiziksel karşılığının daha doğru temsil edilmesini sağlarken; gecikmeli su seviyesi değişkenleri, baraj sistemlerinin yüksek zamansal bağımlılık gösteren doğasını modele yansıtarak tahmin sürekliliğini ve kararlılığını artırmıştır. HO ise ani ve kısa süreli hidrometeorolojik dalgalanmaların etkisini azaltarak mevsimsel ve uzun dönemli eğilimlerin model tarafından daha net öğrenilmesine katkı sağlamıştır. Bu özellik mühendisliği yaklaşımı sayesinde tahmin edilen su seviyesi serilerinin, gerek eğitim gerekse test dönemlerinde gözlenen değerleri büyük ölçüde takip ettiği ve mevsimsel dalgalanmaların başarıyla temsil edildiği görülmüştür. Özellikle geniş havza alanına ve güçlü hidrolojik sinyallere sahip Ömerli ve Terkos

barajlarında, yüzey alanı, gecikmeli değişkenler ve hareketli ortalamaların birlikte kullanımı model uyumunu belirgin biçimde artırmış; tahmin eğrilerinin gerçek serilerle yüksek düzeyde örtüşmesini sağlamıştır. Darlık ve Alibey barajlarında ani yağışlar ve hızlı seviye değişimlerinin yaşandığı bazı dönemlerde sınırlı sapmalar gözlenmekle birlikte, söz konusu özellikler sayesinde genel trend ve mevsimsel yapı korunmuştur. Elmalı ve Sazlıdere barajlarında, görece küçük hacim ve şehirleşme baskısına bağlı kısa vadeli dalgalanmalarda hata artışı görülse de, özellikle hareketli ortalamalar ve gecikmeli yapıların etkisiyle uzun dönemli davranışın istikrarlı biçimde yakalandığı belirlenmiştir. Büyükçekmece Barajı'nda ise yüzey alanı verilerinin modele dâhil edilmesi, gecikmeli ve yumuşatılmış zaman serisi özellikleriyle birlikte hem periyodik değişimlerin hem de genel eğilimin dengeli biçimde modellenmesine olanak tanımıştır. Hata dağılımlarının genel olarak sıfır etrafında olması, model tahminlerinde belirgin bir yanlılık bulunmadığını ve yüzey alanı, gecikmeli veriler ve HO ile güçlendirilmiş RO yaklaşımının güvenilir ve dengeli tahminler ürettiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, söz konusu özellik mühendisliği bileşenleriyle desteklenen RO tabanlı modelin, farklı hidrolojik koşullar altında tutarlı sonuçlar verdiği ve baraj su seviyesi tahmini için etkili bir karar destek aracı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

[1] E. Özelkan, "Water body detection analysis using NDWI indices derived from landsat-8 OLI", *Pol J Environ Stud*, c. 29, sy 2, ss. 1759-1769, 2020, doi: 10.15244/pjoes/110447.

[2] M. Gudelj, A. Mateo Gašparović, ve A. Mladen Zrinjski, "Hydrology and Water Resources ACCURACY ANALYSIS OF THE INLAND WATERS DETECTION".

[3] A. Al Bitar, M. Parrens, C. Fatras, ve S. P. Luque, "Global Weekly Inland Surface Water Dynamics from L-Band Microwave", içinde *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Eyl. 2020, ss. 5089-5092. doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324291.

[4] M. Ma, X. Wang, F. Veroustraete, ve L. Dong, "Change in area of Ebinur Lake during the 1998-2005 period", *Int J Remote Sens*, c. 28, sy 24, ss. 5523-5533, Ara. 2007, doi: 10.1080/01431160601009698.

[5] Y. Namlı, "Fırat-Dicle ve Yeşilırmak Havzalarında Taşkın Trend Analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2019.

[6] World Wildlife Fund, "Water Scarcity", https://www.worldwildlife.org.

[7] J. F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick, ve A. S. Belward, "High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes", *Nature*, c. 540, sy 7633, ss. 418-422, Ara. 2016, doi: 10.1038/nature20584.

[8] G. Dergisi *vd.*, "Rastgele Orman Yöntemi Kullanılarak Kıyı Çizgisi Çıkarımı İstanbul Örneği", *Geomatik Dergisi Journal of Geomatics*, c. 3, sy 2, ss. 100-107, 2018.

[9] B. TURGUT, "Batum Deltası Sulak Alanlarının Zamansal Değişimi", *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, c. 9, sy 1, ss. 101-111, Oca. 2023, doi: 10.21324/dacd.1172810.

[10] Orman ve Su İşleri Bakanlığı, "Tarımda Su Kullanımının Etkinleştirilmesi Programı Eylem Planı", 2014.

[11] Q. Hu, C. Li, Z. Wang, Y. Liu, ve W. Liu, "Continuous Monitoring of the Surface Water Area in the Yellow River Basin during 1986–2019 Using Available Landsat Imagery and the Google Earth Engine", *ISPRS Int J Geoinf*, c. 11, sy 5, May. 2022, doi: 10.3390/ijgi11050305.

[12] M. M. Y. Albarqouni, N. Yagmur, F. Bektas Balcik, ve A. Sekertekin, "Assessment of Spatio-Temporal Changes in Water Surface Extents and Lake Surface Temperatures Using Google Earth Engine for Lakes Region, Türkiye", *ISPRS Int J Geoinf*, c. 11, sy 7, Tem. 2022, doi: 10.3390/ijgi11070407.

[13] M. Büyükyildiz, A. Berktay, S. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İ. Mühendisliği Bölümü, ve Ç. Mühendisliği Bölümü, "Fak. Derg., c.19, s.2", 2004.

[14] S. Ekercin ve C. Örmeci, "Evaluating climate change effects on water and salt resources in Salt Lake, Turkey using multitemporal SPOT imagery", *Environ Monit Assess*, c. 163, sy 1-4, ss. 361-368, Nis. 2010, doi: 10.1007/s10661-009-0840-x.

[15] D. Maktav, F. Sunar Erbek, ve S. Kabdasli, "Monitoring coastal erosion at the Black Sea coasts in Turkey using satellite data: A case study at the Lake Terkos, North-west Istanbul", *Int J Remote Sens*, c. 23, sy 19, ss. 4115-4124, 2002, doi: 10.1080/01431160110115979.

[16] H. G. Coskun ve E. Alparslan, "Environmental modelling of Omerli catchment area in Istanbul, Turkey using remote sensing and GIS techniques", *Environ Monit Assess*, c. 153, sy 1-4, ss. 323-332, 2009, doi: 10.1007/s10661-008-0358-7.

[17] E. Alparslan, H. G. Coşkun, ve U. Alganci, "An investigation on water quality of darlik dam drinking water using satellite images", *ScientificWorldJournal*, c. 10, ss. 1293-1306, Tem. 2010, doi: 10.1100/tsw.2010.125.

[18] Z. Altun, "Büyükçekmece Gölü'nün Mikrobiyolojik ve Kimyasal Kirlilik Düzeyinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.

[19] D. Var, "Elmalı Havzası Güney Kesiminin Yüzey ve Yeraltı Su Kirliliği Açısından İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.

[20] H. Şimşek, "Sazlıdere Baraj Gölü'nün Mikrobiyolojik Ve Kimyasal Kirlilik Düzeyinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.

[21] C. Şenol, "İstanbul'un İçme Suyu Havzalarının Ekolojik Sorunları", Oca. 2013. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/344438987

[22] A. Yücel *vd.*, "Investigation of Annual Lake Water Levels and Water Volumes with Şen Innovation and Mann-Kendall Rank Correlation Trend Tests: Example of Lake Eğirdir, Turkey", *Water (Switzerland)*, c. 14, sy 15, Ağu. 2022, doi: 10.3390/w14152374.

[23] L. G. KAYA, C. YÜCEDAĞ, ve Ö. DURUŞKAN, "Burdur Gölü Havzasının Çevresel Açıdan İrdelenmesi", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 6, sy 1, ss. 6-10, Ara. 2015, doi: 10.29048/makufebed.206586.

[24] A. KAPLAN, "Burdur Gölü ve Çevresinin Peyzaj Değerleri Açısından Turizm Potansiyelinin Belirlenmesi", *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi (MBUD)*, c. 4, sy 2, ss. 105-121, Ara. 2019, doi: 10.30785/mbud.555622.

[25] A. Ünlü ve F. M. ÇOBAN ve Sara TUNÇ, "HAZAR GÖLÜ SU KALİTESİNİN FİZİKSEL VE İNORGANİK-KİMYASAL PARAMETRELER AÇISINDAN İNCELENMESİ", 2008.

[26] S. SELİM, M. ÇOŞLU, N. K. SÖNMEZ, ve N. KARAKUŞ, "Köyceğiz Gölü ve Dalyan Kanallarında Kıyı Kenar Çizgisinin UA ve CBS Teknikleri ile Belirlenmesi, Alanda Karşılaşılan Sorunlar", *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 20, sy 2, Haz. 2016, doi: 10.19113/sdufbed.78402.

[27] S. C. J. Palmer, T. Kutser, ve P. D. Hunter, "Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions", *Remote Sens Environ*, c. 157, ss. 1-8, Şub. 2015, doi: 10.1016/J.RSE.2014.09.021.

[28] J. Li *vd.*, "Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology", 01 Nisan 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/w14071148.

[29] X. Tong *vd.*, "Estimating water volume variations in Lake Victoria over the past 22 years using multi-mission altimetry and remotely sensed images", *Remote Sens Environ*, c. 187, ss. 400-413, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2016.10.012.

[30] Y. Zhang, M. Pan, ve E. F. Wood, "On Creating Global Gridded Terrestrial Water Budget Estimates from Satellite Remote Sensing", 2016, ss. 59-78. doi: 10.1007/978-3-319-32449-4_4.

[31] M. Esmail, W. E. Mahmod, ve H. Fath, "Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: Case study of Damietta coast, Egypt", *Applied Ocean Research*, c. 82, ss. 274-282, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.apor.2018.11.009.

[32] B. Zhao, H. Guo, Y. Yan, Q. Wang, ve B. Li, "A simple waterline approach for tidelands using multi-temporal satellite images: A case study in the Yangtze Delta", *Estuar Coast Shelf Sci*, c. 77, sy 1, ss. 134-142, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.ecss.2007.09.022.

[33] S. Sunder, R. Ramsankaran, ve B. Ramakrishnan, "Inter-comparison of remote sensing sensing-based shoreline mapping techniques at different coastal stretches of India", *Environ Monit Assess*, c. 189, sy 6, Haz. 2017, doi: 10.1007/s10661-017-5996-1.

[34] W. Li *vd.*, "Estimating the relationship between dam water level and surface water area for the Danjiangkou Reservoir using Landsat remote sensing images", *Remote Sensing Letters*, c. 7, sy 2, ss. 121-130, Şub. 2016, doi: 10.1080/2150704X.2015.1117151.

[35] J. Pimenta, J. N. Fernandes, ve A. Azevedo, "Remote Sensing Tool for Reservoir Volume Estimation", *Remote Sens (Basel)*, c. 17, sy 4, Şub. 2025, doi: 10.3390/rs17040619.

[36] O. G. Narin, "Gap filling of water level time series with water area using remote sensing data: a comparative performance analysis of polynomial functions, XGBoost, Random Forest and Support Vector Machine", *Hydrological Sciences Journal*, c. 70, sy 5, ss. 750-760, 2025, doi: 10.1080/02626667.2025.2458555.

[37] F. Zeng *vd.*, “Monitoring inland water via Sentinel satellite constellation: A review and perspective”, 01 Ekim 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.isprsjprs.2023.09.011.

[38] T. M. , K. R. W. , & C. J. W. Lillesand, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7. bs. 2015.

[39] S. Dellepiane, R. De Laurentiis, ve F. Giordano, “Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision”, içinde *Pattern Recognition Letters*, Eki. 2004, ss. 1461-1470. doi: 10.1016/j.patrec.2004.05.022.

[40] S. Reis ve H. M. Yilmaz, “Temporal monitoring of water level changes in Seyfe Lake using remote sensing”, *Hydrol Process*, c. 22, sy 22, ss. 4448-4454, Eki. 2008, doi: 10.1002/hyp.7047.

[41] H. Tang, S. Lu, M. H. A. Baig, M. Li, C. Fang, ve Y. Wang, “Large-Scale Surface Water Mapping Based on Landsat and Sentinel-1 Images”, *Water (Switzerland)*, c. 14, sy 9, May. 2022, doi: 10.3390/w14091454.

[42] C. GÜNEŞ ve H. UYGUÇGİL, “Investigation of 6-Year Land Use Change of Sakarya River Around İnhisar (Bilecik) using Remote Sensing”, *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, ss. 112-125, Eyl. 2022, doi: 10.48123/rsgis.1111906.

[43] H. Gao, C. Birkett, ve D. P. Lettenmaier, “Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing”, *Water Resour Res*, c. 48, sy 9, 2012, doi: 10.1029/2012WR012063.

[44] K. Thorne, B. Markharn, P. Slater, ve S. Biggar, “Radiometric Calibration of Landsat”.

[45] S. Skakun, J.-C. Roger, E. F. Vermote, J. G. Masek, ve C. O. Justice, “Automatic sub-pixel co-registration of Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI images using phase correlation and machine learning based mapping”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170002670

[46] X. Yang *vd.*, “Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data”, *Remote Sens Environ*, c. 244, Tem. 2020, doi: 10.1016/j.rse.2020.111803.

[47] P. S. Frazier ve K. J. Page, “Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data”.

[48] S. Battal *vd.*, “MULTİSPEKTRAL UYDU VE YAPAY AÇIKLIKLI RADAR VERİLERİ KULLANILARAK EBER GÖLÜNÜN ALAN VE DEĞİŞİMİNİN TESPİTİ”, 2016.

[49] Y. Zhou *vd.*, “Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors”, *Water (Switzerland)*, c. 9, sy 4, Nis. 2017, doi: 10.3390/w9040256.

[50] G. Büyüksalih ve H. Topan, “UZAYDAN HARİTA YAPIMI”, May. 2006.

[51] A. Fisher ve T. Danaher, “A water index for SPOT5 HRG satellite imagery, New South Wales, Australia, determined by linear discriminant analysis”, *Remote Sens (Basel)*, c. 5, sy 11, ss. 5907-5925, 2013, doi: 10.3390/rs5115907.

[52] T. Zhang, X. Yang, S. Hu, ve F. Su, "Extraction of coastline in aquaculture coast from multispectral remote sensing images: Object-based region growing integrating edge detection", *Remote Sens (Basel)*, c. 5, sy 9, ss. 4470-4487, 2013, doi: 10.3390/rs5094470.

[53] Y. He, C. Wang, F. Chen, H. Jia, D. Liang, ve A. Yang, "Feature comparison and optimization for 30-M winter wheat mapping based on Landsat-8 and Sentinel-2 data using random forest algorithm", *Remote Sens (Basel)*, c. 11, sy 5, Mar. 2019, doi: 10.3390/rs11050535.

[54] I. Klein, A. J. Dietz, U. Gessner, A. Galayeva, A. Myrzakhmetov, ve C. Kuenzer, "Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over thepast 27 years derived from medium-resolution remote sensing data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, c. 26, sy 1, ss. 335-349, 2014, doi: 10.1016/j.jag.2013.08.004.

[55] R. d'Andrimont ve P. Defourny, "Monitoring African water bodies from twice-daily MODIS observation", 2017.

[56] R. C. Sharma, R. Tateishi, K. Hara, ve L. V. Nguyen, "Developing Superfine Water Index (SWI) for global water cover mapping using MODIS data", *Remote Sens (Basel)*, c. 7, sy 10, ss. 13807-13841, 2015, doi: 10.3390/rs71013807.

[57] S. Calmant, F. Seyler, ve J. F. Cretaux, "Monitoring continental surface waters by satellite altimetry", *Surv Geophys*, c. 29, sy 4-5, ss. 247-269, 2008, doi: 10.1007/s10712-008-9051-1.

[58] C. M. Birkett, L. A. K. Mertes, T. Dunne, M. H. Costa, ve M. J. Jasinski, "Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, c. 107, sy 20, s. LBA 26-1-LBA 26-21, 2002, doi: 10.1029/2001JD000609.

[59] S. Sima ve M. Tajrishy, "Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran", *J Great Lakes Res*, c. 39, sy 1, ss. 90-99, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.jglr.2012.12.013.

[60] K. N. Markert *vd.*, "Comparing Sentinel-1 surface water mapping algorithms and radiometric terrain correction processing in southeast Asia utilizing Google Earth Engine", *Remote Sens (Basel)*, c. 12, sy 15, Ağu. 2020, doi: 10.3390/RS12152469.

[61] W. Huang *vd.*, "Automated extraction of surface water extent from Sentinel-1 data", *Remote Sens (Basel)*, c. 10, sy 5, May. 2018, doi: 10.3390/rs10050797.

[62] M. Dirscherl, A. J. Dietz, C. Kneisel, ve C. Kuenzer, "A novel method for automated supraglacial lake mapping in antarctica using sentinel-1 sar imagery and deep learning", *Remote Sens (Basel)*, c. 13, sy 2, ss. 1-27, Oca. 2021, doi: 10.3390/rs13020197.

[63] G. Shen, W. Fu, H. Guo, ve J. Liao, "Water Body Mapping Using Long Time Series Sentinel-1 SAR Data in Poyang Lake", *Water (Switzerland)*, c. 14, sy 12, Haz. 2022, doi: 10.3390/w14121902.

[64] G. Dergisi, M. Ali AKGÜL, D. Su İşleri, B. Müdürlüğü, H. Yönetimi, ve İ. ve Tahsisler Şube Müdürlüğü, "Sentetik Açıklıklı Radar verilerinin Taşkın

Çalışmalarında Kullanılması: Berdan Ovası Taşkını", *Geomatik Dergisi Journal of Geomatics*, c. 3, sy 2, ss. 154-162, 2018.

[65] S. Babagiray ve K. Kalkan, "Yağışların tarım alanlarında sebep olduğu göllenmelerin Sentinel-1 uydu görüntüleri ile analizi", *Journal of Geodesy and Geoinformation*, c. 8, sy 2, ss. 145-160, Kas. 2021, doi: 10.9733/jgg.2021r0011.t.

[66] S. Skakun, J. C. Roger, E. F. Vermote, J. G. Masek, ve C. O. Justice, "Automatic sub-pixel co-registration of Landsat-8 Operational Land Imager and Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument images using phase correlation and machine learning based mapping", *Int J Digit Earth*, c. 10, sy 12, ss. 1253-1269, Ara. 2017, doi: 10.1080/17538947.2017.1304586.

[67] L. R. Mansaray, F. Wang, J. Huang, L. Yang, ve A. S. Kanu, "Accuracies of support vector machine and random forest in rice mapping with Sentinel-1A, Landsat-8 and Sentinel-2A datasets", *Geocarto Int*, c. 35, sy 10, ss. 1088-1108, Tem. 2020, doi: 10.1080/10106049.2019.1568586.

[68] X. Yang, Q. Qin, P. Grussenmeyer, ve M. Koehl, "Urban surface water body detection with suppressed built-up noise based on water indices from Sentinel-2 MSI imagery", *Remote Sens Environ*, c. 219, ss. 259-270, Ara. 2018, doi: 10.1016/j.rse.2018.09.016.

[69] Y. Miura, M. Shamsudduha, A. Suppasri, ve D. Sano, "A Global Multi-Sensor Dataset of Surface Water Indices from Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Measurements", *Scientific Data* , c. 12, sy 1, Ara. 2025, doi: 10.1038/s41597-025-05562-z.

[70] U. Bhangale, S. More, T. Shaikh, S. Patil, ve N. More, "Analysis of Surface Water Resources Using Sentinel-2 Imagery", içinde *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2020, ss. 2645-2654. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.287.

[71] M. Lock, N. Saintilan, I. van Duren, ve A. Skidmore, "Monitoring Coastal Water Body Health with Sentinel-2 MSI Imagery", *Remote Sens (Basel)*, c. 15, sy 7, Nis. 2023, doi: 10.3390/rs15071734.

[72] B. I. Abrahim, A. A. Jasim, M. R. Mahmood, H. R. Mahmood, H. A. Alalwan, ve M. M. Mohammed, "Water Body Detection Using Sentinel-2 Imagery Through Particle Swarm Intelligence: A Novel Framework for Optimizing Spectral Multi-Band Index", *Eng*, c. 6, sy 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/eng6030059.

[73] E. Portalés-Julià, G. Mateo-García, ve L. Gómez-Chova, "Understanding flood detection models across Sentinel-1 and Sentinel-2 modalities and benchmark datasets", *Remote Sens Environ*, c. 328, Eki. 2025, doi: 10.1016/j.rse.2025.114882.

[74] C. Owusu, N. J. Snigdha, M. T. Martin, ve A. J. Kalyanapu, "PyGEE-SWToolbox: A Python Jupyter Notebook Toolbox for Interactive Surface Water Mapping and Analysis Using Google Earth Engine", *Sustainability (Switzerland)*, c. 14, sy 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14052557.

[75] O. S. YILMAZ, "Uzaktan Algılama Teknikleri ile Su Yüzeylerinin Tespit Edilmesinde Kullanılan Su Çıkarma İndekslerinin Performans Analizi",

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS, ss. 242-261, May. 2023, doi: 10.48123/rsgis.1256092.

[76] R. Wang *vd.*, "Monitoring the spatiotemporal dynamics of surface water body of the Xiaolangdi Reservoir using Landsat-5/7/8 imagery and Google Earth Engine", *Open Geosciences*, c. 13, sy 1, ss. 1290-1302, Oca. 2021, doi: 10.1515/geo-2020-0305.

[77] S. Li, H. Wan, Q. Yu, ve X. Wang, "Downscaling of ERA5 reanalysis land surface temperature based on attention mechanism and Google Earth Engine", *Sci Rep*, c. 15, sy 1, Ara. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-83944-w.

[78] A. Elnashar, S. A. Shojaeezadeh, ve T. K. David Weber, "A Multi-model approach for remote sensing-based actual evapotranspiration mapping using Google Earth Engine (ETMapper-GEE)", *J Hydrol (Amst)*, c. 657, Ağu. 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2025.133062.

[79] Z. Chen ve S. Zhao, "Automatic monitoring of surface water dynamics using Sentinel-1 and Sentinel-2 data with Google Earth Engine", 01 Eylül 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jag.2022.103010.

[80] K. Li, J. Wang, W. Cheng, Y. Wang, Y. Zhou, ve O. Altansukh, "Deep learning empowers the Google Earth Engine for automated water extraction in the Lake Baikal Basin", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, c. 112, Ağu. 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102928.

[81] M. J. Mashala, T. Dube, ve K. K. Ayisi, "Seasonal and Spatial Dynamics of Surface Water Resources in the Tropical Semi-Arid Area of the Letaba Catchment: Insights from Google Earth Engine, Landscape Metrics, and Sentinel-2 Imagery", *Hydrology*, c. 12, sy 4, Nis. 2025, doi: 10.3390/hydrology12040068.

[82] J. Condeça, J. Nascimento, ve N. Barreiras, "Monitoring the Storage Volume of Water Reservoirs Using Google Earth Engine", *Water Resour Res*, c. 58, sy 3, Mar. 2022, doi: 10.1029/2021WR030026.

[83] G. Kaplan ve U. Avdan, "Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery", *Eur J Remote Sens*, c. 50, sy 1, ss. 137-143, Oca. 2017, doi: 10.1080/22797254.2017.1297540.

[84] J. Al-Doski, S. B. Mansor1, H. Zulhaidi, ve M. Shafri, "Image Classification in Remote Sensing", c. 3, sy 10, 2013, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.iiste.org

[85] Richards J.A. ve X. Jia, *8 Supervised Classification Techniques*, 4. bs. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg., 2006.

[86] D. Lu ve Q. Weng, "A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance", 2007, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/01431160600746456.

[87] M. Belgiu ve L. Drăgu, "Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions", 01 Nisan 2016, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.

[88] A. Mondal, S. Kundu, S. K. Chandniha, R. Shukla, ve P. K. Mishra, "Comparison of Support Vector Machine and Maximum Likelihood

Classification Technique using Satellite Imagery", *Int ernat ional Journal of Rem ot e Sensing and GIS*, sy 1, ss. 116-123, 2012.

[89] P. Singh Sisodia ve V. Tiwari, "Analysis of Supervised Maximum Likelihood Classification for Remote Sensing Image".

[90] Ş. Akça, H. Üniversitesi, M. Fakültesi, ve H. Mühendisliği Bölümü, "Kıyı Çizgisinin Makine Öğrenmesi Tabanlı Mean-Shift, Rastgele Orman ve Destek Vektör Makinaları ile Belirlenmesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 37, sy 3, s. 2022, 2022.

[91] A. Raza *vd.*, "Predicting regional-scale groundwater levels at high spatial resolution using spatial Random Forest models", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, c. 144, Kas. 2025, doi: 10.1016/j.jag.2025.104918.

[92] N. de Lange, *Geoinformatics in Theory and Practice An Integrated Approach to Geoinformation Systems, Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer, 2023.

[93] A. K. Jain, "Data clustering: 50 years beyond K-means", *Pattern Recognit Lett*, c. 31, sy 8, ss. 651-666, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.patrec.2009.09.011.

[94] N. F. Erbaş ve A. Varlık, "Determination of surface area change with remote sensing: The case of Salt Lake", *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, c. 7, sy 1, ss. 11-22, Haz. 2025, doi: 10.56130/tucbis.1679860.

[95] A. Afshinfar, S. Vahidi, V. Hatamzadeh, ve P. Nouri, "RS-Based Assessment: Spatial-Temporal Changes in Water Basins of Tar and Havir Lakes", *International Journal of Environment and Climate Change*, c. 13, sy 5, ss. 159-178, Mar. 2023, doi: 10.9734/ijecc/2023/v13i51757.

[96] A. Y. YİĞİT ve M. UYSAL, "Nesne Tabanlı Sınıflandırma ile Taşkın Alanlarının Analizi", *Resilience*, c. 3, sy 2, ss. 369-385, Ara. 2019, doi: 10.32569/resilience.633603.

[97] B. Bayram, D. Z. Seker, U. Acar, Y. Yuksel, H. A. A. Guner, ve I. Cetin, "An integrated approach to temporal monitoring of the shoreline and basin of Terkos Lake", *J Coast Res*, c. 29, sy 6, ss. 1427-1435, Kas. 2013, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00084.1.

[98] M. Mahdianpari, B. Salehi, F. Mohammadimanesh, ve M. Motagh, "Random forest wetland classification using ALOS-2 L-band, RADARSAT-2 C-band, and TerraSAR-X imagery", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, c. 130, ss. 13-31, Ağu. 2017, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.05.010.

[99] N. Demir, S. Oy, F. Erdem, D. Z. Å eker, ve B. Bayram, "INTEGRATED SHORELINE EXTRACTION APPROACH with USE of RASAT MS and SENTINEL-1A SAR IMAGES", içinde *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, Eyl. 2017, ss. 445-449. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-445-2017.

[100] A. M. Marangoz, K. Sedar Görmüş, M. Oruç, Ş. Hakan Kutoğlu, ve Z. Alkış, "Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı", 2013.

[101] İ. Akar *vd.*, "GÖL YÜZEYİ DEĞİŞİMLERİNİN BELİRLENMESİNDE FARKLI DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI Derya MAKTAV Nurten GÜNAL".

[102] A. Sekertekin, "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*, c. 28, sy 3, ss. 1335-1347, May. 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09416-2.

[103] J. Worden ve K. M. de Beurs, "Surface water detection in the Caucasus", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, c. 91, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.jag.2020.102159.

[104] S. K. McFeeters, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", *Int J Remote Sens*, c. 17, sy 7, ss. 1425-1432, 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.

[105] H. Xu, "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery", *Int J Remote Sens*, c. 27, sy 14, ss. 3025-3033, Tem. 2006, doi: 10.1080/01431160600589179.

[106] G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, ve S. R. Proud, "Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery", *Remote Sens Environ*, c. 140, ss. 23-35, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

[107] A. Fisher, N. Flood, ve T. Danaher, "Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia", *Remote Sens Environ*, c. 175, ss. 167-182, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2015.12.055.

[108] A. Ogilvie, G. Belaud, S. Massuel, M. Mulligan, P. Le Goulven, ve R. Calvez, "Surface water monitoring in small water bodies: Potential and limits of multi-sensor Landsat time series", *Hydrol Earth Syst Sci*, c. 22, sy 8, ss. 4349-4380, Ağu. 2018, doi: 10.5194/hess-22-4349-2018.

[109] J. Pena-Regueiro, M. T. Sebastiá-Frasquet, J. Estornell, ve J. A. Aguilar-Maldonado, "Sentinel-2 application to the surface characterization of small water bodies in Wetlands", *Water (Switzerland)*, c. 12, sy 5, May. 2020, doi: 10.3390/w12051487.

[110] A. Elen Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, M. ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Y. Mühendisliği Bölümü, ve M. Tarihleri, "Görüntü İkileştirme için Global Eşikleme Yöntemleri Üzerine Bir İnceleme A Review on Global Thresholding Methods for Image Binarization Article history MAKALE BİLGİSİ ÖZET", 2020.

[111] H. Babaei, M. Janalipour, ve N. A. Tehrani, "A simple, robust, and automatic approach to extract water body from landsat images (Case study: Lake Urmia, Iran)", *Journal of Water and Climate Change*, c. 12, sy 1, ss. 238-249, 2021, doi: 10.2166/wcc.2019.078.

[112] O. Elmi ve A. Ahrari, "An Automatic Google Earth Engine Tool for Generating Lake Water Area Time Series from Satellite Imagery", *IEEE*

Geoscience and Remote Sensing Letters, c. 22, 2025, doi: 10.1109/LGRS.2025.3528323.

[113] L. Lan, Z. Xu, X. Wang, S. Lei, X. Wang, ve S. Zhou, "Quantitative Analysis of the Spatiotemporal Evolution of Poyang Lake Basin From 1987 to 2023", *Hydrol Process*, c. 39, sy 10, Eki. 2025, doi: 10.1002/hyp.70303.

[114] T. E. Yorulmaz, "Quantifying Burdur Lake Shrinkage (2018–2025): Trend Analysis and Uncertainty Quantification with Sentinel-2 Imagery and Monte Carlo", 04 Aralık 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-8269709/v1.

[115] T. Kocsis, I. Kovács-Székely, ve A. Anda, "Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary", *Theor Appl Climatol*, c. 139, sy 3-4, ss. 849-859, Şub. 2020, doi: 10.1007/s00704-019-03014-4.

[116] T. Galbadrakh, Y. Ganbold, L. Dingjun, ve A. Enkhbold, "Factors influencing surface water changes in the Khar-Us Lake basin, western Mongolia", *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*, c. 62, sy 46, ss. 200-207, Eyl. 2025, doi: 10.5564/mjgg.v62i46.4140.

[117] O. Yayla, H. Akpınar, T. Bilgin, Y. Atayeter, ve O. Korkmaz, "An evaluation of the long-term changes in the shoreline of Lake Eğirdir in relation to climate and anthropogenic factors", *Coğrafya Dergisi / Journal of Geography*, c. 0, sy 50, ss. 65-78, Tem. 2025, doi: 10.26650/jgeog2025-1620561.

[118] S. A. Shah, S. Ai, ve W. Rack, "Interconnections, trend analysis and forecasting of water-air temperature with water level dynamics in Blue Moon Lake Valley: A statistical and machine learning approach", *J Environ Manage*, c. 379, Nis. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.124829.

[119] Z. Hao *vd.*, "GRDL: A New Global Reservoir Area-Storage-Depth Data Set Derived Through Deep Learning-Based Bathymetry Reconstruction", *Water Resour Res*, c. 60, sy 1, Oca. 2024, doi: 10.1029/2023WR035781.

[120] D. E. Alsdorf, E. Rodríguez, ve D. P. Lettenmaier, "Measuring surface water from space", *Reviews of Geophysics*, c. 45, sy 2, Haz. 2007, doi: 10.1029/2006RG000197.

[121] A. P. Yunus, D. Jie, X. Song, ve R. Avtar, "High Resolution Sentinel-2 Images for Improved Bathymetric Mapping of Coastal and Lake Environments", 28 Şubat 2019. doi: 10.20944/preprints201902.0270.v1.

[122] A. Ahmad, A. Tanjung, ve I. Ilahi, "Modeling of Water Surface Elevation Using MIKE 21 Based on Rupat Strait Bathymetric Data Pemodelan Elevasi Muka Air Menggunakan MIKE 21 Berdasarkan Data Batimetri Selat Rupat", *Jurnal Natur Indonesia*, sy 2, ss. 79-84, 2025.

[123] C. Schwatke, D. Dettmering, W. Bosch, ve F. Seitz, "DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry", *Hydrol Earth Syst Sci*, c. 19, sy 10, ss. 4345-4364, Eki. 2015, doi: 10.5194/hess-19-4345-2015.

[124] J. F. Crétaux *vd.*, "SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data", *Advances in*

Space Research, c. 47, sy 9, ss. 1497-1507, May. 2011, doi: 10.1016/j.asr.2011.01.004.

[125] S. Güneş Şen, "Machine Learning-Based Water Level Forecast in a Dam Reservoir: A Case Study of Karaçomak Dam in the Kızılırmak Basin, Türkiye", *Sustainability (Switzerland)*, c. 17, sy 18, Eyl. 2025, doi: 10.3390/su17188378.

[126] Y. O. Ouma *vd.*, "Dam Water Level Prediction Using Vector AutoRegression, Random Forest Regression and MLP-ANN Models Based on Land-Use and Climate Factors", *Sustainability (Switzerland)*, c. 14, sy 22, Kas. 2022, doi: 10.3390/su142214934.

[127] M. N. Adli Zakaria *vd.*, "Exploring machine learning algorithms for accurate water level forecasting in Muda river, Malaysia", *Heliyon*, c. 9, sy 7, Tem. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17689.

[128] B. Li *vd.*, "Unraveling the Importance of the Yangtze River and Local Catchment on Water Level Variations of Poyang Lake (China) After the Three Gorges Dam Operation: Insights From Random Forest Modeling", *Front Earth Sci (Lausanne)*, c. 10, Tem. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.927462.

[129] A. Yavuzdoğan ve E. Tanır Kayıkçı, "Ege Denizi'nde makine öğrenimi yöntemleri ile anlık deniz seviyesi değişimlerinin tahmini", *Journal of Geodesy and Geoinformation*, c. 8, sy 2, ss. 84-103, Kas. 2021, doi: 10.9733/jgg.2021r0007.t.

[130] V. H. Nhu *vd.*, "Daily water level prediction of zrebar lake (Iran): A comparison between m5p, random forest, random tree and reduced error pruning trees algorithms", *ISPRS Int J Geoinf*, c. 9, sy 8, Ağu. 2020, doi: 10.3390/ijgi9080479.

[131] W. Guo, X. Ni, Y. Mu, T. Liu, ve J. Zhang, "Detection and Attribution of Alpine Inland Lake Changes by Using Random Forest Algorithm", *Remote Sens (Basel)*, c. 15, sy 4, Şub. 2023, doi: 10.3390/rs15041144.

[132] Y. Kalkan, "Baraj Emniyeti ve Deformasyon İzleme Çalışmaları Atatürk Barajı Örneği", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 6, sy 3, ss. 40-50, 2014, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.teknolojikarastirmalar.com

[133] H. SURAT, "BARAJ GÖLÜ VE ÇEVRELERİNİN REKREASYONEL KULLANIMINA YÖNELIK POTANSIYELLERİNİN BELİRLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERINE BIR ARASTIRMA; DERİNER BARAJI ÖRNEĞİNDE", *Journal of International Social Research*, c. 11, sy 61, ss. 996-1010, Ara. 2018, doi: 10.17719/jisr.2018.2992.

[134] Z. Eminağaoğlu *vd.*, "Borçka Barajı Gölü ve Çevresi Rekreasyonel Alan Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi", 2016.

[135] E. Kalıpcı, H. Cüce, ve S. Toprak, "Damsa Barajı (Nevşehir) Yüzey Suyu Kalitesinin Coğrafi Bilgi Sistemi ile Mekansal Analizi", *Karaelmas Fen ve Müh. Derg*, c. 7, sy 1, ss. 312-319, 2017, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://fbd.beun.edu.tr

[136] M. KÜÇÜKYILMAZ *vd.*, "Işıktepe Baraj Gölü (Maden, Elazığ) Kıyı Bölgesi Fizikokimyasal Su Kalitesi Üzerine İlk Bulgular", *Yunus Araştırma Bülteni*, c. 2, ss. 55-63, 2014, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.yunus.gov.tr

[137] *Dams and development : a new framework for decision-making*. Earthscan, 2000.

[138] M. Hassani, M. C. Chabou, M. Hamoudi, ve M. S. Guettouche, "Index of extraction of water surfaces from Landsat 7 ETM+ images", *Arabian Journal of Geosciences*, c. 8, sy 6, ss. 3381-3389, Haz. 2015, doi: 10.1007/s12517-014-1475-y.

[139] E. N. Kairu, "An introduction to remote sensing", *GeoJournal*, c. 6, sy 3, ss. 251-260, May. 1982, doi: 10.1007/BF00210657.

[140] C. Chen, J. Fu, S. Zhang, ve X. Zhao, "Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images", *Estuar Coast Shelf Sci*, c. 217, ss. 281-291, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.ecss.2018.10.021.

[141] Yener H., Çoban H.O., ve Koç A., "Uzaktan Algılama Verileri ve Teknik Özellikleri", *Orman Fakültesi Dergisi*, c. 56, ss. 33-48, 2006.

[142] Bilgi Serdar, "Fotogrametri ve Uzaktan Algılamada Veri Elde Etme Yöntemlerinin Gelişimi ve Kısa Tarihçeleri", 2007. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.hkmo.org.tr

[143] Y. Deng, Y. Zhang, D. Pan, S. X. Yang, ve B. Gharabaghi, "Review of Recent Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Lake Water Quality Management", 01 Kasım 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/rs16224196.

[144] A. P. Cracknell, "The development of remote sensing in the last 40 years", 02 Aralık 2018, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/01431161.2018.1550919.

[145] J. B. , & W. R. H. Campbell, *Introduction to Remote Sensing*, 5. bs. New York: Guilford Press., 2011.

[146] J. H. J. A. S. K. D. V. P. Robert P. Bukata, "Optical Properties and".

[147] M. Amani *vd.*, "Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review", *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, c. 13, ss. 5326-5350, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.

[148] Q. Zhao, L. Yu, X. Li, D. Peng, Y. Zhang, ve P. Gong, "Progress and trends in the application of google earth and google earth engine", 02 Eylül 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/rs13183778.

[149] A. Velastegui-Montoya, N. Montalván-Burbano, P. Carrión-Mero, H. Rivera-Torres, L. Sadeck, ve M. Adami, "Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends", 01 Temmuz 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/rs15143675.

[150] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, ve R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone",

Remote Sens Environ, c. 202, ss. 18-27, Ara. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

[151] X. Wang *vd.*, "Benefits of Google Earth Engine in remote sensing", *National Remote Sensing Bulletin*, c. 26, sy 2, ss. 299-309, Şub. 2022, doi: 10.11834/jrs.20211317.

[152] H. Tamiminia, B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, ve B. Brisco, "Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review", 01 Haziran 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.

[153] C. M. Bishop, "Pattern Recognition and Machine Learning".

[154] H. Zhang, Y. Liu, C. Zhang, ve N. Li, "Machine Learning Methods for Weather Forecasting: A Survey", 01 Ocak 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/atmos16010082.

[155] SAP, "What is Machine Learning?" Erişim: 08 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.sap.com/turkey/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html

[156] Ö. Gaygusuz *vd.*, "Darlık Deresi ve Kollarının (Şile-İstanbul) Balık Türü Çeşitliliği", 2017.

[157] E. S. TİLAV ve S. GÜLBAZ, "Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkının İncelenmesi: Darlık Barajı Örneği", *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, c. 10, sy 1, ss. 49-67, Oca. 2024, doi: 10.21324/dacd.1327805.

[158] D. Celal Şenol, "III. ULUSAL JEOMORFOLOJİ SEMPOZYUMU (Bildiriler Kitabı)". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/344438987

[159] T. Güvensel, "ÖMERLİ BARAJ GÖLÜ SU KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI", YÜKSEK LİSANS TEZİ, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2006.

[160] N. Yılmaz, "Elmalı Baraj Gölü (İstanbul, Türkiye) Fitoplanktonik Alg Florası", *Journal of Science and Technology*, c. 10, sy 1, ss. 78-89, 2017, doi: 10.18185/erzifbed.309473.

[161] A. C. ÖZDEMİR, "İSTANBUL İÇME SUYU HAVZALARINDA ARAZİ KULLANIMLARININ SU KALİTESİNE OLAN ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ", YÜKSEK LİSANS TEZİ, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, İstanbul, 2010.

[162] N. Yilmaz, "Assesment of seasonal variation of phytoplankton and related water quality parameters of Sazlidere Dam Lake (Istanbul, Turkey)", *Desalination Water Treat*, c. 131, ss. 107-113, Kas. 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.23011.

[163] Ş. Elçi, G. Tayfur, I. Haltaş, ve B. Kocaman, "Baraj Yikilmasi Sonrasi İki Boyutlu Taşkin Yayihminin Yerleşim Bölgeleri İçin Modellenmesi", 2017, *Turkish Chamber of Civil Engineers*. doi: 10.18400/tekderg.307456.

[164] N. Yilmaz, P. J. Bot, N. Yilmaz, ve Y. Güleçal, "PHYTOPLANKTON COMMUNITY OF TERKOS LAKE AND ITS INFLUENT STREAMS,

ISTANBUL, TURKEY", 2012. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/266195721

[165] E. KARATOY, "DURUSU (TERKOS) GÔLÜ ÇAPAK BALIKLARI PARAZiTLERi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.

[166] A. S. Biricik, "İSTANBUL ŞEHRİ VE SU", *Marmara Coğrafya Dergisi*, c. 2, ss. 11-32, 1998.

[167] M. Alp, "İstanbul'un su kaynakları ve Büyük Melen sistemi'nin değerlendirilmesi.", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.

[168] "Sentinel-2". Erişim: 19 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2

[169] "Sentinel-2 MSI". Erişim: 19 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi

[170] "Sentinel-2". Erişim: 19 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html#sentinel-2-level-2a-surface-reflectance

[171] F. Filipponi, "Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow", MDPI AG, Haz. 2019, s. 11. doi: 10.3390/ecrs-3-06201.

[172] "Sentinel-1". Erişim: 19 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/sentinel-data/sentinel-1

[173] A. Dervişoğlu, N. Yağmur, E. Fıratlı, N. Musaoğlu, ve A. Tanık, "Spatio-Temporal Assessment of the Shrinking Lake Burdur, Turkey", *International Journal of Environment and Geoinformatics*, c. 9, sy 2, ss. 169-176, 2022, doi: 10.30897/ijegeo.

[174] O. S. YILMAZ, "Automatic detection of water surfaces using K-means++ clustering algorithm with Landsat-9 and Sentinel-2 images on the Google Earth Engine Platform", *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, c. 7, sy 2, ss. 105-111, Eyl. 2023, doi: 10.30516/bilgesci.1262550.

[175] E. Firatli, A. Dervisoglu, N. Yagmur, N. Musaoglu, ve A. Tanik, "Spatio-temporal assessment of natural lakes in Turkey", doi: 10.1007/s12145-022-00778-8/Published.

[176] H. W. Khalid, R. M. Z. Khalil, ve M. A. Qureshi, "Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau", *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, c. 24, sy 3, ss. 619-634, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.ejrs.2021.09.003.

[177] F. Sun, W. Sun, J. Chen, ve P. Gong, "Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery", *Int J Remote Sens*, c. 33, sy 21, ss. 6854-6875, 2012, doi: 10.1080/01431161.2012.692829.

[178] T. D. Leder, N. Leder, ve M. Baučić, "Application of satellite imagery and water indices to the hydrography of the Cetina riverbasin (Middle Adriatic)",

Transactions on Maritime Science, c. 9, sy 2, ss. 374-384, 2020, doi: 10.7225/toms.v09.n02.020.

[179] L. Ji, B. Wylie, ve L. Zhang, "Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index", 2009.

[180] Q. Guo, R. Pu, J. Li, ve J. Cheng, "A weighted normalized difference water index for water extraction using landsat imagery", *Int J Remote Sens*, c. 38, sy 19, ss. 5430-5445, Eki. 2017, doi: 10.1080/01431161.2017.1341667.

[181] T. V. Bijeesh ve K. N. Narasimhamurthy, "Surface water detection and delineation using remote sensing images: a review of methods and algorithms", *Sustain Water Resour Manag*, c. 6, sy 4, Ağu. 2020, doi: 10.1007/s40899-020-00425-4.

[182] K. Zhai, X. Wu, Y. Qin, ve P. Du, "Comparison of surface water extraction performances of different classic water indices using OLI and TM imageries in different situations", *Geo-Spatial Information Science*, c. 18, sy 1, ss. 32-42, Oca. 2015, doi: 10.1080/10095020.2015.1017911.

[183] J. Laonamsai *vd.*, "Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand", *Hydrology*, c. 10, sy 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/hydrology10030070.

[184] T. Melkamu, M. Bagyaraj, ve M. Adimaw, "Spatiotemporal Change Assessment of Lake Beseka, Ethiopia Using Time Series Landsat Images", *Hydrospatial Analysis*, c. 6, sy 1, ss. 27-39, Tem. 2022, doi: 10.21523/gcj3.2022060103.

[185] G. Sarp ve M. Ozcelik, "Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey", *Journal of Taibah University for Science*, c. 11, sy 3, ss. 381-391, 2017, doi: 10.1016/j.jtusci.2016.04.005.

[186] N. Otsu, "A Tlreshold Selection Method from Gray-Level Histograms", *Automatica*, c. 11, ss. 23-27, 1975.

[187] J. Yousefi, "Image Binarization using Otsu Thresholding Algorithm", 2011, doi: 10.13140/RG.2.1.4758.9284.

[188] T. R. Singh, S. Roy, O. I. Singh, T. Sinam, ve K. M. Singh, "A New Local Adaptive Thresholding Technique in Binarization", c. 8, sy 6, ss. 271-277, Kas. 2011, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.IJCSI.org

[189] U. Gonzales-Barron ve F. Butler, "A comparison of seven thresholding techniques with the k-means clustering algorithm for measurement of bread-crumb features by digital image analysis", *J Food Eng*, c. 74, sy 2, ss. 268-278, May. 2006, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.007.

[190] T. GÖKGÖZ, M. ERDOĞAN, K. SEYREK, ve İ. M. OZULU, "Batı Akdeniz Havzası Sınırlarının Yüksek Doğrulukla Belirlenmesi", *Teknik Dergi*, c. 30, sy 3, ss. 9073-9105, May. 2019, doi: 10.18400/tekderg.309105.

[191] H. B. Mann, "Nonparametric Tests Against Trend", 1945. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.jstor.org/stable/1907187

[192] V. Nourani, A. Danandeh Mehr, ve N. Azad, "Trend analysis of hydroclimatological variables in Urmia lake basin using hybrid wavelet

Mann–Kendall and Şen tests", *Environ Earth Sci*, c. 77, sy 5, Mar. 2018, doi: 10.1007/s12665-018-7390-x.

[193] T. Mohsin ve W. A. Gough, "Trend analysis of long-term temperature time series in the Greater Toronto Area (GTA)", *Theor Appl Climatol*, c. 101, sy 3, ss. 311-327, 2010, doi: 10.1007/s00704-009-0214-x.

[194] E. Kahya ve S. Kalayci, "Trend analysis of streamflow in Turkey", *J Hydrol (Amst)*, c. 289, sy 1-4, ss. 128-144, Nis. 2004, doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.006.

[195] R. Sneyers, "On the statistical analysis of series of observations: by R. Sneyers. World Meteorological organization, Geneva, Technical Note N° 143, 1990, U.D.C. 551.501.45, 192 p", *Atmos Res*, c. 29, sy 3-4, s. 274, May. 1993, doi: 10.1016/0169-8095(93)90010-L.

[196] A. A. Hekmatzadeh, S. Kaboli, ve A. Torabi Haghighi, "New indices for assessing changes in seasons and in timing characteristics of air temperature", *Theor Appl Climatol*, c. 140, sy 3-4, ss. 1247-1261, May. 2020, doi: 10.1007/s00704-020-03156-w.

[197] M. N. Öllükçü ve O. M. Katipoğlu, "Hydroclimatic drought trends and change point detection in the Yeşilirmak basin: a comprehensive evaluation using SPI, SPEI, DMI indices and ITA, SQMK, IPTA approaches", *Theor Appl Climatol*, c. 156, sy 5, May. 2025, doi: 10.1007/s00704-025-05502-2.

[198] L. A. Espinosa, M. M. Portela, ve R. Rodrigues, "Rainfall trends over a North Atlantic small island in the period 1937/1938–2016/2017 and an early climate teleconnection", *Theor Appl Climatol*, ss. 469-491, 2021, doi: 10.1007/s00704-021-03547-7/Published.

[199] E. Scornet ve G. Hooker, "Theory of Random Forests: A Review", Mar. 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://hal.science/hal-05006431v1

[200] C. D. Kumral, A. Topal, M. Ersoy, R. Çolak, ve T. Yiğit, "Performing Performance Analysis by Implementing Random Forest Algorithm on FPGA", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, c. 9, sy 4, ss. 1315-1327, Ara. 2022, doi: 10.31202/ecjse.1134799.

[201] G. Goos *vd.*, "LNCS 7473 - Information Computing and Applications".

[202] M. R. Segal, "Title Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression Publication Date Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression", 2003.

[203] L. Bbeiman, "Bagging Predictors", 1996.

[204] Bradley. Efron ve Robert. Tibshirani, *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall/CRC, 1993.

[205] F. Ali Shah *vd.*, "Enhancing Weather Forecasting Accuracy: A Machine Learning Approach Using Genetic Algorithm and Random Forest", *Global Research journal of Natural Science and Technology (Grjnst)*, ss. 3-3, 2025.

[206] H. A. Salman, A. Kalakech, ve A. Steiti, "Random Forest Algorithm Overview", *Babylonian Journal of Machine Learning*, c. 2024, ss. 69-79, Haz. 2024, doi: 10.58496/bjml/2024/007.

[207] F. Erdem, M. Andaç Derinpınar, R. Nasirzadehdizaji, S. Oy, D. Z. Şeker, ve B. Bayram, "Rastgele Orman Yöntemi Kullanılarak Kıyı Çizgisi Çıkarımı İstanbul Örneği", *Geomatik Dergisi Journal of Geomatics*, c. 3, sy 2, ss. 100-107, 2018.

[208] S. Tafralı, "Yapay Öğrenme: Rastgele Orman", https://medium.com/.

[209] P. O. Gislason, J. A. Benediktsson, ve J. R. Sveinsson, "Random forests for land cover classification", içinde *Pattern Recognition Letters*, Mar. 2006, ss. 294-300. doi: 10.1016/j.patrec.2005.08.011.

[210] Ö. Akar ve O. Güngör, "Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması", *Journal of Geodesy and Geoinformation*, c. 1, sy 2, ss. 139-146, 2012, doi: 10.9733/jgg.241212.1t.

[211] M. Pal, "Random forest classifier for remote sensing classification", *Int J Remote Sens*, c. 26, sy 1, ss. 217-222, Oca. 2005, doi: 10.1080/01431160412331269698.

[212] J. D. Watts, R. L. Lawrence, ve W. Group, "MERGING RANDOM FOREST CLASSIFICATION WITH AN OBJECT-ORIENTED APPROACH FOR ANALYSIS OF AGRICULTURAL LANDS".

[213] M. S. Saluja, "GridSearchCV: Temel Kavramlar", https://medium.com/. Erişim: 29 Aralık 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://medium.com/@Mandeep2002/gridsearchcv-key-concepts-8f98ceb633e4

A

HATA MATRİSLERİ

Tablo A.1 Ömerli Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	502	13	**515**
	Su Olmayan	68	2514	**2582**
	Toplam	**570**	**2527**	**3097**
MNDWI	Su	434	66	**500**
	Su Olmayan	136	2461	**2597**
	Toplam	**570**	**2527**	**3097**
$AWEI_{sh}$	Su	506	29	**535**
	Su Olmayan	64	2498	**2562**
	Toplam	**570**	**2527**	**3097**
$AWEI_{nsh}$	Su	483	24	**507**
	Su Olmayan	87	2503	**2590**
	Toplam	**570**	**2527**	**3097**

Tablo A.2 Darlık Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	378	28	**406**
	Su Olmayan	33	2561	**2594**
	Toplam	**411**	**2589**	**3000**
MNDWI	Su	367	27	**394**
	Su Olmayan	44	2562	**2606**
	Toplam	**411**	**2589**	**3000**
$AWEI_{sh}$	Su	390	67	**457**
	Su Olmayan	21	2522	**2543**
	Toplam	**411**	**2589**	**3000**
$AWEI_{nsh}$	Su	383	77	**460**
	Su Olmayan	28	2512	**2540**
	Toplam	**411**	**2589**	**3000**

Tablo A.3 Büyükçekmece Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	1188	6	**1194**
	Su Olmayan	46	2573	**2619**
	Toplam	**1234**	**2579**	**3813**
MNDWI	Su	1181	4	**1185**
	Su Olmayan	53	2575	**2628**
	Toplam	**1234**	**2579**	**3813**
$AWEI_{sh}$	Su	1201	12	**1213**
	Su Olmayan	33	2567	**2600**
	Toplam	**1234**	**2579**	**3813**
$AWEI_{nsh}$	Su	1194	13	**1207**
	Su Olmayan	40	2566	**2606**
	Toplam	**1234**	**2579**	**3813**

Tablo A.4 Sazlıdere Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	336	464	**800**
	Su Olmayan	10	3528	**3538**
	Toplam	**346**	**3992**	**4338**
MNDWI	Su	335	182	**517**
	Su Olmayan	11	3810	**3821**
	Toplam	**346**	**3992**	**4338**
$AWEI_{sh}$	Su	324	16	**340**
	Su Olmayan	22	3976	**3998**
	Toplam	**346**	**3992**	**4338**
$AWEI_{nsh}$	Su	328	19	**347**
	Su Olmayan	18	3973	**3991**
	Toplam	**346**	**3992**	**4338**

Tablo A.5 Alibey Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	567	304	**871**
	Su Olmayan	25	2674	**2699**
	Toplam	**592**	**2978**	**3570**
MNDWI	Su	557	266	**823**
	Su Olmayan	35	2712	**2747**
	Toplam	**592**	**2978**	**3570**
$AWEI_{sh}$	Su	443	41	**484**
	Su Olmayan	149	2937	**3086**
	Toplam	**592**	**2978**	**3570**
$AWEI_{nsh}$	Su	305	29	**334**
	Su Olmayan	287	2949	**3236**
	Toplam	**592**	**2978**	**3570**

Tablo A.6 Elmalı Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	435	86	**521**
	Su Olmayan	78	3117	**3195**
	Toplam	**513**	**3203**	**3716**
MNDWI	Su	398	125	**523**
	Su Olmayan	115	3078	**3193**
	Toplam	**513**	**3203**	**3716**
$AWEI_{sh}$	Su	453	39	**492**
	Su Olmayan	60	3164	**3224**
	Toplam	**513**	**3203**	**3716**
$AWEI_{nsh}$	Su	410	48	**458**
	Su Olmayan	103	3155	**3258**
	Toplam	**513**	**3203**	**3716**

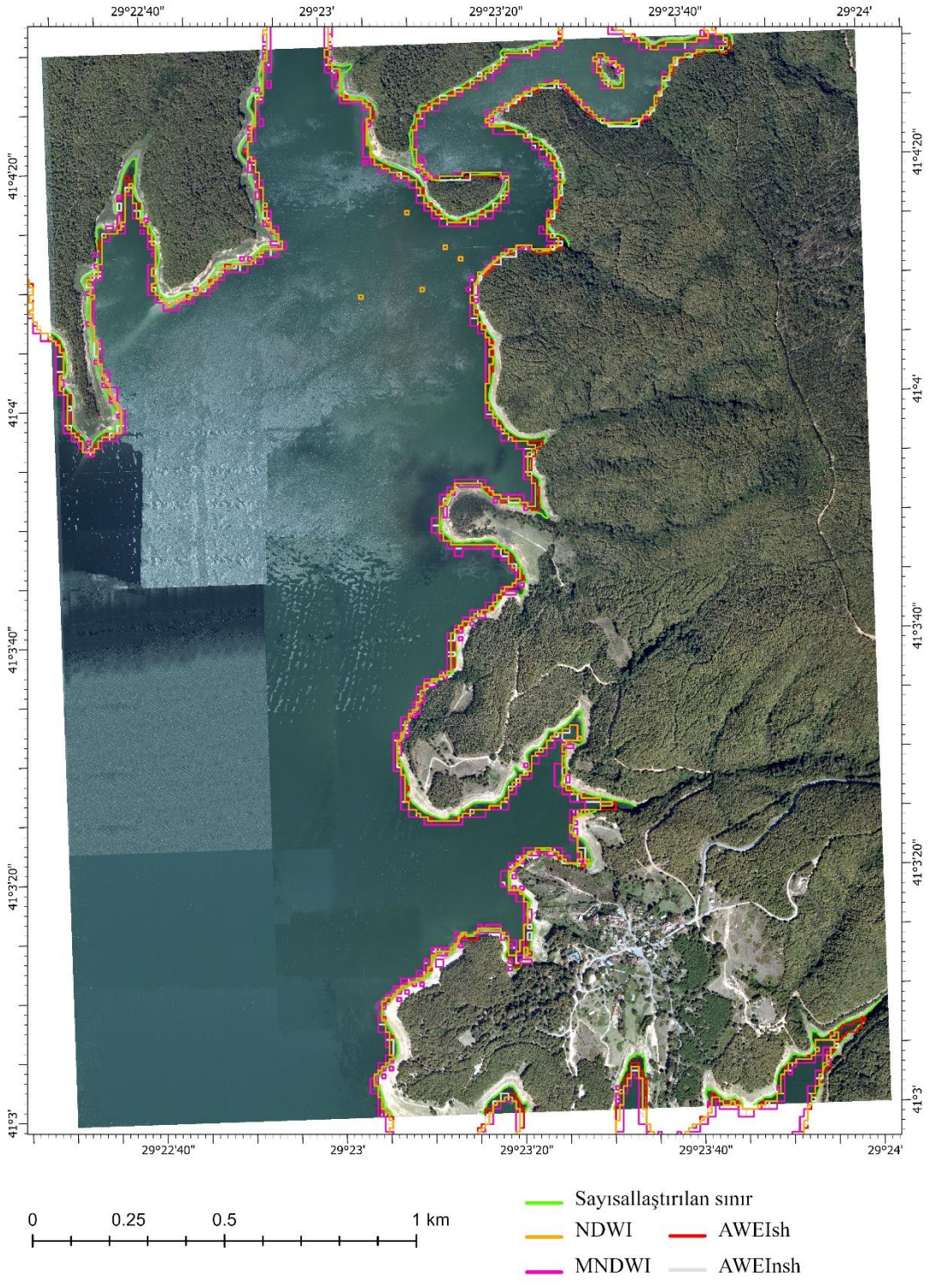
Tablo A.7 Terkos Barajı hata matrisi

		Su	Su Olmayan	**Toplam**
NDWI	Su	1844	52	**1896**
	Su Olmayan	21	2364	**2385**
	Toplam	**1865**	**2416**	**4281**
MNDWI	Su	1832	15	**1847**
	Su Olmayan	33	2401	**2434**
	Toplam	**1865**	**2416**	**4281**
$AWEI_{sh}$	Su	1844	11	**1855**
	Su Olmayan	21	2405	**2426**
	Toplam	**1865**	**2416**	**4281**
$AWEI_{nsh}$	Su	1838	12	**1850**
	Su Olmayan	27	2404	**2431**
	Toplam	**1865**	**2416**	**4281**

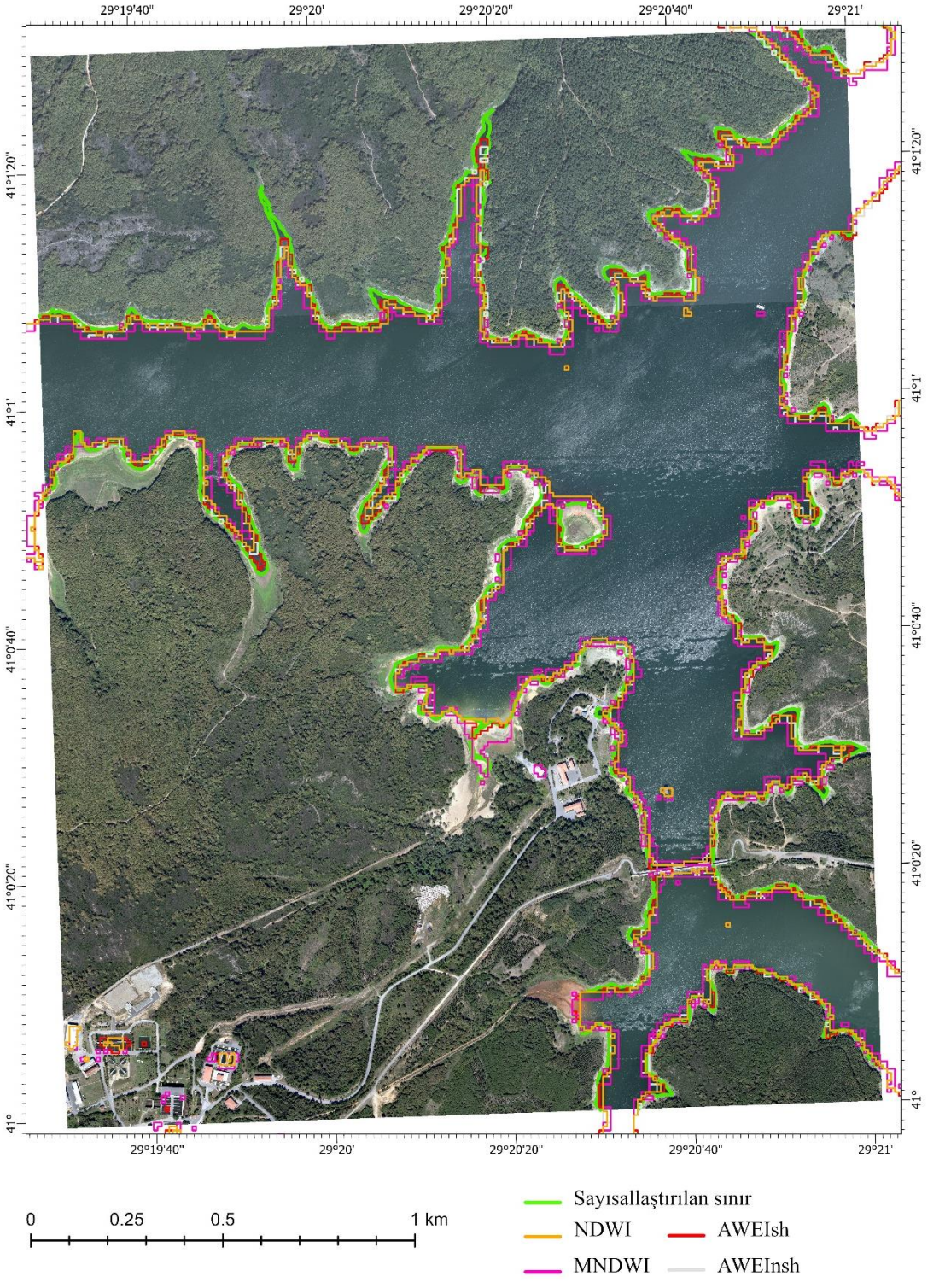
B

YAKINLIK ANALİZLERİ

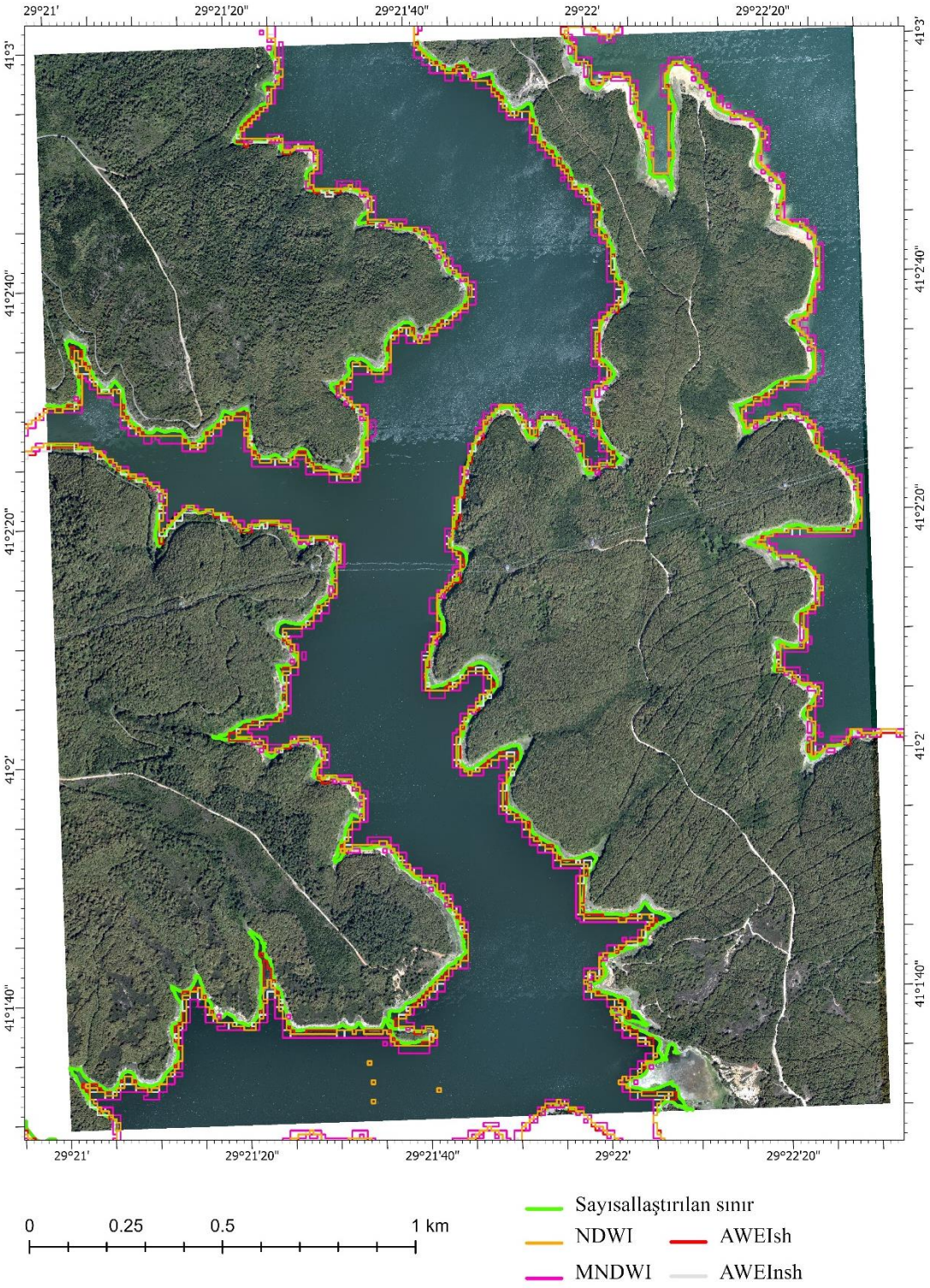
F22C18C



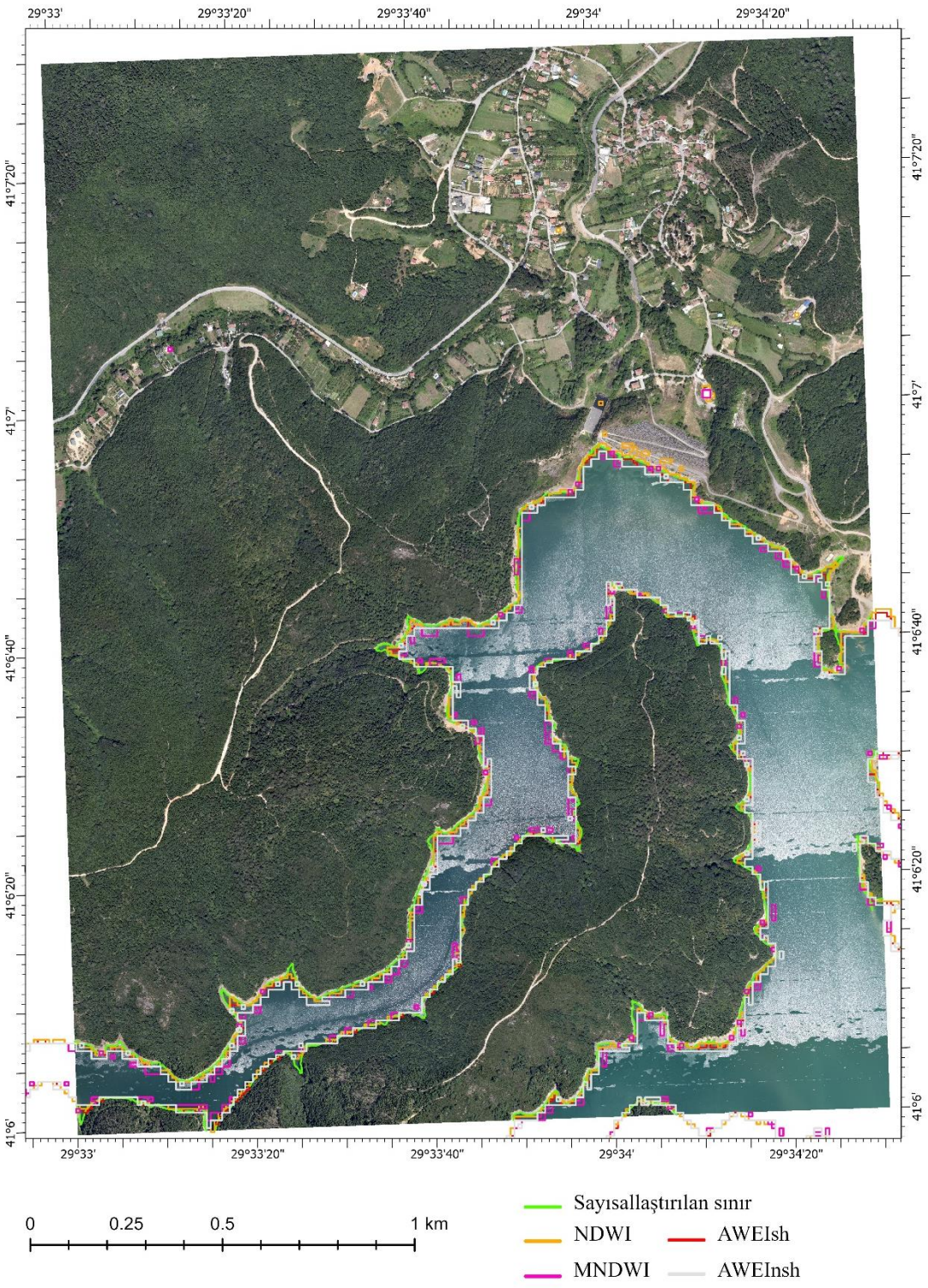
F22C22C


29°19'40"
29°20'
29°20'20"
29°20'40"
29°21'
41°1'20"
41°1'
41°0'40"
41°0'20"
41°
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

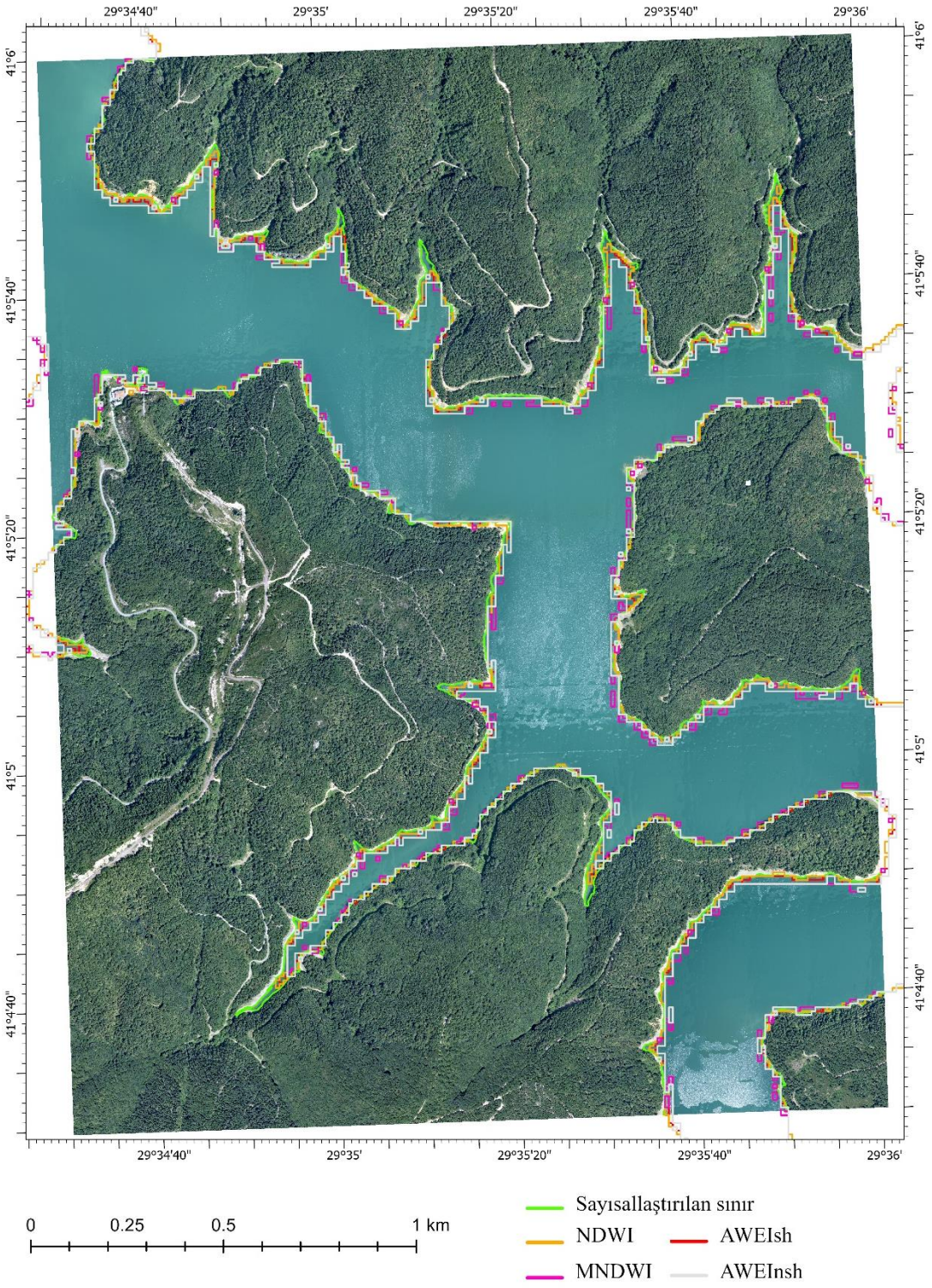
F22C23A


29°21'
29°21'20"
29°21'40"
29°22'
29°22'20"
41°3'
41°2'40"
41°2'20"
41°2'
41°1'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

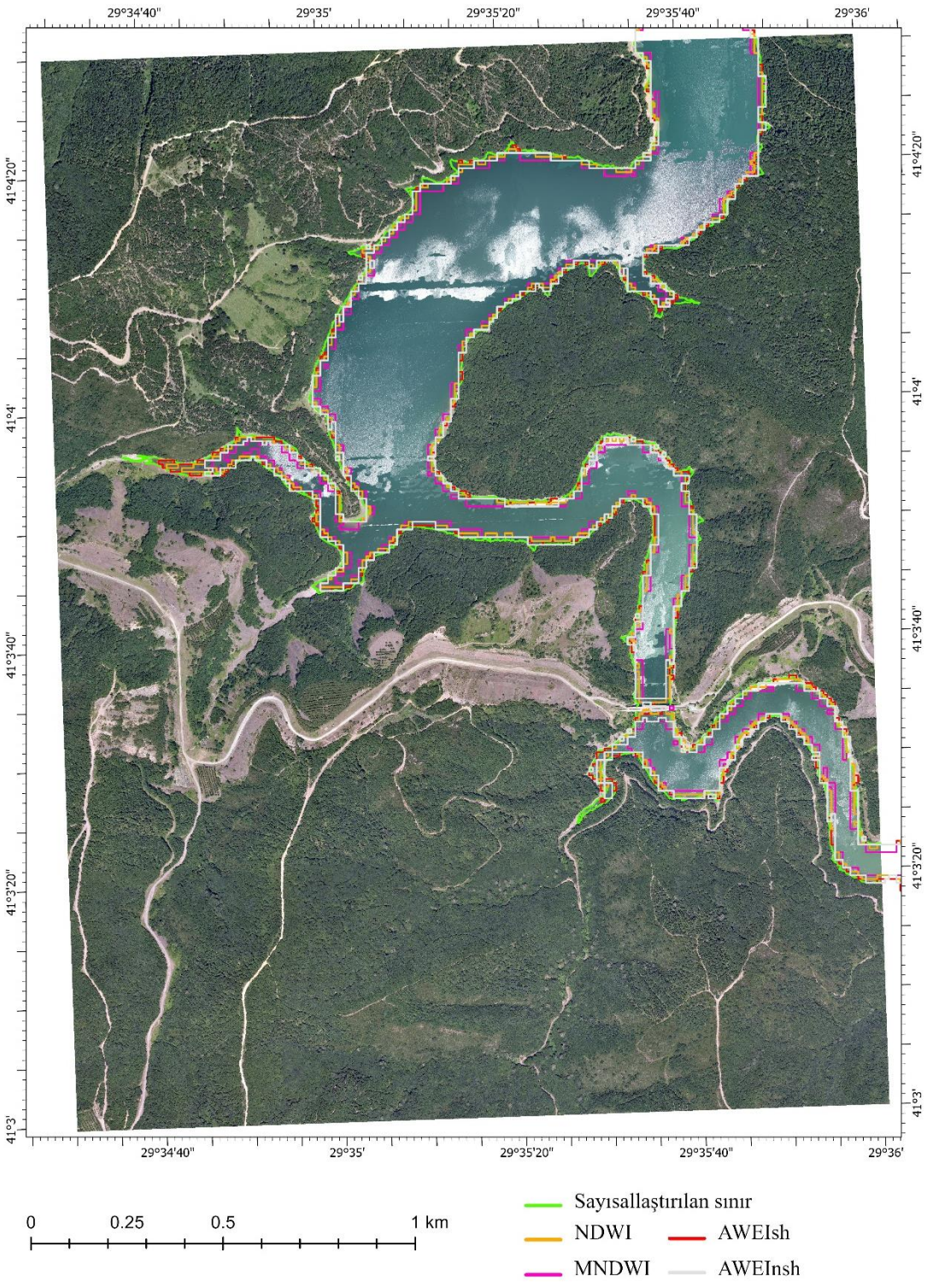
F23D12D


29°33'
29°33'20"
29°33'40"
29°34'
29°34'20"
41°7'20"
41°7'
41°6'40"
41°6'20"
41°6'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

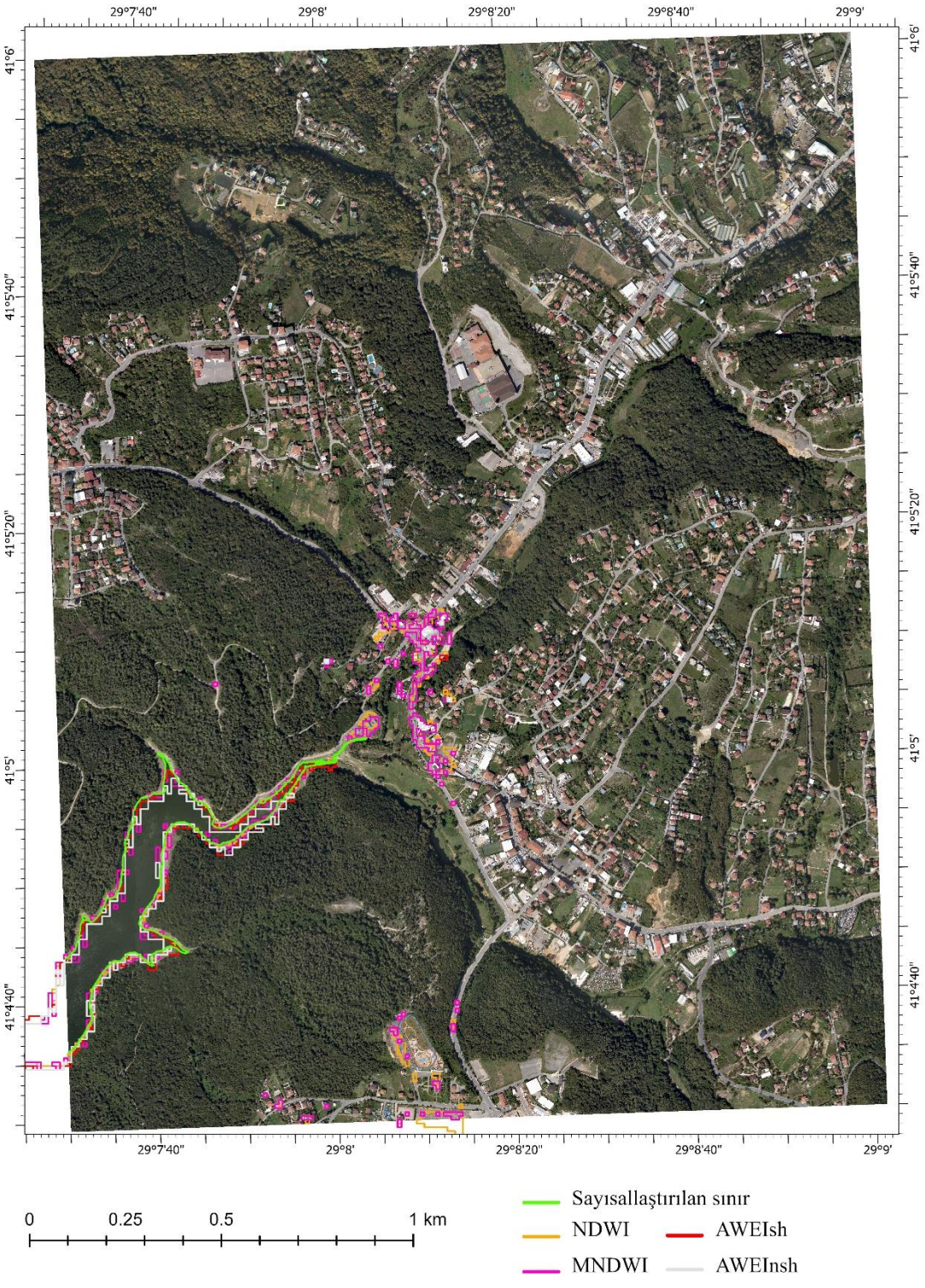
F23D17B


29°34'40"
29°35'
29°35'20"
29°35'40"
29°36'
41°6'
41°5'40"
41°5'20"
41°5'
41°4'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

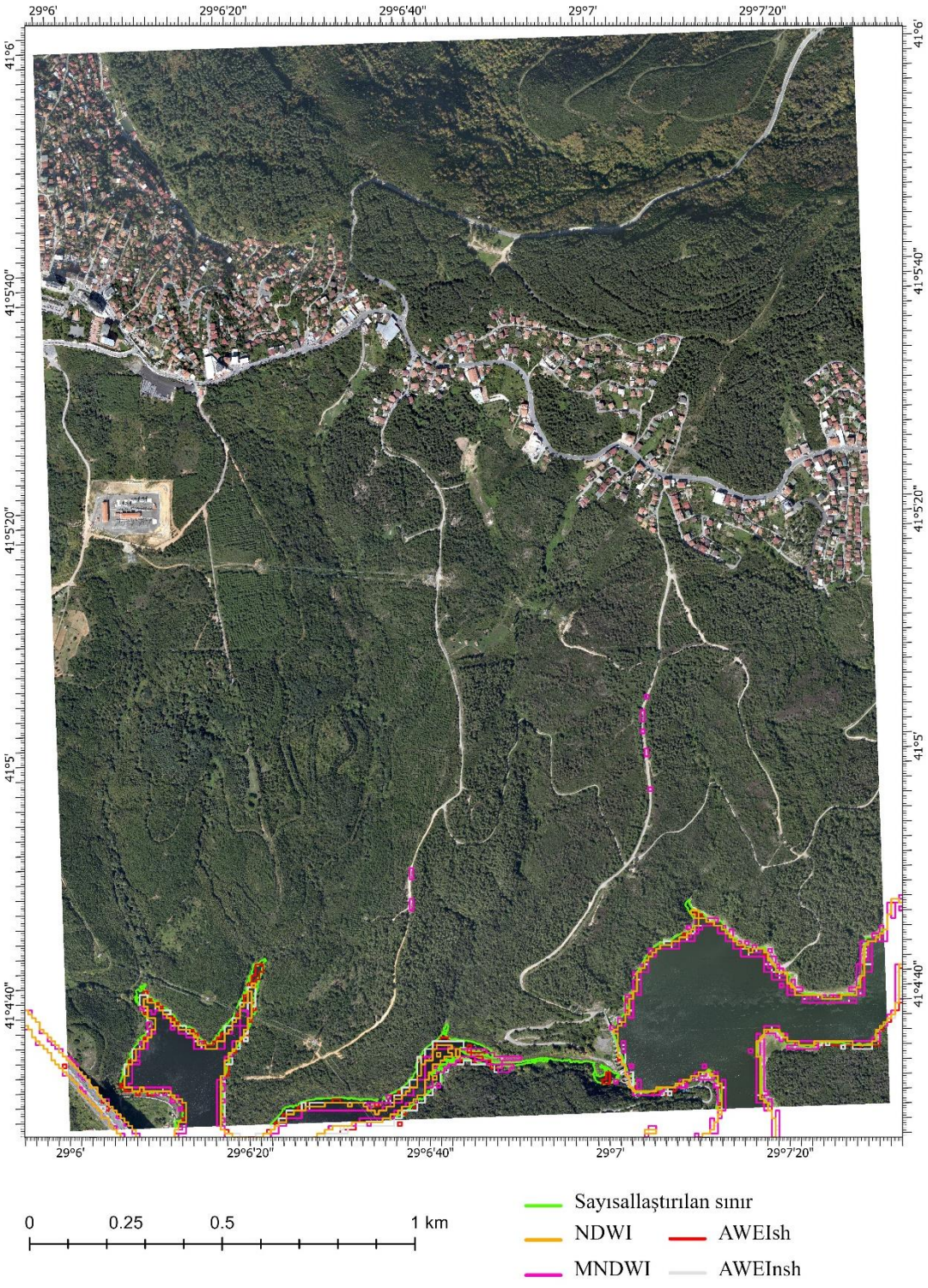
F23D17C


29°34'40"
29°35'
29°35'20"
29°35'40"
29°36'
41°4'20"
41°4'
41°3'40"
41°3'20"
41°3'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

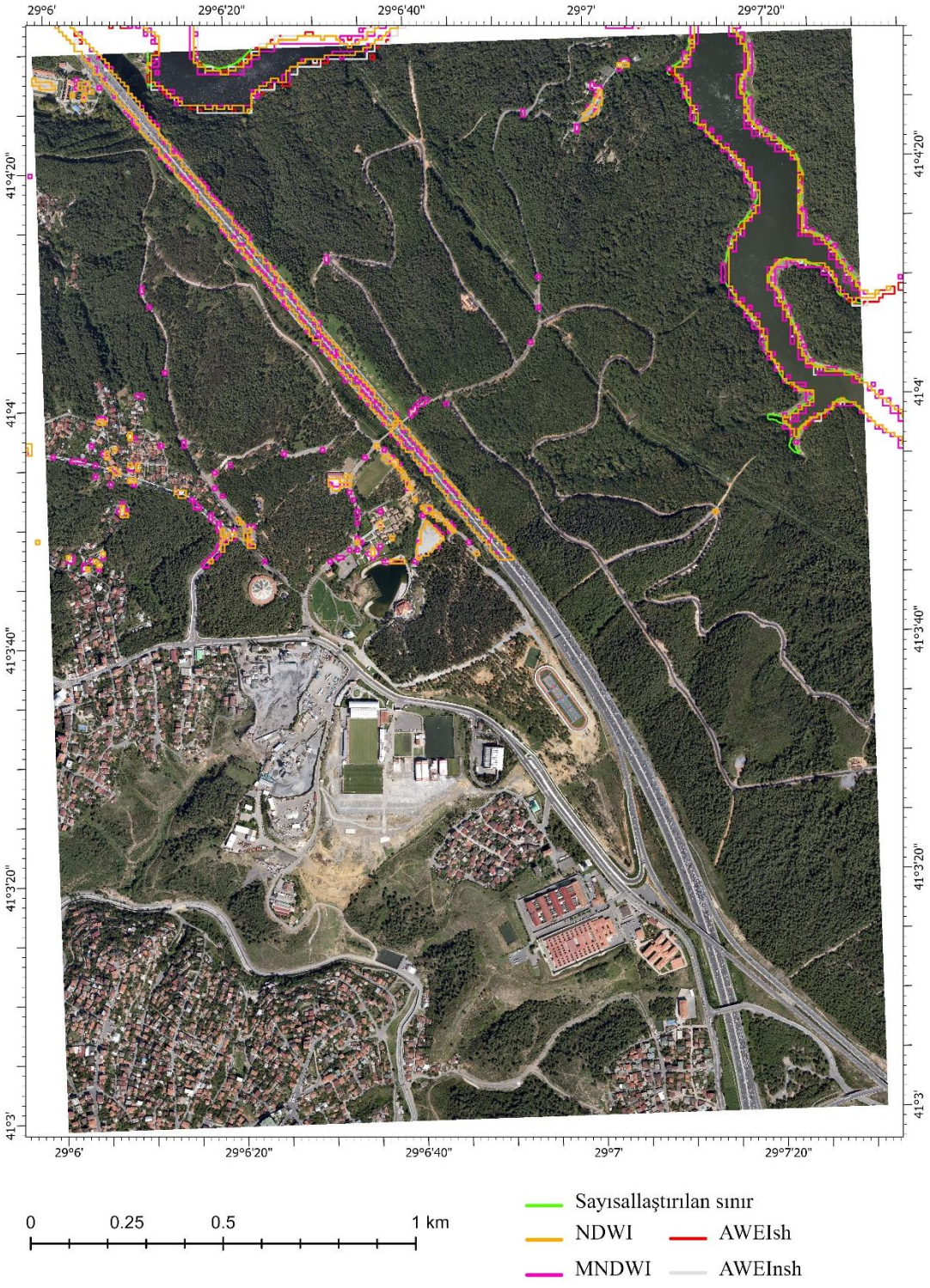
F22D18B


29°7'40"
29°8'
29°8'20"
29°8'40"
29°9'
41°6'
41°5'40"
41°5'20"
41°5'
41°4'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

F22D18A


29°6'
29°6'20"
29°6'40"
29°7'
29°7'20"
41°6'
41°5'40"
41°5'20"
41°5'
41°4'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
MNDWI
AWEIsh
AWEInsh

F22D18D


29°6'
29°6'20"
29°6'40"
29°7'
29°7'20"
41°4'20"
41°4'
41°3'40"
41°3'20"
41°3'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

F21D16C


28°31'40"
28°32'
28°32'20"
28°32'40"
28°33'
41°4'20"
41°4'
41°3'40"
41°3'20"
41°3'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

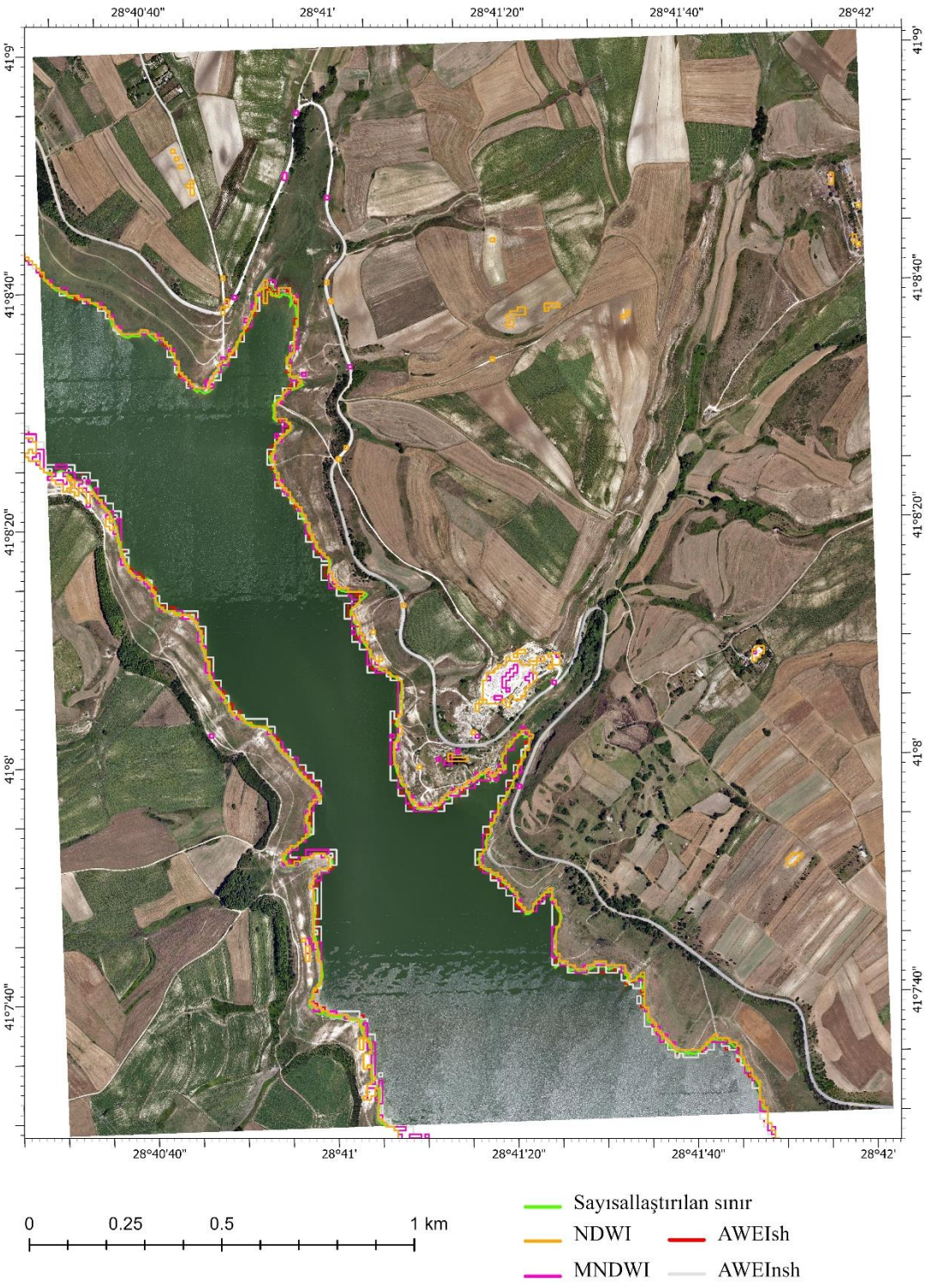
F21D22A


28°33'
28°33'20"
28°33'40"
28°34'
28°34'20"
41°3'
41°2'40"
41°2'20"
41°2'
41°1'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
MNDWI
AWEIsh
AWEInsh

F21D17A


28°33'
28°33'20"
28°33'40"
28°34'
28°34'20"
41°6'
41°5'40"
41°5'20"
41°5'
41°4'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

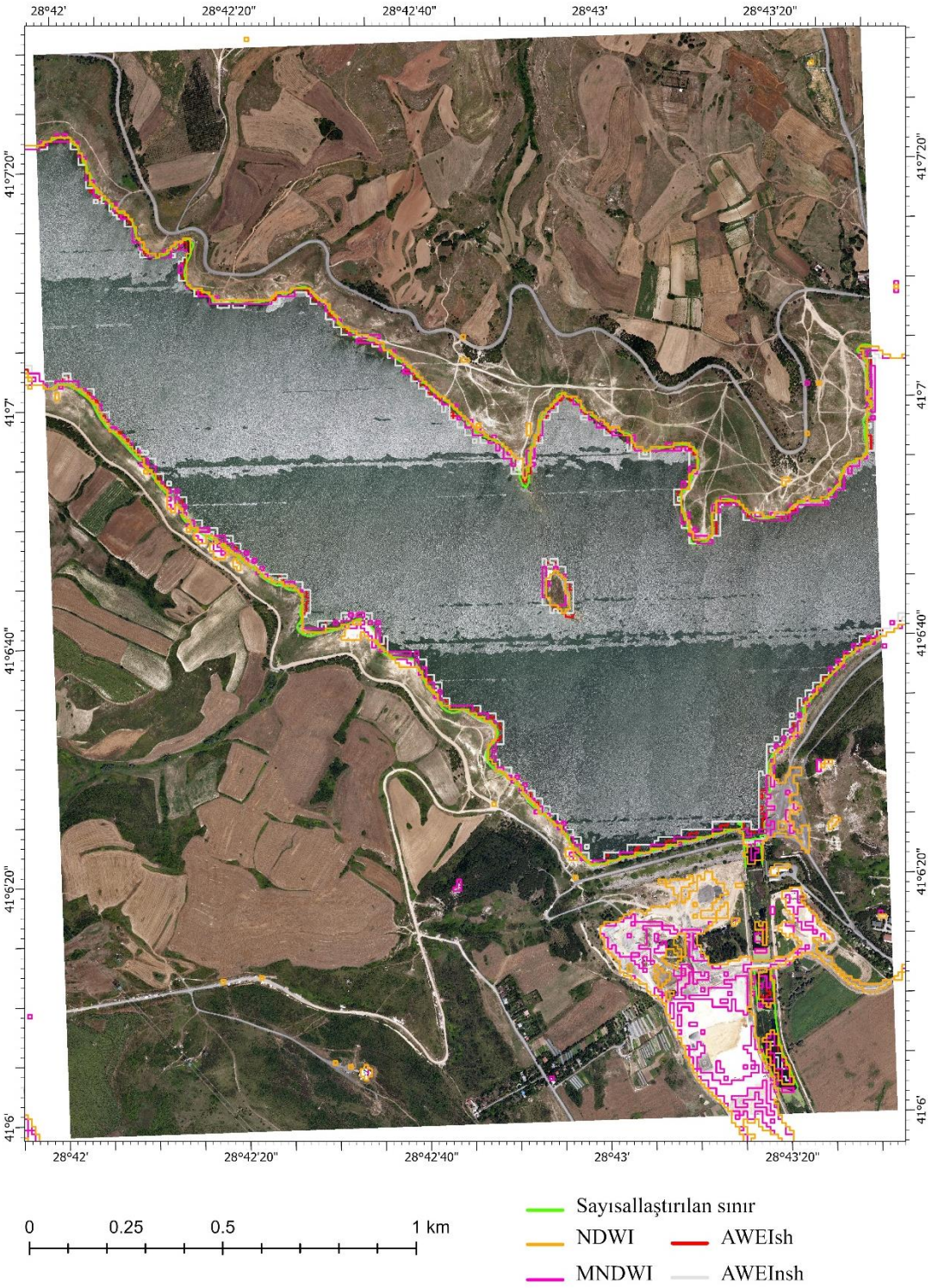
F21D14B


28°40'40"
28°41'
28°41'20"
28°41'40"
28°42'
41°9'
41°8'40"
41°8'20"
41°8'
41°7'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

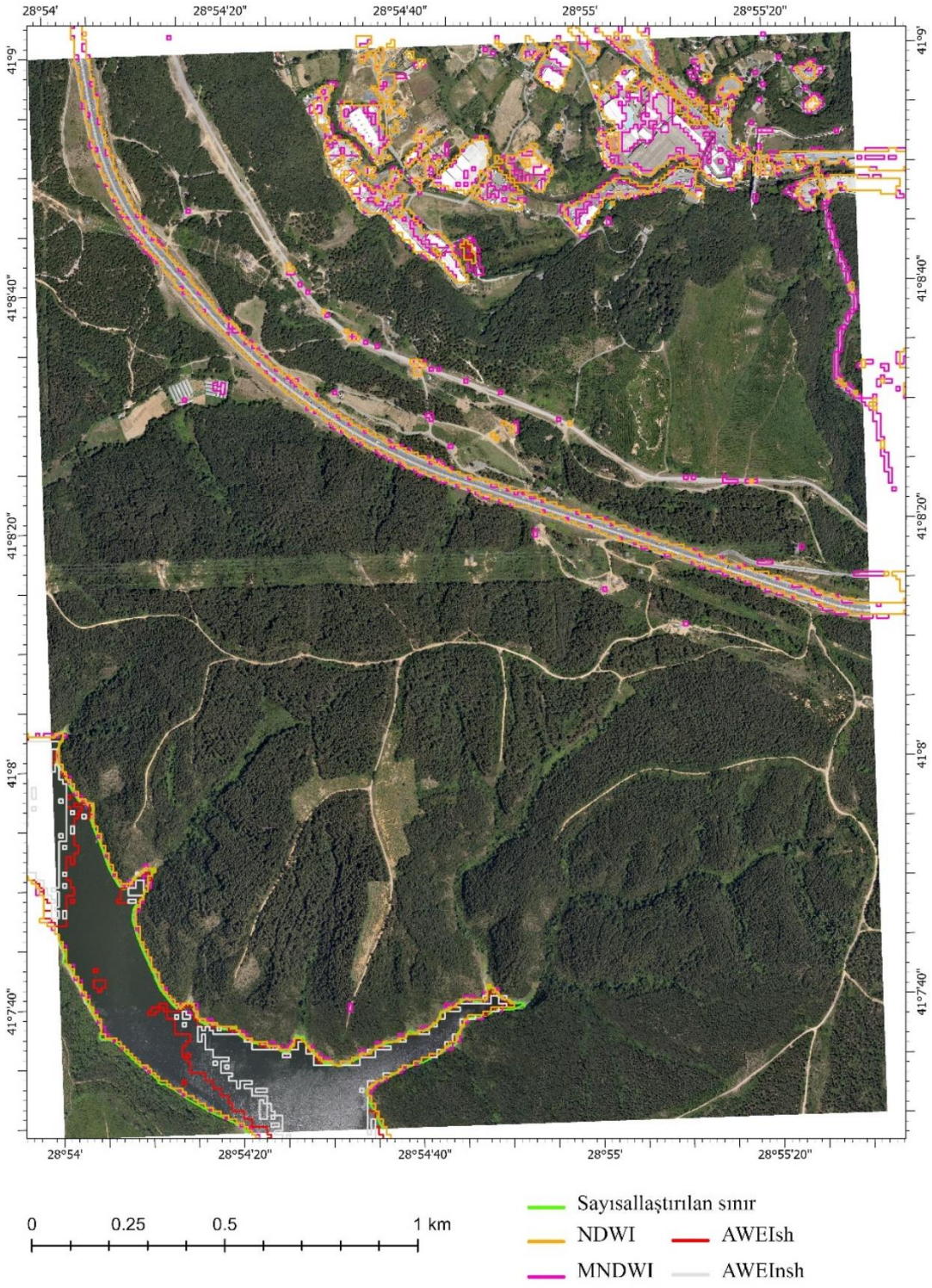
F21D14C


28°40'40"
28°41'
28°41'20"
28°41'40"
28°42'
41°7'20"
41°7'
41°6'40"
41°6'20"
41°6'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
MNDWI
AWEIsh
AWEInsh

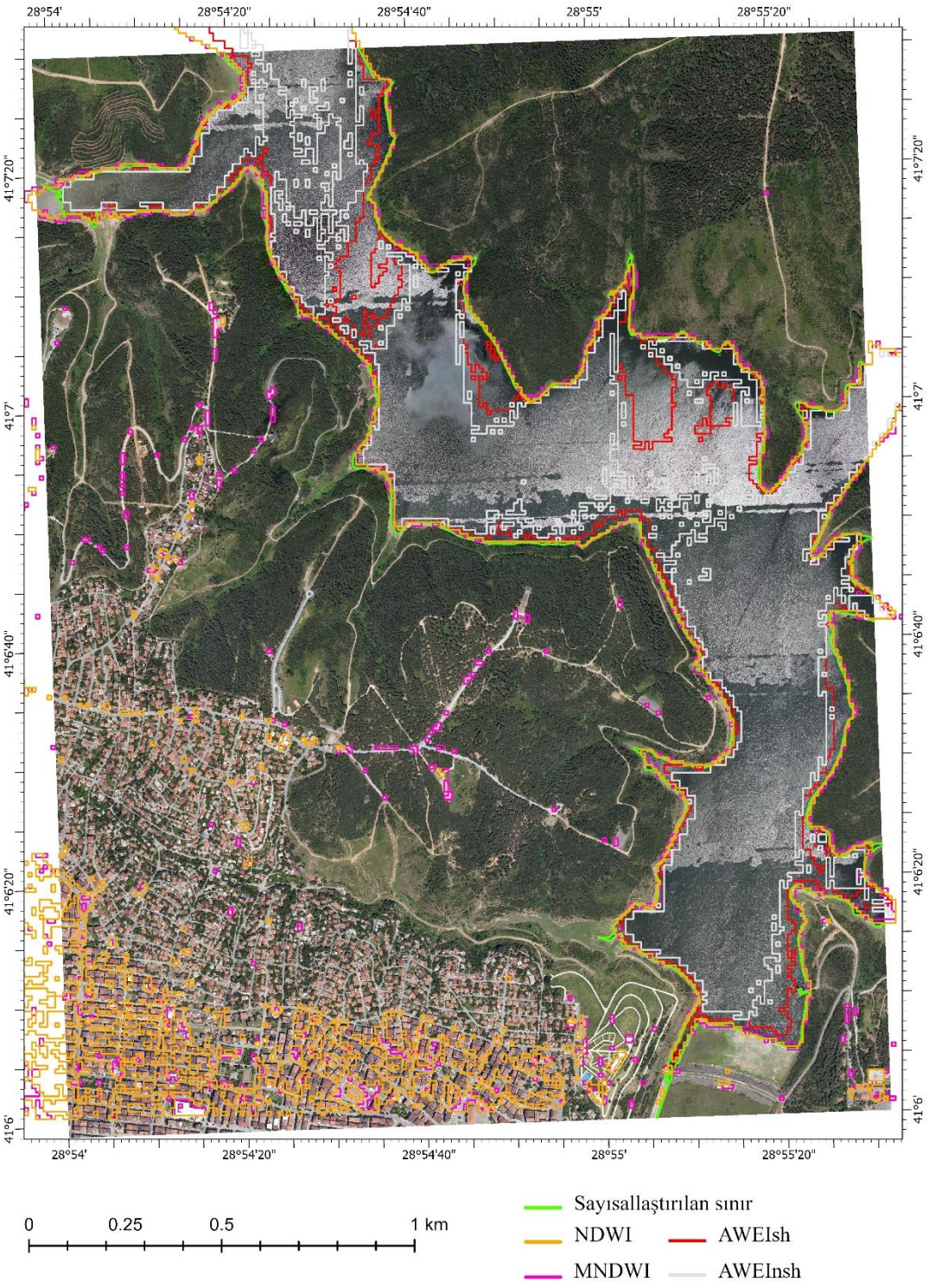
F21D15D


28°42'
28°42'20"
28°42'40"
28°43'
28°43'20"
41°7'20"
41°7'
41°6'40"
41°6'20"
41°6'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

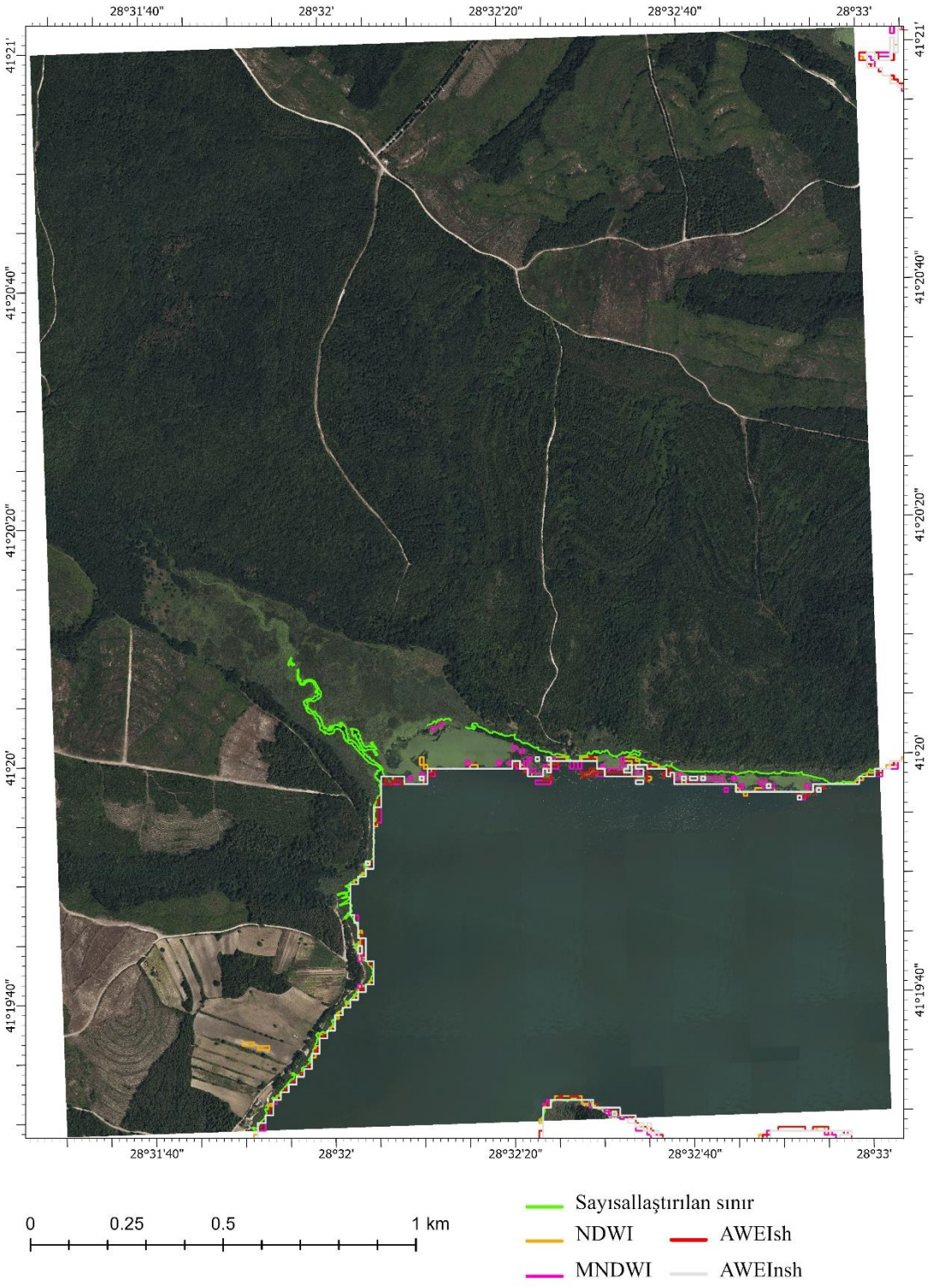
F21C14A


28°54'
28°54'20"
28°54'40"
28°55'
28°55'20"
41°9'
41°8'40"
41°8'20"
41°8'
41°7'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

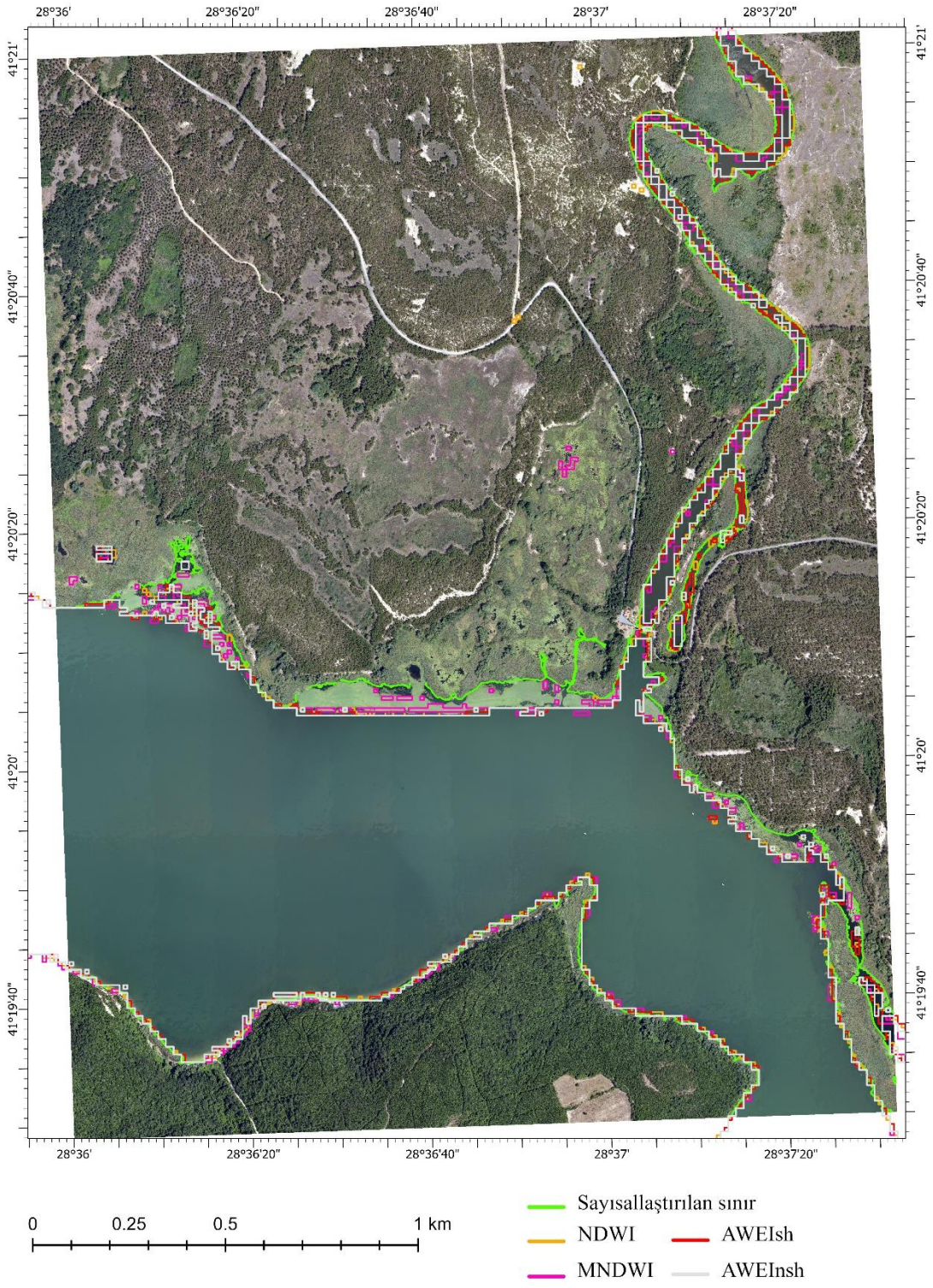
F21C14D


28°54'
28°54'20"
28°54'40"
28°55'
28°55'20"
41°7'20"
41°7'
41°6'40"
41°6'20"
41°6'
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

F21A16B


28°31'40"
28°32'
28°32'20"
28°32'40"
28°33'
41°21'
41°20'40"
41°20'20"
41°20'
41°19'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
MNDWI
AWEIsh
AWEInsh

F21A18A


28°36'
28°36'20"
28°36'40"
28°37'
28°37'20"
41°21'
41°20'40"
41°20'20"
41°20'
41°19'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

F21A22A


28°33'
28°33'20"
28°33'40"
28°34'
28°34'20"
41°18'
41°17'40"
41°17'20"
41°17'
41°16'40"
0
0.25
0.5
1 km
Sayısallaştırılan sınır
NDWI
AWEIsh
MNDWI
AWEInsh

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. G. Kara, O.S. Yılmaz ve F. Gülgen, "İstanbul Havzalarındaki Baraj Yüzeylerinin Su Çıkarma İndeksleri Kullanılarak Belirlenmesi", *XX. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 2025, Ankara.