

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SU GÖVDELERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN OTOMATİK OLARAK TESPİT
EDİLMESİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS

OZAN KİYAT

Temmuz 2026
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SU GÖVDELERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN OTOMATİK OLARAK TESPİT
EDİLMESİ VE ANALİZİ**

**AUTOMATIC DETECTION AND ANALYSIS OF CHANGES IN WATER
BODIES**

YÜKSEK LİSANS

OZAN KİYAT

**Temmuz 2026
GÜMÜŞHANE**



LEE

**GÜMÜŞHANE
ÜNİVERSİTESİ**

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

T.C.

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SU GÖVDELERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN OTOMATİK OLARAK
TESPİT EDİLMESİ VE ANALİZİ**

**AUTOMATIC DETECTION AND ANALYSIS OF CHANGES IN
WATER BODIES**

YÜKSEK LİSANS

OZAN KİYAT

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HATİCE ÇATAL REİS

Temmuz 2026

GÜMÜŞHANE

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Hatice ÇATAL REİS danışmanlığında, **Ozan KİYAT** tarafından hazırlanan “**Su Gövdelerindeki Değişimlerin Otomatik Olarak Tespit Edilmesi Ve Analizi**” isimli bu çalışma,16/07/2026 tarihinde yapılan lisansüstü tez savunma sınavı sonucunda **Oy Birliği** ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.....
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÜSTÜNER (Başkan)

.....
Doç. Dr. Hatice ÇATAL REİS (Danışman)

.....
Dr. Öğr. Üyesi Burhan Baha BİLGİLİOĞLU (Üye)

Lisansüstü tez savunma sınavında başarılı bulunarak kabul edilen bu tezin ciltlenmiş hali, /..... /..... tarihli ve / sayılı Enstitü Yönetim Kurulu toplantısında görüşülmüş ve tez yazım kılavuzuna uygun bulunarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Duygu Özdeş
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Su Gövdelerindeki Değişimlerin Otomatik Olarak Tespit Edilmesi Ve Analizi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, danışmanımın sorumluluğunda hazırladığımı, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim.

Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

16/07/2026

Ozan KİYAT

TEŞEKKÜR

Araştırma konusunun belirlenmesi, yöntemsel yaklaşımın geliştirilmesi ve çalışmanın tüm aşamalarında sunduğu bilimsel rehberlik ve değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hatice ÇATAL REİS'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecinde teknik desteklerini, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, akademik çalışmalarım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür borçluyum.

Ozan KİYAT

GÜMÜŞHANE – 2026

ÖZET

Uzaktan algılama tarım, orman, bitki örtüsü ve su gibi farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Göllerde su yüzeyindeki değişimler, ekosistemler ve sürdürülebilir su kaynaklarının yönetimi açısından elzemdir. Bu çalışma, uydu görüntüleri kullanılarak Türkiye’de farklı oluşum kökenlerine ve su kimyalarına sahip 10 gölün (Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir, Burdur) 1984–2025 yılları arasındaki göl su yüzey alanı değişimini otomatik olarak tespit etmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel veri kaynağını Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 ve Sentinel-2 MSI uydu görüntüleri oluşturmaktadır. CHIRPS yağış verileri ile ERA5-Land potansiyel buharlaşma verileri hidroklimatik değerlendirmeleri desteklemek amacıyla kullanılmıştır. Veriler, Google Earth Engine platformunda işlenmiştir. Su yüzeylerinin sınıflandırılmasında spektral indeksler ve Otsu eşikleme yöntemi kullanılmış; bu kapsamda Modifiye Edilmiş Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI), Normalize Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Normalize Fark Su İndeksi (NDWI) ve Otomatik Su Çıkarma İndeksi (AWEI) hesaplanmıştır. Ayrıca tüm analiz yıllarında (1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025) Rastgele Orman (RO), Destek Vektör Makineleri (DVM), Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (CART) ve K-En Yakın Komşu (KNN) makine öğrenmesi algoritmaları uygulanmıştır.

Göllerin su yüzey alanlarında anlamlı azalmalar tespit edilmiştir. En çarpıcı düşüşler, yüzey alanının tamamını yitiren (%100) Akşehir Gölü’nde ve alanının %93,68’ini kaybeden Tuz Gölü’nde gözlemlenmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları arasında RO modeli, %99,25 genel doğrulukla en yüksek sınıflandırma başarısını göstermiştir.

Bu çalışma, farklı oluşum ve özelliklere sahip göllerin izlenmesi için geliştirilebilir ve güncellenebilir bir uzaktan algılama iş akışı sunmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için farklı disiplinlere bilimsel bir altlık sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Google Earth Engine, Göl su yüzey alanı değişimi, Makine öğrenmesi, Spektral indeksler ve Otsu eşikleme, Uzaktan algılama

ABSTRACT

Remote sensing is widely used in agriculture, forestry, vegetation monitoring, and water resources management. Changes in lake surface areas are important indicators for ecosystem assessment and sustainable water management. This study aims to automatically detect water surface area changes in 10 lakes (Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir, and Burdur) with different formation origins and water chemistry characteristics using satellite imagery from 1984 to 2025.

The main data sources were Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, and Sentinel-2 MSI images. CHIRPS precipitation and ERA5-Land potential evaporation data were used to support hydroclimatic assessments. All data were processed on the Google Earth Engine platform. Water surfaces were classified using spectral indices and Otsu thresholding, including the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), and Automated Water Extraction Index (AWEI). Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Classification and Regression Tree (CART), and K-Nearest Neighbors (KNN) algorithms were also applied for the analysis years 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, and 2025.

Significant decreases were detected in lake water surface areas. Lake Akşehir lost its entire water surface area (100%), while Lake Tuz lost 93.68% of its area. Among the machine learning algorithms, RF achieved the highest performance with an overall accuracy of 99.25%.

The study presents a generalizable and updatable remote sensing workflow for monitoring lakes with different formation processes and characteristics and provides a scientific basis for different disciplines involved in sustainable water resources management.

Keywords: Google Earth Engine, Lake surface area change, Machine learning, Spectral indices and Otsu thresholding, Remote sensing

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XV
EKLER DİZİNİ.....	XVI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye’de Göl Su Yüzeyi Alanlarındaki Değişim ve İzleme Çalışmaları.....	3
1.2. Su Yüzeyi İzlemede Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bulut Bilişim .	4
1.3. Landsat Arşivinin Uzun Dönemli Su Yüzeyi İzleme Çalışmalarındaki Rolü.....	5
1.4. Su Yüzeyi Sınıflandırmasında İndeks, Eşikleme ve Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlar.	5
1.5. Tezin Amacı, Kapsamı, Özgün Değeri ve Araştırma Soruları.....	6
2. LİTERATÜR TARAMASI VE YÖNTEMLER.....	9
2.1. Göl Sistemlerinde Su Yüzeyi Alanı Değişiminin Kavramsal Temelleri	9
2.1.1. Göl Su Bütçesi ve Yüzey Alanı İlişkisi.....	9
2.1.2. Alan, Seviye ve Hacim Kavramlarının Ayrımı.....	10
2.1.3. Doğal ve İnsan Kaynaklı Baskılar.....	10
2.2. Optik Uzaktan Algılama Verilerinin Fiziksel ve Radyometrik Temelleri.....	10
2.2.1. Suyun Spektral Davranışı.....	11
2.2.2. Yüzey Yansıması ve Sensörler Arası Farklılıklar.....	11
2.2.3. Veri Kalitesi ve Zamansal Tutarlılık.....	12
2.2.4. Mekânsal Çözünürlük ve Karışık Piksel Problemi	12
2.3. Spektral Su İndeksleri ve Yardımcı Spektral Değişkenler.....	13
2.3.1. Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi	13
2.3.2. Modifiye Edilmiş Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi.....	14
2.3.3. Otomatik Su Çıkarma İndeksi.....	14
2.3.4. NDVI ve NIR Yansıması	15
2.4. Spektral Eşikleme ve Su Maskesi Üretimi.....	16

2.4.1. Sabit ve Göl Bazlı Eşikleme	16
2.4.2. Dinamik Eşikleme ve Otsu Yöntemi.....	16
2.4.3. Yardımcı Spektral Ölçütlerin Kullanımı	17
2.5. Makine Öğrenmesi Algoritmaları	17
2.5.1. K-En Yakın Komşu.....	18
2.5.2. Destek Vektör Makineleri	18
2.5.3. Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı ile Rastgele Orman	20
2.6. Doğruluk Analizi ve Referans Veri.....	22
2.7. Google Earth Engine Tabanlı Uzun Dönemli Su İzleme Çalışmaları.....	24
2.8. Zamansal Eğilim Analizi.....	25
2.8.1. Mevsimsel Standardizasyon.....	25
2.8.2. Mann–Kendall Testi.....	25
2.8.3. Sen’in Eğim Yöntemi.....	26
2.8.4. Eğilim Temelli Senaryo Değerleri	27
2.9. Hidroklimatik Verilerin Yardımcı Değerlendirmesi	27
2.10. Türkiye’de Çalışma Kapsamındaki Göller Üzerine Yapılan Araştırmalar	28
2.11. Literatürün Genel Değerlendirmesi ve Araştırma Boşluğu	30
3. MATERYAL VE METOD	32
3.1. Araştırmanın İş Akışı	32
3.2. Çalışma Alanı.....	34
3.2.1. Analiz ve Eşik Hesaplama Geometrilere	35
3.3. Kullanılan Veri Setleri	36
3.3.1. Landsat Verileri.....	36
3.3.2. Sentinel-2 MSI Verileri.....	37
3.3.3. JRC Global Surface Water Verisi	37
3.3.4. CHIRPS ve ERA5-Land Verileri	37
3.4. Uydu Görüntüsünün Yıl ve Dönem Seçimi	38
3.5. GEE Ortamı ve Kod Mimarisi	38
3.6. Landsat Uydu Görüntülerinin Ön İşlenmesi	39
3.6.1. Yüzey Yansıması Ölçeklendirmesi	39
3.6.2. Bulut, Gölge, Kar ve Doygun Piksel Maskesi	39
3.6.3. Medyan Kompozit Üretimi	40
3.7. Spektral Değişkenlerin Hesaplanması.....	40
3.7.1. MNDWI	41
3.7.2. NDVI ve NIR Yüzey Yansıması.....	41

3.7.3. Makine Öğrenmesi İçin Spektral Öznitelikler	41
3.8. Dinamik Eşikleme ve Su Maskesi Üretimi	41
3.8.1. Otsu Dinamik Eşik Yöntemi	41
3.8.2. Temel Su Sınıflandırma Modeli.....	42
3.8.3. NDVI ve NIR Ek Koşullarının Değerlendirilmesi.....	42
3.8.4. NoData Ayrımı.....	43
3.9. Göl Bazlı Uygulama ve Kalite Güvencesi	43
3.10. Su Yüzeyi Alanının Hesaplanması.....	44
3.11. Sonuç Verilerinin Elde Edilmesi.....	45
3.12. Su Maskelerinin Doğrulanması ve Belirsizlik Değerlendirmesi.....	45
3.12.1. Piksel Tabanlı Performans Ölçütleri	46
3.12.2. Referans Noktalarının Oluşturulması ve Doğruluk Analizi.....	46
3.13. Makine Öğrenmesi Algoritmaları	47
3.14. Zamansal Değişim ve Eğilim Analizi	48
3.14.1. Mann–Kendall Trend Testi	48
3.14.2. Sen’in Eğim Yöntemi.....	49
3.14.3. Eğilim Temelli Senaryo Analizi.....	49
3.15. Hidroklimatik Destekleyici Analiz	50
3.16. Yeniden Üretilbilirlik, Veri Yönetimi ve Yöntemsel Sınırlılıklar	51
4. BULGULAR.....	52
4.1. Göllere İlişkin Genel Bulgular	52
4.1.1. Su Yüzey Alanlarındaki Genel Değişim	52
4.1.2. Göller Arası Karşılaştırmalı Değerlendirme	53
4.2. Van Gölü Bulguları	54
4.2.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	54
4.2.2. Doğruluk Analizi.....	56
4.2.3. Deneyisel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	56
4.3. Tuz Gölü Bulguları	56
4.3.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	56
4.3.2. Doğruluk Analizi.....	59
4.3.3. Deneyisel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	59
4.4. Beyşehir Gölü Bulguları	59
4.4.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	59
4.4.2. Doğruluk Analizi.....	62
4.4.3. Deneyisel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	62

4.5. Eğirdir Gölü Bulguları	62
4.5.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	62
4.5.2. Doğruluk Analizi.....	65
4.5.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	65
4.6. Burdur Gölü Bulguları	65
4.6.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	65
4.6.2. Doğruluk Analizi.....	68
4.6.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	68
4.7. İznik Gölü Bulguları	68
4.7.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	68
4.7.2. Doğruluk Analizi.....	71
4.7.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	71
4.8. Manyas Gölü Bulguları	71
4.8.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	71
4.8.2. Doğruluk Analizi.....	74
4.8.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	74
4.9. Salda Gölü Bulguları.....	74
4.9.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	74
4.9.2. Doğruluk Analizi.....	77
4.9.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	77
4.10. Eber Gölü Bulguları	77
4.10.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	77
4.10.2. Doğruluk Analizi.....	80
4.10.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	80
4.11. Akşehir Gölü Bulguları	80
4.11.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim.....	80
4.11.2. Doğruluk Analizi.....	83
4.11.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi.....	83
4.12. Trend Analizi ve Eğilim Temelli Projeksiyon Bulguları	84
4.12.1. Mann–Kendall Trend Testi Bulguları	84
4.12.2. Sen Eğimi Bulguları.....	84
4.12.3. Eğilim Temelli Su Yüzey Alanı Projeksiyonları	85
4.13. Makine Öğrenmesi Bulguları.....	86
4.13.1. Modellerin Toplu Performans Sonuçları.....	86
4.13.2. RO Modelinin Toplu Hata Matrisi.....	86

4.13.3. DVM-RTF Modelinin Toplu Hata Matrisi	87
4.13.4. CART Modelinin Toplu Hata Matrisi.....	87
4.13.5. KNN Modelinin Toplu Hata Matrisi.....	88
4.13.6. Model Alanları ile Su Alanlarının Karşılaştırılması	88
4.14. Hidroklimatik Destekleyici Bulgular	89
4.14.1. Hidrolojik Yıl Hidroklimatik Bulguları	89
4.14.2. Temmuz–Eylül Dönemi Hidroklimatik Bulguları	90
4.14.3. Dönemsel Hidroklimatik Bulgular	91
4.14.4. 2026 Nisan–Haziran Dönemi Hidroklimatik Bulguları	91
4.15. Deneysel Sonuçların Genel Değerlendirilmesi	91
5. TARTIŞMA	93
5.1. Göllerde Belirlenen Su Yüzey Alanı Değişimlerinin Tartışılması	93
5.2. Dinamik Otsu Yönteminin Başarısının Tartışılması	94
5.3. Landsat ve Sentinel-2 Sonuçlarının Karşılaştırılması	95
5.4. Trend ve Projeksiyon Sonuçlarının Tartışılması	95
5.5. Makine Öğrenmesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	96
5.6. Hidroklimatik Bulguların Destekleyici Değerlendirmesi	97
5.7. Çalışmanın Güçlü Yönleri ve Sınırlılıkları	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKÇA	101
EKLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ	117

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışma alanını oluşturan göllerin temel özellikleri	35
Tablo 2. Çalışmada kullanılan veri setleri ve araştırmadaki işlevleri	36
Tablo 3. Landsat sensörlerinde kullanılan optik bantların ortaklaştırılması	37
Tablo 4. Analiz yılları, gözlem pencereleri ve kullanılan sensörler	38
Tablo 5. Landsat kalite bantlarında kullanılan temel bitler.....	40
Tablo 6. Göl bazlı kalite kontrolünde incelenen değişkenler.....	43
Tablo 7. Çekirdek yöntem tarafından üretilen temel çıktılar	45
Tablo 8. Destekleyici makine öğrenmesi karşılaştırmasının yapısı	48
Tablo 9. Göllerin 1984, 2025 ve 2026 su yüzey alanları ile 1984–2025 değişimleri	52
Tablo 10. Göller arası değişimin temel karşılaştırma göstergeleri	53
Tablo 11. Van Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları.....	54
Tablo 12. Van Gölü doğruluk analizi sonuçları	56
Tablo 13. Tuz Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları	57
Tablo 14. Tuz Gölü doğruluk analizi sonuçları	59
Tablo 15. Beyşehir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları	60
Tablo 16. Beyşehir Gölü doğruluk analizi sonuçları	62
Tablo 17. Eğirdir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları	63
Tablo 18. Eğirdir Gölü doğruluk analizi sonuçları	65
Tablo 19. Burdur Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları	66
Tablo 20. Burdur Gölü doğruluk analizi sonuçları	68
Tablo 21. İznik Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları	69
Tablo 22. İznik Gölü doğruluk analizi sonuçları	71
Tablo 23. Manyas Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları.....	72
Tablo 24. Manyas Gölü doğruluk analizi sonuçları.....	74
Tablo 25. Salda Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları.....	75
Tablo 26. Salda Gölü doğruluk analizi sonuçları.....	77
Tablo 27. Eber Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları.....	78
Tablo 28. Eber Gölü doğruluk analizi sonuçları	80
Tablo 29. Akşehir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları.....	81
Tablo 30. Akşehir Gölü doğruluk analizi sonuçları.....	83
Tablo 31. Mann–Kendall trend testi ve Sen eğimi sonuçları	84
Tablo 32. Sen eğimine dayalı eğilim temelli su yüzey alanı projeksiyonları	85

Tablo 33. Makine öğrenmesi modellerinin toplu performans ölçütleri	86
Tablo 34. Model alanları ile su alanları arasındaki toplu fark ölçütleri	88
Tablo 35. Yıllık hidroklimatik göstergelerin dönem ortalamaları	89
Tablo 36. Temmuz–Eylül hidroklimatik göstergelerinin dönem ortalamaları	90
Tablo 37. 2026 Nisan–Haziran hidroklimatik göstergeleri.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Su, bitki örtüsü ve kuru toprağın görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerdeki genelleştirilmiş spektral yansımaları.....	11
Şekil 2. Araştırmanın GEE tabanlı genel iş akışı.....	33
Şekil 3. Türkiye’de incelenen 10 gölün konumu	34
Şekil 4. Göllerin 1984–2025 dönemindeki yüzdesel su yüzey alanı değişimleri	53
Şekil 5. Van Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi	54
Şekil 6. Van Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026).....	55
Şekil 7. Tuz Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi.....	57
Şekil 8. Tuz Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2025)	58
Şekil 9. Beyşehir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi.....	60
Şekil 10. Beyşehir Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)	61
Şekil 11. Eğirdir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi.....	63
Şekil 12. Eğirdir Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)	64
Şekil 13. Burdur Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi.....	66
Şekil 14. Burdur Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)	67
Şekil 15. İznik Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi.....	69
Şekil 16. İznik Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)	70
Şekil 17. Manyas Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi	72
Şekil 18. Manyas Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026).....	73
Şekil 19. Salda Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi	75
Şekil 20. Salda Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026).....	76
Şekil 21. Eber Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi	78
Şekil 22. Eber Gölü’nün su yüzeyi değişiminin mekânsal görünümü (1984-2026).....	79
Şekil 23. Akşehir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi	81
Şekil 24. Akşehir Gölü’nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026).....	82
Şekil 25. 10 Gölün 1984–2025 dönemine ait Sen eğimleri	84
Şekil 26. RO modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi.....	86
Şekil 27. DVM-RTF modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi	87
Şekil 28. CART modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi.....	87
Şekil 29. KNN modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi.....	88

EKLER DİZİNİ

Ek 1. Makine Öğrenmesi Sonuçları	113
Ek 2. Yapay Zekâ Kullanımı Beyan Formu.....	116

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
°	: Derece
AOI	: İlgi Alanı
AWEI	: Otomatik Su Çıkarma İndeksi
AWEInsh	: Gölge etkisinin bulunmadığı koşullar için Otomatik Su Çıkarma İndeksi
AWEIsh	: Gölge etkisinin bulunduğu koşullar için Otomatik Su Çıkarma İndeksi
CART	: Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CHIRPS	: İstasyon Verileriyle İklim Tehlikeleri Grubu Kızılötesi Yağış Verisi
CSV	: Virgülle Ayrılmış Değerler
DN	: Sayısal Değer
DVM	: Destek Vektör Makineleri
DVM-RTF	: Radyal Tabanlı Fonksiyon çekirdekli Destek Vektör Makineleri modeli
E	: Buharlaşma
ERA5-Land	: ECMWF Beşinci Nesil Kara Yüzeyi Yeniden Analiz Veri Kümesi
F1	: Kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasına dayalı sınıflandırma ölçütü
FN	: Yanlış Negatif
FP	: Yanlış Pozitif
GD	: Genel Doğruluk
GEE	: Google Earth Engine
GeoTIFF	: Coğrafi Etiketli TIFF Raster Biçimi
G_out	: Yeraltı suyu çıkışı
GSW	: Küresel Yüzey Suyu
IoU	: Kesişimin Birleşime Oranı
JRC	: Ortak Araştırma Merkezi
KNN	: K-En Yakın Komşu

MAE	: Ortalama Mutlak Hata
MNDWI	: Modifiye Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi
MSI	: Çok Spektralli Görüntüleme Cihazı
NDVI	: Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi
NDWI	: Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi
NIR	: Yakın Kızılötesi
OA	: Genel Doğruluk
OLI	: Operasyonel Arazi Görüntüleyicisi
OLI-2	: Operasyonel Arazi Görüntüleyicisi-2
PET	: Potansiyel Evapotranspirasyon
QA	: Kalite Değerlendirmesi
QA_PIXEL	: Piksel Kalite Değerlendirme Bandı
QA_RADSAT	: Radyometrik Doygunluk Kalite Değerlendirme Bandı
QGIS	: Açık kaynaklı Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımı
R_valid	: Geçerli veri oranı
RF	: Rastgele Orman
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
RO	: Rastgele Orman
RTF	: Radyal Tabanlı Fonksiyon
S	: Mann–Kendall test istatistiği
SVM	: Destek Vektör Makineleri
SWIR	: Kısa Dalga Kızılötesi
SWIR1	: Kısa Dalga Kızılötesi 1
SWIR2	: Kısa Dalga Kızılötesi 2
TIRS	: Termal Kızılötesi Sensör
TIRS-2	: Termal Kızılötesi Sensör-2
TM	: Tematik Haritalayıcı
TN	: Doğru Negatif
TP	: Doğru Pozitif
UA	: Uzaktan Algılama
USGS	: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu

1. GİRİŞ

Göller; hidrolojik döngünün düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması, içme ve kullanma suyu temini, tarımsal üretim, balıkçılık ve yerel iklim koşullarının dengelenmesi bakımından önemli doğal sistemlerdir (Sterner vd., 2020). Göl ekosistemlerinin fiziksel durumu; yağış, yüzey akışı, yeraltı suyu beslenimi, buharlaşma, göl çıkışları, iklim değişikliği ve havza içindeki su kullanımları arasındaki dengeye bağlı olarak değişmektedir (Jiménez-Bonilla vd., 2025). Bu bileşenlerde meydana gelen farklılaşmalar göl seviyesine, su depolamasına ve su yüzeyi alanına yansıyabilmektedir. Bu nedenle göller, çevresel değişimlere duyarlı sistemler ve uzun dönemli değişimin izlenebildiği göstergeler arasında değerlendirilmektedir (Adrian vd., 2009; Woolway vd., 2020). Araştırmalar, göl alanındaki ve depolamasındaki değişimlerin iklimsel süreçler ile insan kaynaklı su kullanımlarının birleşik etkisi altında gelişebildiğini göstermektedir (Bonnema vd., 2022; Yao vd., 2023). Bununla birlikte, Schwatke vd. (2020) tarafından belirtildiği üzere, her gölün batimetrik özelliklerine bağlı özgün bir alan–seviye ilişkisi bulunmaktadır. Benzer şekilde Sobek vd. (2011), göl hacmi ve derinliğinin, yüzey alanının yanı sıra kıyı eğiminin de önemli olduğunu belirtmiştir. Göl yüzey alanlarında meydana gelen zamansal ve mekânsal değişimlerin sistematik olarak izlenmesi, yalnızca hidrolojik parametrelerin takibi açısından değil, taşıdığı ekolojik riskler nedeniyle de kritik öneme sahiptir. Nitekim göl yüzeylerinin azalması, ekosistemin bozulmasına yol açabilmektedir (Wurtsbaugh vd., 2017). Gerek ekolojik gerekse sosyoekonomik dinamikler doğrultusunda su yüzeylerinin izlenmesi, yalnızca akademik bir faaliyet değil; havza bazlı karar destek sistemleri ve sürdürülebilir su yönetimi politikalarının geliştirilmesi için temel bir veri altyapısı gereksinimidir (Ahmadov, 2020). Göl yüzey alanları, hem geniş ölçekli iklimsel süreçlerin hem de yerel antropojenik baskıların doğrudan yansıdığı, ölçülebilir ve somut bir coğrafi gösterge niteliği taşımaktadır (Bonnema vd., 2022; Güngör vd., 2022). Bu nedenle uzun dönemli ve sistematik izleme çalışmaları, göl ekosistemleri üzerindeki doğal ve beşerî baskıların nicel olarak belgelenmesine ve bölgesel su yönetimi stratejilerinin bilimsel bir temele dayandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Uzaktan algılama (UA), su yüzeyi alanındaki uzun dönemli değişimlerin düzenli olarak izlenmesine ve geçmiş dönemlere ait uydu verileri kullanılarak geriye dönük olarak belirlenmesine olanak sağlaması nedeniyle, göllerdeki mekânsal ve zamansal değişimlerin izlenmesinde önemli bir araçtır (Pekel vd., 2016). Geniş alanlara dağılmış

çok sayıda gölün araziye dayalı yöntemlerle sistematik olarak izlenmesi zordur. Uzaktan algılama küresel ölçekte göl haritalama çalışmalarında uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır (Sheng vd., 2016). Uzaktan algılama, yeryüzündeki nesne ve yüzeylerin fiziksel temas kurulumaksızın yansıttıkları veya yaydıkları elektromanyetik enerjinin ölçülmesine dayalı olarak gözlemlenmesini sağlamaktadır (Jensen, 2016; Lillesand vd., 2015). Uydu sistemlerinin düzenli gözlem sıklığı, çok bantlı veri yapısı ve uzun süreli görüntü arşivleri, göl su yüzeylerinin farklı tarihlerde ortak bir yöntemle haritalanmasını ve karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır (Pekel vd., 2016; Sheng vd., 2016). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ise konuma bağlı verilerin depolanmasına, yönetilmesine, analiz edilmesine ve görselleştirilmesine olanak tanır (Longley vd., 2015).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, uzun dönemli göl izleme araştırmalarında uzaktan algılama verilerinin ve Google Earth Engine (GEE) gibi bulut tabanlı analiz platformlarının kullanıldığını göstermektedir (Atiz ve Durduran, 2025; Bonnema vd., 2022; Feng vd., 2023; Günen ve Atasever, 2024; Kahraman ve Öztürk, 2025; Lai vd., 2024). Google Earth Engine, çok sayıda küresel coğrafi veri setini bulut ortamında barındıran ve sunucu tarafında paralel işlem olanağı sağlayan bir analiz platformudur. Platform üzerinde görüntü koleksiyonları tarih, konum ve kalite ölçütlerine göre filtrelenebilmekte; spektral indeksler, sınıflandırmalar, alan hesapları ve zaman serileri aynı iş akışı içinde üretilebilmektedir (Gorelick vd., 2017; Jahangeer vd., 2025).

Bu tezde GEE platformunda, 1984-2025 yılları arasındaki Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir ve Burdur göllerinin su yüzeyi alanları belirlenmiş ve zamansal değişimleri analiz edilmiştir. Çalışmada Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, Sentinel-2 MSI uydu görüntüleri kullanılmıştır ve izlenen yöntemler sırasıyla; Modifiye Edilmiş Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (Modified Normalized Difference Water Index [MNDWI]) görüntülerine dinamik Otsu eşikleme uygulanmıştır. Göllerin kıyı yapısı, sazlık yoğunluğu, sığlık durumu ve çevresindeki arazi örtüsü özelliklerinden kaynaklanabilecek sınıflandırma sorunlarının azaltılması amacıyla gerekli görülen durumlarda Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index [NDVI]) ve yakın kızılötesi bant değerleri yardımcı spektral ölçütler olarak değerlendirilmiştir. Bu ölçütler ana sınıflandırma yönteminin yerine kullanılmamakta, yalnızca yanlış sınıflandırmaları azaltmaya yönelik tamamlayıcı ek koşullar olarak değerlendirilmiştir. Böylece eşikleme yaklaşımının görüntü ve göl koşullarına uyarlanabilir olması amaçlanmıştır. Rastgele Orman (Random Forest [RF-RO]), Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (Classification and Regression Tree, [CART]), Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines [SVM-DVM]) ve K-En

Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors [KNN]) algoritmaları, su ve su dışı sınıfların farklı denetimli sınıflandırıcılarla temsil edilme düzeyini inceleyen destekleyici bir karşılaştırma bileşeni olarak uygulanmıştır. Referans sınıflarının spektral indeks ve filtrelerden üretilen maskeden türetilmesi nedeniyle bu sonuçlar bağımsız arazi gerçeğine dayalı mutlak doğruluk göstergeleri olarak değil, kullanılan referans maskeyle uyum ölçütleri olarak yorumlanmalıdır (Maxwell vd., 2018). Ek olarak, İklim Tehlikeleri Grubu Kızılötesi Yağış İstasyon Verileri (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data [CHIRPS]) yağış verileri ile ERA5-Land Potansiyel Buharlaşma-Terleme (Potential Evapotranspiration [PET]) verileri su maskesi üretiminde kullanılmamış; su yüzeyi alanındaki değişimlerin hidroklimatik bağlamda değerlendirilmesini destekleyen yardımcı veri kaynakları olarak ele alınmıştır (Funk vd., 2015; Muñoz-Sabater vd., 2021).

Çalışmanın uzun dönemli ve mevsimsel açıdan karşılaştırılabilir dönemi 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 ve 2025 yılları Temmuz–Eylül ayları olarak seçilmiştir. Ek olarak güncel durumu göstermek amacıyla 2026 yılının Nisan–Haziran dönemine ait görüntülerden su yüzeyi alanı hesaplanmıştır. Ancak 2026 verisi farklı bir mevsimsel dönemi temsil ettiğinden, Mann–Kendall testi, Sen’in eğim yöntemi ve eğilim temelli değerlendirmelerden ayrı tutulmuştur.

1.1. Türkiye’de Göl Su Yüzeyi Alanlarındaki Değişim ve İzleme Çalışmaları

Türkiye, farklı iklimler ve iklimlerin kısa mesafelerde değişebildiği, kapalı ve açık havza sistemlerinin bir arada bulunduğu bir coğrafi yapıya sahiptir (Öztürk vd., 2017). Bu yapı, göllerin oluşum kökeni, derinliği, kıyı eğimi, tuzluluğu, beslenme kaynakları ve mevsimsel davranışları bakımından farklılaşmasına neden olabilir. Kapalı havza göllerinde dışa akışın bulunmaması veya sınırlı olması, buharlaşma ve havza içindeki su kullanımının göl bütçesi üzerindeki etkisini artırabilmektedir (Demir, 2022). Bununla birlikte, aynı iklimsel değişkenlik farklı göllerde aynı alansal tepkiyi oluşturmayabilir; morfometri, yeraltı suyu bağlantısı ve su yönetimi uygulamaları gölün değişime verdiği yanıtı belirlemektedir (Aydın vd., 2020; Woolway vd., 2020).

Tuz Gölü ve Konya Kapalı Havzası üzerine yapılan araştırmalar, sıg ve tuzlu su sistemlerinde gözlem dönemi ile sensör seçiminin sonuçların yorumlanmasında belirleyici olduğunu ortaya koymuştur (Bilgilioğlu vd., 2021; Ekercin, 2007; Yagmur vd., 2021).

Akşehir, Eber ve Manyas/Kuş gölleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar; sazlık, makrofüt, nemli zemin, bulanık su ve parçalı açık su yüzeylerinin indeks temelli sınıflandırmalarda belirsizlik oluşturabildiğini göstermektedir (Acar ve Zengin, 2025;

Çağlayan vd., 2020; Mutlu vd., 2020; Uzun, 2024). Bu nedenle açık su sınıfının tanımı, eşikleme yöntemi ve üretilen maskelerin kalite kontrol ölçütleri araştırmanın başında açıkça belirlenmiştir.

Burdur, Beyşehir, Eğirdir ve Salda göllerindeki çalışmalar ise kıyı morfolojisi, adalar, açık renkli kıyı birimleri, sazlıklar ve mevsimsel gözlem farklılıklarının su sınırlarını etkileyebildiğini göstermektedir (Albarqouni vd., 2022; Kale ve Erişmiş, 2024; Kaya ve Kaplan, 2021; Sabuncu, 2020; Yıldız, 2025). İznik ve Van göllerinde alan ve seviye değişimleri daha geniş hidrolojik ve iklimsel süreçlerle birlikte değerlendirilmiştir (Altan Aydın ve Doğu, 2018; Bahadır ve Özdemir, 2011).

1.2. Su Yüzeyi İzlemede Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bulut Bilişim

Uzaktan algılama teknolojileri; geniş alanların düzenli bir biçimde görüntülenmesi, geçmişe dönük veri arşivleri sunması ve ölçüm yapılmasına olanak sağlaması nedeniyle göl izleme çalışmalarında önemli avantajlar sağlayabilmektedir (Gorelick vd., 2017; Pekel vd., 2016). Uydu görüntülerinden üretilen su maskeleri CBS ortamında saklanabilmekte ve işlenebilmekte, piksel alanlarından yararlanılarak su yüzeyi alanları hesaplanabilmekte ve farklı tarihlere ait göl sınırları üst üste getirilerek kıyı değişimleri haritalanabilmektedir (Jensen, 2016; Lillesand vd., 2015). Türkiye’de göl değişimlerinin UA ve CBS ile incelenmesine yönelik çalışmalar, farklı veri ve yöntemlerin birlikte kullanılabildiğini göstermektedir (Davraz vd., 2019; Ekercin, 2007). Bununla birlikte, uydu görüntülerinden elde edilen su yüzeyi alanları doğrudan ve hatasız arazi ölçümleri olarak değerlendirilmemelidir. Bulutlar ve bulut gölgeleri, topoğrafik gölgeler, atmosferik saçılım, sensörler arasındaki spektral bant farklılıkları, kıyı pikselleri, geometrik kayıt hataları ve sınıflandırma eşikleri sonuçları etkileyebilmektedir (Frazier ve Page, 2000; Zou vd., 2017). Özellikle 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip görüntülerde bir kıyı pikseli aynı anda su, toprak ve bitki örtüsü bileşenlerini içerebilmektedir. Bu nedenle uydu görüntülerinden belirlenen sınır, fiziksel kıyı çizgisinin tam karşılığı değil, piksel tabanlı açık su sınıfının sınırı olarak değerlendirilmelidir (Jensen, 2016; Ji vd., 2009; Lillesand vd., 2015).

GEE, görüntü koleksiyonlarının tarihsel ve mekânsal kapsama göre filtrelenmesi, piksel düzeyinde kalite ve bulut maskelerinin uygulanması, spektral indekslerin hesaplanması, dönemsel kompozitlerin oluşturulması ve işlenen verilerin dışa aktarılması için bütünsel bir bulut bilişim ortamı sağlamaktadır (Domej vd., 2025; Gorelick vd., 2017). GEE tabanlı yüzey suyu çalışmalarında yeniden üretilebilirliğin sağlanabilmesi

için yalnızca kullanılan kodun paylaşılması yeterli değildir; veri koleksiyonu ve sürümü, tarih aralığı, ölçek katsayıları, kalite güvence bitleri, eşik değerinin belirlendiği analiz alanı, işlem ölçeği ve son işlem kuralları da açık biçimde tanımlanmalıdır (Atiz ve Durduran, 2025; Jahangeer vd., 2025; Masoud, 2026).

1.3. Landsat Arşivinin Uzun Dönemli Su Yüzeyi İzleme Çalışmalarındaki Rolü

Landsat programı, 1972 yılında başlatılan ve yeryüzünün düzenli olarak gözlemlenmesine yönelik en uzun süreli uydu programlarından biridir. Landsat arşivinin 2008 yılında ücretsiz erişime açılması, uzun dönemli çevresel değişimlerin uydu görüntüleri aracılığıyla incelenmesini kolaylaştırmış ve çok zamanlı uzaktan algılama çalışmalarının yaygınlaşmasına önemli katkı sağlamıştır (Wulder vd., 2012; Wulder vd., 2019). Landsat görüntüleri; düzenli veri üretimi, uzun süreli arşiv yapısı ve görünür, yakın kızılötesi ile kısa dalga kızılötesi bölgelerde ölçüm yapan spektral bantları sayesinde su yüzeyi izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hemati vd., 2024). Farklı Landsat sensörlerinin bant özellikleri tamamen aynı olmamakla birlikte, karşılık gelen spektral bantların ortak bir yapıda değerlendirilmesi uzun dönemli görüntülerin aynı işlem yaklaşımı içerisinde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır.

1.4. Su Yüzeyi Sınıflandırmasında İndeks, Eşikleme ve Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlar

Su yüzeyi çıkarımında en yaygın yöntemlerden biri spektral indekslerin eşiklenmesidir. NDWI, yeşil ve yakın kızılötesi bantlar arasındaki yansıma farklılığından yararlanmaktadır. MNDWI, ise yakın kızılötesi bant yerine kısa dalga kızılötesi bandını kullanarak özellikle açık toprak ve yapılaşmış yüzeylerden kaynaklanabilecek bazı yanlış sınıflandırmaları azaltmayı amaçlamaktadır (McFeeters, 1996; Xu, 2006). Otomatik Su Çıkarma İndeksi (Automated Water Extraction Index [AWEI]) ise gölge ve koyu yüzeylerin su sınıfıyla karışmasını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir (Feyisa vd., 2014). Spektral indeksler kolay uygulanabilir ve açıklanabilir yöntemler olmakla birlikte, sınıflandırma sonuçları kullanılan eşik değerine duyarlıdır. NDWI ve MNDWI için sıfır değeri yaygın bir başlangıç eşiği olarak kullanılabilen; ancak uygun eşik suyun bulanıklığına, kullanılan sensöre, gözlem dönemine, kıyı örtüsüne ve çalışma alanındaki su-kara dağılımına göre değişebilmektedir (Ji vd., 2009). Dinamik eşikleme yöntemleri, eşik değerinin ilgili görüntünün veya dönemsel kompozitin piksel dağılımından belirlenmesini sağlar. Otsu yöntemi, histogramdaki sınıflar arası varyansı en yüksek eşik değerini seçer. Bununla birlikte, su ve su dışı sınıfların histogram üzerinde yeterince

ayrışmadığı durumlarda elde edilen eşik değeri kararsız sonuçlar üretebilmektedir (Otsu, 1979).

1.5. Tezin Amacı, Kapsamı, Özgün Değeri ve Araştırma Soruları

Bu tezde, uydu görüntüleri kullanılarak Türkiye’de farklı oluşum kökenlerine ve su kimyalarına sahip Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir ve Burdur göllerinin, 1984-2025 yılları arasındaki su yüzeyi alanı değişimlerinin otomatik olarak tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada UA, CBS ve bulut bilişim teknolojileri yalnızca harita üretim araçları olarak değil, uzun süreli uydu arşivlerinden standartlaştırılmış açık su yüzeyi alanı bilgisi üreten bütünleşik bir analiz sistemi olarak ele alınmıştır. Ortak işlem zincirinin farklı oluşumlara ve özelliklere sahip göllere ve dönemlere uygulanmasıyla kullanıcıya bağlı kıyı çizimi etkisinin azaltılması, sonuçların karşılaştırılabilirliğinin güçlendirilmesi ve yeni uydu görüntüleriyle güncellenebilir bir analiz yapısının oluşturulması sağlanmıştır. Mevcut araştırmalar önemli bilgiler sunmakla birlikte, görüntü tarihleri, mevsimsel pencereler, çalışma alanı sınırları, eşik değerleri, sazlıkların sınıflandırılması ve mekânsal kurallar arasında birlik bulunmamaktadır. Bu farklılıklar, yayımlanan göl alanlarının doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla farklı göl tiplerinin aynı veri ürünleri, ortak bir mevsimsel pencere ve açıkça tanımlanmış bir işlem zinciriyle değerlendirilmesi yöntem kaynaklı farklılıkların azaltılması açısından önem taşımaktadır.

Bu tezde, çalışma alanı olarak farklı oluşum ve özelliklere sahip Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas/Kuş, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir ve Burdur gölleri seçilmiştir. Göller, aynı uydu verisi, aynı uzun dönem (1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 Temmuz-Eylül ayları) ve standart ön işleme adımları kullanılarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Ayrıca 2026 yılının nisan–haziran dönemine ait veriler güncel durumun değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu dönem, farklı bir mevsimsel aralığı temsil etmesi nedeniyle uzun dönemli eğilim analizlerine dâhil edilmemiştir.

Landsat 5 Tematik Haritalayıcı (Thematic Mapper [TM]), Landsat 8 Operasyonel Arazi Görüntüleyicisi/Termal Kızılötesi Sensör (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor [OLI/TIRS]) ve Landsat 9 Operasyonel Arazi Görüntüleyicisi-2/Termal Kızılötesi Sensör-2 (Operational Land Imager-2/Thermal Infrared Sensor-2 [OLI-2/TIRS-2]) verileri kullanılmıştır. Sentinel-2 Çok Spektralli Görüntüleyici (MultiSpectral Instrument [MSI]) verileri, 2015 sonrası dönem için daha yüksek mekânsal çözünürlük sağlamaktadır (Drusch vd., 2012). Aynı zamanda Sentinel-2 arşivinin, çalışmanın başlangıç yılı olan 1984’e kadar uzanmaması nedeniyle, uzun dönemli ana zaman serisi

Landsat görüntülerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Böylece incelenen dönemler arasında veri kaynağı, mekânsal çözünürlük ve analiz yaklaşımı bakımından tutarlı bir yapının korunması amaçlanmıştır. Sentinel-2 MSI ile Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi'nin (Joint Research Centre, JRC) Küresel Yüzey Suyu (Global Surface Water, GSW) ürününden, CHIRPS ve ERA5-Land verilerinden ise su yüzeyi alanı değişimlerinin hidroklimatik bağlamda değerlendirilmesinde yararlanılmıştır.

Bu tezde, bütün göl ve dönemlere sabit bir MNDWI eşik değerinin uygulanması yerine, eşik değerlerinin dönemsel görüntü kompozitlerinin dağılımından dinamik Otsu yöntemiyle belirlenmesi esas alınmıştır. Ana sınıflandırma yaklaşımının ortak yapısı korunmakla birlikte, göllerin kıyı yapısı, sazlık yoğunluğu, sıklık durumu ve çevresindeki arazi örtüsünden kaynaklanabilecek yanlış sınıflandırmaların azaltılması amacıyla yardımcı spektral ölçütlerin kullanılabilirliği göl bazında değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları birden fazla spektral bant ve indeksi birlikte değerlendirerek doğrusal olmayan karar sınırları oluşturabilmektedir (Maxwell vd., 2018). RO algoritması, çok sayıda karar ağacının topluluk kararından yararlanırken, radyal tabanlı fonksiyon (Radial Basis Function [RTF]) çekirdekli DVM algoritması sınırlı örneklerle yüksek boyutlu öznitelik uzaylarında etkili olabilmektedir. CART, yorumlanabilir bir karar ağacı yapısı; KNN algoritması ise örnek benzerliğine dayalı temel bir karşılaştırma sağlamaktadır (Belgiu ve Drăguț, 2016; Breiman, 2001; Cortes ve Vapnik, 1995; Cover ve Hart, 1967; Mountrakis vd., 2011).

Çalışmada, farklı fiziksel ve hidrolojik özelliklere sahip göllerde uygulanabilecek ortak bir işlem çekirdeği, görüntü dağılımına uyarlanabilen dinamik eşikleme yaklaşımıyla bütünleştirilmiştir. Bütün göl ve dönemlere tek bir sayısal eşik değeri uygulanması yerine, aynı eşik belirleme ve kalite güvencesi yaklaşımının dönemsel kompozitlere uygulanmasıyla yöntemsel standardizasyon ile spektral uyarlanabilirlik arasında denge kurulmuştur. On gölün aynı analiz yılları, ortak mevsimsel dönem, aynı veri ürünleri ve tanımlanmış bir algoritmik iş akışıyla değerlendirilmesi, göller arası karşılaştırmaya uygun bir veri yapısının oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Üretilen göl-yıl alan tabloları, ikili su maskeleri ve sınır verileri, yeni uydu görüntüleriyle güncellenebilecek bir izleme altyapısı sunmaktadır. Bununla birlikte su yüzeyi alanındaki değişimler, göllerin hidrolojik durumunu tek başına açıklayan doğrudan nedensel göstergeler olarak değerlendirilmemiştir. Alan değişimlerinin nedenlerinin kapsamlı biçimde açıklanabilmesi için göl seviyesi, su hacmi, yüzey ve yeraltı suyu girdileri, su çekimleri ve arazi kullanımı gibi ek verilere gereksinim bulunduğu, çalışmanın bilimsel sınırı olarak kabul edilmiştir. Tez aşağıdaki araştırma sorularına göre dizayn edilmiştir.

Ortak bir ön işleme ve sınıflandırma zinciri kullanılarak farklı oluşum ve özelliklere sahip göllerin açık su yüzeyleri otomatik olarak belirlenebilir mi?

MNDWI temelli dinamik Otsu eşikleme yaklaşımı, farklı göl ve görüntü koşullarında tutarlı açık su maskeleri üretebilir mi?

Farklı oluşum ve özelliklere sahip göllerde geliştirilen yaklaşımın güçlü ve sınırlı yönleri nelerdir?

Su yüzeyi alanındaki değişimler, yağış ve potansiyel buharlaşma/terleme göstergeleriyle birlikte değerlendirildiğinde, nasıl bir hidroklimatik bağlam ortaya çıkmaktadır?

2. LİTERATÜR TARAMASI VE YÖNTEMLER

Bu bölümde, göl sistemlerinde su yüzeyi alanı değişiminin kavramsal temelleri, optik uzaktan algılama verilerinin fiziksel ve radyometrik temelleri, spektral su indeksleri ve yardımcı spektral değişkenler, spektral eşikleme ve su maskesi üretimi, makine öğrenmesi algoritmaları açıklanmıştır. Devamında ise doğruluk değerlendirmesi ve referans veri, Google Earth Engine tabanlı uzun dönemli su izleme çalışmaları, zamansal eğilim analizi, hidroklimatik verilerin yardımcı değerlendirmesi, Türkiye’de çalışma kapsamındaki göller üzerine yapılan araştırmalar, literatürün genel değerlendirmesi ve araştırma boşluğuyla ilgili açıklamalar verilmiştir.

2.1. Göl Sistemlerinde Su Yüzeyi Alanı Değişiminin Kavramsal Temelleri

Göl su yüzeyi alanındaki değişimler, hidrolojik, morfolojik ve beşerî etkenlerin ortak sonucudur. Bu değişimlerin değerlendirilmesinde su bütçesi, alan, seviye ve hacim ilişkileri birlikte ele alınmalıdır. Ayrıca doğal süreçler ile insan kaynaklı baskılar birbirinden ayrılarak incelenmelidir. Bu bölümde söz konusu kavramsal ilişkiler açıklanmaktadır.

2.1.1. Göl Su Bütçesi ve Yüzey Alanı İlişkisi

Bir gölün su bütçesi; göl yüzeyine düşen yağış, akarsu ve yüzey akışı, yeraltı suyu girdileri ile buharlaşma, dışa akış, yeraltına sızma ve insan kaynaklı çekimler arasındaki denge tarafından belirlenmektedir (Healy vd., 2007). Söz konusu denge basitleştirilmiş biçimde Eşitlik 1 ile ifade edilebilir.

$$\Delta S = P + Q_{in} + G_{in} - E - Q_{out} - G_{out} - W \quad (1)$$

Bu eşitlikte:

ΔS : Göl depolamasındaki değişimi,

P: Göl yüzeyine düşen doğrudan yağışı,

Q_{in} : Yüzeysel su girişini,

Q_{out} : Yüzeysel su çıkışını,

G_{in} : Yer altı suyu girişini,

G_{out} : Yer altı suyu çıkışını,

E: Buharlaşmayı,

W: İnsan kaynaklı net su çekimini ifade eder.

Bu bileşenlerin görelî etkisi gölün açık veya kapalı havza karakterine, morfometrisine ve havza içindeki su kullanım biçimlerine göre değişmektedir. Bu nedenle yalnızca yağış ve buharlaşma verilerinden hareketle göl alanındaki değişimin kesin nedeni belirlenemez (Woolway vd., 2020; Yao vd., 2023).

2.1.2. Alan, Seviye ve Hacim Kavramlarının Ayrımı

Göl yüzey alanı, su seviyesi ve su hacmi birbiriyle ilişkili olmakla birlikte farklı fiziksel değişkenleri ifade etmektedir. Su seviyesi, göl yüzeyinin belirli bir düzey referansa göre yüksekliğini; yüzey alanı, suyun yatay düzlemde kapladığı alanı; hacim ise göl tabanı ile su yüzeyi arasında bulunan toplam su miktarını göstermektedir. Bu değişkenler arasındaki ilişki gölün batimetrisine, kıyı eğimine ve taban topoğrafyasına bağlıdır. Düşük eğimli ve sığ göllerde küçük bir seviye değişimi geniş bir yüzey alanı değişimi yaratabilirken, dik kıyılı ve derin göllerde benzer bir seviye değişimi daha sınırlı bir alan farklılığı oluşturabilmektedir (Schwatke vd., 2020; Sobek vd., 2011). Bu nedenle uydu görüntülerinden hesaplanan su yüzeyi alanındaki değişim, doğrudan su seviyesi veya hacim değişimi olarak yorumlanmamalıdır.

2.1.3. Doğal ve İnsan Kaynaklı Baskılar

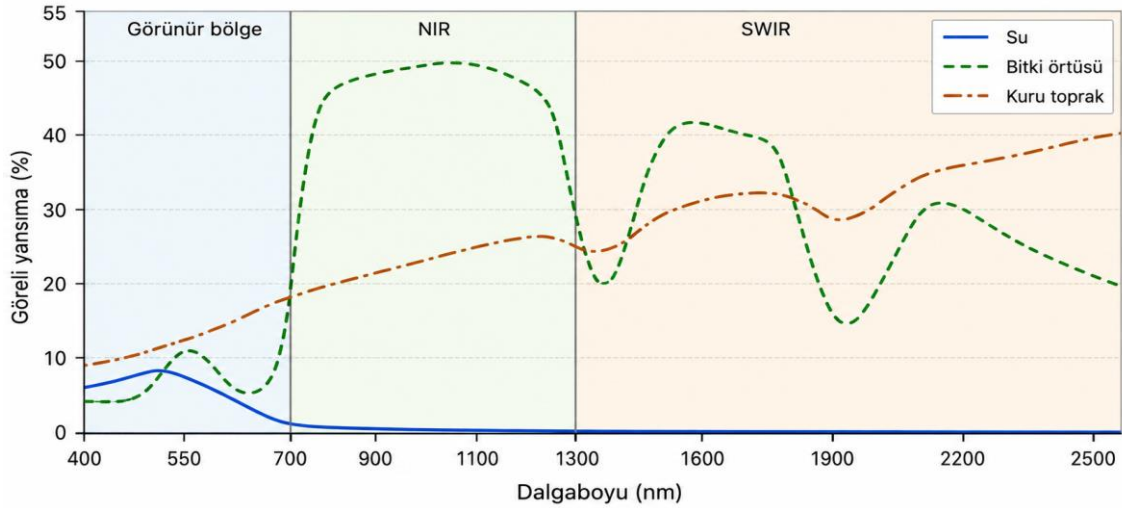
Göl su bütçesi ve yüzey alanındaki değişimler, doğal süreçler ile insan faaliyetlerinin birleşik etkisi altında gelişebilmektedir. Yağış ve yüzeysel akıştaki azalma, sıcaklık ve buharlaşmadaki artış, yeraltı suyu sistemindeki değişimler, tarımsal ve kentsel su çekimleri, akarsu düzenlemeleri ve arazi kullanımı değişimleri göller üzerinde farklı büyüklüklerde baskı oluşturabilmektedir (Altan Aydın ve Doğu, 2018; Aydın vd., 2020; Yao vd., 2023). Aynı zamanda su yüzeyi alanı ile hidroklimatik göstergeler arasında belirlenen zamansal benzerlik veya istatistiksel ilişki, tek başına nedensellik kanıtı olarak değerlendirilmemelidir (Runge vd., 2019). Alan değişimlerinin nedenlerinin kapsamlı biçimde açıklanabilmesi için yağış ve buharlaşmanın yanı sıra akarsu akımları, göl seviyesi, yeraltı suyu hareketleri, su çekimleri ve arazi kullanımı gibi değişkenlere ait bağımsız ve yeterli uzunluktaki veri serilerine ihtiyaç vardır (Healy vd., 2007; Runge vd., 2019; Yao vd., 2023).

2.2. Optik Uzaktan Algılama Verilerinin Fiziksel ve Radyometrik Temelleri

Suyun spektral davranışı, yüzey yansıması ve sensörler arası farklılıklar, veri kalitesi ve zamansal tutarlılık, mekânsal çözünürlük ve karışık piksel problemi bu bölümde ele alınmıştır.

2.2.1. Suyun Spektral Davranışı

Bir yüzeyin farklı dalga boylarında yansıttığı elektromanyetik enerji miktarı, o yüzeyin spektral davranışını oluşturmaktadır. Berrak ve derin su yüzeyleri görünür dalga boylarında sınırlı yansıma gösterirken yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerde elektromanyetik enerjinin büyük bölümünü soğurmaktadır (Huang vd., 2018; Mondejar ve Tongco, 2019). Buna karşılık bitki örtüsü yakın kızılötesi bölgede, kuru toprak ve yapay yüzeyler ise yakın ve kısa dalga kızılötesi bölgelerde suya göre daha yüksek yansıma göstermektedir (Şekil 1). Su ile diğer yüzeyler arasındaki bu spektral farklılık, su indekslerinin ve piksel tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarının fiziksel temelini oluşturmaktadır (Jensen, 2016; Lillesand vd., 2015). Suyun spektral tepkisi; klorofil-a ve askıda katı madde gibi optik olarak etkin su bileşenlerine, su derinliğine ve göl tabanından yansıyan enerjinin sensör tarafından kaydedilen sinyale karışmasına bağlı olarak değişebilmektedir (Sun vd., 2024; Wang vd., 2025). Dalga hareketleri ve güneş parıltısı da su yüzeyinde yerel yansıma farklılıkları oluşturabilmektedir (Huang vd., 2018; Jensen, 2016). Bu nedenle açık ve derin sularda başarılı sonuç veren genel eşik değerleri, bulanık, sığ veya su bitkileriyle kaplı kıyı alanlarında aynı sınıflandırma başarısını göstermeyebilir (Feyisa vd., 2014; Jensen, 2016; Ji vd., 2009; Lillesand vd., 2015).



Şekil 1. Su, bitki örtüsü ve kuru toprağın görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerdeki genelleştirilmiş spektral yansımaları. (Jensen, 2016; Lillesand vd., 2015 kaynaklarından yararlanılarak hazırlanmıştır)

2.2.2. Yüzey Yansıması ve Sensörler Arası Farklılıklar

Uydu sensörleri tarafından kaydedilen değerler; güneş açısı, atmosferik saçılma, aerosol koşulları ve sensör özelliklerinden etkilenmektedir. Uzun dönemli çevresel değişim çalışmalarında yüzey yansıması ürünlerinin kullanılması, atmosferik etkilerin

azaltılması ve farklı tarihlerde elde edilen gözlemlerin ortak bir fiziksel ölçekte değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Claverie vd., 2015). Farklı uydu sensörlerinde karşılık gelen spektral bantların dalga boyu aralıkları ve radyometrik tepkileri tamamen aynı değildir. Bu nedenle sensörler arası standardizasyon yalnızca bant adlarının değiştirilmesiyle sınırlı değildir. Karşılık gelen görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantların doğru biçimde eşleştirilmesi ve sensörlerin spektral özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir (Roy vd., 2016). Yüzey yansımaları ürünleri, farklı tarih ve sensörler arasındaki karşılaştırılabilirliği artırmakla birlikte, sensörlerden kaynaklanan tüm spektral farklılıkları tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Özellikle kıyı ve karışık piksellerdeki küçük spektral farklılıklar, sınıflandırma kararlarını etkileyebilmektedir (Wulder vd., 2019).

2.2.3. Veri Kalitesi ve Zamansal Tutarlılık

Bulutlar su yüzeyinin doğrudan gözlenmesini engellerken, bulut ve topoğrafik gölgeler düşük yansıma özellikleri nedeniyle su sınıfıyla karışabilmektedir (Feyisa vd., 2014; Li vd., 2013). İnce bulutlar ve atmosferik pus, görüntülerdeki spektral yansıma değerlerini değiştirerek su indekslerinden elde edilen sonuçları etkileyebilmektedir (Song vd., 2001; Zhang vd., 2002). Bu nedenle yalnızca uydu görüntüsünün genel bulutluluk oranının değerlendirilmesi yeterli değildir; güvenilir olmayan pikseller, piksel düzeyindeki kalite bilgileri kullanılarak analiz dışında bırakılmalıdır (U.S. Geological Survey [USGS], t.y.-b; Zhu ve Woodcock, 2012).

Uzun dönemli su yüzeyi alanı analizlerinde görüntülerin benzer mevsimsel koşulları temsil etmesi de önemlidir. Farklı mevsimlerden elde edilen görüntülerin karşılaştırılması, doğal mevsimsel değişkenliğin uzun dönemli bir eğilim olarak yorumlanmasına neden olabilir. Buna karşılık, gözlem döneminin çok dar tutulması, bulut ve bulut gölgelerinin maskelenmesi ile görüntü bulunabilirliğinin sınırlı olması nedeniyle bazı yıllarda yeterli sayıda geçerli gözlem elde edilmesini güçleştirebilir. Bu nedenle zaman aralığı belirlenirken mevsimsel karşılaştırılabilirlik, görüntü bulunabilirliği ve zamansal tutarlılık birlikte gözetilmelidir (Banerjee, 2025; Masoud, 2026; Uzun, 2024).

2.2.4. Mekânsal Çözünürlük ve Karışık Piksel Problemi

Landsat görüntülerinde 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip bir piksel yaklaşık 900 m² yüzey alanını temsil etmektedir (USGS, t.y.-a). Göl kıyısı boyunca bulunan bir piksel aynı anda su, kuru toprak, nemli zemin ve bitki örtüsü bileşenlerini içerebilmektedir. Karışık piksel problemi, özellikle su–kara sınırlarında, sık kıyı kesimlerinde, dar ve küçük

su kütlelerinde ve sulak alan bitki örtüsünün bulunduğu geçiş alanlarında daha belirgin hâle gelmektedir (Acharya vd., 2018; Bishop-Taylor vd., 2019; Mayr vd., 2021). Bu nedenle uydu görüntülerinden belirlenen su sınırı, fiziksel kıyı çizgisinin alt piksel düzeyindeki kesin konumu olarak değil, kullanılan mekânsal çözünürlükte açık su olarak sınıflandırılan piksellerin sınırı olarak değerlendirilmelidir (Bishop-Taylor vd., 2019; Xie vd., 2016). Daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri yakın dönem kıyı geçişlerinin daha ayrıntılı incelenmesine katkı sağlayabilmekle birlikte, uzun dönemli Landsat zaman serisinin mekânsal çözünürlüğünü geçmiş yıllar için değiştirmemektedir (Drusch vd., 2012).

2.3. Spektral Su İndeksleri ve Yardımcı Spektral Değişkenler

Optik uydu görüntülerinden su yüzeylerinin belirlenmesinde, su ile su dışı yüzeylerin farklı dalga boylarındaki yansıma özelliklerinden yararlanan spektral indeksler bu bölümde açıklanmaktadır.

2.3.1. Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi

Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (NDWI) terimi, farklı uzaktan algılama amaçları için iki ayrı bant bileşimiyle kullanılmıştır. Gao (1996), bitki örtüsündeki sıvı su içeriğini belirlemek amacıyla yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantlardan yararlanan bir indeks tanımlamıştır. McFeeters (1996) ise açık su yüzeylerini belirlemek ve suyu bitki ile toprak arka planından ayırmak amacıyla yeşil ve yakın kızılötesi bantların yansıma farklılığına dayanan NDWI formülünü geliştirmiştir.

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte:

ρ , ilgili spektral banda ait yüzey yansıması değerini,
 ρ_{Green} : Yeşil banda ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerini,
 ρ_{NIR} : NIR bandına ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerini ifade etmektedir.

NDWI teorik olarak -1 ile +1 arasında değer alır. Su yüzeyleri birçok görüntüde pozitif değerlerle temsil edilebilmekle birlikte, sıfır değeri bütün çalışma alanları için geçerli evrensel bir sınıflandırma eşiği değildir. Yerleşim alanları, gölgeler, nemli

zeminler ve kıyı bitkileri su sınıfıyla benzer indeks değerleri üretebilmektedir. Bu nedenle uygun eşik değerinin görüntü ve çalışma alanı koşulları dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir (Ji vd., 2009).

2.3.2. Modifiye Edilmiş Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi

Modifiye Edilmiş Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (MNDWI), McFeeters (1996) NDWI’de de kullanılan yakın kızılötesi bant yerine birinci kısa dalga kızılötesi bandının kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Bu değişiklik, özellikle açık toprak ve yapılaşmış yüzeylerden kaynaklanan bazı yanlış su sınıflarının azaltılmasını amaçlamaktadır (Xu, 2006). MNDWI, Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (3)$$

Bu eşitlikte:

ρ_{Green} : Yeşil banda ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansımaları değerini,
 ρ_{SWIR1} : SWIR1 bandına ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansımaları değerini ifade etmektedir.

Suyun SWIR1 bölgesinde düşük yansıma göstermesi, birçok görüntüde su ile su dışı yüzeyler arasındaki spektral karışıklığı artırmaktadır. Bununla birlikte, tuz yüzeyleri, koyu gölgeler, bulanık ve sığ sular, sazlıklar, nemli zeminler ve karışık pikseller MNDWI temelli sınıflandırmalarda belirsizlik oluşturabilmektedir. Türkiye’de farklı göller üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar da MNDWI’nin su yüzeylerinin belirlenmesinde yararlı olduğunu, ancak eşik değerinin ve gerekli yardımcı kontrollerin göl özelliklerine göre değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Acar ve Zengin, 2025; Kale ve Erişmiş, 2024; Mutlu vd., 2020; Sabuncu, 2020).

2.3.3. Otomatik Su Çıkarma İndeksi

Otomatik Su Çıkarma İndeksi (AWEI), gölgelerin ve düşük yansımaya sahip koyu yüzeylerin su sınıfına hatalı biçimde dâhil edilmesini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. İndeksin gölge etkisinin sınırlı olduğu alanlar için $AWEI_{nsh}$ (no shadow) ve gölge etkisinin bulunduğu koşullar için kullanılan $AWEI_{sh}$ (shadow) olmak üzere iki formu bulunmaktadır (Feyisa vd., 2014). $AWEI_{nsh}$ ve $AWEI_{sh}$ formülleri sırasıyla Eşitlik 4 ve Eşitlik 5’te verilmiştir.

$$AWEI_{nsh} = 4(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) - (0,25\rho_{NIR} + 2,75\rho_{SWIR2}) \quad (4)$$

$$AWEI_{sh} = \rho_{Blue} + 2,5\rho_{Green} - 1,5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0,25\rho_{SWIR2} \quad (5)$$

Bu eşitliklerde:

$AWEI_{sh}$: Gölge etkisinin bulunduğu koşullar için AWEI değerini,

$AWEI_{nsh}$: Gölge etkisinin bulunmadığı koşullar için AWEI değerini,

ρ_{Blue} : Mavi banda ait yüzey yansımaları,

ρ_{Green} : Yeşil banda ait yüzey yansımaları,

ρ_{NIR} : NIR bandına ait yüzey yansımaları,

ρ_{SWIR1} : SWIR1 bandına ait yüzey yansımaları,

ρ_{SWIR2} : SWIR2 bandına ait yüzey yansımaları ifade etmektedir.

AWEI, gölge ve koyu yüzeylerden kaynaklanan sınıflandırma hatalarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş olsa da, su-kara sınırlarındaki karışık piksel sorununu tamamen ortadan kaldırmamaktadır (Feyisa vd., 2014; Sun vd., 2017). AWEI ve MNDWI'nin sınıflandırma başarıları çalışma alanına ve uygulanan sınıflandırma yöntemine göre değişebildiğinden, AWEI'nin tüm göl ve görüntü koşullarında MNDWI'den daha başarılı olduğu varsayılmamalıdır (Feyisa vd., 2014; Pan vd., 2020).

2.3.4. NDVI ve NIR Yansıması

NDVI, bitki örtüsünün kırmızı bantta düşük, yakın kızılötesi bantta ise yüksek yansıma göstermesi ilkesine dayanmaktadır (Rouse vd., 1974). NDVI, Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (6)$$

Bu eşitlikte:

ρ_{NIR} : NIR bandına ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerini,

ρ_{Red} : Kırmızı banda ait atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerini ifade etmektedir.

Sazlıklar, makrofitler ve kıyı bitkileri bazı su indekslerinde açık suya yakın değerler üretebilmektedir (Hestir vd., 2015; Villa vd., 2014). Bu nedenle NDVI değerleri ile doğrudan NIR yansıması, bitki örtüsü veya su dışı yüzeylerden kaynaklanan yanlış

sınıflandırmaların değerlendirilmesinde yardımcı spektral ölçütler olarak kullanılabilmektedir. Bununla birlikte, bu değişkenler MNDWI temelli ana sınıflandırma yaklaşımının yerine geçen bağımsız su indeksleri olarak değerlendirilmemelidir (Herndon vd., 2020; Huang vd., 2018).

2.4. Spektral Eşikleme ve Su Maskesi Üretimi

Spektral indekslerden elde edilen sürekli piksel değerlerinin su ve su dışı sınıflara dönüştürülmesi için bir eşik değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Eşik seçimi, üretilen su maskesinin kapsamını doğrudan etkilediğinden, sabit ve görüntüye uyarlanabilen eşikleme yaklaşımlarının özellikleri ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

2.4.1. Sabit ve Göl Bazlı Eşikleme

Sabit eşikleme, spektral indeks değerlerinin önceden belirlenen bir sınırla karşılaştırılmasına dayanır. Yöntemin hesaplama maliyeti düşüktür, uygulanması kolaydır ve karar yapısı açıklanabilir. Bununla birlikte, aynı eşik değeri farklı görüntü, sensör, mevsim ve göl koşullarında aynı sınıflandırma başarısını sağlamayabilir. Her göl için ayrı bir sabit eşik belirlenmesi göller arasındaki farklılıkları kısmen dikkate alsa da aynı gölde zaman içinde değişebilen bulanıklık, su seviyesi, kıyı örtüsü ve görüntü koşullarına tam olarak uyum sağlayamayabilir (Ji vd., 2009).

2.4.2. Dinamik Eşikleme ve Otsu Yöntemi

Dinamik eşikleme, eşik değerinin ilgili görüntünün veya dönemsel kompozitin spektral dağılımından belirlenmesine dayanır. Otsu yöntemi, histogramı iki sınıfa ayıran aday eşikler arasından sınıflar arası varyansı en yüksek olan değeri seçmektedir (Otsu, 1979). En uygun eşik değeri Eşitlik 7 ile ifade edilmektedir.

$$\theta^* = \operatorname{argmax}_{\theta} [\omega_0(\theta)\omega_1(\theta)(\mu_0(\theta) - \mu_1(\theta))^2] \quad (7)$$

Bu eşitlikte:

θ^* :En uygun eşik değerini,

θ :Aday eşik değerini,

ω_0 :Birinci sınıfın piksel ağırlığını,

ω_1 :İkinci sınıfın piksel ağırlığını,

μ_0 :Birinci sınıfın ortalamasını,

μ_1 : İkinci sınıfın ortalamasını ifade etmektedir.

Su ve su dışı pikseller histogramda belirgin iki grup oluşturduğunda, Otsu yöntemi etkili sonuçlar üretebilmektedir. Buna karşılık su piksel sayısının düşük olması, geniş kara alanlarının histogramı baskılaması veya tuz, sazlık ve nemli zeminlerin ek spektral gruplar oluşturması eşik değerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle histogramın üretildiği analiz alanının kapsamı, geçerli piksel sayısı ve sınıfların histogramdaki dağılımı eşik sonucunun güvenilirliği açısından önem taşımaktadır (Ji vd., 2009; Otsu, 1979). Elde edilen su maskesinin, sınıflandırma sonucundan bağımsız ve daha güvenilir referans verilerle değerlendirilmesi gerekmektedir (Olofsson vd., 2014; Stehman ve Foody, 2019). Dinamik Otsu yöntemiyle belirlenen eşik değeri MNDWI görüntüsüne uygulanarak pikseller su ve su dışı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Bu işlem sonucunda oluşturulan ikili su maskesi, ana sınıflandırma kuralı değiştirilmeden görsel ve sayısal kalite kontrolü adımlarıyla değerlendirilmiştir.

2.4.3. Yardımcı Spektral Ölçütlerin Kullanımı

MNDWI temelli eşikleme, bazı göllerde sazlıklar, sucul bitki örtüsü, nemli zeminler, koyu yüzeyler veya suya benzer indeks değerleri üreten kıyı birimleri nedeniyle yanlış pozitif su pikselleri oluşturabilmektedir. Hestir vd. (2015) ve Villa vd. (2014), su alanlarında NDVI değerlerinden yararlanılmasının açık su ile sucul bitki örtüsünün ayrılmasına katkı sağlayabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, NIR yansıması su ve su dışı yüzeyler arasındaki spektral farklılığın değerlendirilmesinde yardımcı bir ölçüt olarak kullanılabilir (Mondejar ve Tongco, 2019). Bununla birlikte NDVI veya NIR eşiklerinin bütün göl ve dönemlere zorunlu ve değişmez biçimde uygulanması, sığ, bulanık veya bitki örtüsüyle karışmış gerçek su piksellerinin su sınıfı dışında bırakılmasına neden olabilir. Yardımcı eşiklerin uygunluğu; suyun optik özelliklerine, kıyı yapısına, bitki yoğunluğuna ve görüntü koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Günen ve Atasever, 2024; Herndon vd., 2020; Huang vd., 2018). Bu nedenle yardımcı spektral ölçütler, MNDWI ve dinamik Otsu temelli ana sınıflandırma yaklaşımının yerine kullanılmamalı; yalnızca belirlenen sınıflandırma sorunlarını azaltmak amacıyla göl bazında değerlendirilmelidir.

2.5. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Sınıflandırmada her piksel, sahip olduğu spektral bant ve indeks değerlerinden oluşan öznitelik kümesi üzerinden bağımsız olarak değerlendirilmektedir (Khatami vd., 2016). Denetimli makine öğrenmesi algoritmaları, eğitim örneklerinden yararlanarak su ve su dışı sınıflar arasındaki ilişkileri modellemekte ve oluşturulan karar yapısını

görüntüdeki diğer piksellere uygulamaktadır (Maxwell vd., 2018). Bu yaklaşımlar, birden fazla spektral değişkeni birlikte değerlendirebilmeleri ve doğrusal olmayan sınıf sınırlarını modelleyebilmeleri nedeniyle uzaktan algılama çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Maxwell vd., 2018). Bu tez kapsamında K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makineleri, Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı ile Rastgele Orman algoritmaları destekleyici sınıflandırma yöntemleri olarak değerlendirilmiştir.

2.5.1. K-En Yakın Komşu

K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması, sınıflandırılacak bir örneğin öznitelik uzayındaki en yakın (k) komşusunun sınıf dağılımına göre karar veren parametrik olmayan bir algoritmadır (Cover ve Hart, 1967). Yöntem, karar yapısının anlaşılır ve uygulanmasının görece kolay olması nedeniyle temel karşılaştırma algoritması olarak kullanılabilmektedir. KNN'nin sınıflandırma başarısı seçilen komşu sayısına, özniteliklerin ölçeğine ve eğitim örneklerinin sınıfları temsil etme düzeyine bağlıdır (Halder vd., 2024; Noi ve Kappas, 2018). Öznitelik sayısının artması, örnekler arasındaki uzaklıkların ayırt ediciliğini azaltarak algoritmanın performansını etkileyebilmektedir (Beyer vd., 1999). Algoritmada pikseller arasındaki benzerlik, çoğunlukla Öklid uzaklığı kullanılarak hesaplanmaktadır (Cover ve Hart, 1967).

$$d(x, x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^P (x_j - x_{ij})^2} \quad (8)$$

Bu eşitlikte:

x: Sınıflandırılacak pikseli,

x_i : Eğitim veri kümesindeki i. örnek pikseli,

P: Öznitelik (bant) sayısını,

j: İlgili öznitelik indeksini,

x_j ve x_{ij} : Sırasıyla hedef pikselin ve örnek pikselin j. öznitelik değerlerini ifade etmektedir.

2.5.2. Destek Vektör Makineleri

Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritması, sınıflar arasındaki ayırma marjını en yüksek yapan karar sınırının belirlenmesine dayalı denetimli bir sınıflandırma algoritmasıdır (Cortes ve Vapnik, 1995). Doğrusal olarak ayrılamayan sınıflar, çekirdek fonksiyonları kullanılarak daha yüksek boyutlu bir öznitelik uzayında

modellenebilmektedir. Yöntemin yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin sınıflandırılmasındaki kullanımı Ustuner vd. (2015) tarafından da incelenmiştir. Radyal tabanlı fonksiyon çekirdeği, su ve su dışı yüzeyler arasındaki doğrusal olmayan spektral ilişkilerin temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. Algoritmanın performansı eğitim örneklerinin dağılımından, özniteliklerin ölçeğinden ve kullanılan model parametrelerinden etkilenmektedir (Mountrakis vd., 2011). DVM'nin ikili sınıflandırma problemine ilişkin ikili optimizasyon yapısı Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 ile ifade edilmektedir (Cortes ve Vapnik, 1995).

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (9)$$

Kısıtlar:

$$0 \leq \alpha_i \leq C \quad \text{ve} \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (10)$$

Bu eşitlikte:

α_i : i. örneğe ait Lagrange çarpanını,

y_i ve y_j : Eğitim örneklerine ait sınıf etiketlerini ($y \in \{-1, +1\}$),

x_i ve x_j : Eğitim örneklerine ait öznitelik (bant) vektörlerini,

$K(x_i, x_j)$: Doğrusal olmayan sınırları yüksek boyutlu uzayda çözmek için kullanılan çekirdek (kernel) fonksiyonunu,

C: Modelin aşırı öğrenmesini kontrol eden hata cezası (regülerizasyon) katsayısını ifade etmektedir.

Bu tezde, kıyı bölgelerinde ve su/su dışı ayrımında görülebilen doğrusal olmayan spektral ilişkileri modelleyebilmek amacıyla Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function [RTF]) çekirdeği tercih edilmiştir (Mountrakis vd., 2011).

$$K(x_i, x_j) = \exp \left(-\gamma \|x_i - x_j\|^2 \right) \quad (11)$$

Bu eşitlikte:

γ : Çekirdek (kernel) fonksiyonunun geometrik yayılımını ve karar sınırının esnekliğini belirleyen hiper parametreyi,

x_i ve x_j : Öznitelik uzayında (spektral bant boyutlarında) yer alan iki farklı örnek piksel vektörünü,

$\|x_i - x_j\|^2$: Söz konusu iki örnek piksel vektörü arasındaki karesel Öklid uzaklığını ifade etmektedir.

2.5.3. Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı ile Rastgele Orman

Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (CART), öznitelik uzayını belirli bölünme ölçütlerine göre ardışık karar kurallarıyla daha homojen alt gruplara ayıran ağaç tabanlı bir algoritmadır (Breiman vd., 1984). Oluşturulan karar yapısının izlenebilir ve yorumlanabilir olması, yöntemin temel avantajlarından biridir. Bununla birlikte tek bir karar ağacı, eğitim verilerindeki gürültüye ve aşırı öğrenmeye duyarlı olabilmektedir. CART sınıflandırma algoritmasında, bir düğümdeki sınıfların homojenlik düzeyinin belirlenmesinde çoğunlukla Gini safsızlık indeksi kullanılmaktadır (Breiman vd., 1984).

$$G(t) = 1 - \sum_{c=1}^C p(c | t)^2 \quad (12)$$

Bu eşitlikte:

$G(t)$: t düğümünün Gini safsızlık değerini,

C : toplam sınıf sayısını,

c : ilgili sınıf indeksini,

$p(c | t)$: t düğümündeki örneklerin c sınıfına ait olma oranını ifade etmektedir.

Gini değerinin sıfıra yaklaşması, düğümde bulunan örneklerin büyük ölçüde aynı sınıfa ait olduğunu göstermektedir. Buna karşılık Gini değerinin yükselmesi, düğümde farklı sınıflara ait örneklerin daha fazla karıştığını ifade etmektedir. Bu çalışmadaki su ve kara olmak üzere iki sınıflı yapı için Gini safsızlığı aşağıdaki biçimde hesaplanmaktadır.

$$G(t) = 1 - p_{su}(t)^2 - p_{kara}(t)^2 \quad (13)$$

CART algoritması, her düğümde aday öznitelikler ve eşik değerleri arasından alt düğümlerdeki ağırlıklı safsızlığı en fazla azaltan bölünmeyi seçmektedir. Bir bölünme sonucunda elde edilen Gini azalması aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\Delta G = G(t) - \frac{N_L}{N_t} G(t_L) - \frac{N_R}{N_t} G(t_R) \quad (14)$$

Bu eşitlikte:

ΔG : bölünme sonucunda elde edilen Gini safsızlığı azalmasını,

$G(t)$: ana düğümün Gini safsızlık değerini,

$G(t_l)$: sol alt düğümün Gini safsızlık değerini,

$G(t_r)$: sağ alt düğümün Gini safsızlık değerini,

N_t : ana düğümde bulunan toplam örnek sayısını,

N_l : sol alt düğümde bulunan örnek sayısını,

N_r : sağ alt düğümde bulunan örnek sayısını ifade etmektedir.

Algoritma, ΔG değerini en büyük yapan bölünmeyi seçerek sınıfların alt düğümlerde daha homojen biçimde ayrılmasını sağlamaktadır. Bölünme işlemi belirlenen durdurma koşullarına kadar sürdürülmekte ve terminal düğümde en yüksek örnek oranına sahip sınıf, ilgili pikselin tahmin edilen sınıfı olarak atanmaktadır.

Rastgele Orman (RO) algoritması, farklı eğitim örnekleri ve öznitelik alt kümeleri kullanılarak oluşturulan çok sayıda karar ağacının sonuçlarını birleştiren topluluk tabanlı bir algoritmadır (Breiman, 2001). Her karar ağacı, eğitim veri kümesinden tekrarlı rastgele örnekleme yoluyla oluşturulan bir alt küme üzerinde eğitilmektedir. Ayrıca her düğümde bütün öznitelikler yerine rastgele seçilen belirli sayıdaki öznitelik arasından en uygun bölünme belirlenmektedir. Bu rastgelelik, ağaçlar arasındaki benzerliği azaltmakta ve modelin genelleme yeteneğini artırmaktadır.

Sınıflandırma işleminde her karar ağacı ilgili piksel için bir sınıf tahmini üretmekte, Rastgele Orman modelinin nihai kararı ise ağaçların çoğunluk oylamasına göre belirlenmektedir (Breiman, 2001).

$$\hat{y}_{RO}(x) = \operatorname{argmax}_{c \in C} \sum_{b=1}^B I[h_b(x) = c] \quad (15)$$

Bu eşitlikte:

$\hat{y}_{RO}(x)$: x pikseli için Rastgele Orman tarafından tahmin edilen sınıfı,

x: sınıflandırılacak pikselin öznitelik vektörünü,

C: sınıf kümesini,

c: ilgili sınıfı,

B: ormandaki toplam karar ağacı sayısını,

b: ilgili karar ağacının indeksini,

$h_b(x)$: b. karar ağacının x pikseli için ürettiği sınıf tahminini,

$I[\cdot]$: parantez içindeki koşul doğru olduğunda 1, yanlış olduğunda 0 değerini alan gösterge fonksiyonunu ifade etmektedir.

Bu çalışmadaki ikili sınıflandırma probleminde, karar ağaçlarının çoğunluğu bir pikseli su olarak sınıflandırdığında ilgili piksel su; çoğunluğu kara olarak sınıflandırdığında ise kara sınıfına atanmaktadır. Birden fazla karar ağacının ortak kararından yararlanılması, tek bir karar ağacına bağlı değişkenliği ve aşırı öğrenme riskini azaltabilmektedir. RO algoritması, çok sayıda spektral değişkeni birlikte değerlendirebilmesi ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi nedeniyle uzaktan algılama sınıflandırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Belgiu ve Drăguț, 2016; Maxwell vd., 2018).

Makine öğrenmesi algoritmalarında elde edilen sınıflandırma başarısı yalnızca algoritmanın yapısına bağlı değildir. Eğitim ve test örneklerinin sayısı, örneklerin sınıfları temsil etme düzeyi, öznitelik seçimi ve referans verilerin güvenilirliği de sonuçları doğrudan etkileyebilmektedir (Foody ve Mathur, 2004; Kuo vd., 2014; Mellor vd., 2015; Olofsson vd., 2014; Ramezan vd., 2021; Stehman ve Foody, 2019). Bu nedenle farklı çalışmalarda bildirilen doğruluk değerleri, kullanılan veri, öznitelik ve örnekleme koşulları dikkate alınmadan doğrudan karşılaştırılmamalıdır (Khatami vd., 2016; Stehman ve Foody, 2019).

2.6. Doğruluk Analizi ve Referans Veri

Sınıflandırma performansı, karışıklık matrisinde yer alan doğru pozitif (True Positive [TP]), doğru negatif (True Negative [TN]), yanlış pozitif (False Positive [FP]) ve yanlış negatif (False Negative [FN]) değerleri üzerinden değerlendirilmektedir (Congalton, 1991). Genel doğruluk (Overall Accuracy [OA]), kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve Kesişimin Birleşime Oranı (Intersection over Union [IoU]) bu değerlerden türetilmektedir (Powers, 2011). Kappa katsayısı ise gözlenen uyum ile tesadüfen beklenen uyum dikkate alınarak hesaplanmaktadır (Cohen, 1960).

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP+FP} \quad (16)$$

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP+FN} \quad (17)$$

$$GD = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (18)$$

$$F1 \text{ skoru} = \frac{2TP}{2TP+FP+FN} \quad (19)$$

$$IoU = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (20)$$

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (21)$$

Bu eşitliklerde:

Kesinlik: Su olarak sınıflandırılan pikseller içerisinde gerçekten su olan piksellerin oranını,

Duyarlılık: Gerçekte su olan pikseller içerisinde doğru biçimde su olarak sınıflandırılan piksellerin oranını,

OA: Genel doğruluğu,

TP: Doğru sınıflandırılan su piksellerini,

TN: Doğru sınıflandırılan su dışı piksellerini,

FP: Su olmadığı hâlde su sınıfına atanan pikselleri,

FN: Su olduğu hâlde su dışı sınıfa atanan pikselleri,

F1: Kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasını,

IoU: Su sınıfına ait kesişim/birleşim oranını,

κ : Kappa katsayısını,

p_o : Gözlenen sınıflandırma uyumunu,

p_e : Sınıf dağılımlarına göre tesadüfî beklenen uyumu ifade etmektedir.

Kappa katsayısı, gözlenen sınıflandırma uyumunu tesadüfen ortaya çıkabilecek uyumu dikkate alarak değerlendirmektedir (Cohen, 1960). Bununla birlikte genel doğruluk ve Kappa katsayısının yüksek olması, su sınıfındaki bütün sınıflandırma hatalarının düşük olduğunu göstermemektedir. Özellikle sınıfların dengesiz olduğu durumlarda, geniş su dışı alanların doğru sınıflandırılması genel doğruluk değerini yükseltebilir. Buna karşılık kıyı bölgelerinde oluşan yanlış pozitif ve yanlış negatif sınıflandırmalar genel doğruluk değerine yeterince yansımayaabilir (Foody, 2020; Shao vd., 2019). Bu nedenle sınıflandırma performansı yalnızca genel doğruluk ve Kappa katsayısıyla değerlendirilmemiş; kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve IoU değerleri de birlikte dikkate alınmıştır. Doğruluk değerlendirmesinin güvenilirliği, referans verilerin değerlendirilen sınıflandırma sonucundan bağımsız ve daha güvenilir bir süreçle

oluşturulmasına bağlıdır (Olofsson vd., 2014; Stehman ve Foody, 2019). Bu nedenle bir su maskesinden doğrudan türetilen örneklerin aynı su maskesinin doğrulanmasında kullanılması bağımsız doğrulama olarak kabul edilmemiştir. Referans örnekleri, sınıflandırma sonucundan bağımsız biçimde belirlenmiş ve su ile su dışı sınıfları temsil edecek şekilde değerlendirilmiştir.

2.7. Google Earth Engine Tabanlı Uzun Dönemli Su İzleme Çalışmaları

Google Earth Engine (GEE), uzun süreli uydu arşivlerinin geniş alanlarda ve ortak işlem adımlarıyla değerlendirilmesine olanak sağlaması nedeniyle yüzey suyu izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Gorelick vd., 2017). Pekel vd. (2016), üç milyondan fazla Landsat görüntüsünden yararlanarak yüzey sularının oluşumunu, sürekliliğini ve değişimini 1984–2015 döneminde 30 m mekânsal çözünürlükte küresel ölçekte haritalamıştır. Bu çalışma, GEE'nin geniş uydu arşivlerini yüzey suyu değişimlerinin belirlenmesinde kullanma kapasitesini gösteren temel örneklerden biridir. Bununla birlikte küresel ölçekte önceden üretilmiş sınıflandırma ürünleri, belirli göllerin kıyı yapısı ve spektral özellikleri dikkate alınarak geliştirilen yerel iş akışlarının doğrudan yerine geçmemektedir.

Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar da GEE’nin göl değişimlerinin uzun dönemli değerlendirilmesinde kullanılabildiğini göstermektedir. Albarqouni vd. (2022), Burdur, Eğirdir ve Beyşehir göllerinin 2000–2021 dönemindeki su yüzeyi alanı ve göl yüzey sıcaklığı değişimlerini Landsat görüntüleri ve NDWI aracılığıyla incelemiştir. Atiz ve Durduran (2025) ise Ilgın Gölü’nün 1985–2024 dönemindeki su yüzeyi alanı ve su kalitesi göstergelerini Landsat verilerinden üretmiş; uzun dönemli değişimleri Mann–Kendall ve Theil–Sen yöntemleriyle değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, bulut tabanlı işlem ortamlarının çok zamanlı göl analizlerini ortak bir iş akışı içerisinde yürütme olanağı sağladığını ortaya koymaktadır. GEE tabanlı yüzey suyu izleme yaklaşımları, son yıllarda optik ve radar görüntülerinin birlikte değerlendirilmesi ile alan, seviye ve depolama bilgilerinin bütünleştirilmesine doğru gelişmektedir (Jahangeer vd., 2025; Masoud, 2026). Masoud (2026), Sentinel-1, Sentinel-2 ve Landsat 8–9 görüntülerini kullanan GEE-HydroMonitor uygulamasında otomatik eşikleme yoluyla rezervuar alanı ve seviye serileri üretmiş ve sonuçları bağımsız altimetre verileriyle değerlendirmiştir. Jahangeer vd. (2025) ise GEE ile makine ve derin öğrenme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı yüzey suyu çalışmalarını inceleyerek bu yaklaşımların ölçeklenebilirliğinin yanı sıra veri işleme, model seçimi, doğruluk değerlendirmesi ve yöntemsel sınırlılıkların açık biçimde tanımlanmasının önemini vurgulamıştır.

2.8. Zamansal Eğilim Analizi

Bu bölümde mevsimsel standardizasyon, Mann–Kendall testi, Sen’in eğim yöntemi ve eğilim temelli senaryo değerleri kısaca açıklanmıştır.

2.8.1. Mevsimsel Standardizasyon

Göl su yüzeyi alanı; yağış, kar erimesi, yüzeysel akış, buharlaşma ve su kullanımı gibi etkenlere bağlı olarak yıl içinde değişebilmektedir. Farklı mevsimleri temsil eden görüntülerin doğrudan karşılaştırılması, dönemsel dalgalanmaların uzun dönemli değişim olarak yorumlanmasına neden olabilir. Manyas Gölü’nde 2022 yılına ait aylık su yüzeyi alanlarının nisan ve ağustos ayları arasında değişmesi, aynı yıl içerisindeki mevsimsel farklılığın önemini göstermektedir (Uzun, 2024). Bu nedenle uzun dönemli karşılaştırmalarda kullanılan görüntülerin ortak bir mevsimsel dönemi temsil etmesi gerekmektedir.

2.8.2. Mann–Kendall Testi

Mann-Kendall testi, bir zaman serisinde monoton artış veya azalış eğiliminin bulunup bulunmadığını değerlendiren parametrik olmayan bir yöntemdir (Kendall, 1975; Mann, 1945). Test istatistiği Eşitlik 22 ile hesaplanmaktadır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (22)$$

Bu eşitlikte:

S: Mann–Kendall test istatistiğini,

n: Gözlem sayısını,

x_i : i zamanındaki gözlem değerini,

x_j : j zamanındaki gözlem değerini,

sgn: İşaret fonksiyonunu ifade etmektedir.

Bağlı değerlerin bulunduğu zaman serilerinde S istatistiğinin varyansı Eşitlik 23 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] / 18 \quad (23)$$

Bu eşitlikte:

q: Bağlı değer grubu sayısını,

t_p ise p grubundaki bağı gözlem sayısını göstermektedir.

Standartlaştırılmış test istatistiği Z, S ve Var(S) değerlerinden Eşitlik 24 ile hesaplanmaktadır.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Pozitif "**Z**"değeri artış, negatif "**Z**"değeri ise azalış yönündeki eğilimi göstermektedir. Eğilimin istatistiksel anlamlılığı, hesaplanan "**Z**"ve "**P**"değerlerinin seçilen anlamlılık düzeyine göre değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Mann–Kendall testi, zaman serisindeki monoton eğilimin varlığını ve yönünü değerlendirmekte; ancak gözlenen değişimin nedenini tek başına açıklayamamaktadır (Runge vd., 2019). Eğilimin büyüklüğü ise Sen eğimi ile belirlenmektedir (Sen, 1968). Mann–Kendall testinin istatistiksel gücü örneklem sayısına, eğilimin büyüklüğüne ve zaman serisindeki değişkenliğe bağlıdır. Bu nedenle az sayıda gözlem içeren zaman serilerinde anlamlılık düzeyi, eğilim yönü ve Sen eğimi birlikte değerlendirilmelidir (Yue vd., 2002).

2.8.3. Sen'in Eğim Yöntemi

Sen'in eğim yöntemi, bütün gözlem çiftleri arasındaki eğimlerin medyanını kullanarak değişimin birim zamandaki büyüklüğünü tahmin etmektedir (Sen, 1968). Eğim Eşitlik 25 ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \quad (25)$$

Bu eşitlikte:

Q_{ij} : i ve j gözlemleri arasındaki eğimi,

x_i : i zamanındaki gözlem değerini,

x_j : j zamanındaki gözlem değerini,

t_i : i gözleminin zamanını,

t_j : j gözleminin zamanını ifade etmektedir.

Pozitif Q artış, negatif Q azalış yönünü göstermektedir. Analiz yılları eşit aralıklı değilse paydada gözlem sırası yerine gerçek yıl farkının kullanılması gerekir. Sen eğimi, uç değerlere karşı klasik doğrusal regresyona göre daha dayanıklıdır (Sen, 1968). Bununla birlikte, Sen eğimi geleceğin deterministik tahmini değildir. Eğim temelli ileri yıl değerleri yalnızca geçmiş eğilimin değişmeden sürmesi varsayımına dayalı senaryo değerleri olarak değerlendirilmelidir

2.8.4. Eğilim Temelli Senaryo Değerleri

Sen eğimi, incelenen dönemde su yüzeyi alanında meydana gelen yıllık değişim hızını belirlemek için kullanılmıştır. Belirlenen eğilimin gelecekte aynı hız ve yönde devam edeceği varsayılarak ileri yıllara ilişkin eğilim temelli senaryo değerleri hesaplanmıştır. Belirli bir gelecek yıldaki su yüzeyi alanı Eşitlik 26 ile ifade edilmiştir.

$$A_y = A_{y_0} + \beta \times (y - y_0) \quad (26)$$

Bu eşitlikte:

A_y : hedef yıldaki senaryo alanını,

A_{y_0} : başlangıç yılındaki gözlenen alanı,

β : Sen eğimini,

y : hedef yılı

y_0 : başlangıç yılını ifade etmektedir.

Hesaplanan değerler; iklim, su kullanımı, havza yönetimi ve hidrolojik süreçlerde gelecekte meydana gelebilecek değişimleri dikkate alan kesin tahminler değildir. Bu değerler, geçmiş dönemde belirlenen eğilimin aynı hız ve yönde devam edeceği varsayımına dayalı eğilim temelli senaryo sonuçları olarak değerlendirilmelidir (IPCC, 2022). Su yüzeyi alanı fiziksel olarak negatif değer alamayacağından, sıfırın altında hesaplanan eğilim temelli senaryo değerleri 0 km² ile sınırlandırılmış ve negatif değerler gerçek bir fiziksel alan olarak yorumlanmamıştır

2.9. Hidroklimatik Verilerin Yardımcı Değerlendirmesi

Göl alanındaki değişimlerin hidroklimatik bağlamını desteklemek amacıyla yağış ve potansiyel buharlaşma ve terleme değişkenlerinden yararlanılabilir. CHIRPS, istasyon verileriyle birleştirilmiş uydu tabanlı yağış tahminleri sunarken, ERA5-Land kara

yüzeyine ilişkin yeniden analiz değişkenlerini sağlamaktadır (Funk vd., 2015; Muñoz-Sabater vd., 2021). Yağış toplamı, hidrolojik sisteme giren atmosferik suyu; PET ise atmosferin buharlaşma talebini temsil eden destekleyici bir göstergedir. Yağış ile PET arasındaki fark ve oran, göl alanındaki değişimlerin kuraklık ve su açığı koşullarıyla birlikte yorumlanmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu göstergeler tek başına göl alanı değişiminin nedenini açıklamaz; yüzey akışı, yeraltı suyu, su kullanımı ve havza yönetimi gibi diğer süreçler de dikkate alınmalıdır (Aydın vd., 2020; Yao vd., 2023). Bu nedenle su yüzeyi alanı ile hidroklimatik göstergeler arasındaki benzerlikler, çevresel bağlamı destekleyen birlikte değişim örüntüleri olarak değerlendirilmiştir. Yalnızca zamansal uyuma veya istatistiksel ilişkiye dayanılarak doğrudan nedensellik kurulmamıştır

2.10. Türkiye’de Çalışma Kapsamındaki Göller Üzerine Yapılan Araştırmalar

Türkiye’de çalışma kapsamında incelenen göllerin su yüzeyi alanı, kıyı, seviye ve sulak alan değişimleri; farklı uzaktan algılama verileri, hidrolojik kayıtlar ve analiz yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalar, su sınırlarının belirlenmesinde göllerin morfolojik, hidrolojik ve spektral özelliklerinin yanı sıra kullanılan sensörün, görüntü döneminin, spektral indeksin ve sınıflandırma yaklaşımının da etkili olduğunu göstermektedir.

Akşehir Gölü’nde bant oranlama, sınıflandırma ve spektral su indekslerinin karşılaştırıldığı çalışmalar, NDWI ve MNDWI gibi yöntemlerin farklı görüntü tarihlerinde farklı su sınırları üretebildiğini ortaya koymuştur (Çağlayan vd., 2020; Mutlu vd., 2020). Eber Gölü’nün 2015–2024 dönemindeki değişimlerini Sentinel-2 görüntüleri ve MNDWI kullanarak inceleyen Acar ve Zengin (2025), su ve su dışı yüzeyleri ayıran eşik değerlerini aşamalı olarak belirlemiş ve sonuçları yer verileriyle kontrol etmiştir. Bu çalışmalar; sığlık, sazlık, parçalı açık su yüzeyleri ve nemli göl tabanı gibi özelliklerin açık su sınıfının belirlenmesinde belirsizliğe neden olabildiğini göstermektedir. Bu nedenle Akşehir ve Eber göllerinde açık su tanımının, eşikleme yaklaşımının analiz ve eşik geometrilerinin ve kalite kontrol ölçütlerinin açık biçimde belirtilmesi önem taşımaktadır.

Tuz Gölü’ndeki değişimler çok zamanlı optik görüntüler, iklim kayıtları, arazi ölçümleri ve radar verileri kullanılarak incelenmiştir. Ekercin (2007), Tuz Gölü ve yakın çevresindeki zamansal değişimleri uydu görüntüleri, iklim verileri ve eşzamanlı arazi ölçmeleriyle değerlendirmiştir. Yagmur vd. (2021), Tuz Gölü’nü, Konya Kapalı Havzası’ndaki farklı özelliklere sahip göllerle birlikte, uzun ve kısa dönemli su yüzeyi

alanı değişimleri açısından ele almıştır. Erbaş ve Varlık (2025) yaz dönemine ait Landsat görüntülerinden yararlanırken Bilgilioğlu vd. (2021), Sentinel-1 radar verileri üzerinden gölün hacim dinamiklerini incelemiştir. Bu çalışmalar, sığ su, nemli tuz yüzeyi ve kuru tuz kabuğunun ayrılmasında kullanılan sensörün, gözlem döneminin ve sınıflandırma ölçütlerinin sonuçları etkileyebildiğini ortaya koymaktadır.

Van Gölü üzerine yapılan araştırmalar, göl seviyesi ve kıyı değişimlerini doğal ve insan kaynaklı süreçler birlikte değerlendirmektedir. Altan Aydın ve Doğu (2018), göl seviyesindeki değişimleri yağış, buharlaşma, akarsu girdileri, tektonik süreçler ve beşerî etkiler bağlamında incelemiştir. Akkuş (2026) ise 1982–2022 dönemine ait uydu görüntülerinden yararlanarak kıyı değişimlerinin göl çevresinde homojen olmadığını ve aşınma ile birikme süreçlerinin kıyı kesimlerine göre farklılaştığını belirlemiştir. Bu bulgular, Van Gölü’nde su sınırı belirlenirken akarsu ağızları, tortu birikimi ve yerel kıyı morfolojisinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Beyşehir Gölü’nün kıyı, açık su ve sulak alan değişimleri Landsat görüntüleri kullanılarak incelenmiş; açık su yüzeyi ile çevresindeki sulak alanların farklı değişim örüntüleri gösterebildiğı belirlenmiştir (Goksel vd., 2004). Beyşehir, Eğirdir ve Burdur göllerini ortak bir GEE iş akışıyla değerlendiren Albarqouni vd. (2022), göl su yüzeyi alanı ile göl yüzey sıcaklığındaki zamansal değişimleri birlikte incelemiştir. Eğirdir Gölü’nde NDWI ve MNDWI yöntemlerini karşılaştıran Kale ve Erişmiş (2024), indekslerin özellikle sazlıkların bulunduğu kıyı kesimlerinde farklı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur. Bu araştırmalar, geniş tatlı su göllerinde dahi kıyı örtüsünün, sazlıkların, adaların ve mevsimsel gözlem koşullarının belirlenen su sınırlarını etkileyebildiğini göstermektedir.

Burdur Gölü’nün kıyı ve su yüzeyi alanındaki değişimler; MNDWI, NDWI, en çok benzerlik, Destek Vektör Makineleri ve nesne tabanlı sınıflandırma gibi farklı yöntemlerle araştırılmıştır (Kaya ve Kaplan, 2021; Sabuncu, 2020; Taş ve Akpınar, 2021). Bu çalışmalar göl su yüzeyi alanındaki uzun dönemli azalmayı ortaya koymakla birlikte, görüntü tarihleri, çalışma alanı sınırları ve sınıflandırma yöntemlerindeki farklılıklar hesaplanan alan değerlerinin doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Salda Gölü’nde aynı aya ait Landsat görüntülerinden yararlanan Yıldız (2025) ise uzun dönemli su yüzeyi alanı ve kıyı değişimlerini benzer mevsimsel koşullar altında değerlendirmiştir. Çalışma, farklı yıllara ait görüntülerin ortak bir mevsimsel dönemi temsil etmesinin uzun dönemli karşılaştırılabilirlik açısından önemini göstermektedir.

İznik Gölü üzerine yapılan araştırmalarda göl seviyesi ile iklim değişkenleri arasındaki ilişkiler ve zamansal eğilimler değerlendirilmiştir (Bahadır ve Özdemir, 2011).

Özbayram vd. (2021), İznik ve Manyas göllerini su kalitesi ve mikrobiyal topluluk özellikleri bakımından karşılaştırmış; İznik Gölü'nü derin, Manyas Gölü'nü ise sığ ve hipertrofik bir göl sistemi olarak tanımlamıştır. Manyas/Kuş Gölü'nün sığ ve bulanık yapısı ile yoğun kıyı bitki örtüsü, açık su sınırının belirlenmesinde farklı güçlükler oluşturmaktadır (Albay ve Akçaalan, 2008). Uzun (2024) gölün 1980–2020 dönemindeki kıyı değişimlerini ve 2022 yılına ait aylık su yüzeyi alanlarını incelemiş; göl alanının nisan ve ağustos ayları arasında belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymuştur. Aynı çalışmada güney kıyılarındaki sazlık gelişimi ve Manyas Çayı deltasının ilerlemesine bağlı birikim süreçleri ile kuzey kıyılarındaki aşınma alanları belirlenmiştir. Bu bulgular, Manyas/Kuş Gölü'nün incelenmesinde mevsimsel standardizasyonun yanı sıra sazlık ve delta gelişiminin kıyı sınırları üzerindeki etkisinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

2.11. Literatürün Genel Değerlendirmesi ve Araştırma Boşluğu

Literatürdeki çalışmalar, su yüzeylerinin belirlenmesinde tek bir spektral indeksin veya sınıflandırma yönteminin tüm göl ve görüntü koşullarında mutlak üstünlük sağlamadığını göstermektedir. NDWI ve MNDWI gibi spektral indeksler uygulanabilir ve açıklanabilir yaklaşımlar sunmakla birlikte eşik seçimi, gölge, bulanıklık, tuz yüzeyleri, sazlıklar ve karışık piksellerden etkilenebilmektedir (Feyisa vd., 2014; Ji vd., 2009). Makine öğrenmesi algoritmaları birden fazla spektral değişkeni birlikte değerlendirebilmekte; ancak elde edilen sonuçların güvenilirliği, eğitim ve test örneklerinin niteliğine, sınıfları temsil etme düzeyine ve referans verilerin bağımsızlığına bağlıdır (Maxwell vd., 2018 Olofsson vd., 2014; Stehman ve Foody, 2019).

Türkiye'de çalışma kapsamındaki göller üzerine gerçekleştirilen araştırmalar önemli bulgular sunmakla birlikte, çalışmaların büyük bölümü tek bir göle, sınırlı sayıdaki görüntüye veya belirli bir indeks ve sınıflandırma yaklaşımına odaklanmaktadır. Görüntü tarihleri, mevsimsel dönemler, çalışma alanı sınırları, açık su tanımı, eşik belirleme yöntemi, kıyı bitkilerinin sınıflandırılması ve doğrulama yaklaşımları arasındaki farklılıklar, literatürde bildirilen su yüzeyi alanlarının doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir (Acar ve Zengin, 2025; Kale ve Erişmiş, 2024; Mutlu vd., 2020; Sabuncu, 2020; Uzun, 2024). Bu araştırma boşluğu doğrultusunda, tez kapsamında farklı fiziksel, hidrolojik ve spektral özelliklere sahip 10 göl; ortak Landsat veri ürünleri, karşılaştırılabilir mevsimsel dönemler ve tanımlanmış bir algoritmik iş akışı kullanılarak değerlendirilmiştir. Ana su yüzeyi belirleme yaklaşımı, MNDWI görüntülerine dinamik Otsu eşikleme yönteminin uygulanmasına dayandırılmış; gerekli

görülen durumlarda yardımcı spektral ölçütlerin yanlış sınıflandırmaları azaltmadaki kullanılabilirliği göl bazında ele alınmıştır. Böylece bütün göl ve dönemlere tek bir sayısal eşik uygulanması yerine, ortak eşik belirleme mantığı ile görüntü koşullarına uyarlanabilir bir sınıflandırma yapısının birlikte kullanılması amaçlanmıştır.

Makine öğrenmesi algoritmaları, ana su yüzeyi alanı üretim yönteminin yerine kullanılmamış; farklı denetimli sınıflandırıcıların ortak eğitim ve bağımsız test koşullarındaki performanslarını değerlendiren destekleyici bir karşılaştırma bileşeni olarak ele alınmıştır. CHIRPS yağış ve ERA5-Land potansiyel buharlaşma ve terleme verileri de su maskesi üretimine dâhil edilmemiş, su yüzeyi alanındaki değişimlerin hidroklimatik bağlamda yorumlanmasını destekleyen yardımcı veriler olarak kullanılmıştır. Bu ayırım, sınıflandırma sonuçları ile çevresel göstergeler arasındaki ilişkilerin doğrudan nedensellik biçiminde yorumlanmasını önleyerek çalışmanın yöntemsel kapsamını ve bilimsel sınırlarını belirginleştirmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, Türkiye'nin farklı hidrolojik, limnolojik ve spektral özelliklere sahip 10 gölündeki açık su yüzeyi alanı değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan veriler ve uygulanan yöntemsel işlem zinciri açıklanmaktadır. Araştırma, Landsat uydu verilerinin Google Earth Engine (GEE) ortamında işlenmesine, dönemsel kompozitlerden ikili su maskelerinin üretilmesine ve su olarak sınıflandırılan piksellerin alanlarının toplanmasına dayalı yeniden üretilebilir bir algoritmik iş akışına dayanmaktadır. Bu bölümde kullanılan “model” kavramı, yalnızca makine öğrenmesi algoritmalarını değil, otomatik su yüzeyi belirleme ve alan hesaplama sürecinin tamamını da ifade etmektedir.

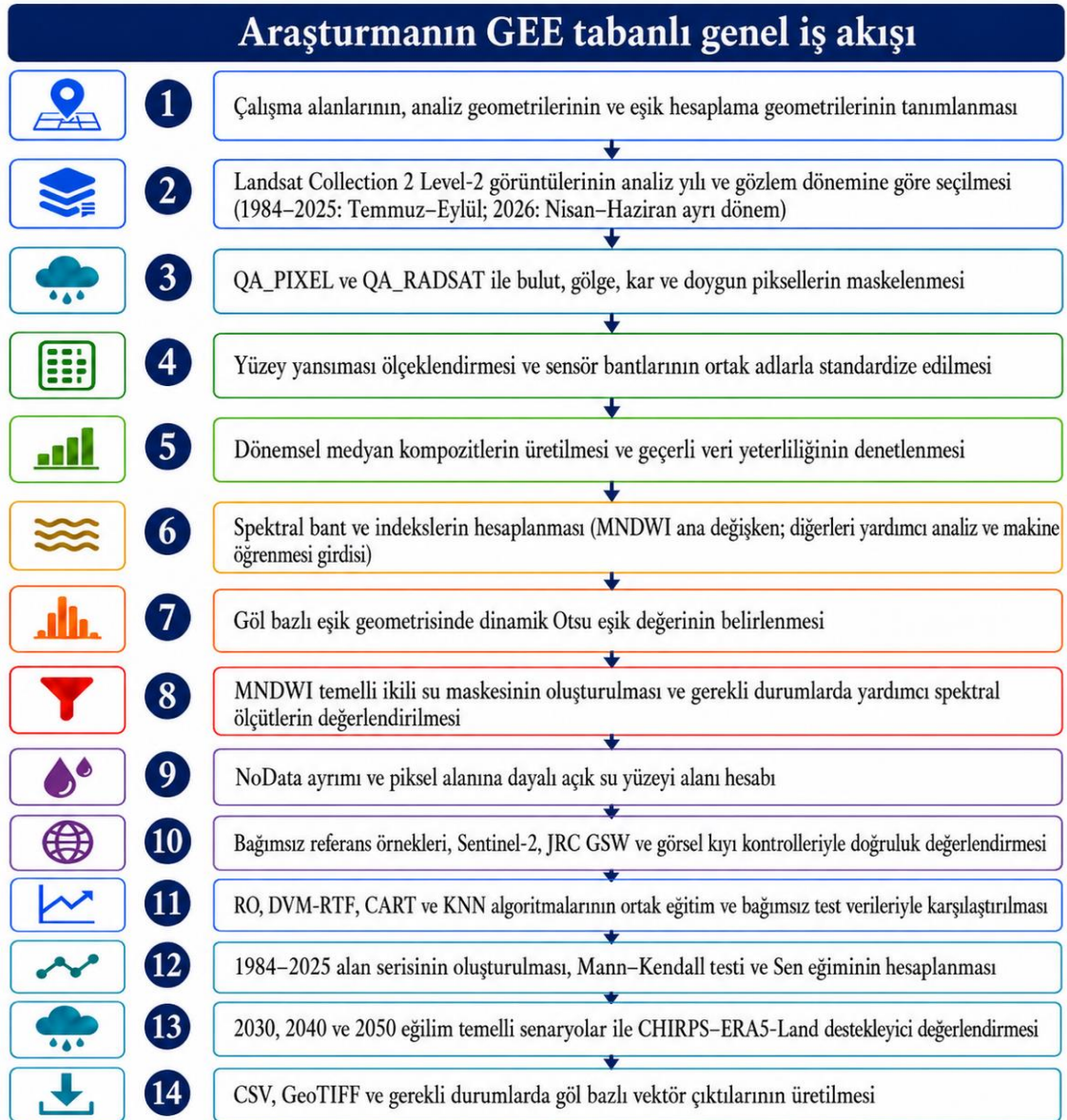
Uzun dönemli ve mevsimsel açıdan karşılaştırılabilir zaman serisi 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 ve 2025 yıllarının temmuz–eylül dönemlerinden oluşturulmuştur. Ayrıca 2026 yılının nisan–haziran dönemine ait görüntüler güncel durumun değerlendirilmesi amacıyla ayrı bir gözlem penceresi olarak işlenmiştir. Bu dönem, farklı bir mevsimsel aralığı temsil etmesi nedeniyle Mann–Kendall testi, Sen'in eğim yöntemi ve eğilim temelli senaryo analizlerine dâhil edilmemiştir.

Çalışmanın temel çıktısını, belirlenen gözlem dönemlerinde uydu görüntülerinde açık su olarak sınıflandırılan piksellerin toplam alanı oluşturmaktadır. Sazlıklar, makrofitler, nemli zeminler, çamurlu kıyılar, kuru göl tabanı ve tuz kabuğu açık su sınıfına dâhil edilmemiştir. Bu nedenle hesaplanan değerler, toplam sulak alan büyüklüğünü değil, kullanılan mekânsal çözünürlük ve sınıflandırma kuralları çerçevesinde belirlenen açık su yüzeyi alanını temsil etmektedir.

3.1. Araştırmanın İş Akışı

Araştırma, çok zamanlı ve karşılaştırmalı bir uzaktan algılama tasarımına dayanmaktadır. Göller arasında karşılaştırılabilirliğin korunması amacıyla veri ürünleri, mevsimsel gözlem penceresi, yüzey yansıması ölçeklendirmesi, temel kalite kontrolü, medyan kompozit üretimi, spektral indeks hesapları, alan hesabı ve zamansal eğilim analizi ortak bir yapıda uygulanmıştır. Bununla birlikte, göllerin büyüklük, kıyı geometrisi, sıklık, tuzluluk, bulanıklık ve kıyı bitki örtüsü bakımından farklı özelliklere sahip olması nedeniyle analiz alanları ile Otsu histogramlarının üretildiği geometriler göl bazında tanımlanmıştır. Her göl için belirlenen karar yapısı, tüm analiz dönemlerinde değiştirilmeden uygulanmıştır. Yöntem iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada Landsat görüntülerinin seçilmesi, kalite katmanları kullanılarak güvensiz piksellerin

maskelenmesi, karşılık gelen sensör bantlarının ortak adlarla standartlaştırılması, mevsimsel kompozitlerin oluşturulması, spektral değişkenlerin hesaplanması, dinamik Otsu eşiklerinin uygulanması, ikili su maskelerinin üretilmesi ve su yüzeyi alanlarının hesaplanması ortak bir çekirdek iş akışı içinde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ortak işlem çekirdeği, her göl için ayrı olarak belirlenen analiz ve eşikleme geometrileri üzerinde çalıştırılmış; üretilen sonuçlar görüntü yeterliliği, eşik davranışı, kıyı sürekliliği ve yardımcı referans verilerle mekânsal uyum bakımından kontrol edilmiştir. Araştırmanın genel iş akışı Şekil 2’de gösterilmiştir. İş akışı veri seçimi ve ön işleme aşamalarıyla başlamış; su maskesi ve alan üretimi, doğruluk değerlendirmesi, makine öğrenmesi karşılaştırması, zamansal analiz ve çıktıların dışa aktarılması adımlarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 2. Araştırmanın GEE tabanlı genel iş akışı

3.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde yer alan ve oluşum özellikleri, hidrolojik yapıları, su kimyaları, morfolojik nitelikleri ve çevresel koşulları bakımından birbirinden ayrılan Akşehir, Eber, Tuz, Salda, Manyas/Kuş, İznik, Van, Beyşehir, Eğirdir ve Burdur göllerinden oluşmaktadır (Şekil 3). İncelenen göller, uzun dönemli Landsat uydu görüntüleriyle düzenli ve karşılaştırılabilir biçimde izlenebilmeleri, yüzey alanlarında meydana gelen değişimlerin ekolojik ve çevresel açıdan önem taşıması ve Türkiye'deki farklı göl sistemlerini temsil etmeleri nedeniyle seçilmiştir. Çalışma alanlarının belirlenmesinde yalnızca göllerin coğrafi dağılımları değil, aynı zamanda su-kara ayrımını etkileyebilecek farklı spektral ve fiziksel koşulları içermeleri de dikkate alınmıştır. Bu kapsamda derin ve geniş açık su yüzeylerine sahip göllerin yanı sıra sığ, sazlıklarla çevrili, bulanık veya sediman yüklü su özellikleri gösteren göller ile tatlı su, acı su, sodalı ve yüksek tuzluluğa sahip kapalı havza gölleri birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca kıyı bitkileri, adalar, koylar, açık renkli kıyı birimleri, tuz kabukları, nemli göl tabanları ve mevsimsel olarak kuruyan alanlar gibi uydu görüntülerinden su yüzeyi çıkarımını zorlaştıracak farklı çevresel unsurların temsil edilmesine özen gösterilmiştir. Böylece seçilen göller, ortak bir veri işleme ve sınıflandırma yaklaşımının farklı göl koşullarındaki uygulanabilirliğinin değerlendirilmesine olanak sağlayan kapsamlı bir çalışma alanı oluşturmuştur. Göllerin temel özellikleri ve analiz sürecinde dikkate alınan yöntemsel noktalar Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 3. Türkiye'de incelenen 10 gölün konumu

Tablo 1. Çalışma alanını oluşturan göllerin temel özellikleri

Göl	Yaklaşık Merkez Koordinatı	Havza rejimi	Baskın özellik	Yöntemsel Dikkat Noktası
Van	38°38' K / 42°54' D	Kapalı	Derin; sodalı ve yüksek alkalinite; geniş açık su yüzeyi	Büyük alan ve kıyı girintileri
Tuz	38°44' K / 33°23' D	Kapalı	Çok sıg; yüksek tuzluluk; mevsimsel tuz yüzeyi	Tuz kabuğu, nemli zemin ve sıg su ayrımı
Beyşehir	37°45' K / 31°30' D	Açık	Sıg tatlı su; kıyı bitkileri ve adalar	Makrofit ve karma piksel etkisi
Eğirdir	38°03' K / 30°53' D	Açık	Tatlı su; orta derinlik; parçalı kıyı yapısı	Koylar ve dar kıyı geçişleri
Burdur	37°43' K / 30°10' D	Kapalı	Acı-tuzlu; belirgin kıyı çekilme alanları	Geçmiş kıyıların geniş AOI içinde korunması
İznik	40°26' K / 29°30' D	Açık	Derin tektonik tatlı su gölü	Gölge ve kıyı yerleşimi etkisi
Salda	37°33' K / 29°41' D	Kapalı	Derin; açık renkli kıyı birimleri	Sıg su-açık renkli kıyı ayrımı
Eber	38°36' K / 31°12' D	Kapalı	Çok sıg; yoğun sazlık ve sulak alan geçişleri	Açık su ile sazlık sınırının tanımlanması
Manyas/ Kuş	40°11' K / 27°58' D	Açık	Sıg; bulanık ve sediman yüklü su	Yüksek yakın kızılötesi yansımali bulanık su pikselleri
Akşehir	38°32' K / 31°25' D	Kapalı	Çok sıg; geniş kuruyan göl yatağı	Nemli zemin, sazlık ve parçalı su yüzeyi

Tablo 1’de verilen koordinatlar göllerin yaklaşık merkezlerini göstermektedir. Sayısal analizlerde merkez noktaları yerine, her gölün tarihsel olarak kaplayabileceği alanı ve kıyı çekilme zonlarını kapsayan ayrı çalışma alanı poligonları kullanılmıştır. Poligonların yalnızca güncel kıyı çizgisine göre dar tanımlanması, geçmiş yıllardaki geniş su yüzeylerini analiz dışında bırakabileceğinden, özellikle belirgin kıyı çekilmesi bulunan göllerde tarihsel alanlar yeterli tamponla kapsanmıştır. Kapalı ve açık havza niteliği, göl alanındaki değişimlerin hidrolojik yorumunu etkilemekle birlikte, sınıflandırma işleminde ortak veri ve hesaplama yapısı korunmuştur. Göller arasındaki farklılıklar, göle özgü analiz ve eşikleme geometrileri ile kalite kontrolü aşamasında dikkate alınmıştır.

3.2.1. Analiz ve Eşik Hesaplama Geometrileri

Her göl için su yüzeyindeki tarihsel çekilmelerin tamamını kapsayan geniş bir ilgi alanı (Area of Interest [AOI]) tanımlanmıştır. AOI sınırları gölün güncel su yüzeyiyle sınırlandırılmamış; geçmiş kıyı izleri, kuruyan göl yatağı, sazlık ve sığlık geçişleri ile yakın çevrede yanlış su sınıfı oluşturabilecek yüzeyleri içerecek biçimde hazırlanmıştır.

3.3. Kullanılan Veri Setleri

Araştırmada optik uydu görüntüleri, yardımcı yüzey suyu katmanları ve hidroklimatik veri kümeleri birlikte kullanılmıştır. Uzun dönemli açık su yüzeyi alan serisinin temel veri kaynağını Landsat görüntüleri oluşturmuştur. Sentinel-2 MSI görüntüleri ile JRC Global Surface Water (GSW) ürünleri, elde edilen su maskelerinin destekleyici görsel ve mekânsal kontrolünde değerlendirilmiştir. CHIRPS yağış verileri ve ERA5-Land yeniden analiz ürünü ise göl yüzey alanlarında belirlenen değişimlerin hidroklimatik koşullar bağlamında yorumlanması amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri kümeleri, bu veri kümelerinin kullanım dönemleri, mekânsal çözünürlükleri ve araştırmadaki işlevleri Tablo 2’de sunulmuştur. Tüm veri kümelerinin ön işleme, analiz ve hesaplama işlemleri Google Earth Engine (GEE) ortamında gerçekleştirilmiştir (Gorelick vd., 2017).

Tablo 2. Çalışmada kullanılan veri setleri ve araştırmadaki işlevleri

Veri Kümesi	Sensör/ürün	Kullanım dönemi	Mekânsal çözünürlük	Çalışmadaki işlevi
Landsat 5	TM	1984–2010 analiz yılları	30 m	Ana uzun dönem açık su alanı serisi
Landsat 8	OLI	2015, 2020, 2025 ve 2026	30 m	Yakın dönem ana su alanı analizi
Landsat 9	OLI-2	2025 ve 2026	30 m	Landsat 8 ile birleştirilmiş güncel dönem desteği
Sentinel-2	MSI	2015 sonrası	10–20 m	Görsel kıyı kontrolü ve destekleyici değerlendirme
JRC Global Surface Water	Occurrence/seasonality katmanları	1984–2021	30 m	Uzun dönemli yardımcı su varlığı kontrolü
CHIRPS	Günlük/aylık yağış	1984–2025	0,05°	Yağış toplamaları ve hidroklimatik bağlam
ERA5-Land	Aylık toplulaştırılmış değişkenler	1984–2025	0,1°	Potansiyel buharlaşma ve su açığı göstergeleri

3.3.1. Landsat Verileri

Landsat Collection 2 Level-2 ürünleri, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (U.S. Geological Survey, USGS) tarafından sağlanan atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansımaları ve kalite bantlarını içermektedir. Landsat 5 görüntülerinde mavi, yeşil, kırmızı, NIR, SWIR1 ve SWIR2 bantları sırasıyla SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B5 ve SR_B7; Landsat 8–9 görüntülerinde ise SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B5, SR_B6 ve SR_B7 bantlarından elde edilmiştir. Sensörler arası bant adlandırma farklılıkları kod içinde “blue, green, red, nir, swirl ve swirl2” ortak adlarına dönüştürülmüştür. Böylece sonraki indeks ve sınıflandırma fonksiyonları

sensörden bağımsız olarak çalıştırılmıştır. Landsat uydu verilerine ait bant verileri Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Landsat sensörlerinde kullanılan optik bantların ortaklaştırılması

Spektral bölge	Landsat 5 TM	Landsat 8–9 OLI/OLI-2	Ortak Kod Adı
Mavi	SR_B1	SR_B2	BLUE
Yeşil	SR_B2	SR_B3	GREEN
Kırmızı	SR_B3	SR_B4	RED
Yakın kızılötesi	SR_B4	SR_B5	NIR
Kısa dalga kızılötesi 1	SR_B5	SR_B6	SWIR1
Kısa dalga kızılötesi 2	SR_B7	SR_B7	SWIR2

3.3.2. Sentinel-2 MSI Verileri

Sentinel-2 Çok Spektralli Görüntüleyici (Multispectral Instrument [MSI]) verileri, ana su yüzeyi alanı zaman serisinin oluşturulmasında değil, 2015 ve sonrasında Landsat uydu verilerinden elde edilen su sınırları ve alan sonuçlarının destekleyici olarak kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Sentinel-2’nin görünür ve yakın kızılötesi bantlarda 10 m, kısa dalga kızılötesi bantlarda ise 20 m mekânsal çözünürlük sunması, kıyı geçişlerinin, dar su uzantılarının ve küçük su yüzeylerinin daha ayrıntılı incelenmesine katkı sağlamıştır (Drusch vd., 2012). Sensörlerin mekânsal çözünürlükleri ve görüntü edinim tarihleri arasındaki farklılıklar nedeniyle Sentinel-2 verilerinden türetilen su sınırları ve alan değerleri, Landsat tabanlı ana sonuçların yerine kullanılmamıştır.

3.3.3. JRC Global Surface Water Verisi

JRC GSW veri kümesi, 1984–2021 dönemindeki Landsat gözlemlerinden üretilmiş su varlığı, oluş sıklığı, mevsimsellik ve geçiş katmanlarını içermektedir (Pekel vd., 2016). Bu çalışmada JRC GSW, kalıcı ve mevsimsel su alanlarının uzun dönemli konumunu değerlendirmek ve tarihsel kıyı alanlarının analiz geometrileri içinde yer alıp almadığını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Aynı Landsat arşivinden türetilmiş olması nedeniyle bağımsız bir arazi doğrulaması olarak kabul edilmemiştir.

3.3.4. CHIRPS ve ERA5-Land Verileri

CHIRPS, uydu gözlemleri ile istasyon verilerini birleştiren 0,05° çözünürlüklü ve 1981’den yakın döneme uzanan bir yağış veri kümesidir (Funk vd., 2015). Göl bazlı yıllık ve mevsimsel yağış toplamaları tanımlanan hidroklimatik değerlendirme bölgelerinde hesaplanmıştır. ERA5-Land verilerinden yıllık ve temmuz–eylül dönemlerine ait

potansiyel buharlaşma ve terleme toplamaları türetilmiştir (Muñoz-Sabater vd., 2021). Bu değişkenler su maskesi üretiminde, eşik belirlemede veya sınıflandırıcı girdisi olarak kullanılmamış; alan değişimlerinin çevresel bağlamını desteklemek amacıyla değerlendirilmiştir.

3.4. Uydu Görüntüsünün Yıl ve Dönem Seçimi

Mevsimsel farklardan kaynaklı atmosferik etkileri azaltmak amacıyla ana zaman serisinde her analiz yılı için temmuz–eylül dönemi kullanılmıştır (Tablo 4). Tek bir tarihe ait görüntü yerine üç aylık dönemdeki uygun görüntülerden medyan kompozit oluşturulmuş; böylece geçici bulut, gölge, atmosferik sapma ve tek sahneye özgü spektral değişkenliğin etkisi azaltılmıştır.

Tablo 4. Analiz yılları, gözlem pencereleri ve kullanılan sensörler

Yıl	Gözlem penceresi	Sensör
1984-1990-1995- 2000-2005-2010	1 Temmuz–30 Eylül	Landsat 5 TM
2015-2020	1 Temmuz–30 Eylül	Landsat 8 OLI
2025	1 Temmuz–30 Eylül	Landsat 8 OLI + Landsat 9 OLI-2
2026	1 Nisan–30 Haziran	Landsat 8 OLI + Landsat 9 OLI-2

Görüntüler çalışma alanıyla kesişme, tarih aralığı ve sahne bulutluluk oranı ölçütlerine göre filtrelenmiştir. Sahne düzeyindeki bulutluluk filtresi ön eleme amacıyla kullanılmış; nihai piksel temizliği QA_PIXEL ve QA_RADSAT bantlarıyla gerçekleştirilmiştir. Her dönem için kullanılan görüntü sayısı ile geçerli veri kapsamı kaydedilmiştir. Görüntü bulunmayan veya histogram üretilmeyen dönemler kalite durumu ile işaretlenmiş; eksik veri sıfır su alanı olarak yorumlanmamıştır.

3.5. GEE Ortamı ve Kod Mimarisi

Ana mekânsal işlemler GEE'nin JavaScript programlama arayüzü kullanılarak yürütülmüştür. Kod mimarisi ortak işlevler ve göle özgü yapılandırmalar olmak üzere iki bölümde düzenlenmiştir. Ortak işlevler: veri çağırma, kalite maskeleyesi, ölçeklendirme, kompozit üretimi, spektral değişkenlerin hesaplanması, Otsu eşiklemesi, su maskesi üretimi, alan hesabı ve dışa aktarım işlemlerini içermektedir. Gölle özgü yapılandırmalarda ise göl adı, analiz geometrisi, eşik geometrisi, koordinat referans sistemi ve görüntüleme ayarları tanımlanmıştır (Gorelick vd., 2017). Bu modüler yapı,

göle özgü geometrik veya görsel ayarlamaların ortak işlevlerini değiştirmeden uygulanmasına olanak sağlamıştır. Ortak çekirdek kod ile göl yapılandırmaları birbirinden ayrılarak yöntemsel kararların izlenebilirliği korunmuştur.

3.6. Landsat Uydu Görüntülerinin Ön İşlenmesi

Bu bölümde Landsat görüntülerine uygulanan işlem adımları sırasıyla verilmiştir.

3.6.1. Yüzey Yansıması Ölçeklendirmesi

Landsat Collection 2 Level-2 optik bantları ölçeklenmiş tamsayı değerleri olarak sunulmaktadır. Atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerlerinin elde edilmesi amacıyla Landsat 5, Landsat 8 ve Landsat 9 optik bantlarına 0,0000275 ölçek katsayısı ile -0,2 ofseti uygulanmıştır (USGS, t.y.-a). Dönüşüm Eşitlik 27 ile gerçekleştirilmiştir.

$$\rho = DN \times 0,0000275 - 0,2 \quad (27)$$

Bu eşitlikte:

ρ : Atmosferik olarak düzeltilmiş yüzey yansıması değerini,

DN: Collection 2 Level-2 ürünündeki sayısal piksel değerini ifade etmektedir.

Ölçeklendirme işlemi spektral indekslerin ve doğrudan yansıma değerine dayalı yardımcı değişkenlerin hesaplanmasından önce uygulanmıştır.

3.6.2. Bulut, Gölge, Kar ve Doygun Piksel Maskesi

Piksel düzeyindeki kalite kontrolü, atmosferik ve radyometrik bozulmaların su yüzeyi tespit sonuçları üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla Landsat Collection 2 Level-2 ürünlerinde bulunan QA_PIXEL ve QA_RADSAT kalite bantları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. QA_PIXEL bandı, her piksel için bulut, gölge, kar, buz ve dolgu gibi gözlem kalitesini düşüren durumları ikili bit değerleri aracılığıyla tanımlamaktadır. Bu kapsamda Landsat 5 görüntülerinde dolgu, genişletilmiş bulut, bulut, bulut gölgesi ve kar/buz olarak işaretlenen pikseller analiz dışında bırakılmıştır. Landsat 8 ve Landsat 9 görüntülerinde ise aynı kalite sınıflarına ek olarak yüksek güven düzeyinde sirüs bulutu içeren pikseller de maskelenmiştir. Sirüs bulutları, özellikle görünür ve yakın kızılötesi bantlardaki yüzey yansıma değerlerini etkileyerek su indekslerinde hatalı tepkilere neden olabileceğinden, bu piksellerin dışlanması açık su ve kara sınıflarının daha güvenilir

biçimde ayrılmasını sağlamıştır. Bulut gölgeleri düşük yansımaya özellikleri nedeniyle su pikselleriyle karışabildiğinden, kar ve buz yüzeyleri ise görünür bantlardaki yüksek yansımaları nedeniyle su indekslerini etkileyebildiğinden kalite maskesine dâhil edilmiştir. Ayrıca QA_RADSAT bandından yararlanılarak sensörün ölçüm sınırlarını aşan ve güvenilir yüzey yansımaya değeri üretmeyen radyometrik olarak uygun pikseller de analiz kapsamından çıkarılmıştır. Landsat sensör grupları için kullanılan kalite bitleri ve uygulanan maskeleme işlemleri Tablo 5'te gösterilmiştir (USGS, t.y.-b).

Tablo 5. Landsat kalite bantlarında kullanılan temel bitler

Sensör grubu	QA-biti	Anlam	Uygulama
Landsat 5	0	Dolgu	Maskelendi
Landsat 5	1	Genişletilmiş bulut	Maskelendi
Landsat 5	3	Bulut	Maskelendi
Landsat 5	4	Bulut gölgesi	Maskelendi
Landsat 5	5	Kar/buz	Maskelendi
Landsat 8-9	0	Dolgu	Maskelendi
Landsat 8-9	1	Genişletilmiş bulut	Maskelendi
Landsat 8-9	2	Yüksek güvenli sirüs	Maskelendi
Landsat 8-9	3	Bulut	Maskelendi
Landsat 8-9	4	Bulut gölgesi	Maskelendi
Landsat 8-9	5	Kar/buz	Maskelendi

Aynı sensör grubunda kullanılan kalite maskesi bütün analiz dönemlerinde aynı biçimde uygulanmıştır. Böylece yıllar arasındaki farkların maskeleme kuralındaki değişimlerden kaynaklanması önlenmiştir.

3.6.3. Medyan Kompozit Üretimi

Kalite maskesi uygulanmış ve ortak bant adlarına dönüştürülmüş görüntülerden her göl ve dönem için piksel bazında medyan kompozit oluşturulmuştur. Medyan operatörü, gözlem penceresindeki geçici bulut kalıntıları, gölge ve uç yansımaya değerlerinin etkisini azaltmıştır. Kompozit ilgili gölün analiz geometrisine kırılmış ve geçerli veri maskesinden yararlanılarak her dönem için kullanılabilir veri kapsamı hesaplanmıştır. Düşük geçerli veri kapsamına sahip dönemler otomatik olarak sıfır alan olarak kabul edilmemiş; kompozit, histogram ve su maskesi birlikte yeniden değerlendirilmiştir.

3.7. Spektral Değişkenlerin Hesaplanması

Su yüzeylerinin belirlenmesinde MNDWI ana eşikleme değişkeni olarak hesaplanmıştır. NDVI ve doğrudan NIR yansımaları, gerekli görülen göllerde yardımcı

karar ölçütleri ve makine öğrenmesi öznitelikleri olarak üretilmiştir. İndeks hesaplarında paydanın sıfıra çok yakın olduğu pikseller değerlendirme dışında bırakılmıştır.

3.7.1. MNDWI

MNDWI, yeşil ve SWIR1 bantları arasındaki yansıma karşıtlığından yararlanarak açık suyu belirginleştirmektedir (Xu, 2006). MNDWI, Bölüm 2.3.2’de verilen Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

3.7.2. NDVI ve NIR Yüzey Yansıması

Bitki örtüsü ile su dışı yüzeylerin ayrılmasında yardımcı değişken olarak kullanılan NDVI, Bölüm 2.3.4’te tanımlanan Eşitlik (6) kullanılarak hesaplanmıştır (Rouse vd., 1974). Doğrudan NIR yüzey yansıması ve NDVI, MNDWI koşulunu sağlayan pikselleri sınırlandırmak amacıyla tek başına bir su indeksi olarak değil; yalnızca bitki, nemli zemin veya diğer su dışı yüzeylerden kaynaklanabilecek sınıflandırma hatalarının kontrolünde ve makine öğrenmesi modellerinin öznitelik kümesinde yardımcı ölçütler olarak değerlendirilmiştir.

3.7.3. Makine Öğrenmesi İçin Spektral Öznitelikler

Makine öğrenmesi karşılaştırmasında blue, green, red, nir, swirl ve swir2 yüzey yansıması bantları ile NDVI, NDWI, MNDWI ve AWEI olmak üzere toplam 10 öznitelik kullanılmıştır. NDWI ve AWEI’nin kuramsal tanımları 2. bölümde verildiğinden, formülleri burada tekrar verilmemiştir.

3.8. Dinamik Eşikleme ve Su Maskesi Üretimi

Bu bölümde Otsu Dinamik Eşik Yöntemi, Temel Su Sınıflandırma Modeli, Yardımcı NDVI ve NIR Koşullarının Değerlendirilmesi ile NoData Ayırımı açıklanmaktadır.

3.8.1. Otsu Dinamik Eşik Yöntemi

Her göl ve dönem için MNDWI değerlerinin eşik geometrisi içindeki histogramı üretilmiş ve iki sınıf arasındaki varyansı en yüksek yapan eşik değeri, Bölüm 2.4.2’de kuramsal temelleri ve Eşitlik (7) ile matematiksel ifadesi verilen Otsu (1979) yöntemiyle dinamik olarak belirlenmiştir. Böylece tek bir sabit MNDWI değeri bütün sensörlere, döneme ve göllere uygulanmamış; ilgili dönemin medyan kompozit spektral dağılımına uyarlanan bir eşikleme yaklaşımı benimsenmiştir. Histogram 30 m işlem ölçeğinde ve

göle özgü eşik geometrisi içinde hesaplanmıştır. Histogramın üretilmediği, geçerli piksel içermediği veya sınıf ayrımının güvenilir olmadığı durumlar kalite bayrağıyla işaretlenmiş ve sonuçlar nihai kabulden önce yeniden incelenmiştir.

3.8.2. Temel Su Sınıflandırma Modeli

Çekirdek sınıflandırma modeli yalnızca MNDWI koşuluna dayandırılmış ve kodda MNDWI_ONLY olarak tanımlanmıştır. Geçerli bir kompozit pikselinin MNDWI değeri, ilgili göl ve dönem için hesaplanan Otsu eşliğinden büyük olduğunda piksel su olarak sınıflandırılmıştır. İkili karar kuralı Eşitlik 28 ile gösterilmiştir.

$$W_i = 1, MNDWI_i > \theta_M; \text{aksi durumda } W_i = 0 \quad (28)$$

Bu eşitlikte:

W_i : i pikselinin ikili su sınıfını,

$MNDWI_i$: i pikseline ait MNDWI değerini,

θ_M : İlgili göl ve dönem için Otsu yöntemiyle hesaplanan MNDWI eşik değerini ifade etmektedir.

3.8.3. NDVI ve NIR Ek Koşullarının Değerlendirilmesi

NDVI ve NIR ek koşulları ana modelin zorunlu bileşenleri olarak kabul edilmemiştir. MNDWI_ONLY, MNDWI+NDVI, MNDWI+NIR ve MNDWI+NDVI+NIR seçenekleri, yalnızca MNDWI modelinde belirgin yanlış pozitif sınıflandırmalar görülen göllerde değerlendirilmiştir. Üç değişkenli aday karar yapısı Eşitlik 29 ile gösterilmiştir.

$$W_i = 1, MNDWI_i > \theta_M \wedge NDVI_i \leq \theta_V \wedge \rho_{NIR,i} \leq \theta_N \quad (29)$$

Bu eşitlikte:

W_i : i pikselinin ikili su sınıfını,

$MNDWI_i$: i pikseline ait MNDWI değerini,

$NDVI_i$: i pikseline ait NDVI değerini,

$\rho_{NIR,i}$: i pikseline ait NIR yüzey yansımısını,

θ_M : Dinamik MNDWI eşik değerini,

θ_V : Yardımcı NDVI üst sınırını,

θ_N : Yardımcı NIR yüzey yansımalarının üst sınırını ifade eder.

Yardımcı koşulların kullanılabilmesi için yanlış pozitif piksellerin azaltılması ve gerçek sığ veya bulanık su piksellerinde belirgin kayba yol açmaması ölçütleri birlikte değerlendirilmiştir. Seçilen karar modeli, ilgili gölün tüm analiz dönemlerinde sabit tutulmuştur.

3.8.4. NoData Ayrımı

Bulut, gölge veya veri eksikliği nedeniyle geçersiz olan piksellerin kara sınıfına dönüşmesini önlemek amacıyla dışa aktarılan sınıflı rasterlarda üç değer kullanılmıştır: 0 su dışı yüzeyi, 1 suyu ve 255 veri bulunmayan veya maskelenmiş pikseli göstermektedir. Böylece veri eksikliği kara alanındaki artış olarak yorumlanmamıştır.

3.9. Göl Bazlı Uygulama ve Kalite Güvencesi

Ortak çekirdek iş akışı bütün göllerde aynı veri işleme ve alan hesaplama mantığıyla uygulanmıştır. Göl bazlı farklılıklar, analiz ve eşik geometrileri ile gerekli durumlarda kullanılan yardımcı spektral koşullar üzerinden yönetilmiştir (Tablo 6). Ortak işlevler gölden göle değiştirilmemiş; göle özgü seçimlerin gerekçesi kalite kontrolü ve doğrulama sonuçlarına dayandırılmıştır.

Tablo 6. Göl bazlı kalite kontrolünde incelenen değişkenler

Kontrol değişkeni	Tanım	Karar ölçütü
Görüntü sayısı	Seçilen dönemde kompozit üretiminde kullanılan uydu görüntüsü sayısı	Çok düşük değerlerde kompozit ve bulut etkisi yeniden incelenir
Geçerli piksel oranı	Maskelenmeyen alan / AOI alanı	Düşük değer LOW_VALID_COVERAGE olarak işaretlenir
MNDWI eşiği	Otsu tarafından dönem bazında üretilen değer	Aykırı eşikler histogram ve geometriyle kontrol edilir
QA modu	Landsat 5 katı veya esnek bulut maskesi	Kıyı kaybı ve bulut kenarı hatası birlikte değerlendirilir
Model modu	MNDWI_ONLY veya yardımcı filtreli model	Yanlış pozitif ve yanlış negatif dengesi incelenir
Kıyı sürekliliği	Su maskesinin gerçek kıyıyla mekânsal uyumu	Sentinel-2/JRC ve doğal renk kompozitle kontrol edilir
Alan tutarlılığı	Aynı dönem için raster alanı ve görsel sınır uyumu	Beklenmeyen sıçramalar yeniden işlenir

Göl bazlı ayarlamamanın amacı her göl ve yıl için serbest biçimde değişen bir sınıflandırma mantığı geliştirmek değildir. Analiz ve eşik geometrileri göle özgü tanımlanmış; seçilen karar modeli ise ilgili gölün bütün analiz dönemlerinde aynı biçimde uygulanmıştır.

3.10. Su Yüzeyi Alanının Hesaplanması

İkili su maskesi oluşturulduktan sonra alan hesabı GEE içindeki `ee.Image.pixelArea()` kullanılarak yapılmıştır. Su sınıfındaki pikseller `pixelArea` görüntüsünü maskelemek için kullanılmış ve analiz geometrisi içindeki piksel alanları `ee.Reducer.sum()` ile toplanmıştır. Alan indirgeme işleminde 30 m işlem ölçeği ve göle uygun koordinat referans sistemi kullanılmıştır. Açık su yüzeyi alanı Eşitlik 30 ile hesaplanmıştır.

$$A_{km^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times a_i)}{10^6} \quad (30)$$

Bu eşitlikte:

A_{km^2} : Açık su yüzeyi alanını kilometrekare cinsinden,

W_i : i pikselinin su sınıfı değerini,

a_i : i pikselinin metrekare cinsinden gerçek alanını,

n: Analiz geometrisi içindeki toplam piksel sayısını ifade etmektedir.

Ana alan sonucu raster piksel alanlarının toplamından elde edilmiştir. Vektör poligon alanları temel ölçüm olarak kullanılmamış; yalnızca dışa aktarım ve görsel kontrol amacıyla üretilmiştir. Böylece vektörleştirme sırasında oluşabilecek geometri sadeleştirme ve işlem zaman aşımı sorunlarının ana alan serisini etkilemesi önlenmiştir.

Geçerli veri alanının analiz geometrisine oranı Eşitlik 31 ile hesaplanmıştır.

$$R_{valid} = \frac{A_{valid}}{A_{AOI}} \quad (31)$$

Bu eşitlikte:

R_{valid} : geçerli veri oranını,

A_{valid} : kalite maskelemesi sonrasında kullanılabilir durumda kalan alanı,

A_{AOI} : analiz geometrisinin toplam alanını ifade etmektedir.

3.11. Sonuç Verilerinin Elde Edilmesi

Her göl için alan ve kalite bilgilerini içeren CSV tablosu, 1984–2025 yıllarına ait su sınıflarını ayrı bantlarda içeren çok bantlı GeoTIFF rasteri ve 2026 güncel dönemini içeren ayrı GeoTIFF rasteri üretilmiştir. CSV tablolarında göl adı, yıl, tarih aralığı, sensör, görüntü sayısı, model modu, MNDWI eşiği, geçerli veri oranı, su alanı ve kalite durumu kaydedilmiştir. Makine öğrenmesi analizlerine ait doğruluk ve alan tabloları ile sınıflandırma rasterleri ayrı dosyalar olarak dışa aktarılmıştır. Verilerin temel çıktılarının dışa aktarılması Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Çekirdek yöntem tarafından üretilen temel çıktılar

Çıktı türü	İçerik	Kullanım amacı
CSV	Her göl için 1984–2026 alan ve kalite tablosu	İstatistiksel analiz ve kayıt
Çok bantlı GeoTIFF	1984–2025 su sınıfları; 0 su dışı, 1 su, 255 NoData	QGIS, haritalama ve yıllar arası karşılaştırma
Tek bantlı GeoTIFF	2026 nisan–haziran güncel su sınıfı	Güncel durumun ayrı sunulması
Shapefile/vektör	Gerekli göl ve dönemlere ait su poligonları	Kıyı sınırı haritalama ve görsel kontrol
GEE ön izleme	Doğal renk, MNDWI, geçerli piksel ve su maskesi katmanları	Görsel kalite kontrolü

Vektörleştirme büyük ve parçalı göllerde yüksek hesaplama maliyeti oluşturabildiğinden, raster sonuçlar temel çıktı olarak kabul edilmiştir. Gerekli göl ve dönemler ayrı görevler hâlinde vektörleştirilmiş; poligon alanları ana ölçümün yerine kullanılmamıştır.

3.12. Su Maskelerinin Doğrulanması ve Belirsizlik Değerlendirmesi

Su maskeleri görsel, mekânsal ve piksel tabanlı doğruluk ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Landsat doğal ve yanlış renk kompozitleri kullanılarak kıyı çizgisi, bulut kalıntısı, gölge, nemli zemin ve tuz yüzeyleri incelenmiştir. Sentinel-2 verisinin mevcut olduğu dönemlerde daha ayrıntılı kıyı kontrolü yapılmış; JRC GSW oluş sıklığı ve mevsimsellik katmanları uzun dönemli su varlığına ilişkin yardımcı bilgi olarak kullanılmıştır. Bu kontroller eşzamanlı arazi ölçmesine dayalı bağımsız doğrulamanın yerine geçirilmemiştir. Başlıca belirsizlik kaynakları sensörler arası spektral farklılıklar, Landsat’ın 30 m mekânsal çözünürlüğü, kıyı karışık pikselleri, sık ve bulanık su, sazlık, nemli zemin, tuz kabuğu, gölge, dönem içindeki görüntü sayısı ve Otsu histogramının üretildiği alan olarak değerlendirilmiştir. Aynı veri ürünlerinin, mevsimsel pencerenin ve

işlem zincirinin korunmasıyla yıllar arası görelî karşılaştırılabilirliğin güçlendirilmesi amaçlanmıştır.

3.12.1. Piksel Tabanlı Performans Ölçütleri

Referans örnekleme yapılan dönemlerde sınıflandırma çıktıları karışıklık matrisi üzerinden değerlendirilmiştir. Su sınıfı pozitif sınıf olarak kabul edilmiş; doğru pozitif (TP), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) değerlerinden genel doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru, IoU ve Kappa katsayısı hesaplanmıştır. Sınıflandırma modellerinin performans değerlendirmesinde genel doğruluk (OA), F1 skoru ve kesişimin birleşime oranı (IoU) değerleri Bölüm 2.6'da kuramsal altyapısıyla sunulan Eşitlikler (18), (19) ve (20) kullanılarak hesaplanmıştır. Sınıflandırma uyumunun tesadüfi etkilerden arındırılarak incelenmesinde ise yine aynı bölümde belirtilen Cohen'in (1960) Kappa katsayısından Eşitlik (21) yararlanılmıştır.

3.12.2. Referans Noktalarının Oluşturulması ve Doğruluk Analizi

Ana MNDWI ve dinamik Otsu su maskelerinin doğruluk analizi, her gölde 1990, 2020 ve 2025 yılları için gerçekleştirilmiştir. Her doğrulama döneminde 50 su ve 50 su dışı olmak üzere toplam 100 bağımsız referans noktası kullanılmıştır. Bu yıllar, farklı Landsat sensör dönemlerini ve yakın dönem göl koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinde ise her göl ve analiz dönemi için 100 su ve 100 su dışı eğitim örneği ile eğitim verisinden bağımsız 50 su ve 50 su dışı test örneği hazırlanmıştır. Aynı dönemde RO, DVM-RTF, CART ve KNN algoritmaları aynı eğitim ve test örnekleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Test örnekleri model eğitimi veya hiperparametre seçimi sırasında kullanılmamıştır. Referans örnekleri belirlenirken Otsu ve makine öğrenmesi sınıflandırma katmanları kapalı tutulmuş, ilgili dönemin Landsat kompozitleri esas alınmıştır. Sentinel-2 verisinin mevcut olduğu dönemlerde daha yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntüler destekleyici görsel kontrol amacıyla kullanılmıştır. Belirsiz kıyı karışık pikselleri, bulut, gölge ve sınıfı güvenilir biçimde belirlenemeyen yüzeyler örnekleme dışında bırakılmıştır. Su sınıfına 1, su dışı sınıfına 0 değeri atanmış; referans sınıflar ile tahminler karşılaştırılarak her dönem ve yöntem için karışıklık matrisi oluşturulmuştur. Referans noktalarının tamamı eşzamanlı arazi ölçmelerine dayanmadığından sonuçlar mutlak arazi doğruluğu olarak değil, uzman görüntü yorumuyla oluşturulan bağımsız referans örnekleri ile sınıflandırma çıktıları arasındaki uyum düzeyi olarak yorumlanmıştır.

3.13. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesi yöntemleri bu tezde, uzun dönemli açık su yüzeyi alanlarının üretiminde kullanılan temel yöntemin yerine geçecek bir yaklaşım olarak değil, elde edilen sonuçların farklı sınıflandırma algoritmalarıyla karşılaştırılmasını sağlayan destekleyici bir bileşen olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda, Rastgele Orman algoritması, Radyal Tabanlı Fonksiyon çekirdekli Destek Vektör Makineleri, Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı ve K-En Yakın Komşu algoritmaları her gölün 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025 ve 2026 dönemleri için ayrı ayrı eğitilmiştir. Her dönem için 100 su ve 100 su dışı eğitim örneği kullanılmış; model başarısının eğitim verisinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ayrıca 50 su ve 50 su dışı test örneği oluşturulmuştur. Algoritmalar arasındaki karşılaştırılabilirliğin korunması için dört modele de aynı göl ve dönemde aynı eğitim ve test örnekleri sunulmuş, modeller her dönem için yeniden eğitilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinde kullanılan öznitelik kümesi mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi, kısa dalga kızılötesi 1 ve kısa dalga kızılötesi 2 yüzey yansıması bantları ile NDVI, NDWI, MNDWI ve AWEI indekslerinden oluşmuştur. Farklı bant ve indekslerin değer aralıklarından kaynaklanabilecek ölçek etkisini azaltmak amacıyla öznitelikler, ilgili döneme ait eğitim örneklerinden hesaplanan ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak standartlaştırılmıştır. KNN algoritması, sınıflandırılacak piksel ile eğitim örnekleri arasındaki benzerliği Eşitlik (8)'de verilen Öklid uzaklığına göre hesaplayacak biçimde, komşu sayısı $k = 5$ ve doğrusal arama yöntemi kullanılarak çalıştırılmıştır. DVM modelinde Eşitlikler (9) ve (10)'da açıklanan optimizasyon yapısı esas alınmış, doğrusal olmayan su-su dışı ayrımının modellenmesi için Eşitlik (11)'de verilen RTF çekirdeği kullanılmıştır. DVM-RTF modelinde gama değeri 0,10, maliyet parametresi ise 10 olarak belirlenmiştir. CART modeli, düğümlerdeki sınıf safsızlığını Eşitlik (12) ve Eşitlik (13)'te tanımlanan Gini ölçütüne göre değerlendiren ve en uygun bölünmeyi Eşitlik (14)'te verilen Gini azalmasına göre seçen GEE Smile CART sınıflandırıcısının varsayılan yapılandırmasıyla uygulanmıştır. RO modeli ise 200 karar ağacı, 0,7 örnekleme oranı ve 42 rastgelelik tohumu kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin nihai sınıf kararı, Eşitlik (15)'te ifade edilen karar ağaçlarının çoğunluk oylamasına göre belirlenmiştir. Belirlenen hiperparametreler, göller ve dönemler arasında yöntemsel tutarlılığın korunması amacıyla tüm analizlerde sabit tutulmuştur. Eğitim örnekleri Otsu yöntemiyle veya makine öğrenmesi modelleriyle üretilen su maskelerinden türetilmemiş, bağımsız olarak belirlenen su ve su dışı örneklerinden oluşturulmuştur. Makine öğrenmesi algoritmalarının sonuçları, bağımsız test örneklerinden hesaplanan doğruluk ölçütleri ile modeller tarafından üretilen su yüzeyi

alanları bakımından karşılaştırılmıştır. Kullanılan algoritmaların temel yapılandırmaları ve çalışmadaki karşılaştırma rolleri Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Destekleyici makine öğrenmesi karşılaştırmasının yapısı

Algoritma	Temel uygulama	Çalışmadaki rol
RO	200 ağaç; bagFraction=0,7; seed=42	Topluluk tabanlı karşılaştırma
CART	GEE Smile CART varsayılan yapılandırması	Yorumlanabilir karar ağacı karşılaştırması
DVM-RTF	RTF çekirdeği; gama=0,10; maliyet=10	Doğrusal olmayan karar sınırı karşılaştırması
KNN	k=5; doğrusal arama; Öklid uzaklığı	Örnek benzerliğine dayalı karşılaştırma

3.14. Zamansal Değişim ve Eğilim Analizi

Her göl için 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 ve 2025 yıllarına ait dokuz dönem açık su yüzeyi alanı kronolojik olarak sıralanmıştır. Bu alan değerleri kullanılarak başlangıç yılına göre mutlak ve yüzdesel değişimler ile ardışık gözlem dönemleri arasındaki alan farkları hesaplanmıştır. Gözlemler yaklaşık beş yıllık aralıkları temsil ettiğinden, elde edilen seriler yıllık dalgalanmaların tamamını değil, uzun dönemli değişimin genel yönünü karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Yüzdesel alan değişimi Eşitlik 32 ile hesaplanmıştır.

$$Değişim(\%) = \frac{A_t - A_0}{A_0} \times 100 \quad (32)$$

Bu eşitlikte:

A_0 : Başlangıç yılındaki açık su yüzeyi alanını,

A_t : Karşılaştırılan yıldaki açık su yüzeyi alanını ifade etmektedir.

3.14.1. Mann–Kendall Trend Testi

Açık su yüzeyi alanı serilerinde monoton artış veya azalış eğilimi bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla parametrik olmayan Mann–Kendall trend testi uygulanmıştır (Kendall, 1975; Mann, 1945). Test, her göl için aynı mevsimsel gözlem penceresine dayanan 1984, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 ve 2025 yıllarına ait alan değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi 0,05 olarak kabul edilmiştir. Pozitif Z değeri artış, negatif Z değeri ise azalış yönündeki eğilimi

göstermektedir. Farklı mevsimsel gözlem dönemini temsil eden 2026 yılı verileri eğilim analizine dâhil edilmemiştir.

3.14.2. Sen'in Eğim Yöntemi

Eğilimin birim zamandaki büyüklüğü Sen'in eğim yöntemiyle hesaplanmıştır (Sen, 1968). Gözlem çiftleri arasındaki eğimler Eşitlik 33 ile hesaplanmıştır.

$$\beta_{ij} = (A_j - A_i) / (t_j - t_i), j > i \quad (33)$$

Bu eşitlikte:

β_{ij} : i ve j gözlemleri arasındaki alan değişim eğimini,

A_i : i gözlem yılındaki alan değerini,

A_j : j gözlem yılındaki alan değerini,

t_i : i gözlem yılını,

t_j : j gözlem yılını ifade etmektedir.

Gözlem aralıkları eşit olmadığından eğim hesabında gözlem sıraları yerine doğrudan gözlem yılları kullanılmıştır. Böylece 1984–1990 arasındaki altı yıllık dönem ile diğer beş yıllık dönemler gerçek zaman aralıklarına göre değerlendirilmiştir. Tüm β_{ij} değerlerinin medyanı Sen eğimi olarak kabul edilmiş ve sonuçlar $\text{km}^2/\text{yıl}$ biriminde raporlanmıştır. Negatif Sen eğimi uzun dönemli azalışı, pozitif Sen eğimi ise artışı göstermektedir. Göllerin başlangıç alanları birbirinden farklı olduğundan, eğim büyüklükleri mutlak ve yüzdesel alan değişimleriyle birlikte değerlendirilmiştir.

3.14.3. Eğilim Temelli Senaryo Analizi

2030, 2040 ve 2050 yıllarına ilişkin koşullu alan değerleri, 2025 alanı ile Sen eğiminin doğrusal olarak ileriye uzatılmasıyla hesaplanmıştır. Bu değerler iklim modeli, su bütçesi modeli veya kesin kuruma tarihi tahmini olarak değerlendirilmemiştir. Eğilim temelli alan değeri Eşitlik 34 ile hesaplanmıştır.

$$A_y = \max[0, A_{2025} + \beta \times (y - 2025)] \quad (34)$$

Bu eşitlikte:

A_y : Hedef yıldaki eğilim temelli alan değerini,

A_{2025} : 2025 yılı açık su yüzeyi alanını,

β : Sen eğimini,
y: 2030, 2040 veya 2050 hedef yılını ifade etmektedir.

Hesaplanan negatif alan değerleri fiziksel anlam taşımadığından, sonuçlar sıfır km² ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırma, gölün ilgili hedef yılda kesin olarak tamamen kuruyacağını değil, geçmiş dönemde belirlenen doğrusal eğilimin matematiksel uzatımının sıfır değerine ulaştığını göstermektedir. Elde edilen değerler iklim modeli, hidrolojik su bütçesi modeli veya kesin kuruma tarihi tahmini olarak değil, mevcut eğilimin değişmeden sürmesi varsayımına dayanan koşullu senaryo sonuçları olarak değerlendirilmiştir.

3.15. Hidroklimatik Destekleyici Analiz

Göl alanı değişimlerinin hidroklimatik bağlamını değerlendirmek amacıyla CHIRPS yağış toplamaları ile ERA5-Land PET değerleri kullanılmıştır. Analiz yıllık dönem ve ana görüntüleme penceresi olan temmuz–eylül dönemi için yürütülmüştür. Yağış ile PET arasındaki fark ve bu iki değişkenin oranı destekleyici göstergeler olarak hesaplanmıştır. Bu değişkenler su sınıflandırmasının girdisi veya eşik belirleyicisi olarak kullanılmamıştır.

$$D = P - PET \quad (35)$$

$$K = \frac{P}{PET} \quad (36)$$

Bu eşitlikte:

D: Yağış ile potansiyel buharlaşma arasındaki farkı,

K: Yağışın potansiyel buharlaşmaya oranını,

P: İlgili dönemin toplam yağışını,

PET: İlgili dönemin toplam potansiyel buharlaşmasını ifade etmektedir.

Göstergeler 1984–2000, 2001–2010 ve 2011–2025 alt dönemlerinde özetlenmiş ve alan değişimleriyle birlikte destekleyici bağlam içinde değerlendirilmiştir. Yer altı suyu, yüzey akışı, su tahsisi ve diğer insan kaynaklı süreçler doğrudan modellenmediğinden nedensellik iddiasında bulunulmamıştır.

3.16. Yeniden Üretilirlik, Veri Yönetimi ve Yöntemsel Sınırlılıklar

Yeniden üretilebilirliği güçlendirmek amacıyla her göl ve dönem için veri koleksiyonu, tarih aralığı, sensör, görüntü sayısı, MNDWI eşiği, geçerli veri oranı, alan değeri ve kalite durumu CSV tablolarında saklanmıştır. Raster bantları yıl bilgisiyle adlandırılmış, 2026 verisi ayrı bir dosyada tutulmuş ve eğilim analizine dâhil edilmediği açıkça belirtilmiştir. Ortak kod işlevleri ile göl yapılandırmaları birbirinden ayrılmıştır. Çalışmanın temel sınırlılıkları Landsat'ın 30 m mekânsal çözünürlüğü, kıyı karışık pikselleri, optik görüntülerin bulut ve gölgeden etkilenmesi, seçilen analiz yıllarının ara yıllardaki bütün dalgalanmaları temsil etmemesi, 2026 döneminin farklı mevsimde olması ve kapsamlı eşzamanlı arazi ölçmelerinin bulunmamasıdır. Tuz kabuğu, nemli zemin, gölge, yoğun sazlık ve yüksek bulanıklık koşullarında oluşabilecek belirsizlikler, göl bazlı analiz/eşik geometrileri, yardımcı spektral koşullar, kalite kontrolleri ve bağımsız referans örnekleriyle değerlendirilmiştir.

Bu bölümde tanımlanan yöntem, bütün göllerde aynı çekirdek işlem zincirini korurken, göle özgü analiz geometrilerinin ve gerekli yardımcı karar koşullarının kontrollü biçimde kullanılmasına olanak sağlayacak şekilde uygulanmıştır. Böylece su yüzeyi alanlarının izlenebilir biçimde üretilmesi, yöntemsel kararların kayıt altına alınması ve bulguların kod çıktılarıyla ilişkilendirilmesi sağlanmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, Türkiye’de seçilen göllere ait 1984–2026 dönemi su yüzeyi alan değişimleri, uzaktan algılama tabanlı analiz sonuçları doğrultusunda değerlendirilmiştir. Bulgular; göl bazlı su yüzeyi alan değişimleri, başlangıç ve güncel dönem karşılaştırmaları, trend analizleri, senaryo değerlendirmeleri, hidroklimatik değişkenlerle ilişkiler ve makine öğrenmesi sınıflandırma sonuçları olmak üzere çok boyutlu olarak sunulmuştur.

4.1. Göllere İlişkin Genel Bulgular

Bu bölümde, incelenen göllerin su yüzey alanlarında 1984–2025 döneminde meydana gelen değişimler genel olarak değerlendirilmiş, ardından her göle ait bulgular ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

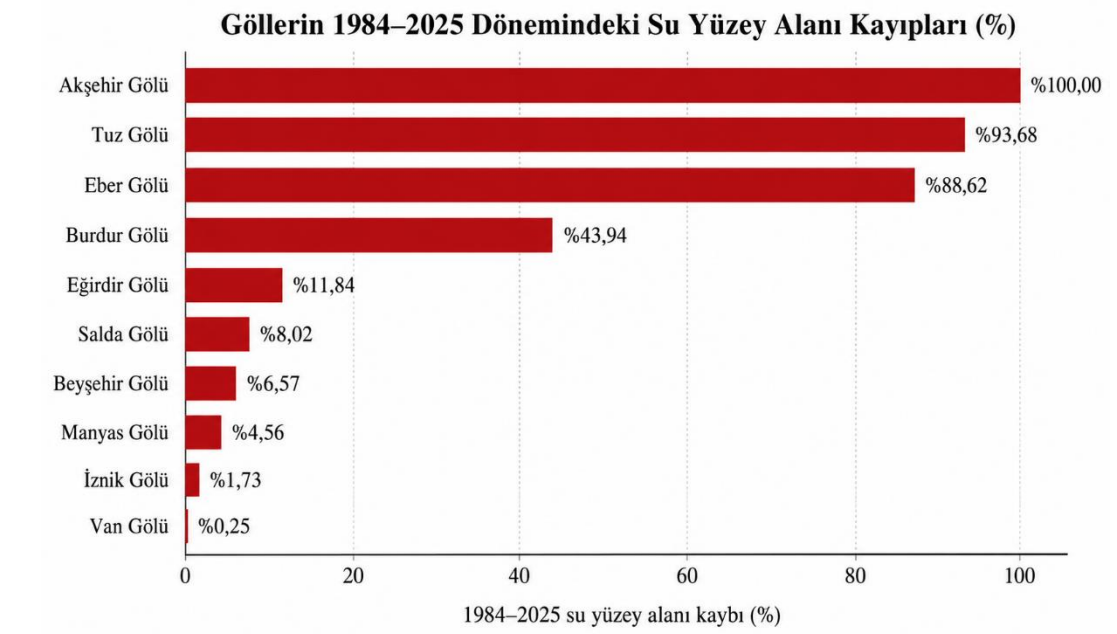
4.1.1. Su Yüzey Alanlarındaki Genel Değişim

Bu bölümde, Türkiye’deki 10 gölün 1984–2025 dönemine ait su yüzey alanı bulguları; dinamik Otsu eşikleme, bağımsız doğrulama, makine öğrenmesi, trend analizi ve destekleyici hidroklimatik göstergeler çerçevesinde sunulmuştur. Ana uzun dönem karşılaştırma (Tablo 9), ortak mevsimsel gözlem penceresini korumak amacıyla 1984–2025 yıllarının Temmuz–Eylül dönemlerine dayanmaktadır. 2026 yılına ait su yüzey alanları Nisan–Haziran dönemindeki güncel durumu göstermek amacıyla sunulmuştur. Farklı bir mevsimsel gözlem dönemini temsil ettiğinden, 1984–2025 uzun dönem eğilim analizlerine dâhil edilmemiştir.

Tablo 9. Göllerin 1984, 2025 ve 2026 su yüzey alanları ile 1984–2025 değişimleri

Göl	1984 (km ²)	2025 (km ²)	Değişim (km ²)	Değişim (%)	2026 (km ²)
Van Gölü	3.558,30	3.549,29	-9,02	-0,25	3.551,48
Tuz Gölü	586,54	37,05	-549,49	-93,68	440,02
Beyşehir Gölü	657,99	614,75	-43,24	-6,57	619,97
Eğirdir Gölü	470,45	414,75	-55,71	-11,84	421,47
Burdur Gölü	205,79	115,36	-90,43	-43,94	115,32
İznik Gölü	300,96	295,75	-5,21	-1,73	296,26
Manyas Gölü	152,27	145,32	-6,95	-4,56	149,11
Salda Gölü	46,13	42,44	-3,7	-8,02	42,08
Eber Gölü	40,83	4,64	-36,18	-88,62	5,06
Akşehir Gölü	297,75	0	-297,75	-100	56,93

4.1.2. Göller Arası Karşılaştırmalı Değerlendirme



Şekil 4. Göllerin 1984–2025 dönemindeki yüzdesel su yüzey alanı değişimleri

Tablo 10. Göller arası değişimin temel karşılaştırma göstergeleri

Gösterge	Göl	Değer
En yüksek mutlak kayıp	Tuz Gölü	-549,49 km ²
En yüksek yüzdesel kayıp	Akşehir Gölü	-100,00 %
İkinci en yüksek yüzdesel kayıp	Tuz Gölü	-93,68 %
En düşük yüzdesel değişim	Van Gölü	-0,25 %
İkinci en düşük yüzdesel değişim	İznik Gölü	-1,73 %

Göller, büyüklük, morfoloji ve kıyı özellikleri bakımından belirgin farklılıklar gösterdiğinden, mutlak ve oransal değişimler ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Tablo 10 ve Şekil 4). En yüksek mutlak kayıp Tuz Gölü’nde 549,49 km², ikinci en yüksek mutlak kayıp ise Akşehir Gölü’nde 297,75 km² olarak belirlenmiştir. Akşehir Gölü’nün 2025 alanının sıfıra ulaşması nedeniyle oransal kayıp %100,00, Tuz Gölü’nde ise %93,68’dir. Eber ve Burdur göllerinde de yüksek oransal kayıplar belirlenmiştir. Buna karşılık Van ve İznik gölleri, çalışma döneminin sonunda başlangıç alanlarına en yakın kalan göllerdir. Kayıp oranlarının tek başına göllerin zamansal davranışını açıklamadığı görülmüştür. Eber Gölü yüksek net kayba rağmen güçlü dönemsel genişleme ve daralmalar gösterirken, Burdur Gölü daha düzenli bir azalma sergilemiştir. Manyas Gölü’nde sınırlı dalgalanma, Salda ve Beyşehir göllerinde kademeli daralma, Eğirdir Gölü’nde ise özellikle son gözlem aralığında belirginleşen azalma öne çıkmıştır.

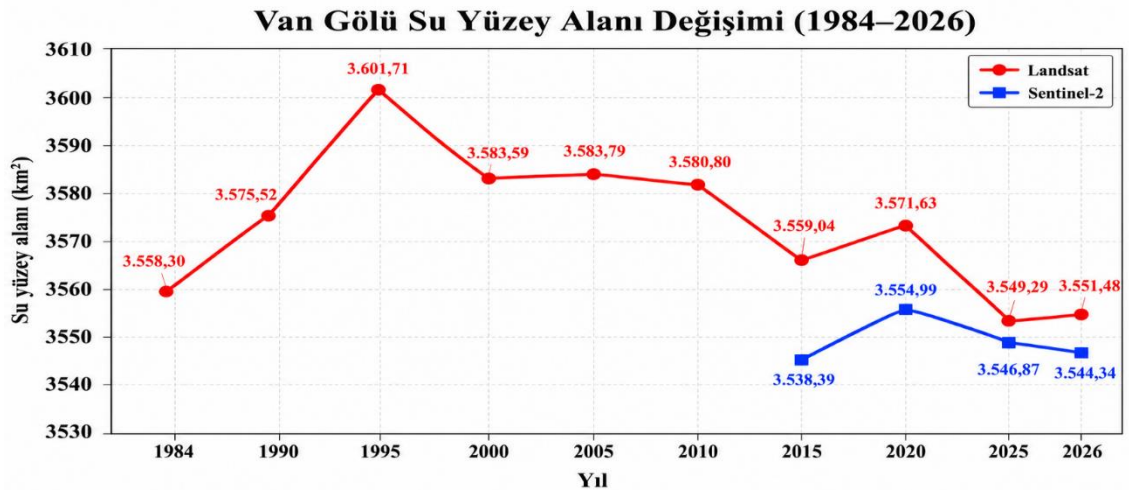
4.2. Van Gölü Bulguları

4.2.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Van Gölü, çalışma kapsamındaki en büyük su yüzeyine sahip göldür. Ana zaman serisinde alan 1984 yılında 3.558,30 km², 2025 yılında ise 3.549,29 km² olarak belirlenmiştir (Tablo 11 ve Şekil 5). Bu iki tarih arasındaki net değişim 9,02 km² (0,25 %) olup gölün uzun dönem boyunca görece kararlı kaldığını göstermektedir. En yüksek alan 1995 yılında 3.601,71 km², en düşük ana dönem alanı ise 2025 yılında 3.549,29 km² olarak hesaplanmıştır.

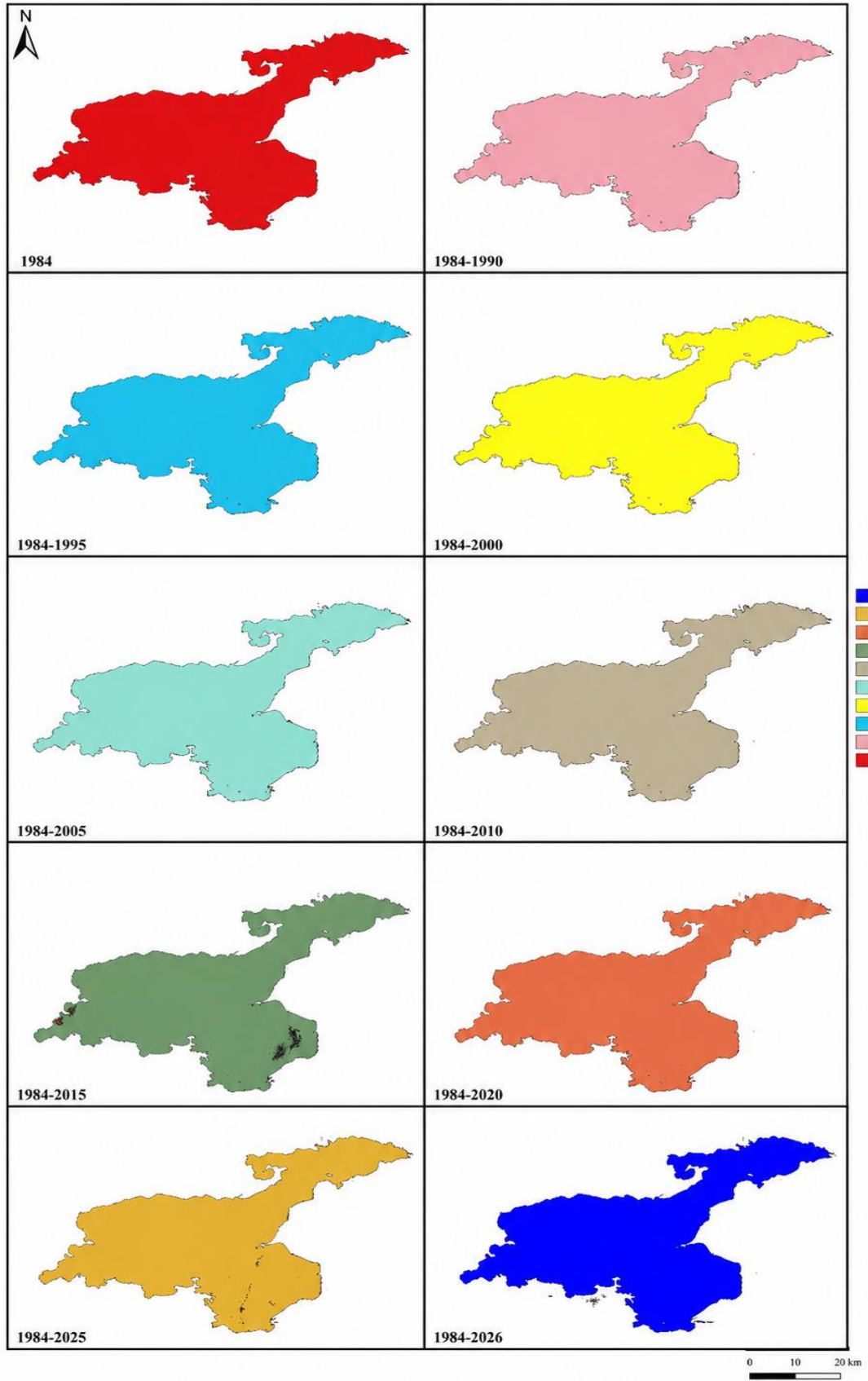
Tablo 11. Van Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	3.558,304	0,00
1990	3.575,520	0,48
1995	3.601,706	1,22
2000	3.583,589	0,71
2005	3.583,790	0,72
2010	3.580,802	0,63
2015	3.559,042	0,02
2020	3.571,626	0,37
2025	3.549,286	-0,25
2026	3.551,483	-0,19



Şekil 5. Van Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Genel olarak iki veri serisinin uyumlu seyri, Van Gölü için oluşturulan ana zaman serisinin güvenilirliğini desteklemektedir.



Şekil 6. Van Gölü'nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)

Şekil 6'da Van Gölü'nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su yüzeyleri karşılaştırılmıştır. Gölün genel biçiminin inceleme dönemi

boyunca büyük ölçüde korunduğu, yıllar arasındaki farklılıkların daha çok koylar, yarımadalar ve girintili kıyı kesimlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Açık su yüzeyinin geniş bölümünde önemli bir değişim belirlenmezken kıyı çizgisinde yerel ölçekte sınırlı daralma ve genişlemeler meydana gelmiştir.

4.2.2. Doğruluk Analizi

Tablo 12. Van Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1 skoru	Su sınıfı IoU
1990	98,0	0,960	0,980	0,962
2020	98,0	0,960	0,980	0,962
2025	99,0	0,980	0,990	0,980

Van Gölü için (Tablo 12) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %98,0 ile %99,0 arasında, Kappa 0,960–0,980 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 değerleri 0,980–0,990, IoU değerleri ise 0,962–0,980 aralığındadır. Üç doğrulama yılının toplamında 5 yanlış sınıflandırma kaydedilmiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.2.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Van Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk RO modelinde %99,70 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model, KNN (4,227 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

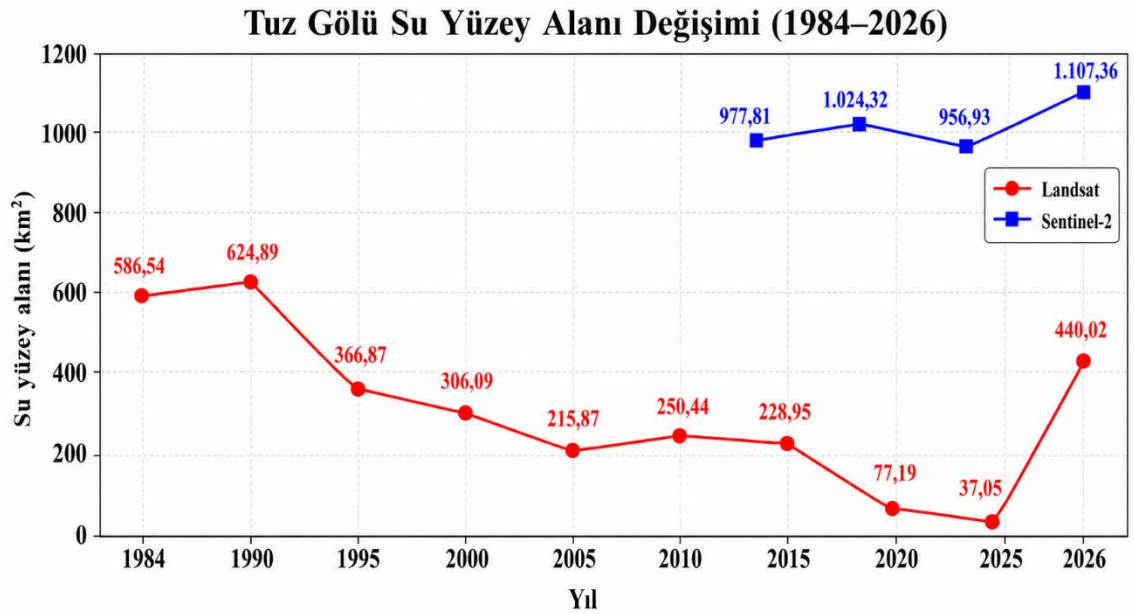
4.3. Tuz Gölü Bulguları

4.3.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Tuz Gölü’nde açık su alanı belirgin ve süreklilik gösteren bir daralma sergilemiştir. Alan 1984 yılında 586,54 km² iken 2025 yılında 37,05 km²’ye gerilemiş; net kayıp 549,49 km² ve oransal kayıp %93,68 olmuştur (Tablo 13). Özellikle 1990 sonrasında hızlanan azalma, sıg ve tuzlu göl tabanının dönemsel nemlilik ve tuz kabuğu koşullarına duyarlı yapısıyla birlikte değerlendirilmelidir.

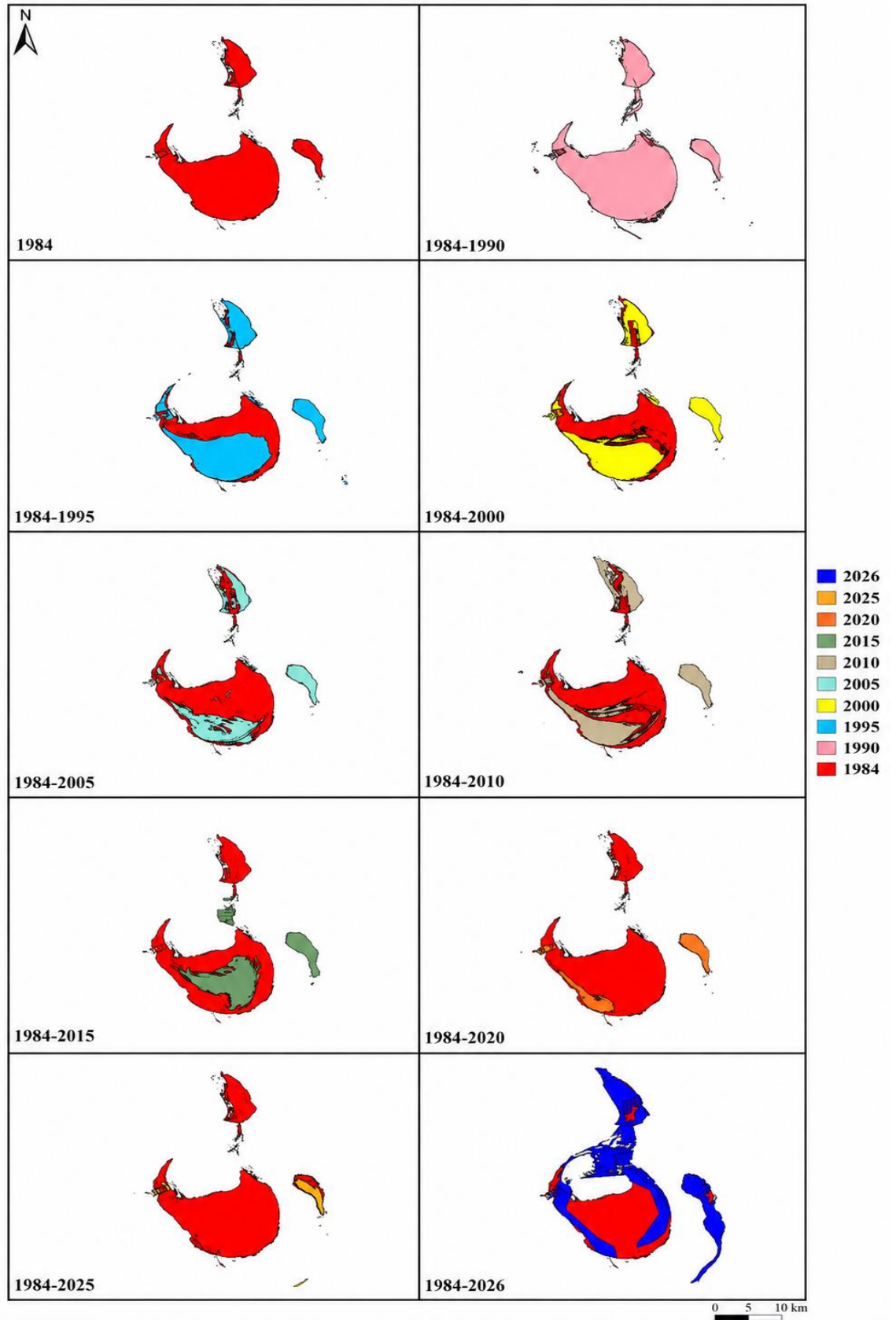
Tablo 13. Tuz Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	586,540	0,00
1990	624,891	6,54
1995	366,873	-37,45
2000	306,091	-47,81
2005	215,867	-63,20
2010	250,439	-57,30
2015	228,946	-60,97
2020	77,187	-86,84
2025	37,046	-93,68
2026	440,025	-24,98



Şekil 7. Tuz Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Tuz Gölü'nde Sentinel-2 destekleyici alanlarının (Şekil 7) Landsat ana seri değerlerinden belirgin biçimde yüksek olması, tuz kabuğu, nemli göl tabanı, çok sığ su ve farklı mekânsal çözünürlük koşullarının su maskesine etkisini göstermektedir. Bu nedenle Sentinel-2 sonuçları ana alan serisinin yerine kullanılmamış; yalnızca sensör duyarlılığını ortaya koyan destekleyici bulgu olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 8. Tuz Gölü'nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2025)

Şekil 8'de Tuz Gölü'nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su alanları mekânsal olarak karşılaştırılmıştır. Kırmızı renk 1984 yılına ait

referans su yüzeyini, diğer renkler ise karşılaştırılan yıllardaki su alanlarını göstermektedir. Gölün çok sığ ve mevsimsel yapısı nedeniyle su yüzeyinin yıllar arasında belirgin biçimde parçalandığı, daraldığı veya farklı kesimlere yayıldığı görülmektedir. Özellikle 2000, 2005, 2010 ve 2015 yıllarında ana gövde içindeki su dağılımı düzensiz ve parçalı bir görünüm sergilerken, 2020 yılında daha geniş bir su yüzeyi oluşmuştur. 2025 yılında su alanı büyük ölçüde daralmış, 2026 yılında ise kuzey, ana gövde ve doğu kesimlerinde yeniden genişleme belirlenmiştir.

4.3.2. Doğruluk Analizi

Tablo 14. Tuz Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1 skoru	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	100,0	1,000	1,000	1,000
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

Tuz Gölü için (Tablo 14) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %100,0 ile %100,0 arasında, Kappa 1,000–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 değerleri 1,000–1,000, IoU değerleri ise 1,000–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılında yanlış sınıflandırma oluşmamıştır. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.3.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Tuz Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk CART modelinde %99,40 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise CART (26,147 km²) olmuştur. Tuzlu ve çok sığ yüzey koşulları nedeniyle alan farkları diğer göllere göre daha yüksek olmuştur; bu nedenle sınıflandırma doğruluğu ile alan yakınlığı birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.4. Beyşehir Gölü Bulguları

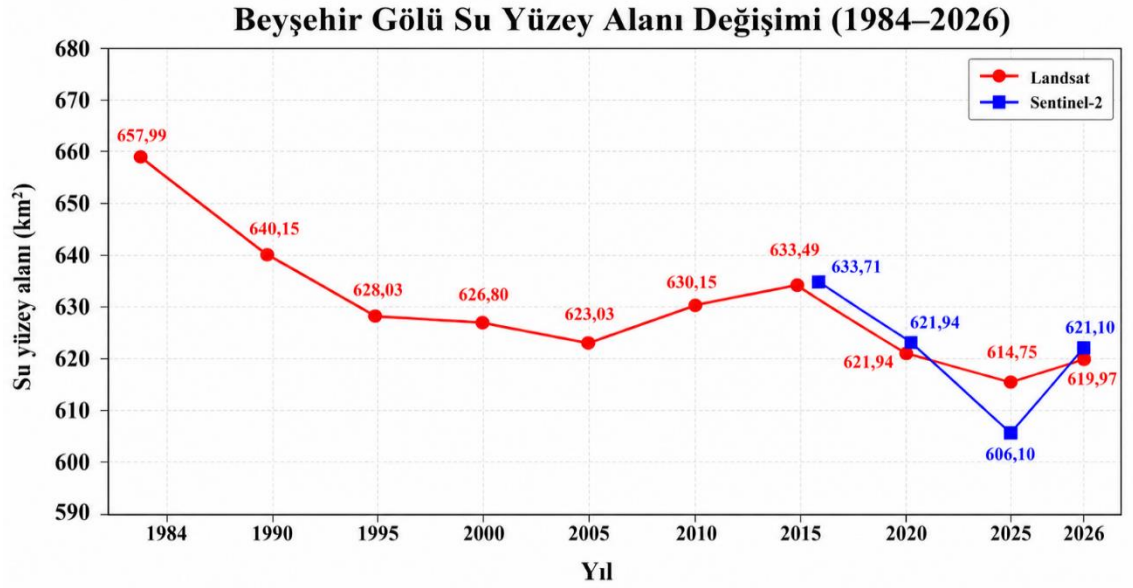
4.4.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Beyşehir Gölü’nde 1984–2025 döneminde kademeli bir alan kaybı tespit edilmiştir. Alan 657,99 km²’den 614,75 km²’ye gerilemiş; toplam kayıp 43,24 km² (6,57 %)

olmuştur (Tablo 15). Seride ara dönemlerde sınırlı artışlar görülmesine karşın, 2025 yılı ana dönem içindeki en düşük alanı temsil etmiştir.

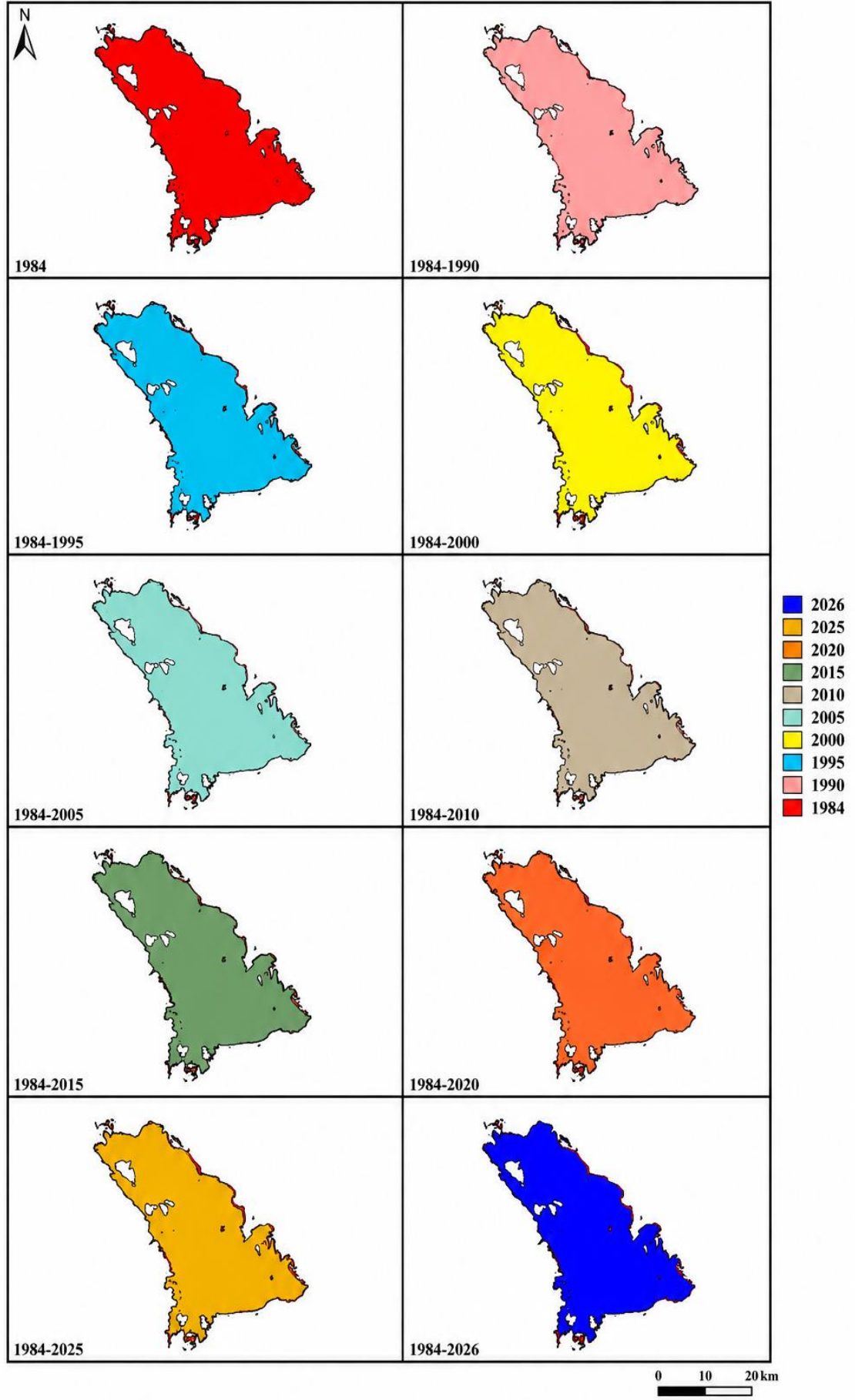
Tablo 15. Beyşehir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	657,989	0,00
1990	640,151	-2,71
1995	628,030	-4,55
2000	626,798	-4,74
2005	623,030	-5,31
2010	630,149	-4,23
2015	633,491	-3,72
2020	623,523	-5,24
2025	614,748	-6,57
2026	619,975	-5,78



Şekil 9. Beyşehir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Sentinel-2 ve Landsat sonuçları 2015, 2020 ve 2026 yıllarında birbirine yakın değerler vermiş, en belirgin fark 2025 yılında görülmüştür (Şekil 9). Bu farkın; sensörlerin mekânsal çözünürlükleri, spektral özellikleri ve sığ kıyı alanlarındaki karışık piksellere gösterdikleri farklı duyarlılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir



Şekil 10. Beyşehir Gölü'nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)

Şekil 10’da Beyşehir Gölü’nün 1984 yılındaki su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su yüzeyleri karşılaştırılmıştır. Kırmızı çizgi 1984 yılına ait referans sınırı, diğer renkler ise karşılaştırılan yıllardaki su yüzeyini göstermektedir. Buna göre gölün genel biçimi büyük ölçüde korunmakla birlikte özellikle kuzeybatı, doğu ve güney kıyılarında dönemlere bağlı daralma ve genişlemeler görülmektedir. Merkezdeki geniş açık su alanlarında değişim sınırlı kalırken kıyıya yakın sığ ve girintili kesimlerde farklılıklar daha belirgin olduğu değerlendirilmiştir.

4.4.2. Doğruluk Analizi

Tablo 16. Beyşehir Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	99,0	0,980	0,990	0,980
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

Beyşehir Gölü için (Tablo 16) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %99,0 ile %100,0 arasında, Kappa değeri 0,980–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 değerleri 0,990–1,000, IoU değerleri ise 0,980–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılının toplamında 1 yanlış sınıflandırma kaydedilmiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.4.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Beyşehir Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk RF modelinde %100,00 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (4,605 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

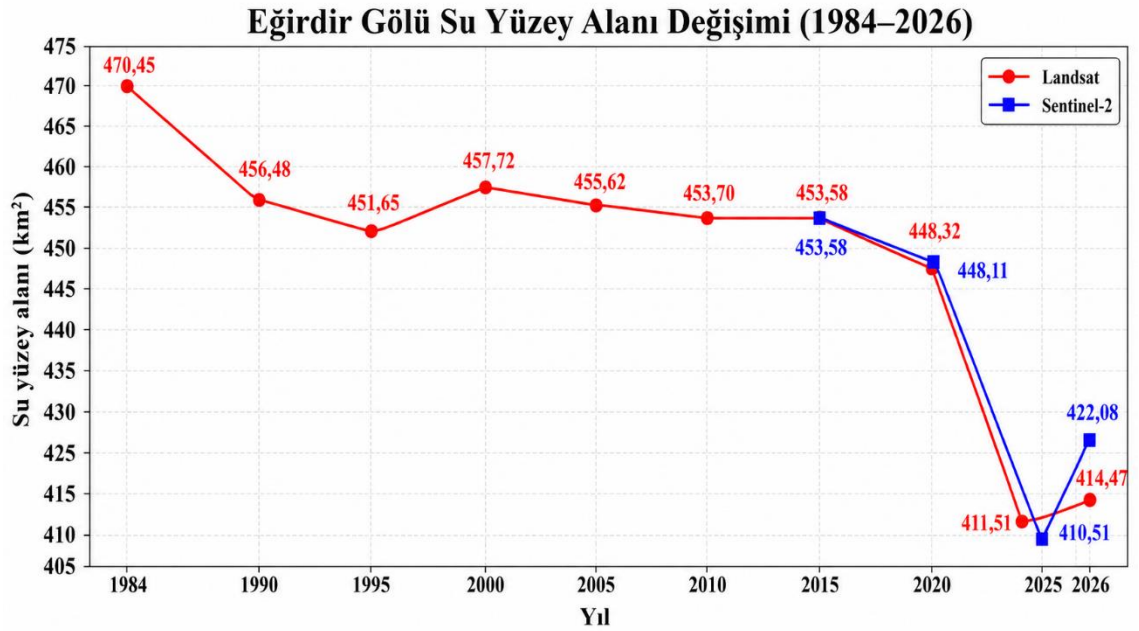
4.5. Eğirdir Gölü Bulguları

4.5.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Eğirdir Gölü’nün su yüzeyi 1984 yılında 470,45 km² iken 2025 yılında 414,75 km² olarak belirlenmiştir (Tablo 17). Toplam azalma 55,71 km² (%11,84) düzeyindedir. Uzun süre görece sınırlı değişim gösteren seri, 2020–2025 döneminde daha belirgin bir daralmaya işaret etmektedir.

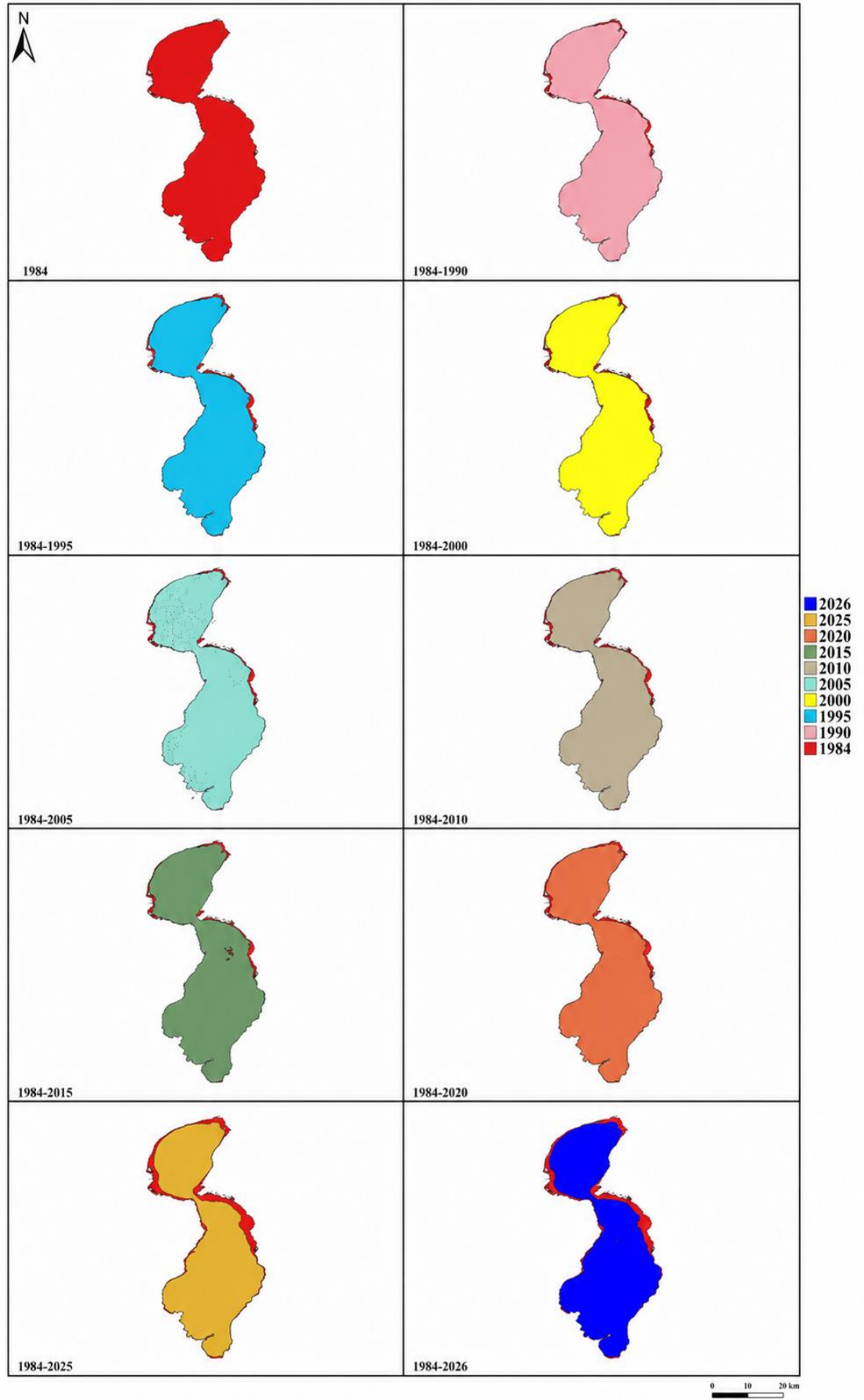
Tablo 17. Eğirdir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	470,452	0,00
1990	456,476	-2,97
1995	451,654	-4,00
2000	457,723	-2,71
2005	455,624	-3,15
2010	453,705	-3,56
2015	453,583	-3,59
2020	448,815	-4,60
2025	414,745	-11,84
2026	421,469	-10,41



Şekil 11. Eğirdir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Landsat ve Sentinel-2 sonuçlarının ortak yıllarda birbirine yakın değerler vermesi, belirlenen zamansal değişimin iki sensör tarafından da benzer biçimde yansıtıldığını göstermektedir (Şekil 11). Sensörler arasındaki küçük farkların ise mekânsal çözünürlük, spektral bant özellikleri ve sığ kıyı piksellerinin sınıflandırılmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 12. Eğirdir Gölü'nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)

Şekil 12 ‘de dönemler arası karşılaştırma, göl sınırındaki değişimin kıyı boyunca eşit dağılmadığını ve belirli kıyı kesimlerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Su yüzeyindeki gerilemeler özellikle sık kıyı zonlarında, girintili kıyı kesimlerinde ve gölün iki ana bölümünü birbirine bağlayan dar geçiş çevresinde daha belirgin biçimde izlenmektedir. Buna karşılık gölün derin ve açık su özelliği gösteren merkez bölümlerinde genel geometrinin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. 2025 ve 2026 karşılaştırmaları, 1984 sınırı ile güncel su yüzeyi arasındaki farkların bazı kıyı kesimlerinde daha görünür hâle geldiğini göstermektedir.

4.5.2. Doğruluk Analizi

Tablo 18. Eğirdir Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1 skoru	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	99,0	0,980	0,990	0,980
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

Eğirdir Gölü için (Tablo 18) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %99,0 ile %100,0 arasında, Kappa değeri ise 0,980–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 0,990–1,000, IoU değerleri ise 0,980–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılının toplamında 1 yanlış sınıflandırma kaydedilmiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.5.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Eğirdir Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en yüksek ortalama genel doğruluk DVM-RTF modelinde %100,00 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (0,639 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.6. Burdur Gölü Bulguları

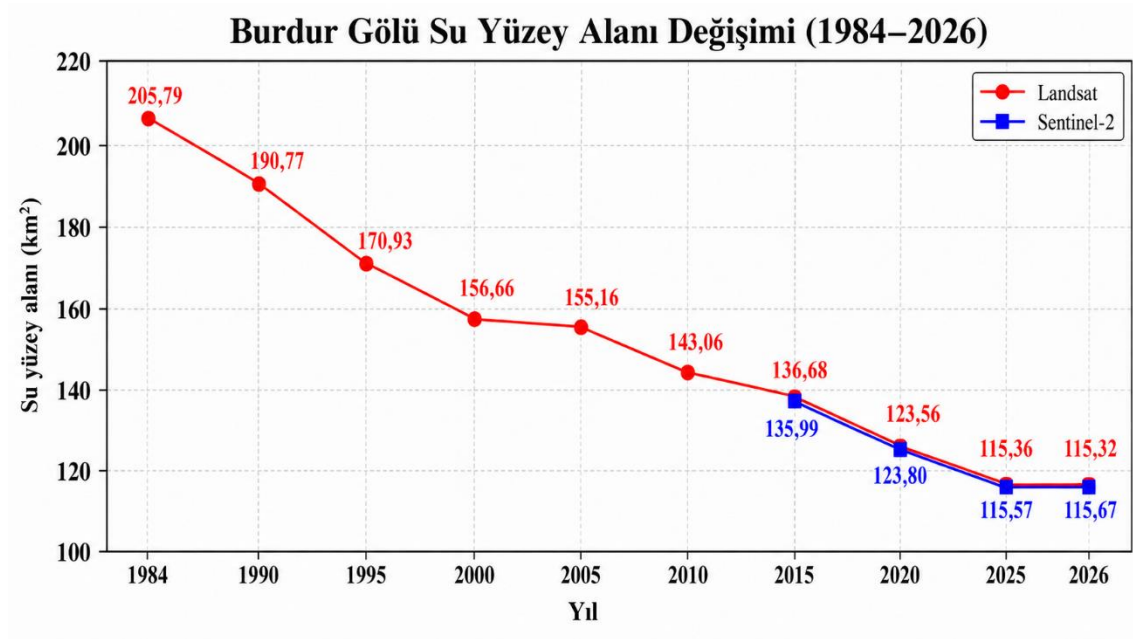
4.6.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Burdur Gölü, ana zaman serisinde düzenli ve güçlü bir azalma gösteren göller arasındadır. Alan 1984 yılındaki 205,79 km² düzeyinden 2025 yılında 115,36 km²’ye

düşmüş; 90,43 km²'lik ve %43,94'lük bir kayıp gerçekleşmiştir (Tablo 19). İncelenen ana yılların ardışık yapısı, daralmanın tek bir döneme bağlı kalmadığını göstermektedir.

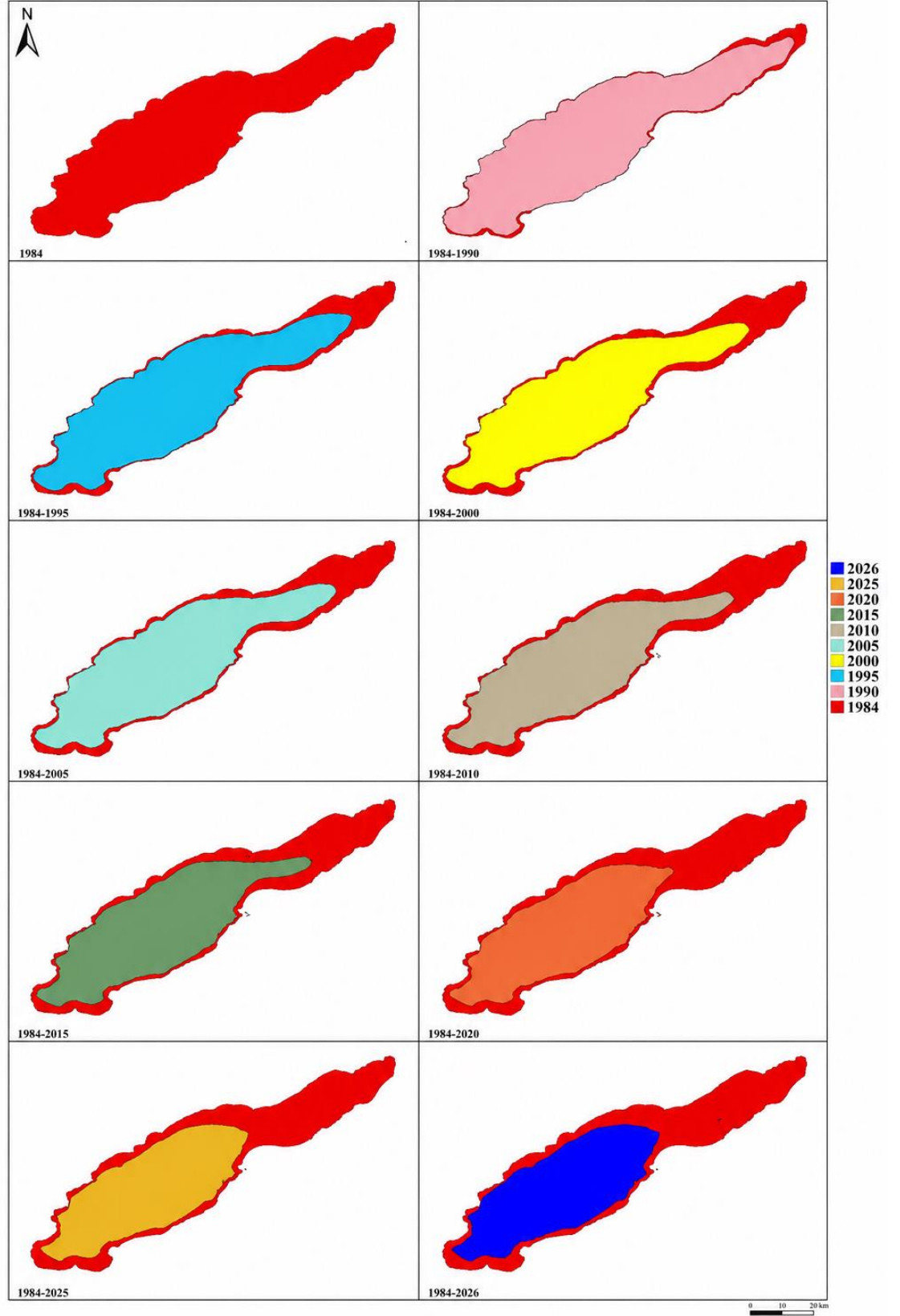
Tablo 19. Burdur Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	205,787	0,00
1990	190,767	-7,30
1995	170,930	-16,94
2000	156,658	-23,87
2005	155,164	-24,60
2010	143,059	-30,48
2015	136,682	-33,58
2020	123,561	-39,96
2025	115,358	-43,94
2026	115,320	-43,96



Şekil 13. Burdur Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Ortak yıllarda Landsat ve Sentinel-2 sonuçlarının birbirine oldukça yakın olması, belirlenen alan değişiminin sensörler arasında tutarlı olduğunu ve Burdur Gölü'ndeki uzun dönemli daralmanın güvenilir biçimde ortaya konulduğunu göstermektedir (Şekil 13).



Şekil 14'te Burdur Gölü'nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su yüzeyleri karşılaştırılmıştır. Kırmızı renk 1984 yılına ait referans su sınırını,

diğer renkler ise ilgili yıllardaki su alanlarını göstermektedir. Karşılaştırmalar, göl yüzeyinin zaman içinde genel olarak küçüldüğünü ve kıyı gerilemesinin özellikle gölün kuzeydoğu kesimi ile çevresindeki sığ kıyı alanlarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. 1990'dan sonra giderek belirginleşen daralma, 2015, 2020 ve 2025 yıllarında daha açık biçimde görülürken 2026 yılında da su yüzeyinin 1984 sınırının oldukça gerisinde kaldığı belirlenmiştir.

4.6.2. Doğruluk Analizi

Tablo 20. Burdur Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	100,0	1,000	1,000	1,000
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

Burdur Gölü için (Tablo 20) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %100,0 ile %100,0 arasında, Kappa ise 1,000–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 1,000–1,000, IoU değerleri ise 1,000–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılında yanlış sınıflandırma oluşmamıştır. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.6.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Burdur Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk DVM-RTF modelinde %97,30 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (1,479 km²) olmuştur. Bazı yıllarda sığ, parçalı veya bitki örtüsünden etkilenen alanlar sınıflandırma ölçütlerini düşürmüştür; göl bazlı yorumlarda yıllar arası değişkenlik dikkate alınmıştır. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.7. İznik Gölü Bulguları

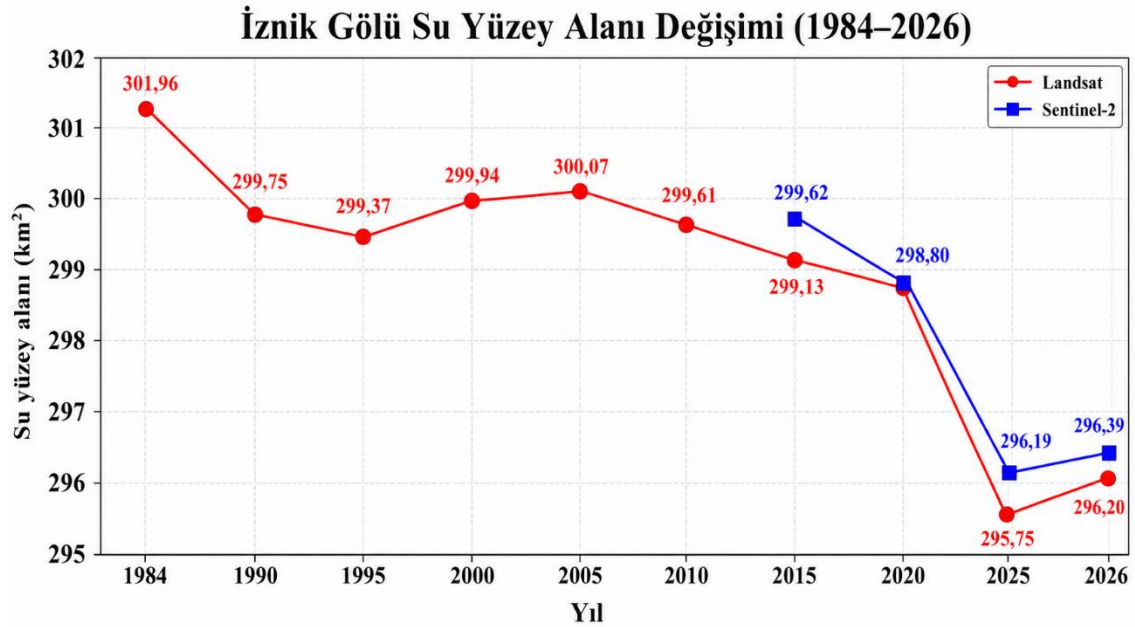
4.7.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

İznik Gölü’nün yüzey alanı çalışma dönemi boyunca yüksek kararlılık göstermiştir. 1984–2025 arasındaki net azalma 5,21 km² ve %1,73 ile sınırlı kalmıştır (Tablo 21).

Bununla birlikte, değişimin yıllar boyunca büyük ölçüde aynı yönde gerçekleşmesi, düşük büyüklükteki eğimin istatistiksel olarak anlamlı bulunmasına neden olmuştur.

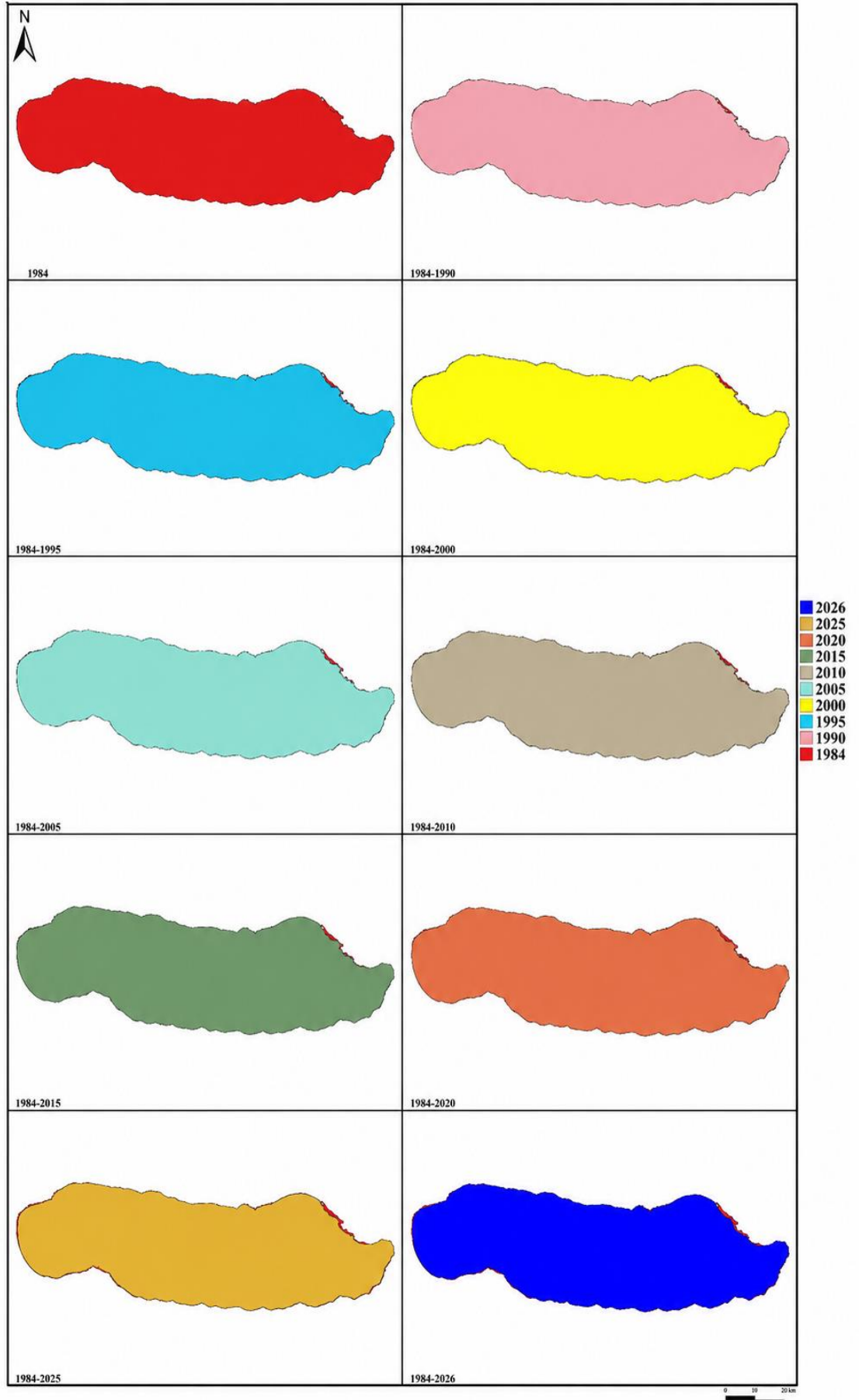
Tablo 21. İznik Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	300,960	0,00
1990	299,735	-0,41
1995	299,367	-0,53
2000	299,944	-0,34
2005	300,071	-0,30
2010	299,614	-0,45
2015	299,131	-0,61
2020	298,747	-0,74
2025	295,753	-1,73
2026	296,260	-1,56



Şekil 15. İznik Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Şekil 15 İznik gölü su yüzey alanının 1984–2025 döneminde genel olarak sınırlı bir azalma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Su yüzey alanı 1984–2010 döneminde yaklaşık 299–301 km² aralığında sınırlı dalgalanmalar göstermiş, 2015 sonrasında ise azalma daha belirgin hâle gelmiştir . Ortak yıllarda Landsat ve Sentinel-2 sonuçlarının birbirine yakın olması, İznik Gölü için belirlenen zamansal değişimin sensörler arasında tutarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 16. İznik Gölü'nün su yüzeyi değişim haritası (1984-2026)

Şekil 16’da İznik Gölü’nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su yüzeyleri karşılaştırılmıştır. Kırmızı renk 1984 yılına ait referans sınırı, diğer renkler ise ilgili yıllardaki su alanlarını göstermektedir. Gölün genel biçiminin inceleme dönemi boyunca büyük ölçüde korunduğu, değişimlerin daha çok doğu ve kuzeydoğu kıyılarındaki dar alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Yıllar arasındaki sınır farklılıkları sınırlı düzeyde kalmış ve göl yüzeyinde belirgin bir parçalanma meydana gelmemiştir

4.7.2. Doğruluk Analizi

Tablo 22. İznik Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	100,0	1,000	1,000	1,000
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

İznik Gölü için (Tablo 22) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %100,0 ile %100,0 arasında, Kappa ise 1,000–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 1,000–1,000, IoU değerleri ise 1,000–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılında yanlış sınıflandırma oluşmamıştır. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.7.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

İznik Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en yüksek ortalama genel doğruluk DVM-RTF modelinde %100,00 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise DVM-RTF (0,296 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.8. Manyas Gölü Bulguları

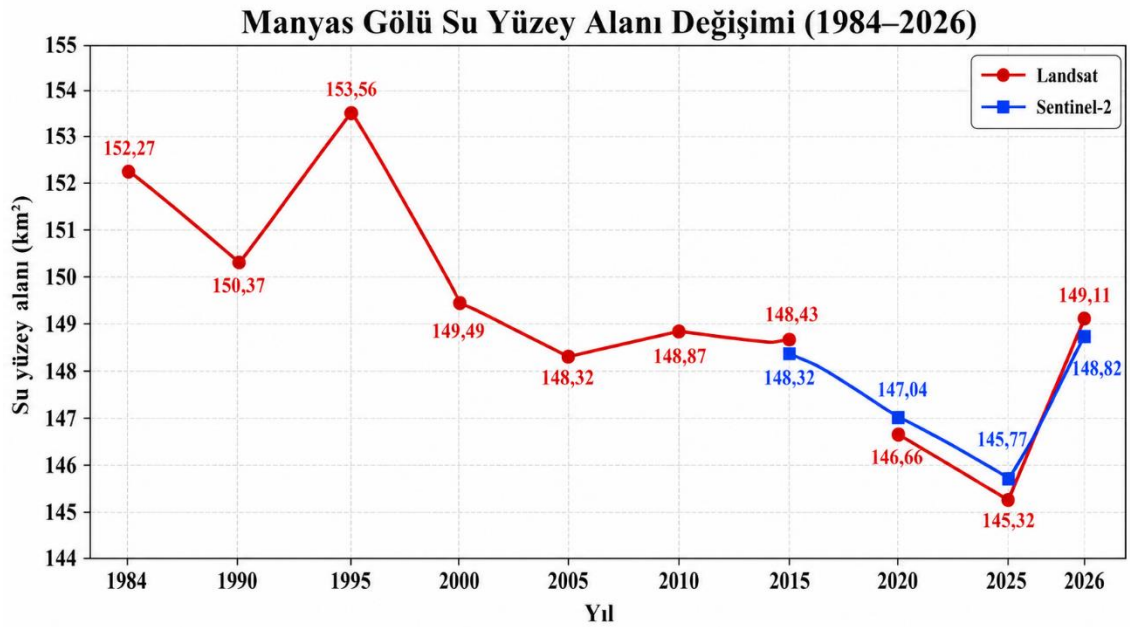
4.8.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Manyas Gölü’nde alan değerleri dönemsel dalgalanmalar göstermiş, ancak uzun dönem sonunda sınırlı bir azalma gözlenmiştir. 1984 yılındaki 152,27 km² alan 2025 yılında 145,32 km²’ye gerilemiş; net değişim 6,95 km² (%4,56) olmuştur (Tablo 23).

Gölün sığ, kıyı çizgisi değişken ve bitki örtüsünden etkilenebilen yapısı, küçük alan farklarının yorumlanmasında dikkate alınmıştır.

Tablo 23. Manyas Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	152,273	0,00
1990	150,371	-1,25
1995	153,562	0,85
2000	149,492	-1,83
2005	148,325	-2,59
2010	148,872	-2,23
2015	148,434	-2,52
2020	146,664	-3,68
2025	145,322	-4,56
2026	149,114	-2,07



Şekil 17. Manyas Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Sentinel-2 sonuçları Landsat değerleriyle oldukça uyumludur. İki sensör arasındaki farklar 2015'te 0,11 km², 2020'de 0,38 km², 2025'te 0,45 km² ve 2026'da 0,29 km² düzeyindedir (Şekil 17). Bu yakınlık, elde edilen su yüzey alanı sonuçlarının sensörler arasında tutarlı olduğunu göstermektedir.

boyunca büyük ölçüde korunduğu, ancak özellikle güney, güneydoğu ve doğu kıyılarında sınırlı daralma ve genişlemelerin meydana geldiği görülmektedir. Yıllar arasındaki değişimler çoğunlukla sığ ve kıyı bitkilerinden etkilenebilen kesimlerde yoğunlaşmış, gölün merkezindeki açık su yüzeyi ise genel olarak sürekliliğini koruduğu değerlendirilmektedir.

4.8.2. Doğruluk Analizi

Tablo 24. Manyas Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1 skoru	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	100,0	1,000	1,000	1,000
2025	100,0	1,000	1,000	1,000

Manyas Gölü için (Tablo 24) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %100,0 ile %100,0 arasında, Kappa ise 1,000–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 1,000–1,000, IoU değerleri ise 1,000–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılında yanlış sınıflandırma gerçekleşmemiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.8.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Manyas Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en yüksek ortalama genel doğruluk DVM-RTF modelinde %100,00 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (0,728 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

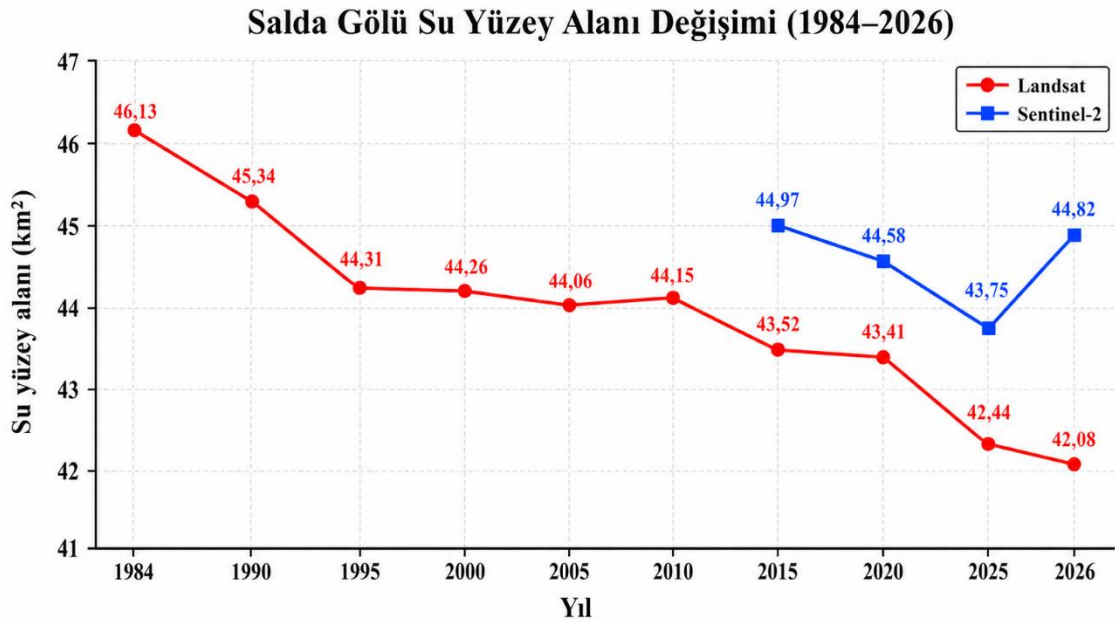
4.9. Salda Gölü Bulguları

4.9.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Salda Gölü’nde 1984–2025 arasında düşük büyüklükte ancak süreklilik gösteren bir daralma saptanmıştır. Alan 46,13 km²’den 42,44 km²’ye düşmüş; toplam kayıp 3,70 km² (8,02 %) olarak hesaplanmıştır (Tablo 25). Gölün küçük yüzey alanı nedeniyle mutlak kayıp düşük görünmekle birlikte, oransal değişim göller arası karşılaştırmada ayrıca önem taşımaktadır.

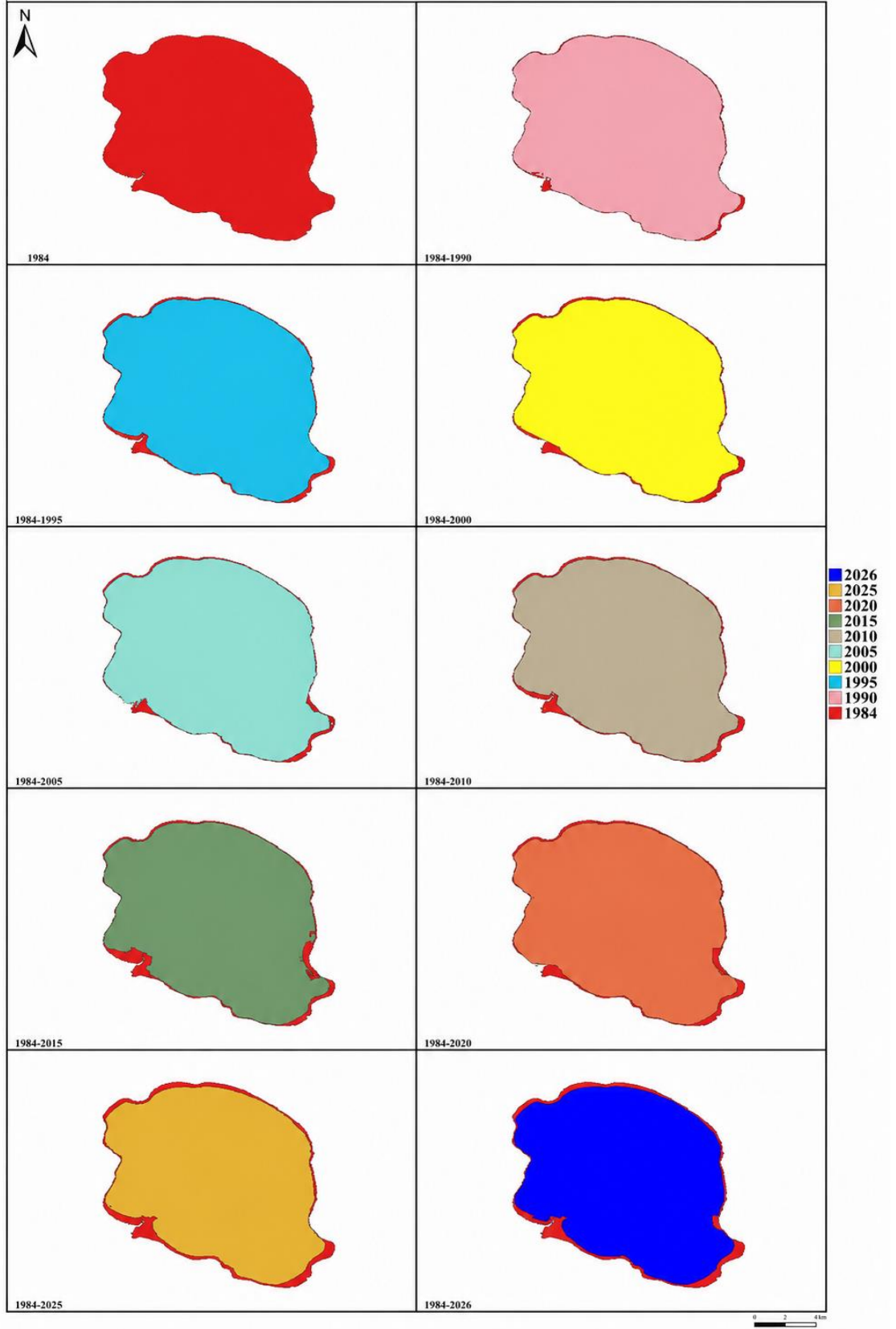
Tablo 25. Salda Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	46,135	0,00
1990	45,335	-1,73
1995	44,311	-3,95
2000	44,265	-4,05
2005	44,059	-4,50
2010	44,148	-4,31
2015	43,525	-5,66
2020	43,413	-5,90
2025	42,435	-8,02
2026	42,082	-8,79



Şekil 19. Salda Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Sentinel-2 sonuçları da 2015–2025 döneminde azalan bir seyir göstermiş; ancak tüm ortak yıllarda Landsat değerlerinden daha yüksek alan üretmiştir. İki sensör arasındaki farkın mekânsal çözünürlük, spektral özellikler, kıyıdaki karışık pikseller ve uygulanan dinamik eşik değerlerine karşı gösterilen farklı duyarlılıklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir



Şekil 20. Salda Gölü'nün su yüzeyi değişimi haritası (1984-2026)

Şekil 20'de Salda Gölü'nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su yüzeyleri karşılaştırılmıştır. Kırmızı renk 1984 yılına ait referans sınırı,

diğer renkler ise ilgili yıllardaki su alanlarını göstermektedir. Gölün genel biçiminin inceleme dönemi boyunca büyük ölçüde korunduğu, yıllar arasındaki farklılıkların daha çok güney, güneybatı ve doğu kıyılarında yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle 2015, 2020, 2025 ve 2026 dönemlerinde su yüzeyinin 1984 sınırının yer yer gerisinde kalması, kıyı çizgisinde sınırlı bir gerilemeye işaret etmektedir.

4.9.2. Doğruluk Analizi

Tablo 26. Salda Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1 skoru	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	97,0	0,940	0,969	0,940
2025	99,0	0,980	0,990	0,980

Salda Gölü için (Tablo 26) 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %97,0 ile %100,0 arasında, Kappa ise 0,940–1,000 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 0,969–1,000, IoU değerleri ise 0,940–1,000 aralığındadır. Üç doğrulama yılının toplamında 4 yanlış sınıflandırma kaydedilmiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.9.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Salda Gölü için geçerli 10 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk KNN modelinde %99,90 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (0,346 km²) olmuştur. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek A–D’de sunulmuştur

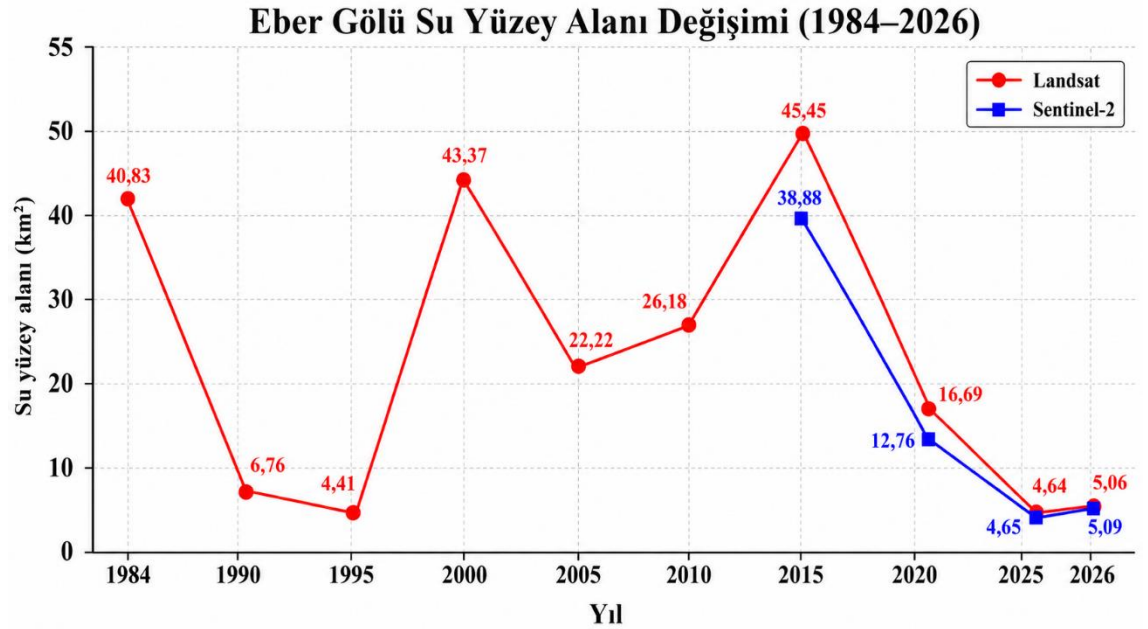
4.10. Eber Gölü Bulguları

4.10.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Eber Gölü, incelenen göller arasında en yüksek dönemsel değişkenliği gösteren örneklerden biridir. Alan 1984 yılında 40,83 km² iken 1990 ve 1995 yıllarında keskin biçimde azalmış, 2000 ve 2015 yıllarında yeniden genişlemiş, 2025 yılında 4,64 km²’ye gerilemiştir (Tablo 27). Bu dalgalı yapı nedeniyle 1984–2025 net kaybı 36,18 km² (88,62 %) olmasına karşın tekdüze bir eğilim oluşmamıştır.

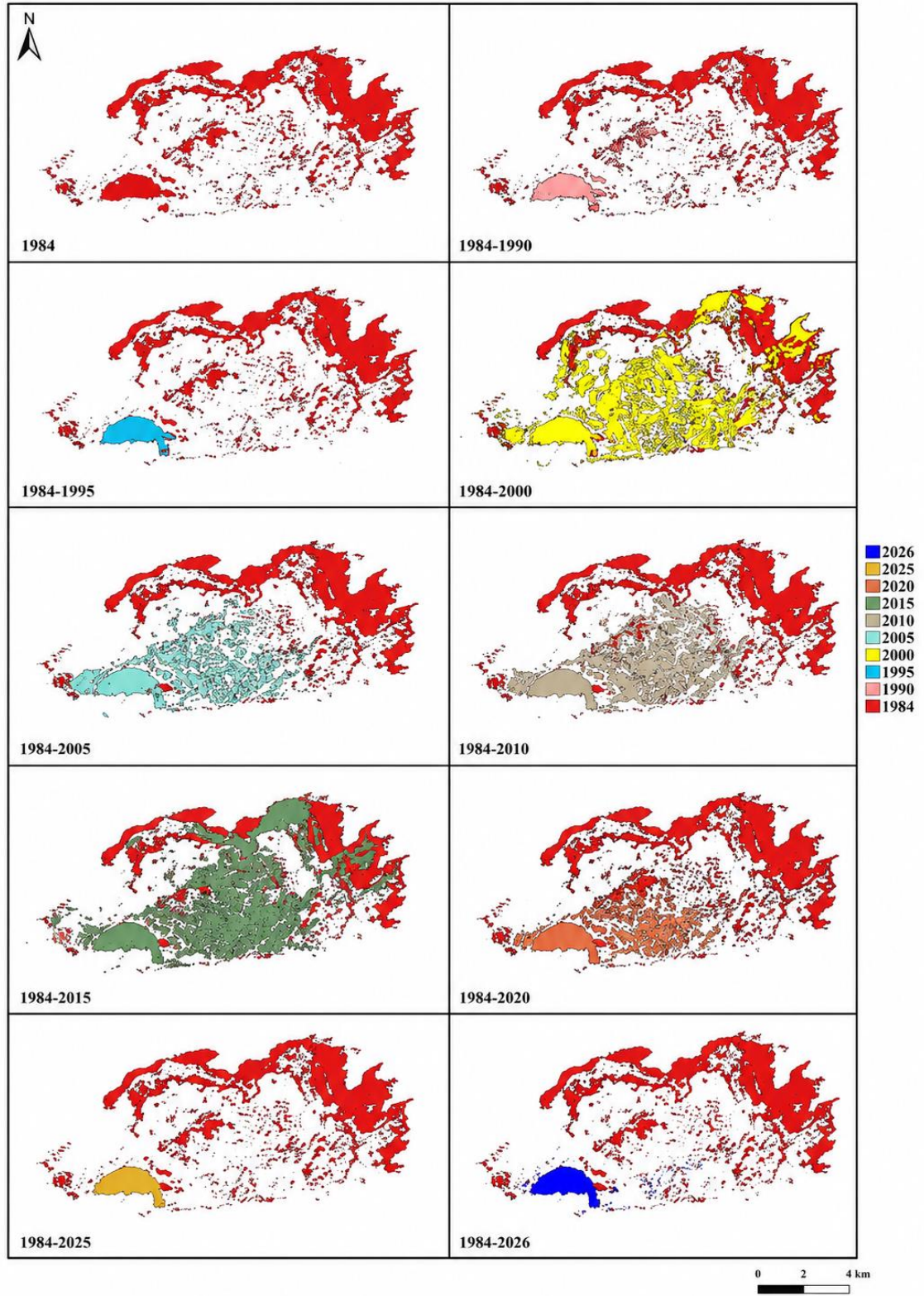
Tablo 27. Eber Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	40,825	0,00
1990	6,763	-83,44
1995	4,406	-89,21
2000	43,372	6,24
2005	22,222	-45,57
2010	26,181	-35,87
2015	45,454	11,34
2020	16,694	-59,11
2025	4,645	-88,62
2026	5,063	-87,60



Şekil 21. Eber Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Landsat ve Sentinel-2 sonuçları 2015 ve 2020 yıllarında farklılık göstermekle birlikte, 2025 yılında neredeyse aynı değere ulaşmıştır (Şekil 21). Bu durum, özellikle son dönemde gölün açık su yüzeyinin yaklaşık 4,6 km² düzeyine kadar daraldığını güçlü biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 22. Eber Gölü'nün su yüzeyi değişiminin mekânsal görünümü (1984-2026)

Şekil 22'de Eber Gölü'nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su alanları karşılaştırılmıştır. Kırmızı renk 1984 yılına ait referans su alanını, diğer renkler ise ilgili yıllarda belirlenen su yüzeylerini göstermektedir. Gölün sığ, sazlıklarla çevrili ve parçalı yapısı nedeniyle su alanlarının yıllar arasında belirgin

biçimde değiştiği görülmektedir. Özellikle 2000, 2005, 2010 ve 2015 yıllarında su yüzeyi göl yatağının farklı kesimlerine yayılmış ve parçalı bir görünüm sergilemiştir. Buna karşılık 1990, 1995, 2020, 2025 ve 2026 dönemlerinde açık su alanının daha çok gölün güneybatı kesiminde yoğunlaştığı ve 1984 yılına göre önemli ölçüde daraldığı belirlenmiştir.

4.10.2. Doğruluk Analizi

Tablo 28. Eber Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1	Su sınıfı IoU
1990	96,0	0,920	0,958	0,920
2020	94,0	0,880	0,936	0,880
2025	94,0	0,880	0,936	0,880

Eber Gölü için 1990, 2020 ve 2025 yıllarında genel doğruluk %94,0 ile %96,0 arasında, Kappa ise 0,880–0,920 aralığında bulunmuştur. Su sınıfı F1 skoru değerleri 0,936–0,958, IoU değerleri ise 0,880–0,920 aralığındadır. Üç doğrulama yılının toplamında 16 yanlış sınıflandırma kaydedilmiştir. Sonuçlar, dinamik eşikleme yaklaşımının açık su ve kara sınıflarını yüksek tutarlılıkla ayırdığını göstermektedir.

4.10.3. DeneySEL Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Eber Gölü için geçerli 10 yıllık model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk CART modelinde %97,90 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (11,834 km²) olmuştur. Bazı yıllarda sığ, parçalı veya bitki örtüsünden etkilenen alanlar sınıflandırma ölçütlerini düşürmüştür; göl bazı yorumlarda yıllar arası değişkenlik dikkate alınmıştır. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.11. Akşehir Gölü Bulguları

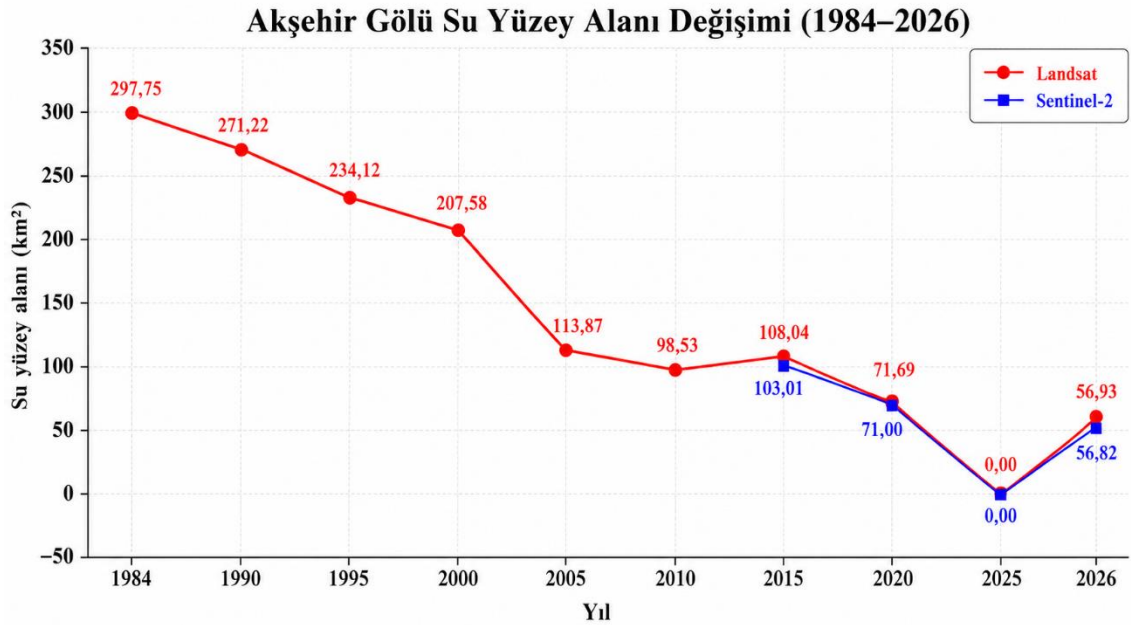
4.11.1. Su Yüzey Alanındaki Zamansal ve Mekânsal Değişim

Akşehir Gölü’nde çalışma döneminin en belirgin yüzey alanı kayıplarından biri tespit edilmiştir (Tablo 29). Alan 1984 yılında 297,75 km² iken, 2025 Temmuz–Eylül döneminde güvenilir bir açık su yüzeyi belirlenememiş ve nihai açık su alanı 0,00 km²

olarak kabul edilmiştir. Böylece 1984–2025 arasındaki kayıp 297,75 km² ve %100,00 olarak hesaplanmıştır.

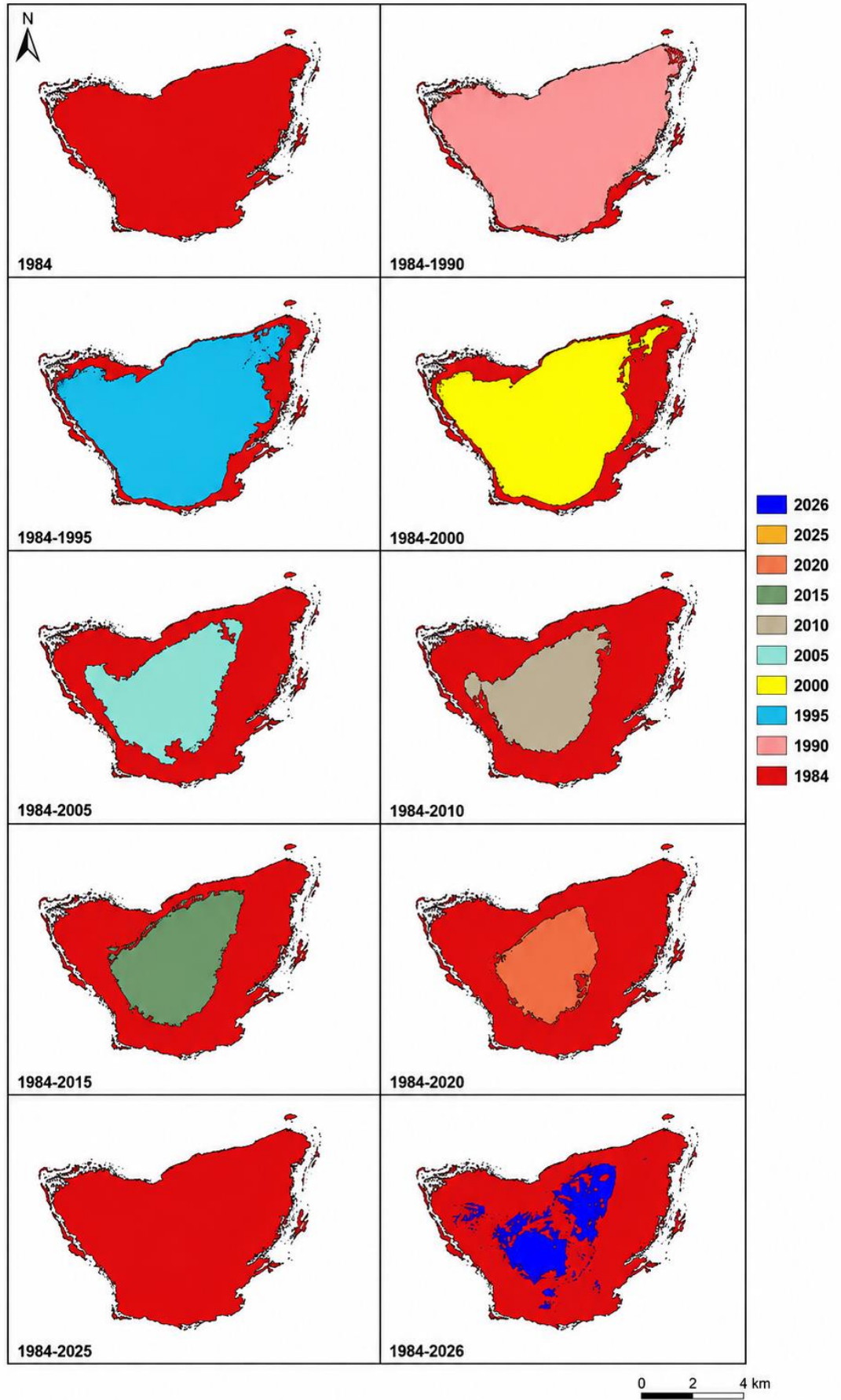
Tablo 29. Akşehir Gölü yıllara göre su yüzey alanı sonuçları

Yıl	Landsat alanı (km ²)	1984'e göre değişim (%)
1984	297,748	0,00
1990	271,221	-8,91
1995	234,125	-21,37
2000	207,577	-30,28
2005	113,866	-61,76
2010	98,526	-66,91
2015	108,242	-63,65
2020	71,685	-75,92
2025	0,000	-100,00
2026	56,926	-80,88



Şekil 23. Akşehir Gölü Landsat ve Sentinel-2 su yüzey alanı zamansal değişimi

Akşehir Gölü'nün su yüzey alanı, 1984–2025 döneminde belirgin ve süreklilik gösteren bir azalma göstermiştir (Şekil 23). Sentinel-2 sonuçlarının 2015, 2020, 2025 ve 2026 yıllarında Landsat değerleriyle yakınlık göstermesi, sensörler arası tutarlılığı desteklemektedir.



Şekil 24. Akşehir Gölü'nün su yüzeyi değişimi haritası (1984-2026)

Şekil 24’te Akşehir Gölü’nün 1984 yılı su yüzeyi ile 1990–2026 dönemlerinde belirlenen su alanları karşılaştırılmıştır. Gölün 1990’dan itibaren giderek daraldığı, 2005–2020 döneminde açık su yüzeyinin büyük ölçüde gölün orta ve güney kesimlerinde toplandığı görülmektedir. 2025 yılında belirgin bir açık su yüzeyi tespit edilmezken 2026 döneminde göl yatağının merkezinde parçalı su alanları belirlenmiştir. Bu görünüm, Akşehir Gölü’nde uzun dönem boyunca güçlü bir alan kaybı ve belirgin mekânsal parçalanma yaşandığını ortaya koymaktadır.

4.11.2. Doğruluk Analizi

Tablo 30. Akşehir Gölü doğruluk analizi sonuçları

Yıl	Genel doğruluk (%)	Kappa	Su sınıfı F1	Su sınıfı IoU
1990	100,0	1,000	1,000	1,000
2020	100,0	1,000	1,000	1,000
2025	Uygulanamaz	-	-	-

1990 ve 2020 bağımsız doğrulamalarında iki sınıflı yapı eksiksiz oluşturulmuş ve tüm referans noktaları doğru şekilde sınıflandırılmıştır. 2025 yılı referans görüntülerinde güvenilir bir açık su sınıfı bulunmadığından standart iki sınıflı hata matrisi oluşturulmamıştır. Bunun yerine, ham dinamik Otsu sonucunun su olarak gösterdiği kuru göl tabanından 50 ve kesin kuru kara alanlarından 50 olmak üzere toplam 100 kara referans noktası kullanılmıştır. Ham sonuçta yanlış su adayı olan 50 nokta su olarak sınıflandırılırken, nihai görsel kalite kontrolünden sonra 100 noktanın tamamı doğru biçimde kara olarak belirlenmiştir.

4.11.3. Deneysel Doğruluk Metriklerinin Değerlendirmesi

Akşehir Gölü için geçerli 9 yılın model sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek ortalama genel doğruluk DVM-RTF modelinde %99,78 olarak belirlenmiştir. Dinamik Otsu alanlarına en düşük ortalama mutlak farkla yaklaşan model ise KNN (6,618 km²) olmuştur. 2025 yılında güvenilir bir açık su sınıfı bulunmadığı için dört model de uygulanmamış ve bu yıl toplu hesapların dışında bırakılmıştır. Ayrıntılı göl–yıl–model sonuçları Ek 1’de sunulmuştur.

4.12. Trend Analizi ve Eğilim Temelli Projeksiyon Bulguları

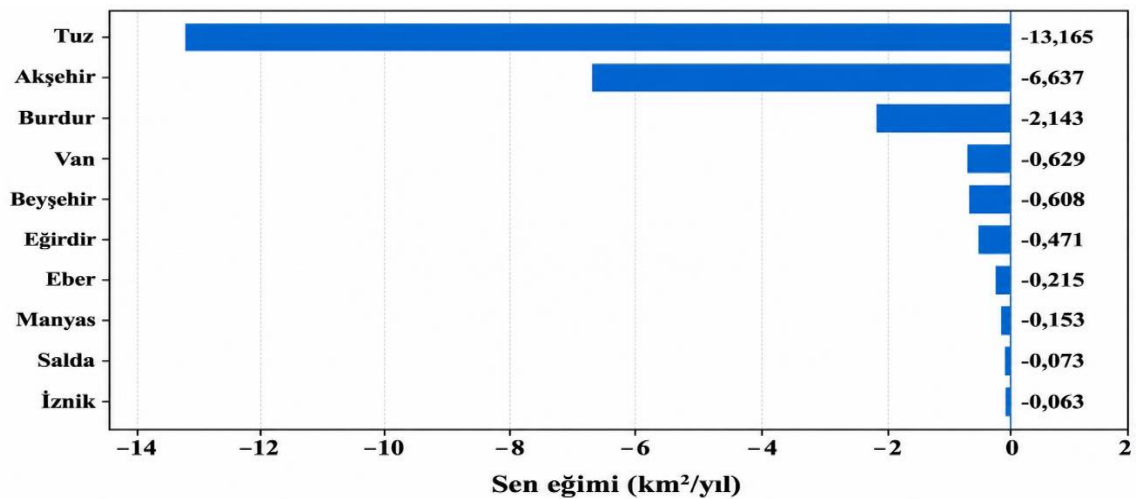
4.12.1. Mann–Kendall Trend Testi Bulguları

Tablo 31. Mann–Kendall trend testi ve Sen eğimi sonuçları

Göl	S	Z	p	Yön	$\alpha=0,05$
Van	-10	-0,938	0,3481	Azalan	Anlamli değil
Tuz	-30	-3,023	0,0025	Azalan	Anlamli
Beyşehir	-20	-1,981	0,0476	Azalan	Anlamli
Eğirdir	-26	-2,606	0,0091	Azalan	Anlamli
Burdur	-36	-3,649	0,0003	Azalan	Anlamli
İznik	-24	-2,398	0,0165	Azalan	Anlamli
Manyas	-28	-2,815	0,0049	Azalan	Anlamli
Salda	-34	-3,440	0,0006	Azalan	Anlamli
Eber	-2	-0,104	0,9170	Azalan	Anlamli değil
Akşehir	-34	-3,440	0,0006	Azalan	Anlamli

Mann–Kendall testi sonucunda (Tablo 31) Tuz, Beyşehir, Eğirdir, Burdur, İznik, Manyas, Salda ve Akşehir göllerinde $\alpha=0,05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamli bir azalan eğilim belirlenmiştir. Van ve Eber göllerinde Sen eğimleri negatif olmakla birlikte p değerleri 0,05’in üzerinde kalmış ve eğilimler istatistiksel olarak anlamli bulunmamıştır. Eber Gölü’ndeki sonuç, serideki güçlü dönemsel dalgalanmayla uyumludur

4.12.2. Sen Eğimi Bulguları



Şekil 25. 10 Gölün 1984–2025 dönemine ait Sen eğimleri

Şekil 25'e göre; yıllık alan değişim hızının en yüksek olduğu göl $-13,165 \text{ km}^2/\text{yıl}$ ile Tuz Gölü'dür. Bunu $-6,637 \text{ km}^2/\text{yıl}$ ile Akşehir ve $-2,143 \text{ km}^2/\text{yıl}$ ile Burdur gölleri izlemiştir. İznik, Salda ve Manyas göllerindeki eğimler mutlak büyüklük bakımından düşük olmakla birlikte, değişimin zaman içinde tutarlı olması nedeniyle anlamlıdır. Van Gölü'nde $-0,629 \text{ km}^2/\text{yıl}$ ve Eber Gölü'nde $-0,215 \text{ km}^2/\text{yıl}$ eğim belirlenmiş, ancak bu eğimler istatistiksel anlamlılık taşımamıştır.

4.12.3. Eğilim Temelli Su Yüzey Alanı Projeksiyonları

Tablo 32. Sen eğimine dayalı eğilim temelli su yüzey alanı projeksiyonları

Göl	2025 (km ²)	2030 (km ²)	2040 (km ²)	2050 (km ²)
Van Gölü	3.549,29	3.546,14	3.539,86	3.533,57
Tuz Gölü	37,05	0,00	0,00	0,00
Beyşehir Gölü	614,75	611,71	605,62	599,54
Eğirdir Gölü	414,75	412,39	407,67	402,96
Burdur Gölü	115,36	104,64	83,21	61,77
İznik Gölü	295,75	295,44	294,82	294,19
Manyas Gölü	145,32	144,56	143,03	141,50
Salda Gölü	42,44	42,07	41,34	40,60
Eber Gölü	4,64	3,57	1,43	0,00
Akşehir Gölü	0,00	0,00	0,00	0,00

Not: Projeksiyonlar 2025 alanına 1984–2025 Sen eğiminin doğrusal olarak eklenmesiyle oluşturulmuş, negatif sonuçlar 0 km² ile sınırlandırılmıştır.

Tablo 32'ye göre Sen eğimlerinin doğrusal olarak sürdürülmesi durumunda göllerin çoğunda su yüzey alanlarının azalmaya devam edeceği öngörülmektedir. Tuz Gölü 2030'da, Eber Gölü ise 2050'de 0 km² sınırına ulaşırken Akşehir Gölü için tüm projeksiyonlar 0 km² olarak hesaplanmıştır. Bu durum, özellikle küçük ve uzun dönemli azalma eğilimi belirgin olan göllerin daha yüksek risk altında bulunduğunu göstermektedir.

Burdur Gölü'nde 2025 yılında 115,36 km² olan su yüzey alanının 2050'de 61,77 km²'ye düşeceği öngörülmektedir. Van, Beyşehir, Eğirdir, İznik, Manyas ve Salda göllerinde ise daha sınırlı ve kademeli azalmalar belirlenmiştir. Büyük ve görece kararlı göllerdeki değişimin mutlak alan bakımından düşük kaldığı görülmektedir.

Bu değerler kesin gelecek tahminleri değil, geçmiş eğilimlerin aynı hızla sürmesi durumunu gösteren matematiksel projeksiyonlardır. Bu nedenle sonuçlar, hidrolojik ve iklimsel süreçlere dayalı ayrıntılı modellerin yerine kullanılmamalıdır. Bununla birlikte

projeksiyonlar, izleme ve koruma önceliklerinin belirlenmesinde genel bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

4.13. Makine Öğrenmesi Bulguları

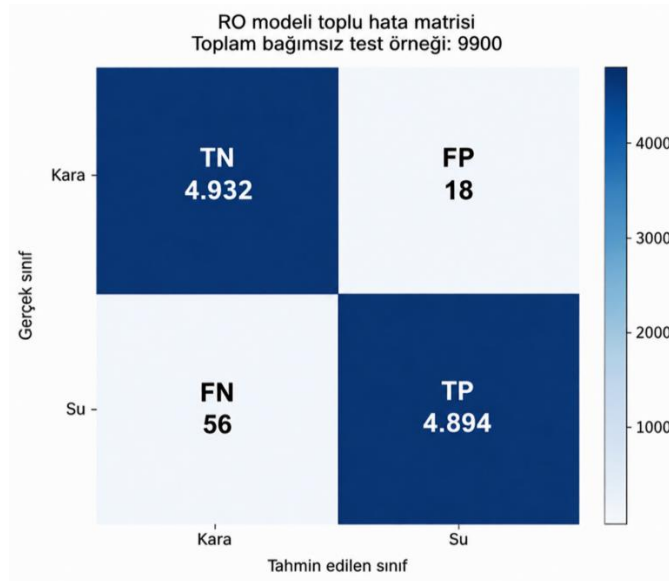
4.13.1. Modellerin Toplu Performans Sonuçları

Tablo 33. Makine öğrenmesi modellerinin toplu performans ölçütleri

Model	GD (%)	Kappa	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skoru	IoU
RO	99,25	0,9851	0,9963	0,9887	0,9925	0,9851
DVM-RTF	99,21	0,9842	0,9953	0,9889	0,9921	0,9843
CART	98,99	0,9798	0,9941	0,9857	0,9899	0,9799
KNN	99,13	0,9826	0,9945	0,9881	0,9913	0,9827

Şekil 26'ya göre toplu karmaşıklık matrisleri, Akşehir Gölü'nün 2025 yılında uygulanmayan model kayıtları çıkarıldıktan sonra her model için 99 göl-yıl kaydı ve 9.900 bağımsız test örneği üzerinden oluşturulmuştur. Tablo 33'e göre RO modeli %99,25 genel doğruluk, 0,9851 Kappa, 0,9925 F1 skoru ve 0,9851 IoU ile sınıflandırma performansı bakımından ilk sırada yer almıştır. DVM-RTF ve KNN sonuçları RO'a çok yakinken, CART modelinin toplu performansı sınırlı ölçüde daha düşüktür.

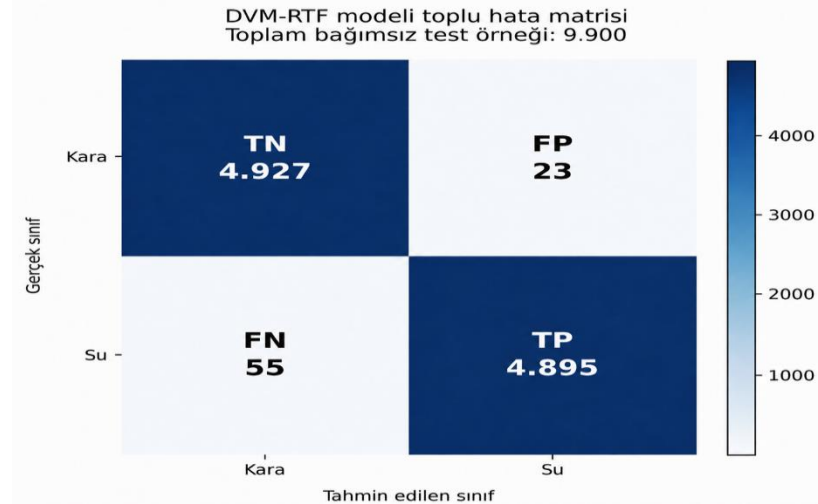
4.13.2. RO Modelinin Toplu Hata Matrisi



Şekil 26. RO modelinin 99 geçerli göl-yıl kaydına ait toplu hata matrisi

RO algoritmasında 4.932 kara ve 4.894 su örneği doğru sınıflandırılmış; 18 kara örneği su, 56 su örneği ise kara olarak tahmin edilmiştir. Yanlış sınıflandırmalar toplam test örneklerinin %0,75'ini oluşturmaktadır.

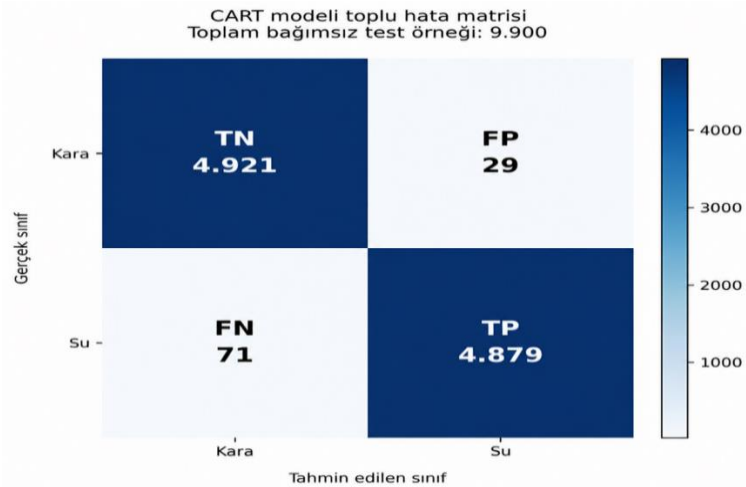
4.13.3. DVM-RTF Modelinin Toplu Hata Matrisi



Şekil 27. DVM-RTF modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi

Şekil 27'ye göre DVM-RTF modelinde 4.927 kara ve 4.895 su örneği doğru sınıflandırılmış; 23 kara örneği su, 55 su örneği ise kara olarak tahmin edilmiştir. Yanlış sınıflandırmalar toplam test örneklerinin %0,79'unu oluşturmaktadır.

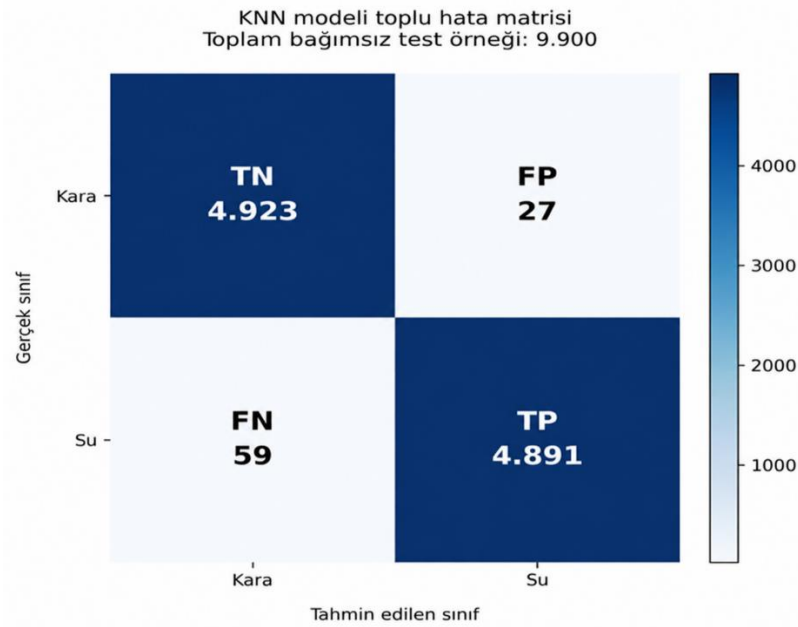
4.13.4. CART Modelinin Toplu Hata Matrisi



Şekil 28. CART modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi

Şekil 28'e göre CART modelinde 4.921 kara ve 4.879 su örneği doğru sınıflandırılmış; 29 kara örneği su, 71 su örneği kara olarak tahmin edilmiştir. Yanlış sınıflandırmalar toplam test örneklerinin %1,01'sini oluşturmaktadır.

4.13.5. KNN Modelinin Toplu Hata Matrisi



Şekil 29. KNN modelinin 99 geçerli göl–yıl kaydına ait toplu hata matrisi

Şekil 29'a göre KNN modelinde 4.923 kara ve 4.891 su örneği doğru sınıflandırılmış; 27 kara örneği su, 59 su örneği ise kara olarak tahmin edilmiştir. Yanlış sınıflandırmalar toplam test örneklerinin %0,87'sini oluşturmaktadır.

4.13.6. Model Alanları ile Su Alanlarının Karşılaştırılması

Makine öğrenme modellerine ait Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error [MAE]), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error [RMSE]) değerleri Tablo 34'te verilmiştir.

Tablo 34. Model alanları ile su alanları arasındaki toplu fark ölçütleri

Model	MAE (km ²)	RMSE (km ²)	Medyan mutlak fark (%)	Ortalama mutlak fark (%)	Ortalama yanlışlık (km ²)
RO	8,585	20,176	0,572	12,235	0,449
DVM-RTF	9,278	21,973	0,554	12,266	1,256
CART	10,536	21,374	1,238	14,927	-1,958
KNN	6,530	19,693	0,284	11,413	3,612

4.14. Hidroklimatik Destekleyici Bulgular

4.14.1. Hidrolojik Yıl Hidroklimatik Bulguları

Tablo 35. Yıllık hidroklimatik göstergelerin dönem ortalamaları

Göl	Yıllık dönem	Özet dönem	P (mm)	PET (mm)	P–PET (mm)	P/PET
Van	Hidrol.	1984-2000	430,8	1.222,3	-791,5	0,352
Van	Hidrol.	2001-2010	500,9	1.257,5	-756,7	0,398
Van	Hidrol.	2011-2025	440,8	1.342,1	-901,3	0,328
Tuz	Hidrol.	1984-2000	380,6	1.587,3	-1.206,7	0,240
Tuz	Hidrol.	2001-2010	396,4	1.675,5	-1.279,1	0,237
Tuz	Hidrol.	2011-2025	405,0	1.679,4	-1.274,4	0,241
Beyşehir	Hidrol.	1984-2000	507,8	1.461,3	-953,6	0,347
Beyşehir	Hidrol.	2001-2010	588,3	1.522,4	-934,1	0,386
Beyşehir	Hidrol.	2011-2025	528,2	1.547,5	-1.019,3	0,341
Eğirdir	Hidrol.	1984-2000	482,3	1.430,2	-947,9	0,337
Eğirdir	Hidrol.	2001-2010	547,0	1.509,6	-962,6	0,362
Eğirdir	Hidrol.	2011-2025	508,6	1.531,3	-1.022,7	0,332
Burdur	Hidrol.	1984-2000	475,0	1.532,5	-1.057,4	0,310
Burdur	Hidrol.	2001-2010	574,2	1.589,6	-1.015,4	0,361
Burdur	Hidrol.	2011-2025	513,7	1.625,2	-1.111,6	0,316
İznik	Hidrol.	1984-2000	642,7	1.642,9	-1.000,2	0,391
İznik	Hidrol.	2001-2010	681,5	1.826,1	-1.144,7	0,373
İznik	Hidrol.	2011-2025	691,6	1.844,4	-1.152,8	0,375
Manyas	Hidrol.	1984-2000	570,9	1.858,3	-1.287,4	0,307
Manyas	Hidrol.	2001-2010	659,9	2.001,9	-1.342,0	0,330
Manyas	Hidrol.	2011-2025	632,5	2.020,4	-1.387,9	0,313
Salda	Hidrol.	1984-2000	508,6	1.609,8	-1.101,1	0,316
Salda	Hidrol.	2001-2010	607,3	1.686,7	-1.079,5	0,360
Salda	Hidrol.	2011-2025	571,9	1.737,6	-1.165,7	0,329
Eber	Hidrol.	1984-2000	429,5	1.580,4	-1.150,9	0,272
Eber	Hidrol.	2001-2010	460,4	1.711,2	-1.250,9	0,269
Eber	Hidrol.	2011-2025	478,4	1.752,1	-1.273,7	0,273
Akşehir	Hidrol.	1984-2000	457,8	1.435,7	-977,9	0,319
Akşehir	Hidrol.	2001-2010	485,5	1.523,9	-1.038,5	0,319
Akşehir	Hidrol.	2011-2025	480,7	1.558,7	-1.078,1	0,308

Tablo 35'e göre yıllık dönem ortalamalarında bütün göllerde PET değerleri yağıştan yüksektir ve P–PET göstergesi negatiftir. P/PET oranları göller ve dönemler arasında farklılaşmakla birlikte, incelenen dönemlerin tümünde 1'in altında kalmıştır. Bu

göstergeler, çalışma alanlarının hidroklimatik arka planını tanımlamak amacıyla sunulmuş; göl alanındaki değişimlerin doğrudan açıklayıcısı olarak kullanılmamıştır.

4.14.2. Temmuz–Eylül Dönemi Hidroklimatik Bulguları

Tablo 36. Temmuz–Eylül hidroklimatik göstergelerinin dönem ortalamaları

Göl	Özet dönem	P (mm)	PET (mm)	P–PET (mm)	P/PET
Van	1984-2000	16,4	593,3	-576,9	0,028
Van	2001-2010	19,8	603,5	-583,7	0,033
Van	2011-2025	17,6	637,3	-619,7	0,028
Tuz	1984-2000	14,0	703,6	-689,6	0,020
Tuz	2001-2010	20,1	709,0	-688,9	0,028
Tuz	2011-2025	18,4	722,5	-704,1	0,025
Beyşehir	1984-2000	29,4	653,7	-624,3	0,045
Beyşehir	2001-2010	39,5	657,6	-618,1	0,060
Beyşehir	2011-2025	31,1	674,2	-643,1	0,046
Eğirdir	1984-2000	38,1	638,2	-600,1	0,060
Eğirdir	2001-2010	43,6	659,2	-615,7	0,066
Eğirdir	2011-2025	39,1	672,7	-633,6	0,058
Burdur	1984-2000	37,2	655,4	-618,2	0,057
Burdur	2001-2010	42,4	670,7	-628,3	0,063
Burdur	2011-2025	42,8	689,3	-646,6	0,062
İznik	1984-2000	80,0	703,3	-623,3	0,114
İznik	2001-2010	98,8	785,9	-687,1	0,126
İznik	2011-2025	90,7	815,8	-725,1	0,111
Manyas	1984-2000	31,7	795,5	-763,7	0,040
Manyas	2001-2010	49,3	848,1	-798,8	0,058
Manyas	2011-2025	41,6	879,5	-837,9	0,047
Salda	1984-2000	39,3	669,8	-630,6	0,059
Salda	2001-2010	42,3	694,7	-652,4	0,061
Salda	2011-2025	44,6	717,8	-673,2	0,062
Eber	1984-2000	44,1	684,8	-640,8	0,064
Eber	2001-2010	49,6	733,0	-683,4	0,068
Eber	2011-2025	50,6	753,9	-703,4	0,067
Akşehir	1984-2000	34,6	632,2	-597,5	0,055
Akşehir	2001-2010	40,4	652,3	-611,8	0,062
Akşehir	2011-2025	36,6	670,0	-633,4	0,055

Tablo 36'ya göre Temmuz–Eylül döneminde P/PET oranlarının yıllık değerlere göre belirgin biçimde düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, ana su yüzey alanı

gözlemlerinin gerçekleştirildiği yaz döneminin yağışa kıyasla yüksek atmosferik su talebiyle karakterize edildiğini göstermektedir.

4.14.3. Dönemsel Hidroklimatik Bulgular

1984–2000, 2001–2010 ve 2011–2025 dönemleri karşılaştırıldığında, hidroklimatik göstergelerin göller arasında tek tip bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Bazı göllerde 2001–2010 döneminin P/PET değeri önceki döneme göre yükselirken, 2011–2025 döneminde yeniden düşüş gözlenmiştir; bazı göllerde ise dönemler arası fark daha sınırlı kalmıştır. Bu heterojen yapı, hidroklimatik bulguların göl bazında ve destekleyici nitelikte ele alınmasını gerektirmektedir.

4.14.4. 2026 Nisan–Haziran Dönemi Hidroklimatik Bulguları

Tablo 37. 2026 Nisan–Haziran hidroklimatik göstergeleri

Göl	P (mm)	PET (mm)	P–PET (mm)	P/PET
Van Gölü	160,0	384,7	-224,7	0,416
Tuz Gölü	180,1	492,8	-312,7	0,365
Beyşehir Gölü	193,1	468,6	-275,5	0,412
Eğirdir Gölü	240,3	457,1	-216,7	0,526
Burdur Gölü	222,3	488,0	-265,6	0,456
İznik Gölü	127,7	583,2	-455,5	0,219
Manyas Gölü	123,5	669,8	-546,3	0,184
Salda Gölü	214,8	507,0	-292,2	0,424
Eber Gölü	238,7	517,1	-278,3	0,462
Akşehir Gölü	248,8	462,4	-213,6	0,538

Tablo 37'ye göre 2026 Nisan–Haziran döneminde tüm göllerde P–PET değerleri negatif olmuştur. P/PET oranları 0,184–0,538 aralığında değişmiştir. Bu değerler, 2026'nın güncel alan sonuçlarının mevsimsel çevresel bağlamını ortaya koyan destekleyici bulgulardır.

4.15. Deneyisel Sonuçların Genel Değerlendirilmesi

Bulgular, incelenen 10 gölün ortak bir yöntemle değerlendirilmesine rağmen birbirinden belirgin biçimde farklı zamansal davranışlar sergilediğini ortaya koymuştur. Akşehir, Tuz, Eber ve Burdur göllerinde yüksek oransal kayıplar; Van ve İznik göllerinde ise görece kararlı alanlar; Manyas ve Eber göllerinde ise daha güçlü dönemsel

dalgalanmalar belirlenmiştir. Sekiz gölde anlamlı azalan eğilim saptanırken Van ve Eber göllerinde eğilimler anlamlı bulunmamıştır.

Bağımsız doğrulamalar yüksek başarı göstermiştir; RO algoritması en yüksek piksel sınıflandırma başarısını, KNN modeli ise dinamik Otsu alanların en düşük ortalama mutlak farkını sağlamıştır. Hidroklimatik göstergeler destekleyici bulgu olarak sunulmuş ve alan değişimleriyle doğrudan ilişkilendirilmemiştir.

5. TARTIŞMA

5.1. Göllerde Belirlenen Su Yüzey Alanı Değişimlerinin Tartışılması

Bu çalışmada ortak veri işleme zinciri, mevsimsel gözlem penceresi ve alan hesaplama yaklaşımı kullanılarak 10 göl aynı karşılaştırma çerçevesinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, göllerin yalnızca büyüklükleri bakımından değil, değişimin yönü, sürekliliği ve büyüklüğü bakımından da farklı gruplara ayrıldığını göstermektedir. Akşehir ve Tuz göllerinde çok yüksek kayıplar, Burdur Gölü'nde düzenli ve güçlü bir daralma, Eber Gölü'nde yüksek değişkenlik, Van ve İznik göllerinde ise görece kararlılık belirlenmiştir.

Akşehir Gölü'nün 2025 Temmuz–Eylül döneminde açık su yüzeyinin belirlenememesi, daha önce çok zamanlı uydu görüntüleriyle raporlanan uzun dönemli küçülme ve kuruma bulgularıyla aynı yöndedir. Şener vd. (2010), Akşehir Gölü'nde 1975–2006 arasında belirgin alan ve hacim kaybı olduğunu bildirmiş ve gölün 2008'de tamamen kurduğunu belirtmiştir. Bu tezde, 1984–2025 için hesaplanan %100'lük kayıp, gölün yeniden su kazanabildiği dönemler bulunmasına karşın uzun dönemli kırılganlığın sürdüğünü göstermektedir. Eber Gölü'nde ise aynı çalışmada vurgulanan sucul bitki örtüsü ve hidrolik koşulların önemi, bu tezde belirlenen güçlü yıllar arası alan dalgalanmalarının yorumlanmasında dikkate alınması gereken bir bağlam sunmaktadır.

Tuz Gölü'nde 1984–2025 arasında belirlenen %93,68'lik açık su kaybı ve $-13,165 \text{ km}^2/\text{yıl}$ Sen eğimi, çok zamanlı Landsat verileriyle su rezervindeki değişimleri ortaya koyan önceki çalışmalarla genel yön bakımından uyumludur (Örmeci ve Ekercin, 2007). Bununla birlikte, Tuz Gölü'nün tuz kabuğu, nemli taban ve çok sığ su koşulları nedeniyle optik görüntülerde su ile su dışı sınıfların spektral ayrımı olağan göllere göre daha karmaşıktır. Sentinel-2 destekleyici değerlerinin Landsat ana serisinden belirgin biçimde daha yüksek çıkması, farklı sensör ve çözünürlüklerin bu özel yüzey koşullarına farklı duyarlılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, ana sonuçların tek bir sensör serisi içinde korunması, yöntemsel tutarlılık açısından uygun görülmüştür.

Burdur Gölü'nde belirlenen sürekli daralma, Landsat görüntülerine dayalı önceki değişim analizleriyle uyumludur. Sarp ve Özçelik (2017), 1987–2011 döneminde özellikle erken yıllarda güçlü bir alan azalması belirlemiş ve MNDWI ile destek vektör sınıflandırmasının su çıkarımındaki başarısını göstermiştir. Aslan ve Koç-San (2021) da Burdur Gölü alanının 1998–2018 arasında belirgin biçimde azaldığını, Eğirdir

Gölü’ndeki azalmanın ise daha sınırlı olduğunu bildirmiştir. Bu tezde Burdur için %43,94, Eğirdir için %11,84 kayıp hesaplanması söz konusu görelî farkla uyumludur.

Beyşehir, Salda ve Manyas göllerinde mutlak ve oransal kayıplar Akşehir, Tuz ve Burdur göllerine göre daha sınırlıdır. Manyas Gölü için Uzun (2024) tarafından 1980–2020 döneminde belirlenen kıyı ilerlemeleri, gerilemeleri, birikme ve erozyon alanları, göl kıyılarının dönemsel ve mekânsal olarak değişken bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu tezde, Manyas Gölü’nün uzun dönem kaybı %4,57 ile sınırlı olmakla birlikte, yıllar arası dalgalanma ve mekânsal kıyı farklılıkları belirlenmiştir. Salda Gölü’nde %8,02’lik kayıp, küçük göllerde mutlak alan farkının düşük olmasına rağmen oransal değişimin ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Van Gölü’nde 1984–2025 arasında %0,25 ve İznik Gölü’nde %1,73 düzeyinde kayıp belirlenmesi, bu göllerin çalışma grubunda görece kararlı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, İznik Gölü’nde Sen eğiminin düşük büyüklükte olmasına rağmen istatistiksel olarak anlamlı çıkması, trend testlerinin yalnızca toplam başlangıç–bitiş farkını değil, gözlemlerin zaman içindeki sıralı tutarlılığını da yansıttığını göstermektedir. Van Gölü’nde ise ara yıllardaki artış ve azalışların birbirini kısmen dengelemesi nedeniyle trend anlamlı bulunmamıştır.

5.2. Dinamik Otsu Yönteminin Başarısının Tartışılması

MNDWI, açık su özelliklerini güçlendirmek ve yapılaşmış alan, bitki örtüsü ve toprak kaynaklı spektral karışmayı azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir spektral indekstir (Xu, 2006). Otsu yöntemi, görüntü histogramını iki sınıfa ayıran olası eşikler arasından sınıflar arası varyansı en büyükleyen eşik değerini otomatik olarak belirler (Otsu, 1979). Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, göller ve yıllar arasında tek bir sabit eşik yerine görüntüye özgü dinamik eşiklerin üretilmesini sağlamıştır.

Bağımsız doğrulama sonuçları, yöntemin çoğu gölde %97–%100 aralığında genel doğruluk sağladığını göstermiştir. Tuz, Burdur, İznik ve Manyas göllerinin doğrulama yıllarında hatasız sonuçlar elde edilmesi, açık su–kara ayrımının uygun referans koşullarında güçlü olduğunu göstermektedir. Eber Gölü’nde doğruluğun %94–%96 aralığına düşmesi, parçalı ve spektral açıdan karmaşık yüzey koşullarının sınır piksellerini artırmış olabileceğine işaret etmektedir. Ancak bu çalışma, söz konusu düşüşün belirli bir fiziksel etkenden kaynaklandığını sınamak üzere tasarlanmadığından, yorum spektral ve mekânsal karmaşıklık düzeyiyle sınırlandırılmıştır.

Akşehir Gölü 2025 kaydı, iki sınıflı doğrulamanın her koşulda mekanik biçimde uygulanmaması gerektiğini göstermiştir. Güvenilir bir su referansı bulunmadığı hâlde

dengeli bir hata matrisi üretmek, gerçekte var olmayan bir sınıfı temsil eden örneklerin kullanılmasına yol açacaktı. Bu nedenle iki sınıflı doğruluk ölçütleri hesaplanmamış; Otsu yöntemiyle başlangıçta su olarak sınıflandırılan kuru göl tabanı pikselleri, yalnızca kara referanslarına dayalı bir yanlış pozitiflik kontrolüyle ayrıca değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, doğrulama tasarımının sahadaki sınıf varlığına bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

5.3. Landsat ve Sentinel-2 Sonuçlarının Karşılaştırılması

Landsat verileri, aynı veri işleme zinciri altında uzun dönemli karşılaştırmaya elverişli ana veri serisini sağlarken, Sentinel-2 verileri daha yüksek mekânsal çözünürlüğü sayesinde kıyı sınırlarının ve küçük su parçalarının destekleyici olarak kontrol edilmesine olanak vermiştir (Wulder vd., 2019). Sentinel-2 görevinin 13 spektral bantta 10, 20 ve 60 m mekânsal çözünürlüklerde gözlem kapasitesi sunması, ayrıntılı su–kara sınırı incelemeleri açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır (Drusch vd., 2012). Aynı zamanda MNDWI hesabında kullanılan kısa dalga kıızılötesi bandın Sentinel-2’de 20 m mekânsal çözünürlüğe sahip olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca sensörlerin spektral tepki özellikleri ve piksel büyüklükleri ile kullanılan görüntü sayılarının ve gözlem tarihlerinin farklılaşması, Landsat ve Sentinel-2 verilerinden birebir aynı alan değerlerinin elde edilmesini gerektirmemektedir (Mandanici ve Bitelli, 2016).

Van, Beyşehir, Eğirdir, Burdur, İznik, Manyas, Salda, Eber ve Akşehir göllerinde Sentinel-2 ve Landsat sonuçlarının genel olarak benzer alan büyüklükleri göstermesi, iki veri kaynağının ana değişim yönü bakımından birbirini desteklediğini ortaya koymuştur. Tuz Gölü’nde ise iki sensörden elde edilen alanlar arasında belirgin farklılıklar saptanmıştır. Bu durum, Sentinel-2 sonuçlarının daha doğru veya Landsat sonuçlarının daha hatalı olduğu şeklinde yorumlanmamıştır. Bunun yerine, sonuçlar Tuz Gölü’ndeki tuz kabuğu, nemli göl tabanı ve çok sığ su yüzeylerinin mekânsal çözünürlük, spektral özellikler ve eşikleme yaklaşımındaki farklılıklara duyarlı olabileceğine işaret etmektedir. Bu çalışma söz konusu farklılığın nedenlerini deneysel olarak sınamak üzere tasarlanmadığından, yorum sensör ve yüzey koşullarındaki yöntemsel farklılıklarla sınırlandırılmıştır. Ana trend değerlendirmesinin Landsat serisine dayandırılması, uzun dönemli veri bütünlüğünün ve karşılaştırılabilirliğin korunmasını sağlamıştır.

5.4. Trend ve Projeksiyon Sonuçlarının Tartışılması

Mann–Kendall testi ile Sen eğimi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, negatif eğimin her durumda istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Mann–Kendall

testi, zaman serisindeki monoton eğilimin yönünü ve istatistiksel anlamlılığını değerlendirirken, Sen eğimi ise gözlem çiftlerinden hesaplanan eğimlerin medyanı aracılığıyla değişimin büyüklüğünü ortaya koymaktadır (Kendall, 1975; Mann, 1945; Sen, 1968). Van ve Eber göllerinde Sen eğimi negatif olmasına karşın p değerlerinin 0,05'in üzerinde kalması, bu serilerde istatistiksel olarak anlamlı bir monoton azalma eğilimine ilişkin yeterli kanıt elde edilemediğini göstermektedir. Özellikle Eber Gölü'nde görülen güçlü genişleme ve daralmalar, başlangıç ve bitiş yılları arasındaki kaybın tek başına sürekli veya monoton bir eğilim olarak yorumlanamayacağını göstermektedir.

Tuz, Akşehir ve Burdur göllerinde belirlenen yüksek negatif Sen eğimleri, su yüzey alanındaki uzun dönemli değişimin büyüklüğünü $\text{km}^2/\text{yıl}$ cinsinden özetlemektedir. Bununla birlikte Sen eğimi, her yıl aynı miktarda alan kaybı gerçekleştiğini değil, gözlem çiftlerinden elde edilen medyan değişim eğilimini ifade etmektedir. İznik ve Salda göllerinde eğimin mutlak büyüklüğü düşük olmasına karşın, gözlemlerin zaman içindeki sıralı değişimi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, istatistiksel anlamlılık ile değişimin uygulamadaki büyüklüğünün birbirinden farklı kavramlar olduğunu göstermektedir (Wasserstein ve Lazar, 2016). Dolayısıyla göl yönetimi açısından p değeri, Sen eğimi, mutlak alan kaybı ve yüzdesel değişim birlikte değerlendirilmelidir.

2030, 2040 ve 2050 yıllarına ilişkin değerler süreç temelli hidrolojik model çıktıları olmayıp, 1984–2025 döneminde gözlenen Sen eğiminin 2025 sonrasında doğrusal biçimde devam ettiği varsayımına dayanan koşullu eğilim uzatımlarıdır. Bu yaklaşımda Tuz Gölü 2030'da, Eber Gölü ise 2050'de matematiksel olarak 0 km^2 sınırına ulaşmaktadır. Akşehir Gölü'nün 2025 başlangıç değeri zaten 0 km^2 olduğundan, sonraki projeksiyon yıllarında da alan 0 km^2 ile sınırlandırılmıştır. Bu sonuçlar, göllerin belirtilen tarihlerde kesin olarak kuruyacağını göstermemekte; yalnızca doğrusal matematiksel uzatımın fiziksel alt sınıra ulaştığını ifade etmektedir. Yağış, buharlaşma, yeraltı suyu beslenimi, su kullanımı, göl tabanı morfolojisi ve yönetim müdahaleleri gelecekte farklılaşabileceğinden, söz konusu değerler kesin bir öngörü olarak değil, mevcut eğilimin sürmesi durumundaki duyarlılık göstergeleri olarak değerlendirilmelidir.

5.5. Makine Öğrenmesi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dört modelin toplu genel doğruluklarının %98,99–%99,25 aralığında bulunması, 10 spektral değişken kullanılarak eğitilen modellerin bağımsız test örneklerinde su ve kara sınıflarını genel olarak yüksek başarıyla ayırdığını göstermektedir. RO modeli; toplu genel doğruluk, Kappa, F1 skoru ve IoU bakımından en yüksek sonuçları vermiştir. DVM-RTF ve KNN modelleri RO'ya yakın performans gösterirken, CART modeli yine

yüksek doğruluğa sahip olmakla birlikte diğer modellerin sınırlı ölçüde gerisinde kalmıştır. Piksel tabanlı sınıflandırma başarısı ile su yüzeyi alanı yakınlığı aynı model sıralamasını vermemiştir. RO modeli en yüksek sınıflandırma ölçütlerine sahipken, KNN dinamik Otsu alanlarına göre 6,530 km² ile en düşük ortalama mutlak alan hatasını üretmiştir. Genel doğruluk, bağımsız test örneklerinin doğru sınıflandırılma oranını; alan hatası ise sınıflandırılmış rasterin tamamından hesaplanan su yüzeyinin referans alandan farkını göstermektedir. Bu nedenle bağımsız test örneklerinde sınırlı kalan hatalar, raster genelinde mekânsal olarak sistematik biçimde tekrarlandığında geniş göllerde belirgin km² farklarına yol açabilir. Küçük göllerde ise düşük mutlak alan farkları başlangıç alanının küçük olması nedeniyle yüksek yüzdesel farklara dönüşebilir. Bu durum, sınıflandırma doğruluğu ile alan tahmininin birbirini tamamlayan ancak farklı değerlendirme boyutları olduğunu göstermektedir (Foody, 2002; Olofsson vd., 2014). Burdur ve Eber göllerinde göl bazlı toplu doğrulukların diğer göllerin çoğuna göre görece düşük kalması, modellerin genel ortalamalarının göller ve yıllar arasındaki performans değişkenliğini tek başına yansıtmadığını göstermektedir. Tuz Gölü'nde ise %98,30–%99,40 aralığındaki yüksek piksel doğruluklarına karşın model alanlarının dinamik Otsu alanlarından belirgin biçimde farklılaşması, bu gölün özel yüzey koşullarında piksel tabanlı doğruluk ölçütleri ile alan sonuçlarının ayrışabildiğine işaret etmektedir. Akşehir Gölü'nün 2025 yılı kaydında güvenilir açık su sınıfı bulunmadığından modellerin uygulanmaması ve kaydın toplu hesaplamalardan çıkarılması, toplu performans ölçütlerinin yalnızca su ve kara sınıflarının güvenilir biçimde temsil edildiği kayıtları içermesini sağlamıştır.

5.6. Hidroklimatik Bulguların Destekleyici Değerlendirmesi

Hidroklimatik sonuçlar, 1984–2025 dönemi ortalamalarında bütün göllerde hem yıllık hem de Temmuz–Eylül P–PET değerlerinin negatif, P/PET oranlarının ise 1'in altında olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, çalışma alanlarında yağış girdisinin potansiyel atmosferik su talebini karşılamadığı hidroklimatik koşulların genel arka planını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, P–PET göstergesi; yüzey akışı, yeraltı suyu beslenimi, su kullanımı ve göl depolamasındaki değişimler gibi bileşenleri içeren tam bir göl su bütçesini temsil etmemektedir. Göllerin iklim değişikliğine verdikleri yanıtların bölgesel koşullara ve göllerin derinlik, yüzey alanı ve karışım rejimi gibi fiziksel özelliklerine göre farklılaşabildiği literatürde de vurgulanmaktadır (Woolway vd., 2020). Aynı zamanda bu tezde hidroklimatik göstergeler ile göl su yüzey alanı değişimleri arasında doğrudan eşleştirme yapılmamış, korelasyon veya nedensellik ilişkisi kurulmamıştır. Burdur Gölü

üzerine gerçekleştirilen önceki bir çalışmada göl seviyesindeki ve yüzey alanındaki azalma iklimsel ve insan kaynaklı etkiler birlikte ele alınarak değerlendirilmiştir (Davraz vd., 2019). Ancak bu tez kapsamında kullanılan veriler, belirlenen alan kayıplarını tek bir iklimsel veya insan kaynaklı etkene bağlamak amacıyla kullanılmamıştır. Dolayısıyla hidroklimatik bulgular, su yüzey alanı değişimlerinin çevresel bağlamını tanımlayan destekleyici göstergeler olarak değerlendirilmiştir.

5.7. Çalışmanın Güçlü Yönleri ve Sınırlılıkları

Çalışmanın temel güçlü yönü, farklı büyüklük ve oluşum özelliklerine sahip 10 gölün 1984–2025 yılları arasında ortak mevsimsel gözlem penceresi, veri işleme akışı, spektral indeks, eşikleme ve alan hesaplama yaklaşımıyla değerlendirilmesidir. 2026 Nisan–Haziran dönemi ise uzun dönemli seriden ayrı olarak, güncel bir gözlem dönemi olarak ele alınmıştır. Google Earth Engine’in geniş uydu veri kataloğunu bulut tabanlı işlem kapasitesiyle birleştirmesi, aynı kod tabanlı iş akışının farklı göl ve gözlem yıllarına uygulanmasını kolaylaştırmıştır (Gorelick vd., 2017). Dinamik eşikleme, bütün göl ve yıllarda tek bir sabit eşik kullanmak yerine görüntüye özgü eşiklerin belirlenmesini sağlamıştır. Bağımsız doğrulama, Sentinel-2 uydu verisi ile destekleyici kontrol ve dört farklı makine öğrenmesi modelinin uygulanması, sonuçların farklı yöntemlerle denetlenmesine de katkıda bulunmuştur. Landsat ve Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak GEE platformu aracılığıyla göl su yüzeyi alanları ve değişimleri otomatik ve başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Çalışmanın temel sınırlılıkları; 2026 verilerinin ana seriden farklı bir mevsimsel döneme ait olması, optik görüntülerde bulut ve karışık piksel etkilerinin bulunması, sazlık ve sığ su alanlarının sınıflandırmayı zorlaştırması ve tuzlu göl tabanlarında spektral karışım oluşmasıdır. Su yüzey alanı serisi, göllerin su seviyesini veya hacmini doğrudan göstermemekte; alan ile seviye ve hacim arasındaki ilişki göl tabanı morfolojisine göre değişebilmektedir. Hidroklimatik değişkenlerle doğrudan ilişki, korelasyon veya nedensellik analizi yapılmadığından, belirlenen alan değişimlerinin nedenleri bu çalışma kapsamında sınanmamıştır. Eğilim temelli projeksiyonların yağış, buharlaşma, yeraltı suyu beslenimi, su kullanımı ve yönetim müdahaleleri gibi fiziksel süreçleri içermemesi de geleceğe ilişkin değerlerin yorumlanmasındaki önemli bir sınırlılıktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında incelenen farklı özelliklere sahip 10 gölün 1984–2025 yılları arasındaki Temmuz–Eylül dönemindeki su yüzey alanı değişimleri, büyüklük ve süreklilik bakımından tek tip bir örüntü göstermemiştir. Akşehir Gölü ve Tuz Gölü en yüksek oransal kayıplarla öne çıkarken, Burdur Gölü düzenli bir daralma, Eber Gölü ise güçlü dönemsel genişleme ve daralmalar göstermiştir. Van Gölü ve İznik Gölü, başlangıç ve bitiş alanları arasındaki değişim bakımından görece kararlı kalmıştır. 2026 yılı Nisan–Haziran dönemine ait sonuçlar güncel durumu göstermek amacıyla sunulmuş ve uzun dönemli eğilim analizlerine dâhil edilmemiştir.

MNDWI temelli dinamik Otsu eşikleme yaklaşımı, bağımsız doğrulama sonuçlarında genel olarak yüksek sınıflandırma başarısı göstermiştir. Bunun yanı sıra, tuzlu, çok sığ, sazlıkla kaplı, parçalı veya kuruma koşullarından etkilenen göllerde otomatik sonuçların göle özgü kalite kontrolüyle desteklenmesi gerektiği görülmüştür. Makine öğrenmesi modellerinin toplu değerlendirmesinde RO modeli piksel tabanlı genel doğruluk, Kappa, F1 skoru ve IoU ölçütleri bakımından en yüksek sonuçları verirken, KNN modeli dinamik Otsu alanlarına göre en düşük ortalama mutlak alan hatasını üretmiştir. Bu farklılık, piksel sınıflandırma başarısı ile toplam su yüzey alanı yakınlığının aynı değerlendirme boyutunu temsil etmediğini göstermiştir. Bu nedenle uzun dönemli göl izleme çalışmalarında alan sonuçlarının, bağımsız doğrulama ölçütlerinin, su maskelerinin mekânsal dağılımının ve model performansının birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Google Earth Engine tabanlı iş akışı, farklı büyüklük ve özelliklere sahip çok sayıda gölün ortak bir veri işleme ve alan hesaplama çerçevesinde incelenmesine olanak sağlamıştır. Oluşturulan kod tabanlı yapı, uzun dönemli çoklu göl izleme çalışmalarında uygulanabilir, yeniden üretilebilir ve yeni görüntülerle güncellenebilir bir yaklaşım sunmuştur. Hidroklimatik değerlendirmelerde, 1984–2025 dönemi ortalamalarına göre P–PET değerlerinin negatif ve P/PET oranlarının 1’in altında olduğu belirlenmiştir.

Uzun dönemli göl izleme çalışmalarında ortak mevsimsel gözlem penceresinin korunması ve farklı mevsimsel dönemlere ait güncel sonuçların ana eğilim serisinden ayrı değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, mevsimsel su yayılımındaki doğal farklılıkların uzun dönemli değişim olarak yorumlanma riskini azaltacaktır. Dinamik eşikleme sonuçları, özellikle tuzlu, çok sığ, sazlıkla kaplı veya parçalı su yüzeylerine sahip göllerde otomatik kalite kontrol adımlarıyla desteklenmelidir. Tuz Gölü benzeri

özellikteki alanlarda tuz kabuğu, nemli göl tabanı, kuru taban ve sığ su yüzeylerini ayrı sınıflar olarak ele alan çok sınıflı veya nesne tabanlı yaklaşımlar önerilebilir. Eber ve Manyas gibi sucul bitki örtüsünden etkilenen göllerde ise açık su, sucul bitki örtüsü ve nemli zemin sınıflarının ayrı sınıflar değerlendirilmesi yararlı olacaktır.

Eğitim ve test örnekleri birbirinden bağımsız tutulmalıdır. Referans örnekleri farklı uzmanlar tarafından kontrol edilmeli ve yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntülerle desteklenmelidir. Ayrıca ortak model parametreleriyle elde edilen sonuçlar ile göle özgü ayarlamalarla elde edilen sonuçlar ayrı ayrı karşılaştırılmalıdır. Akşehir, Tuz ve Burdur gölleri yüksek alan kayıpları nedeniyle, Eber Gölü ise güçlü yıllar arası değişkenliği nedeniyle daha sık izlenmelidir. Seyrek ve çoğunlukla beş yıllık gözlem serisi uzun dönemli karşılaştırma için genel bir çerçeve sunmakla birlikte, kritik göllerde yıllık ve mevsim içi analizlerin gerçekleştirilmesi değişimin başlangıç zamanını, süresini ve sürekliliğini daha ayrıntılı biçimde ortaya koyabilir. Göl yönetimi uygulamalarında yalnızca toplam su yüzey alanı değil, kıyı geri çekilmesinin ve genişlemesinin mekânsal dağılımı da dikkate alınmalıdır. Sulak alanlara, sazlıklara, yerleşimlere, tarım alanlarına ve koruma bölgelerine komşu kıyı kesimleri ayrı izleme bölgeleri olarak tanımlanabilir. Bu bölgeler için üretilen dönemsel değişim sonuçları, ilgili kurumların karar destek ve koruma süreçlerine aktarılabilir. Gelecekteki çalışmalarda, seyrek ve çoğunlukla beş yıllık gözlemlerin yanı sıra yıllık, mevsimsel veya aylık su yüzey alanı serileri de oluşturulmalıdır. Böylece uzun dönemli eğilimler ile kısa süreli hidrolojik ve mevsimsel dalgalanmalar daha ayrıntılı biçimde birbirinden ayrılabilir. Bu tezde, hidroklimatik göstergeler ile göl su yüzey alanı arasında doğrudan bir ilişki kurulmamıştır. Gelecek araştırmalarda gecikmeli etkileri, birden fazla hidroklimatik değişkeni, yüzey ve yeraltı suyu etkileşimlerini ve havza içindeki su kullanımlarını dikkate alan süreç temelli veya istatistiksel modeller geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Acar, R. U. ve Zengin, E. (2025). Monitoring wetland transformations in Lake Eber over a decade using remote sensing. *Akdeniz Mühendislik Dergisi*, 3(1), 11–19. <https://izlik.org/JA49KG23CN>
- Acharya, T. D., Subedi, A. ve Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 18(8), 2580. <https://doi.org/10.3390/s18082580>
- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A. ve Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6_part_2), 2283–2297. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283
- Ahmadov, E. (2020). Water resources management to achieve sustainable development in Azerbaijan. *Sustainable Futures*, 2, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100030>
- Akkuş, M. (2026). Climate change-driven shoreline dynamics and sustainable fisheries: Future projections from the Lake Van case (Türkiye). *Sustainability*, 18(3), 1611. <https://doi.org/10.3390/su18031611>
- Albarqouni, M. M. Y., Yagmur, N., Bektas Balcik, F. ve Sekertekin, A. (2022). Assessment of spatio-temporal changes in water surface extents and lake surface temperatures using Google Earth Engine for Lakes Region, Türkiye. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 407. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070407>
- Albay, M. ve Akçaalan, R. (2008). Effects of water quality and hydrologic drivers on periphyton colonization on *Sparganium erectum* in two Turkish lakes with different mixing regimes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 171–181. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0069-5>
- Altan Aydın, F. ve Doğu, A. F. (2018). Göllerde seviye değişimleri ve nedenleri: Van Gölü örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 41, 183–208. <https://izlik.org/JA92CJ95SL>
- Aslan, N. ve Koç-San, D. (2021). Investigation of the changes of lake surface temperatures and areas: Case study of Burdur and Eğirdir Lakes, Turkey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021, 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-299-2021>

Atiz, O. F. ve Durduran, S. (2025). Assessing long-term hydrological dynamics and water quality using Google Earth Engine: A case study of Ilgın Lake (1985–2024). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W13-2025, 33–39. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W13-2025-33-2025>

Aydın, F., Erhat, E. ve Türkeş, M. (2020). Impact of climate variability on the surface of Lake Tuz (Turkey), 1985–2016. *Regional Environmental Change*, 20, 68. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01656-z>

Bahadır, M. ve Özdemir, M. A. (2011). Climate trend analysis of the level changes of Iznik Lake in Turkey. *Journal of Biology and Life Sciences*, 2(3), 4–13. <https://hdl.handle.net/11630/8164>

Banerjee, P. (2025). Long-term monitoring and forecasting of glacial lake dynamics using Landsat time series data, Google Earth Engine, machine learning, and geospatial analysis. *Discover Geoscience*, 3, 159. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00280-w>

Belgiu, M. ve Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

Beyer, K., Goldstein, J., Ramakrishnan, R. ve Shaft, U. (1999). When is “nearest neighbor” meaningful? İçinde C. Beeri ve P. Buneman (Ed.), *Database theory—ICDT ’99* (Lecture Notes in Computer Science, Cilt 1540, ss. 217–235). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-49257-7_15

Bilgilioğlu, B. B., Erten, E. ve Musaoğlu, N. (2021). Analysis of salt lake volume dynamics using Sentinel-1 based SBAS measurements: A case study of Lake Tuz, Turkey. *Remote Sensing*, 13(14), 2701. <https://doi.org/10.3390/rs13142701>

Bishop-Taylor, R., Sagar, S., Lymburner, L., Alam, I. ve Sixsmith, J. (2019). Sub-pixel waterline extraction: Characterising accuracy and sensitivity to indices and spectra. *Remote Sensing*, 11(24), 2984. <https://doi.org/10.3390/rs11242984>

Bonnema, M., David, C. H., Frasson, R. P. d. M., Oaida, C. ve Yun, S.-H. (2022). The global surface area variations of lakes and reservoirs as seen from satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL098987. <https://doi.org/10.1029/2022GL098987>

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. ve Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth.

- Claverie, M., Vermote, E. F., Franch, B. ve Masek, J. G. (2015). Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 169, 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.030>
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Cortes, C. ve Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20, 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Cover, T. M. ve Hart, P. E. (1967). Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(1), 21–27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>
- Çağlayan, E. B., Erel, F., Samur, E. B., Deniz, M., Mobariz, M. A. ve Kaplan, G. (2020). Uzaktan algılama teknikleri ile Akşehir Gölü’ndeki alansal değişiminin izlenmesi. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 2(2), 70–76. <https://izlik.org/JA38GG87ZN>
- Davraz, A., Şener, E. ve Şener, Ş. (2019). Evaluation of climate and human effects on the hydrology and water quality of Burdur Lake, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 158, 103569. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103569>
- Demir, V. (2022). Trend analysis of lakes and sinkholes in the Konya Closed Basin, in Turkey. *Natural Hazards*, 112, 2873–2912. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05327-6>
- Domej, G., Pluta, K. ve Ewertowski, M. (2025). CataEx: A multi-task export tool for the Google Earth Engine data catalog. *Environmental Modelling & Software*, 183, 106227. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106227>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. ve Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA’s optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Ekercin, S. (2007). *Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri entegrasyonu ile Tuz Gölü ve yakın çevresinin zamana bağlı değişim analizi* [Doktora tezi, İstanbul Teknik

Üniversitesi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Açık Erişim Sistemi.
<http://hdl.handle.net/11527/1673>

Erbaş, N. F. ve Varlık, A. (2025). Determination of surface area change with remote sensing: The case of Salt Lake. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 7(1), 11–22. <https://doi.org/10.56130/tucbis.1679860>

Feng, L., Pi, X., Luo, Q. ve Li, W. (2023). Reconstruction of long-term high-resolution lake variability: Algorithm improvement and applications in China. *Remote Sensing of Environment*, 297, 113775. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113775>

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R. ve Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)

Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the Kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>

Foody, G. M. ve Mathur, A. (2004). Toward intelligent training of supervised image classifications: Directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.017>

Frazier, P. S. ve Page, K. J. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(12), 1461–1467.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. ve Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Goksel, C., Mercan, D. E., Kabdasli, S., Bektas, F. ve Seker, D. Z. (2004). Definition of sensitive areas in a lakeshore by using remote sensing and GIS. *Fresenius Environmental Bulletin*, 13(9), 860–864.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. ve Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Günen, M. A. ve Atasever, U. H. (2024). Remote sensing and monitoring of water resources: A comparative study of different indices and thresholding methods. *Science of the Total Environment*, 926, 172117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172117>

Güngör, R., Yılmaz, O. S., Şanlı, F. B. ve Ateş, A. M. (2022). Investigation of spatial change in lake surface with Google Earth Engine: Example of Marmara Lake. *Advanced Remote Sensing*, 2(1), 8–15.

Halder, R. K., Uddin, M. N., Uddin, M. A., Aryal, S. ve Khraisat, A. (2024). Enhancing K-nearest neighbor algorithm: A comprehensive review and performance analysis of modifications. *Journal of Big Data*, 11, 113. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00973-y>

Healy, R. W., Winter, T. C., LaBaugh, J. W. ve Franke, O. L. (2007). *Water budgets: Foundations for effective water-resources and environmental management* (U.S. Geological Survey Circular 1308). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1308/>

Hemati, M., Mahdianpari, M., Shiri, H. ve Mohammadimanesh, F. (2024). Comprehensive Landsat-based analysis of long-term surface water dynamics over wetlands and waterbodies in North America. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 50(1), 2293058. <https://doi.org/10.1080/07038992.2023.2293058>

Herndon, K., Muench, R., Cherrington, E. A. ve Griffin, R. (2020). An assessment of surface water detection methods for water resource management in the Nigerien Sahel. *Sensors*, 20(2), 431. <https://doi.org/10.3390/s20020431>

Hestir, E. L., Brando, V. E., Bresciani, M., Giardino, C., Matta, E., Villa, P. ve Dekker, A. G. (2015). Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission. *Remote Sensing of Environment*, 167, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023>

Huang, C., Chen, Y., Zhang, S. ve Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Jahangeer, J., Joshi, P., Kapoor, A. ve Tang, Z. (2025). A review of AI-driven Google Earth Engine applications in surface water monitoring, assessment, and management. *Discover Geoscience*, 3, 140. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00255-x>

Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4. bs.). Pearson.

Ji, L., Zhang, L. ve Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>

Jiménez-Bonilla, A., Rodríguez-Rodríguez, M., Yanes, J. L. ve Gázquez, F. (2025). Impact of climate change on permanent lakes in a semiarid region: Southwestern Mediterranean basin (S Spain). *Science of the Total Environment*, 961, 178305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178305>

Kahraman, S. ve Öztürk, M. Z. (2025). Türkiye göl çalışmalarında uzaktan algılamanın yeri: Bibliyometrik bir yaklaşım. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 15, 43–54. <https://doi.org/10.46453/jader.1719133>

Kale, M. M. ve Erişmiş, M. (2024). Eğirdir Gölü alansal değişiminin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla analizi. *International Journal of Geography and Geography Education*, 52, 122–140. <https://doi.org/10.32003/igge.1380588>

Kaya, Ö. A. ve Kaplan, G. (2021). Uzaktan algılama yöntemleri ile Burdur Gölü’ndeki alansal değişiminin belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.21324/dacd.760805>

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4. bs.). Charles Griffin.

Khatami, R., Mountrakis, G. ve Stehman, S. V. (2016). A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment*, 177, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>

Kuo, B.-C., Ho, H.-H., Li, C.-H., Hung, C.-C. ve Taur, J.-S. (2014). A kernel-based feature selection method for SVM with RBF kernel for hyperspectral image classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1), 317–326. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2262926>

Lai, L., Liu, Y., Zhang, Y., Cao, Z., Yin, Y., Chen, X., Jin, J. ve Wu, S. (2024). Long-term spatiotemporal mapping in lacustrine environment by remote sensing: Review with case study, challenges, and future directions. *Water Research*, 267, 122457. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122457>

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. ve Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7. bs.). Wiley.

Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., Sun, B. ve Zhang, X. (2013). A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530–5549. <https://doi.org/10.3390/rs5115530>

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. ve Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4. bs.). Wiley.

Mandanici, E. ve Bitelli, G. (2016). Preliminary comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for a combined use. *Remote Sensing*, 8(12), 1014. <https://doi.org/10.3390/rs8121014>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

Masoud, A. A. (2026). GEE-HydroMonitor: A Google Earth Engine software for multi-sensor hydrometric monitoring of surface water reservoirs. *Environmental Modelling & Software*, 195, 106761. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106761>

Maxwell, A. E., Warner, T. A. ve Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9), 2784–2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>

Mayr, S., Klein, I., Rutzinger, M. ve Kuenzer, C. (2021). Systematic water fraction estimation for a global and daily surface water time-series. *Remote Sensing*, 13(14), 2675. <https://doi.org/10.3390/rs13142675>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Mellor, A., Boukir, S., Haywood, A. ve Jones, S. (2015). Exploring issues of training data imbalance and mislabelling on random forest performance for large area land cover classification using the ensemble margin. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.014>

Mondejar, J. P. ve Tongco, A. F. (2019). Near infrared band of Landsat 8 as water index: A case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines. *Sustainable Environment Research*, 29, 16. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0016-5>

Mountrakis, G., Im, J. ve Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C. ve Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

Mutlu, A. Z., Kazancı, B., Özçetin, A. Y. ve Sarıyılmaz, F. B. (2020). Akşehir Gölü zamansal değişiminin bant oranlama yöntemleri ile belirlenmesi. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 2(1), 22–28. <https://izlik.org/JA23YB69BY>

Noi, P. T. ve Kappas, M. (2018). Comparison of random forest, K-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*, 18(1), 18. <https://doi.org/10.3390/s18010018>

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. ve Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

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

Örmeci, C. ve Ekercin, S. (2007). An assessment of water reserve changes in Salt Lake, Turkey, through multi-temporal Landsat imagery and real-time ground surveys. *Hydrological Processes*, 21, 1424–1435. <https://doi.org/10.1002/hyp.6355>

Özbayram, E. G., Köker, L., Akçaalan, R., Aydın, F., Ertürk, A., İnce, O. ve Albay, M. (2021). Contrasting the water quality and bacterial community patterns in shallow and deep lakes: Manyas vs. Iznik. *Environmental Management*, 67(3), 506–512. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01357-7>

Öztürk, M. Z., Çetinkaya, G. ve Aydın, S. (2017). Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'nin iklim tipleri. *Coğrafya Dergisi*, 35, 17–27. <https://doi.org/10.26650/JGEOG295515>

Pan, F., Xi, X. ve Wang, C. (2020). A comparative study of water indices and image classification algorithms for mapping inland surface water bodies using Landsat imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1611. <https://doi.org/10.3390/rs12101611>

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N. ve Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Powers, D. M. W. (2011). Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2(1), 37–63. <http://hdl.handle.net/2328/27165>

Ramezan, C. A., Warner, T. A., Maxwell, A. E. ve Price, B. S. (2021). Effects of training set size on supervised machine-learning land-cover classification of large-area high-resolution remotely sensed data. *Remote Sensing*, 13(3), 368. <https://doi.org/10.3390/rs13030368>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. ve Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. İçinde *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (ss. 309–317). National Aeronautics and Space Administration.

Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S. ve Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 185, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>

Runge, J., Bathiany, S., Bollt, E., Camps-Valls, G., Coumou, D., Deyle, E., Glymour, C., Kretschmer, M., Mahecha, M. D., Muñoz-Marí, J., van Nes, E. H., Peters, J., Quax, R., Reichstein, M., Scheffer, M., Schölkopf, B., Spirtes, P., Sugihara, G., Sun, J., . . . Zscheischler, J. (2019). Inferring causation from time series in Earth system sciences. *Nature Communications*, 10, 2553. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10105-3>

Sabuncu, A. (2020). Burdur Gölü kıyı şeridindeki değişiminin uzaktan algılama ile haritalanması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 623–633. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.711653>

Sarp, G. ve Özçelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, 11(3), 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2016.04.005>

Schwatke, C., Dettmering, D. ve Seitz, F. (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs12101606>

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Shao, G., Tang, L. ve Liao, J. (2019). Overselling overall map accuracy misinforms about research reliability. *Landscape Ecology*, 34, 2487–2492. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00916-6>

Sheng, Y., Song, C., Wang, J., Lyons, E. A., Knox, B. R., Cox, J. S. ve Gao, F. (2016). Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 185, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.041>

Sobek, S., Nisell, J. ve Fölster, J. (2011). Predicting the volume and depth of lakes from map-derived parameters. *Inland Waters*, 1(3), 177–184. <https://doi.org/10.5268/IW-1.3.426>

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P. ve Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230–244. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)

Stehman, S. V. ve Foody, G. M. (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111199. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>

Sterner, R. W., Keeler, B., Polasky, S., Poudel, R., Rhude, K. ve Rogers, M. (2020). Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosystem Services*, 41, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101046>

Sun, W., Du, B. ve Xiong, S. (2017). Quantifying sub-pixel surface water coverage in urban environments using low-albedo fraction from Landsat imagery. *Remote Sensing*, 9(5), 428. <https://doi.org/10.3390/rs9050428>

Sun, Y., Wang, D., Li, L., Ning, R., Yu, S. ve Gao, N. (2024). Application of remote sensing technology in water quality monitoring: From traditional approaches to artificial intelligence. *Water Research*, 267, 122546. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122546>

Şener, E., Davraz, A. ve Şener, Ş. (2010). Investigation of Akşehir and Eber Lakes (SW Turkey) coastline change with multitemporal satellite images. *Water Resources Management*, 24, 727–745. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9467-5>

Taş, M. A. ve Akpınar, E. (2021). Burdur havzasındaki göllerde yaşanan seviye değişikliklerinin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama ile tespiti. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 26(46), 37–54. <https://doi.org/10.17295/ataunidcd.984268>

Ustuner, M., Balik Sanli, F. ve Dixon, B. (2015). Application of support vector machines for landuse classification using high-resolution RapidEye images: A sensitivity

analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 48(1), 403–422.
<https://doi.org/10.5721/EuJRS20154823>

U.S. Geological Survey. (t.y.-a). *Landsat Collection 2 Level-2 science products*. 17 Temmuz 2026 tarihinde <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products> adresinden erişilmiştir.

U.S. Geological Survey. (t.y.-b). *Landsat Collection 2 quality assessment bands*. 18 Temmuz 2026 tarihinde <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-quality-assessment-bands> adresinden erişilmiştir.

Uzun, M. (2024). Analysis of Manyas Lake surface area and shoreline change over various periods with DSAS tool. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 6(1), 35–56.
<https://doi.org/10.51489/tuzal.1443490>

Villa, P., Mousivand, A. ve Bresciani, M. (2014). Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 113–127.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.017>

Wang, E., Zhang, H., Wang, J., Cao, W. ve Li, D. (2025). Simulation and sensitivity analysis of remote sensing reflectance for optically shallow water bathymetry. *Remote Sensing*, 17(8), 1384. <https://doi.org/10.3390/rs17081384>

Wasserstein, R. L. ve Lazar, N. A. (2016). The ASA’s statement on p-values: Context, process, and purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129–133.
<https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>

Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O’Reilly, C. M. ve Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 388–403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J. ve Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R. ve Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>

Wurtsbaugh, W. A., Miller, C., Null, S. E., DeRose, R. J., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F. ve Moore, J. (2017). Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, 10(11), 816–821. <https://doi.org/10.1038/ngeo3052>

Xie, H., Luo, X., Xu, X., Pan, H. ve Tong, X. (2016). Automated subpixel surface water mapping from heterogeneous urban environments using Landsat 8 OLI imagery. *Remote Sensing*, 8(7), 584. <https://doi.org/10.3390/rs8070584>

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Yagmur, N., Bilgilioglu, B. B., Dervisoglu, A., Musaoglu, N. ve Tanik, A. (2021). Long and short-term assessment of surface area changes in saline and freshwater lakes via remote sensing. *Water and Environment Journal*, 35(1), 107–122. <https://doi.org/10.1111/wej.12608>

Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétau, J.-F., Wada, Y. ve Berge-Nguyen, M. (2023). Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, 380(6646), 743–749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>

Yıldız, M. C. (2025). Salda Gölü'nde 1995–2025 yılları arasında yüzey su alanı ve kıyı şeridi değişimlerinin uydu verileri kullanılarak analizi. *Türkiye Teknik Bilimler ve İnovasyon Dergisi*, 1(1), 44–50. <https://izlik.org/JA87MT88JR>

Yue, S., Pilon, P. ve Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1–4), 254–271. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)

Zhang, Y., Guindon, B. ve Cihlar, J. (2002). An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 82(2–3), 173–187. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00034-2)

Zhu, Z. ve Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028>

Zou, Z., Dong, J., Menarguez, M. A., Xiao, X., Qin, Y., Doughty, R. B., Hooker, K. V. ve Hambright, K. D. (2017). Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984–2015. *Science of the Total Environment*, 595, 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.259>

EKLER

Ek 1. Makine Öğrenmesi Sonuçları

Tablo 1. Göl ve Model Bazlı Makine Öğrenmesi Doğruluk Özeti

Göl	Model	Geçerli yıl	Doğruluk (%)	Kappa	Keskinlik	Duyarlılık	F1 skoru	IoU
Van Gölü	RO	10	99,70	0,9940	0,9980	0,9960	0,9970	0,9940
Van Gölü	DVM-RTF	10	99,60	0,9920	0,9980	0,9940	0,9960	0,9920
Van Gölü	CART	10	99,40	0,9880	0,9980	0,9900	0,9939	0,9880
Van Gölü	KNN	10	99,10	0,9820	0,9829	1,0000	0,9912	0,9829
Tuz Gölü	RO	10	99,20	0,9840	0,9940	0,9900	0,9919	0,9844
Tuz Gölü	DVM-RTF	10	98,40	0,9680	0,9824	0,9860	0,9841	0,9699
Tuz Gölü	CART	10	99,40	0,9880	0,9959	0,9920	0,9939	0,9882
Tuz Gölü	KNN	10	98,30	0,9660	0,9823	0,9840	0,9830	0,9670
Beyşehir Gölü	RO	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Beyşehir Gölü	DVM-RTF	10	99,90	0,9980	1,0000	0,9980	0,9990	0,9980
Beyşehir Gölü	CART	10	99,60	0,9920	1,0000	0,9920	0,9959	0,9920
Beyşehir Gölü	KNN	10	99,90	0,9980	1,0000	0,9980	0,9990	0,9980
Eğirdir Gölü	RO	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Eğirdir Gölü	DVM-RTF	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Eğirdir Gölü	CART	10	99,30	0,9860	0,9883	0,9980	0,9931	0,9864
Eğirdir Gölü	KNN	10	99,90	0,9980	0,9980	1,0000	0,9990	0,9980
Burdur Gölü	RO	10	97,00	0,9400	1,0000	0,9400	0,9571	0,9400
Burdur Gölü	DVM-RTF	10	97,30	0,9460	1,0000	0,9460	0,9639	0,9460
Burdur Gölü	CART	10	96,80	0,9360	0,9962	0,9400	0,9552	0,9362
Burdur Gölü	KNN	10	97,20	0,9440	1,0000	0,9440	0,9611	0,9440
İznik Gölü	RO	10	99,90	0,9980	1,0000	0,9980	0,9990	0,9980
İznik Gölü	DVM-RTF	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
İznik Gölü	CART	10	99,00	0,9800	1,0000	0,9800	0,9894	0,9800
İznik Gölü	KNN	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Manyas Gölü	RO	10	99,90	0,9980	0,9980	1,0000	0,9990	0,9980
Manyas Gölü	DVM-RTF	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Manyas Gölü	CART	10	99,70	0,9940	0,9962	0,9980	0,9970	0,9942
Manyas Gölü	KNN	10	100,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Salda Gölü	RO	10	99,70	0,9940	0,9960	0,9980	0,9970	0,9941
Salda Gölü	DVM-RTF	10	99,50	0,9900	0,9903	1,0000	0,9951	0,9903
Salda Gölü	CART	10	99,60	0,9920	0,9941	0,9980	0,9960	0,9922
Salda Gölü	KNN	10	99,90	0,9980	0,9980	1,0000	0,9990	0,9980
Eber Gölü	RO	10	97,60	0,9520	0,9826	0,9700	0,9754	0,9531
Eber Gölü	DVM-RTF	10	97,70	0,9540	0,9846	0,9700	0,9764	0,9551
Eber Gölü	CART	10	97,90	0,9580	0,9823	0,9760	0,9786	0,9590
Eber Gölü	KNN	10	97,80	0,9560	0,9882	0,9680	0,9772	0,9567
Akşehir Gölü	RO	9	99,56	0,9911	0,9956	0,9956	0,9956	0,9912
Akşehir Gölü	DVM-RTF	9	99,78	0,9956	1,0000	0,9956	0,9978	0,9956
Akşehir Gölü	CART	9	99,22	0,9844	0,9912	0,9933	0,9923	0,9848
Akşehir Gölü	KNN	9	99,22	0,9844	0,9978	0,9867	0,9921	0,9845

Ek 1. Devamı

Tablo 2. Model Bazlı Toplu Hata Matrisi Kayıtları

Model	Geçerli kayıt	Test örneği	TN	FP	FN	TP
RO	99	9.900	4.932	18	56	4.894
DVM-RTF	99	9.900	4.927	23	55	4.895
CART	99	9.900	4.921	29	71	4.879
KNN	99	9.900	4.923	27	59	4.891

Tablo 3. Model Alanları ile Dinamik Otsu Alanlarının Göl Bazlı Özeti

Göl	Model	Kayıt	MAE (km ²)	Medyan mutlak fark (%)	Ortalama mutlak fark (%)	Yanlılık (km ²)
Van Gölü	RO	10	21,172	0,425	0,592	-21,172
Van Gölü	DVM-RTF	10	23,145	0,336	0,649	-22,022
Van Gölü	CART	10	25,050	0,630	0,702	-25,050
Van Gölü	KNN	10	4,227	0,076	0,119	-0,240
Tuz Gölü	RO	10	28,461	6,128	17,035	16,609
Tuz Gölü	DVM-RTF	10	34,563	8,237	17,929	28,353
Tuz Gölü	CART	10	26,147	3,326	18,514	12,401
Tuz Gölü	KNN	10	34,273	5,998	22,186	28,504
Beyşehir Gölü	RO	10	8,543	0,617	1,323	-5,245
Beyşehir Gölü	DVM-RTF	10	6,751	0,379	1,046	-4,738
Beyşehir Gölü	CART	10	15,655	1,026	2,449	-15,123
Beyşehir Gölü	KNN	10	4,605	0,263	0,712	-2,836
Eğirdir Gölü	RO	10	1,749	0,252	0,381	-0,956
Eğirdir Gölü	DVM-RTF	10	1,401	0,095	0,304	-1,181
Eğirdir Gölü	CART	10	3,557	0,258	0,784	-3,325
Eğirdir Gölü	KNN	10	0,639	0,077	0,140	-0,230
Burdur Gölü	RO	10	1,659	0,189	0,921	-1,519
Burdur Gölü	DVM-RTF	10	1,682	0,375	0,976	-1,406
Burdur Gölü	CART	10	3,525	0,603	2,293	-0,972
Burdur Gölü	KNN	10	1,479	0,114	0,799	-1,263
İznik Gölü	RO	10	0,552	0,107	0,184	-0,060
İznik Gölü	DVM-RTF	10	0,296	0,060	0,099	0,099
İznik Gölü	CART	10	3,358	0,457	1,125	-3,175
İznik Gölü	KNN	10	0,561	0,173	0,188	0,561
Manyas Gölü	RO	10	1,270	0,250	0,843	-0,913
Manyas Gölü	DVM-RTF	10	0,883	0,145	0,585	-0,763
Manyas Gölü	CART	10	2,560	0,283	1,698	-2,443
Manyas Gölü	KNN	10	0,728	0,134	0,483	-0,515
Salda Gölü	RO	10	0,597	1,248	1,360	-0,057
Salda Gölü	DVM-RTF	10	0,657	1,597	1,502	-0,078
Salda Gölü	CART	10	0,834	1,880	1,901	-0,196
Salda Gölü	KNN	10	0,346	0,645	0,785	-0,298
Eber Gölü	RO	10	13,702	63,689	91,039	11,274
Eber Gölü	DVM-RTF	10	12,881	63,275	90,515	11,200
Eber Gölü	CART	10	14,203	57,347	110,848	10,274
Eber Gölü	KNN	10	11,834	50,992	80,613	10,571
Akşehir Gölü	RO	9	8,095	3,699	8,274	7,204
Akşehir Gölü	DVM-RTF	9	10,659	8,030	8,694	3,303
Akşehir Gölü	CART	9	10,457	4,774	8,293	9,140
Akşehir Gölü	KNN	9	6,618	1,596	7,735	1,677

Tablo 4. Modellerin Ayrıntılı Toplu Performans Ölçütleri

Model	Doğruluk (%)	Kappa	Precision	Recall	Specificity	F1	IoU	MAE (km ²)	RMSE (km ²)
RO	99,25	0,9851	0,9963	0,9887	0,9964	0,9925	0,9851	8,585	20,176
DVM-RTF	99,21	0,9842	0,9953	0,9889	0,9954	0,9921	0,9843	9,278	21,973
CART	98,99	0,9798	0,9941	0,9857	0,9941	0,9899	0,9799	10,536	21,374
KNN	99,13	0,9826	0,9945	0,9881	0,9945	0,9913	0,9827	6,530	19,693

Örnekleme ve Girdi Değişkeni Kontrolleri

Makine öğrenmesi modellerinde blue, green, red, nir, swir1, swir2, NDVI, NDWI, MNDWI ve AWEI olmak üzere 10 girdi değişkeni kullanılmıştır. Tüm geçerli göl–yıl kayıtlarında eğitim örnekleme 100 su ve 100 kara, bağımsız test örnekleme ise 50 su ve 50 kara olacak şekilde uygulanmıştır.

Akşehir Gölü’nde 2025 yılı Temmuz–Eylül döneminde güvenilir bir açık su sınıfı belirlenemediğinden dengeli iki sınıflı örnekleme yapılmamış; RO, DVM-RTF, CART ve KNN modelleri uygulanmamıştır. Bu kayıt, tüm toplu makine öğrenmesi hesaplarının dışında tutulmuştur.

Tablo 5. Girdi Değişkeni Kontrol Göstergeleri ve Değerleri

Kontrol göstergesi	Değer
Girdi değişkeni sayısı	10
Geçerli her kayıt için eğitim örneği	200 (100 su + 100 kara)
Geçerli her kayıt için bağımsız test örneği	100 (50 su + 50 kara)
Her model için geçerli göl–yıl kaydı	99
Her model için toplu test örneği	9.900

Ek 2. Yapay Zekâ Kullanımı Beyan Formu

YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde yapay zekâ destekli araçlardan yalnızca yazım ve imla hatalarının kontrol edilmesi ve düzeltilmesi, tablo ve grafik yorumlarını güçlendirmek ve bazı bölümlerde teknik terimlerin üsluba uygun biçimde kullanılıp kullanılmadığının kontrolü amacıyla yararlanılmıştır.

Yapay zekâ destekli araçlar; çalışmanın araştırma problemi, amacı, kapsamı, yöntemsel kurgusu, veri üretimi, analiz sonuçları ve bilimsel yorumlarının yerine geçecek şekilde kullanılmamıştır. Tez kapsamında kullanılan uydu verileri, Google Earth Engine analizleri, spektral indeks hesaplamaları, su yüzeyi alanı değerleri, trend analizleri, hidroklimatik değerlendirmeler, senaryo analizleri ve makine öğrenmesi sınıflandırma sonuçları araştırmacı tarafından yürütülen analizlere dayanmaktadır.

Yapay zekâ destekli araçlardan elde edilen öneriler, doğrudan ve denetimsiz biçimde kullanılmamış; tez kapsamı, yöntemsel tutarlılık, akademik doğruluk, kaynak gösterme gereklilikleri ve bilimsel etik ilkeleri doğrultusunda araştırmacı tarafından kontrol edilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada yer alan tüm verilerin doğruluğu, analiz sonuçlarının uygunluğu, kaynak kullanımının geçerliliği ve nihai metnin akademik sorumluluğu tamamen araştırmacıya aittir.

Bu kapsamda, yapay zekâ destekli araçların tez çalışmasında yalnızca yardımcı bir yazım, düzenleme ve kontrol aracı olarak kullanıldığını; çalışmanın özgün bilimsel katkısının, analizlerinin, değerlendirmelerinin ve sonuçlarının araştırmacı sorumluluğunda hazırlandığını beyan ederim.

Adı Soyadı: Ozan KİYAT

Anabilim Dalı: HARİTA MÜHENDİSLİĞİ

Tez Başlığı: Su Gövdelerindeki Değişimlerin Otomatik Olarak Tespit Edilmesi ve Analizi

Tarih: 16 / 07 / 2026

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ozan KİYAT

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Erciyes Üniversitesi Harita Mühendisliği

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : Merhale Harita

Çalıştığı Kurumlar : Merhale Harita

Tarih : 16.07.2026