T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
DENİZ BİLİMLERİ VE İŞLETMECİLİĞİ ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ: SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Ali Gökhan BORA
Denizel Çevre Ana Bilim Dalı

Danışmanlar
Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU
Doç.Dr. Hasan Bora USLUER

NİSAN, 2026

T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
DENİZ BİLİMLERİ VE İŞLETMECİLİĞİ ENSTİTÜSÜ

ALİ GÖKHAN BORA tarafından hazırlanmış ve sunulmuş "SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ: SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ" başlıklı tez DENİZEL ÇEVRE Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU

II. Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hasan Bora USLUER

Jüri Üyesi
Prof. Dr. Gürcan BÜYÜKSALİH

Jüri Üyesi
Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER

Jüri Üyesi
Prof. Dr. Şinasi KAYA

Jüri Üyesi
Doç Dr. Tolga BAKIRMAN

Tez Savunma Tarihi: 24/04/2026

ETİK BEYAN

İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu kurallarına uygun olarak hazırladığım "SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ: SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ" başlıklı DOKTORA tez çalışmasında bilimsel etik ve akademik kurallara riayet ettiğimi;

- Çalışma konusunun özgün olduğunu,
- Tez içinde sunduğum tüm veri ve belgeleri bilimsel etik ve ahlak kuralları çerçevesinde elde ettiğimi,
- Çalışmanın bulgularında tahrifat yapmadığımı ve yanlı davranmadığımı,
- Tez kapsamında yararlandığım tüm eserlere ve doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya atıfta bulunduğumu,
- Yararlandığım tüm eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu,
- Kullandığım veri ve belgelerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Patent ve telif haklarını ihlal etmediğimi

bildirir, aksinin vuku bulması durumunda yasal sonuç/sonuçları ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabul ettiğimi beyan ederim.

24/04/2026

Ali Gökhan BORA

“Denizi uzaydan ölçtük, hidrografiyi karbonla tarttık”

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlaması amacıyla, Türk kıyılarını kapsayan açık kaynaklı uydu görüntüleri üzerinden ve makine öğrenme algoritmalarıyla desteklenerek, Uluslararası Hidrografi Örgütü'nün (IHO) belirlemiş olduğu S-44 ve B-13 standartları çerçevesinde sürdürülebilir hidrografi dahilinde batimetri elde edilmesine yönelik kapsamlı bir araştırmadır.

"Sürdürülebilir Hidrografik Ölçümler İçin Uydu Tabanlı Batimetri Üretimi: Sığ Sularda Makine Öğrenmesi ile Doğruluk Analizi" konulu bu doktora tez çalışmamda;

Hayatıma kattığı değer, yol arkadaşlığı ve daima yanımda oluşuyla bana güç veren; tez sürecinde kendisine ayırmam gereken zamanı çalışmalarıma ayırmamı sabır ve anlayışla karşılayan; bu zorlu süreç boyunca desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen canım eşim Çağla ŞENGÜL BORA'ya,

Akademik hayatım başlamasına öncülük eden, yüksek lisans eğitimimde dahil bu sürecin başından sonuna kadar bir ağabeyim gibi yanımda olarak desteğini hiç esirgemeyen eski meslektaşım ve şu an ikinci tez danışmanım olan değerli Doç.Dr. Hasan Bora USLUER hocama,

Yüksek Lisans ile başlayan ve Doktora ile devam eden bu yolculuğa çıkma fırsatı sunan danışmanım Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU hocama,

Çalışmanın ortaya çıkmasında ilham kaynağı olan, ayrıca öneri ve tavsiyeleriyle katkılarını ileten Doç. Dr. Tolga BAKIRMAN hocama,

Bu süreçte psikolojik desteğini hiç esirgemeyen hem ağabeyim olarak gördüğüm aynı zamanda meslektaşım olan Dr. Hüsnü DAYAN'a,

Makine öğrenme hesaplamalarında bilgi ve tecrübelerini aktaran kıymetli dostum Barış SALİHOĞLU'na

Uydu görüntüleri üzerinden görsel şekillerin yapılmasına destek veren dostum Cihan KARACİHAN'a,

Karbon ayak izi hesaplamalarına değerli katkıları için Yasemin BAHAR AVCU'ya,

Tezin ilerlemesinde katkıları olan meslektaşlarım Mustafa Cemre ALTINIŞIK, Murat SEZGİN ve Sedat GÖLGESİZ'e teşekkürlerimi bir borç biliyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖNSÖZ i
ÖZET iv
ABSTRACT v
GRAFİK ÖZET vi
TABLO LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
SİMGE LİSTESİ ix
KISALTMA LİSTESİ x
EK LİSTESİ xii
1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi 1
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 5
1.3. Çalışmanın Sınırlılıkları 6
1.4. Literatür Araştırması 7
1.5. Problem Temelli İş Akış Şeması 11
2. MATERYAL VE METOT 12
2.1. Hidrografik Çalışmaların Tarihsel Süreci ve Gelişimi 12
2.1.1. Cumhuriyet öncesi ve sonrası Türkiye'deki hidrografi çalışmaları 16
2.2. Uydu Tabanlı Batimetri Çalışmalarının Tarihsel Süreci ve Gelişimi 17
2.3. Hidrografik Ölçümlerde Kullanılan Aletler 19
2.3.1. Lata iskandil 19
2.3.2. El iskandili (İp iskandil) 19
2.3.3. Mekanik (Makaralı) iskandil 19
2.3.4. Hidrostatik iskandil 19
2.3.5. Termometrik iskandil 20
2.3.6. Tel süpürme yöntemi 20
2.3.7. Dalgıç (Balıkadam) sayesinde derinlik tespiti 20
2.3.8. Tek ışınlı iskandil (Single beam echosounder) 20
2.3.9. Çok ışınlı iskandil (Multi beam echosounder) 21
2.3.10. Yandan taramalı sonar (Side-scan sonar) 22
2.3.11. Uzaktan kumandalı su altı aracı (Remotely underwater operating vehicle) 23
2.3.12. Optik sistemler 23
2.3.13. Uydu görüntüleri 23
2.4. Kalibrasyon Düzeltmeleri 24
2.4.1. Akustik ölçümler 24
2.4.2. Uydu tabanlı batimetri 25
2.4.2.1. Atmosferik 26
2.4.2.2. Güneş parıltısı 27
2.4.2.3. Su kolonu 29
2.5. Uydu Görüntülerinden Batimetri Çıkarımında Kullanılan Temel Modeller 29
2.5.1. Lyzenga (1978) 30
2.5.2. Philpot (1989) 31
2.5.3. Stumpf ve diğerleri (2003) 33

2.5.4. Lyzenga ve diğerleri (2006) 34
2.6. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi 35
2.6.1. Analitik hiyerarşi süreci (Analytical hierarchy process) 36
2.6.2. En iyi- En kötü metodu (Best-worst method) 37
2.7. Batimetri Tahminlenmesinde Kullanılan Makine Öğrenme Modelleri 38
2.7.1. K-En yakın komşu (K-Nearest neighbors-KNN) 39
2.7.2. Rastgele orman (Random forest-RF) 39
2.7.3. Destek vektör makineleri (Support vector machine-SVM) 40
2.7.4. Doğrusal regresyon (Linear regression-LR) 40
2.8. Hidrografik Ölçümlerde Sürdürebilirliğinin Yeri 41
2.8.1. Sürdürebilirlik 41
2.8.2. Karbon ayak izi 42
2.8.3. Uluslararası anlaşmalar ve hedefler 43
2.8.3.1. Birleşmiş Milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi (UNFCCC) 43
2.8.3.2. Kyoto protokolü 43
2.8.3.3. Paris anlaşması 43
2.8.3.4. Türkiye'nin 2053 hedefleri 44
2.8.4. Hidrografik ölçüm araçlarında karbon ayak izi 44
2.8.5. Uydu tabanlı batimetri yöntemlerinin karbon azaltım potansiyeli 45
3. BULGULAR 46
3.1. Uydu Görüntü Verilerinin Seçimi, Kullanılan Program ve Modeller 46
3.2. Çalışma Alanlarına Ait Bölgelerdeki Yersel Verilerin Temini 50
3.3. Uydu Görüntülerinden Batimetri Temini 53
3.3.1. Samsun 54
3.3.2. İzmir Körfezi 56
3.3.3. İskenderun Körfezi 59
3.4. Yersel Batimetri ile Uydu Batimetri Arasındaki İstatiksel İlişkinin Belirlenmesi 61
3.5. Uydu Tabanlı Batimetri Verilerinin Hidrografik Ölçüm Standartları (S-44) ve Uydudan Türetilmiş Batimetri Rehberi (B-13) Kapsamında İncelenmesi 64
3.6. Çok Kiriterli Karar Verme Yöntemlerinin Hesaplanması 67
3.7. Makine Öğrenme Modellerinin Kıyaslanması 72
3.8. Hidrografik Ölçümlerin Çevresel, Ekonomik ve Politika Değerlendirmesi 77
3.8.1. Karbon ayak izi 77
3.8.2. Maliyet analizi 83
3.8.3. Uluslararası hidrografik araştırma platformlarının karşılaştırmalı karbon emisyonları 84
3.8.4. Karbon emisyon tahminlerinin hassasiyet analizi 85
3.8.5. Politika hedefleriyle uyum 86
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR 90
KAYNAKLAR 93
EKLER 111
ÖZGEÇMİŞ 117
FORMLAR
Doktora Tezi İle İlgili Yayınlanan Makale
Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygunluk Yazısı ve Eki

ÖZET

SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ: SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ

Ali Gökhan BORA

Hidrografik ölçümler; seyir emniyeti, kıyı alanı planlaması ve sürdürülebilir deniz yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak geleneksel gemi tabanlı hidrografik yöntemler, yüksek maliyetli, zaman alıcı ve karbon salınımı açısından yoğun sistemlerdir. Bu çalışma, Türkiye'de deniz haritalarının yapımından sorumlu Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığına bağlı hidrografik araştırma platformlarının karbon ayak izinin ilk kapsamlı değerlendirmesini sunmakta ve makine öğrenimi ile geliştirilen Uydu Tabanlı Batimetri (UTB) yöntemini sürdürülebilir bir alternatif olarak incelemektedir.

Çalışma, Türkiye'nin farklı enlemlerinde yer alan Samsun (Karadeniz), İzmir Körfezi (Ege Denizi) ve İskenderun Körfezi (Akdeniz) bölgelerini kapsamaktadır. Bölgelere özgü çevresel ve optik farklılıkların UTB'nin doğruluk düzeyi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sentinel Application Platform (SNAP) yazılımı ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla elde edilen sonuçlara göre, 0-30 metre derinlik aralığında, Uluslararası Hidrografik Örgütünün (IHO) tarafından belirlenen S-44 "1b Derece" doğruluk standardının karşılandığını görülmüştür. Ayrıca, karbon ayak izi analizi, geleneksel hidrografik araştırmaların yılda yaklaşık 3 850 tCO_2e emisyon yaydığını; buna karşılık uydu tabanlı yöntemlerin bu emisyonları önemli ölçüde azaltabildiğini ve aynı zamanda ekonomik açıdan tasarruf sağladığını ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, Uydu Tabanlı Batimetri yönteminin sığ kıyı bölgelerinde akustik sistemlere kıyasla etkili, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Bu araştırmada önerilen metodoloji, hidrografik uygulamaların modernizasyonuna katkı sağlamakta; Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda çevresel açıdan sorumlu deniz haritalaması ve kıyı yönetimine geçişi desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Uydu tabanlı batimetri, makine öğrenme, karbon ayak izi, maliyet analizi

ABSTRACT

SATELLITE-DERIVED BATHYMETRY PRODUCTION FOR SUSTAINABLE HYDROGRAPHIC SURVEYS: ACCURACY ANALYSIS WITH MACHINE LEARNING IN SHALLOW WATERS

Ali Gökhan BORA

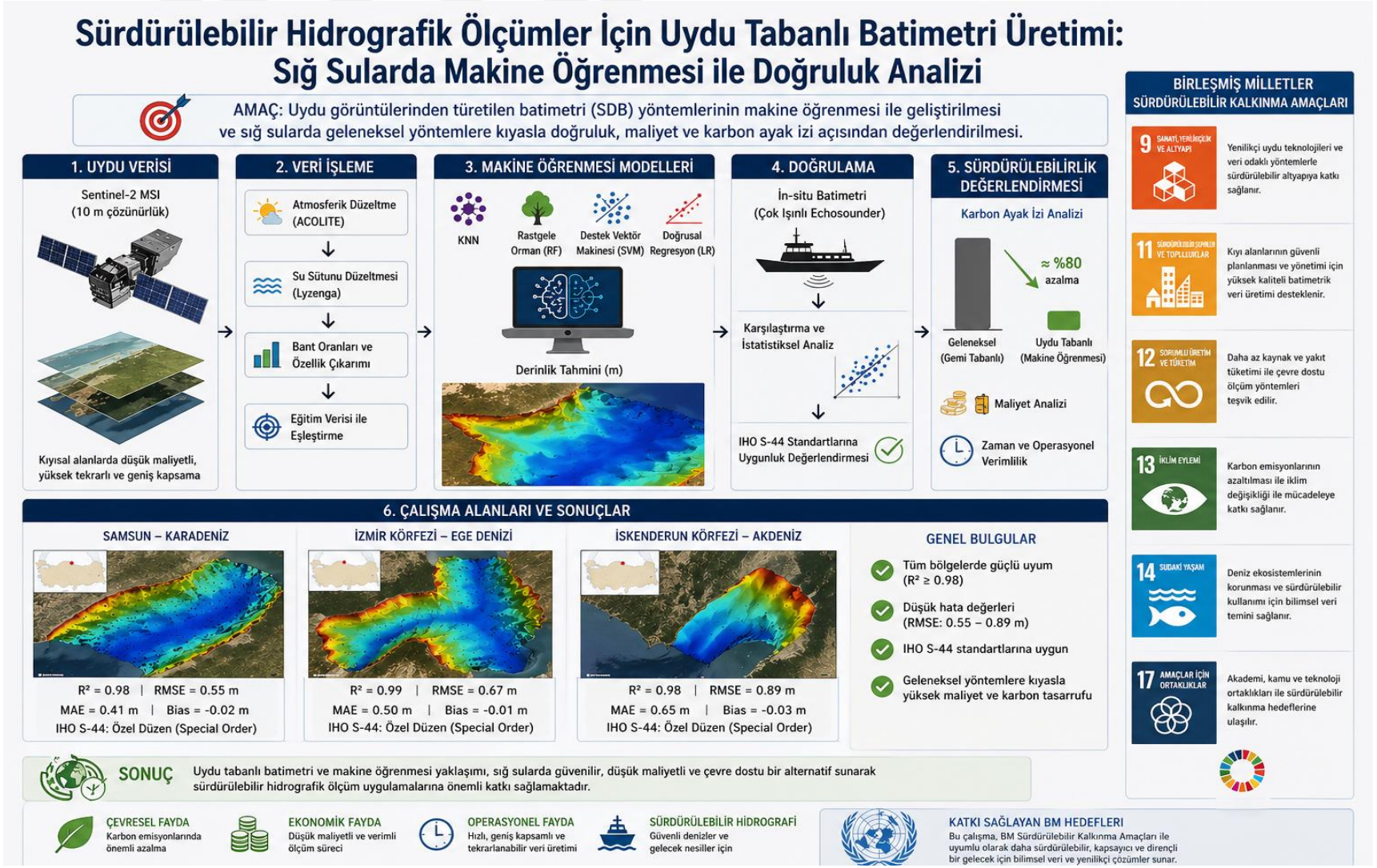
Hydrographic surveys play a crucial role in navigation safety, coastal zone planning, and sustainable marine management. However, traditional vessel-based hydrographic methods are costly, time-consuming, and carbon-intensive. This study presents the first comprehensive assessment of the carbon footprint of the hydrographic research platforms operated by the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography of Türkiye, which is the sole official authority responsible for the production of national nautical charts. It also examines the Satellite-Derived Bathymetry (SDB) method, enhanced by machine learning techniques, as a sustainable alternative to conventional approaches.

The research covers three regions located ad different latitudes of Türkiye; Samsun (Black Sea), İzmir Bay (Aegean Sea), and İskenderun Bay (Mediterranean Sea). The effects of region-specific environmental and optical variations on the accuracy of SDB were analyzed. According to the results obtained using the Sentinel Application Platform (SNAP) software and machine learning algorithms, the IHO S-44 “Order 1b” accuracy standard was achieved within the 0-30 m depth range. Furthermore, the carbon footprint analysis revealed that traditional hydrographic surveys approximately 3 850 tCO_2e per year, whereas satellite-based methods significantly reduce these emissions while also providing substantial economic savings.

The findigs comfirm that the Satellite-Derived Bathymetry (SDB) method can serve as an effective, sustainable, and scalable alternative to acoustic systems in shallow coastal regions. The proposed methodology contributes to the modernşzatşon of hydrographic practices and supports the transition toward environmentally responsible marine mapping and coastal management in line with Türkiye’s 2053 Net-Zero Emission Goals.

Keywords: Satellite-derived bathymetry, machine learning, carbon footprint,cost analysis

GRAFİK ÖZET


Sürdürülebilir Hidrografik Ölçümler İçin Uydu Tabanlı Batimetri Üretimi:
Sığ Sularda Makine Öğrenmesi ile Doğruluk Analizi
AMAÇ: Uydu görüntülerinden türetilen batimetri (SDB) yöntemlerinin makine öğrenmesi ile geliştirilmesi ve sığ sularda geleneksel yöntemlere kıyasla doğruluk, maliyet ve karbon ayak izi açısından değerlendirilmesi.
1. UYDU VERİSİ
Sentinel-2 MSI
(10 m çözünürlük)
Kıyısal alanlarda düşük maliyetli, yüksek tekrarlı ve geniş kapsama
2. VERİ İŞLEME
Atmosferik Düzeltme (ACOLITE)
Su Sütunu Düzeltmesi (Lyzenga)
Bant Oranları ve Özellik Çıkarımı
Eğitim Verisi ile Eşleştirme
3. MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ
KNN
Rastgele Orman (RF)
Destek Vektör Makinesi (SVM)
Doğrusal Regresyon (LR)
Derinlik Tahmini (m)
4. DOĞRULAMA
İn-situ Batimetri
(Çok Işınlı Echosounder)
Karşılaştırma ve İstatistiksel Analiz
IHO S-44 Standartlarına Uygunluk Değerlendirmesi
5. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ
Karbon Ayak İzi Analizi
≈ %80 azalma
Geleneksel (Gemi Tabanlı)
Uydu Tabanlı (Makine Öğrenmesi)
Maliyet Analizi
Zaman ve Operasyonel Verimlilik
6. ÇALIŞMA ALANLARI VE SONUÇLAR
SAMSUN – KARADENİZ
R² = 0.98 | RMSE = 0.55 m
MAE = 0.41 m | Bias = -0.02 m
IHO S-44: Özel Düzen (Special Order)
İZMİR KÖRFEZİ – EGE DENİZİ
R² = 0.99 | RMSE = 0.67 m
MAE = 0.50 m | Bias = -0.01 m
IHO S-44: Özel Düzen (Special Order)
İSKENDERUN KÖRFEZİ – AKDENİZ
R² = 0.98 | RMSE = 0.89 m
MAE = 0.65 m | Bias = -0.03 m
IHO S-44: Özel Düzen (Special Order)
GENEL BULGULAR
Tüm bölgelerde güçlü uyum (R² ≥ 0.98)
Düşük hata değerleri (RMSE: 0.55 – 0.89 m)
IHO S-44 standartlarına uygun
Geleneksel yöntemlere kıyasla yüksek maliyet ve karbon tasarrufu
SONUÇ
Uydu tabanlı batimetri ve makine öğrenmesi yaklaşımı, sığ sularda güvenilir, düşük maliyetli ve çevre dostu bir alternatif sunarak sürdürülebilir hidrografik ölçüm uygulamalarına önemli katkı sağlamaktadır.
ÇEVRESEL FAYDA
Karbon emisyonlarında önemli azalma
EKONOMİK FAYDA
Düşük maliyetli ve verimli ölçüm süreci
OPERASYONEL FAYDA
Hızlı, geniş kapsamlı ve tekrarlanabilir veri üretimi
SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİ
Güvenli denizler ve gelecek nesiller için
KATKI SAĞLAYAN BM HEDEFLERİ
Bu çalışma, BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile uyumlu olarak daha sürdürülebilir, kapsayıcı ve dirençli bir gelecek için bilimsel veri ve yenilikçi çözümler sunar.
BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA AMAÇLARI
9 SANAYİ, YENİLİKÇİLİK VE ALTYAPI
Yenilikçi uydu teknolojileri ve veri odaklı yöntemlerle sürdürülebilir altyapıya katkı sağlanır.
11 SÜRDÜRÜLEBİLİR ŞEHİRLER VE TOPLULUKLAR
Kıyı alanlarının güvenli planlanması ve yönetimi için yüksek kaliteli batimetrik veri üretimi desteklenir.
12 SORUMLU ÜRETİM VE TÜKETİM
Daha az kaynak ve yakıt tüketimi ile çevre dostu ölçüm yöntemleri teşvik edilir.
13 İKLİM EYLEMİ
Karbon emisyonlarının azaltılması ile iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sağlanır.
14 SUDAKİ YAŞAM
Deniz ekosistemlerinin korunması ve sürdürülebilir kullanımı için bilimsel veri temini sağlanır.
17 AMAÇLAR İÇİN ORTAKLIKLAR
Akademi, kamu ve teknoloji ortaklıkları ile sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılır.

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Akustik ve uydu tabanlı batimetrinin kalibrasyon karşılaştırılması 26
Tablo 2. Sentinel-2 uydusunun teknik özellikleri 47
Tablo 3. Sentinel-2 bant özellikleri.....48
Tablo 4. Makine öğrenme modellerinin karşılaştırılması 49
Tablo 5. Samsun doğruluk matris sonuçları 62
Tablo 6. İzmir Körfezi doğruluk matris sonuçları 63
Tablo 7. İskenderun Körfezi doğruluk matriks sonuçları 64
Tablo 8. IHO S-44 ölçüm standartları 65
Tablo 9. IHO S-44'e göre derinliğe bağlı hata miktarı 66
Tablo 10. IHO S-44'e göre çalışma alanlarının kıyaslanması 66
Tablo 11. SDB derinlik aralıkları ve genel açıklama.....67
Tablo 12. ÇKKV karşılaştırma ölçeği 67
Tablo 13. AHP en önemli parametre seçimi 71
Tablo 14. AHP en uygun yer seçimi ve tutarlılık oranı 71
Tablo 15. BWM en önemli parametre seçimi 72
Tablo 16. Makine öğrenme sonuçları 73
Tablo 17. Rastgele ve mekansal çapraz doğrulama yöntemlerinin model performansının karşılaştırılması 76
Tablo 18. Hidrografik ölçüm platformlarının teknik özellikleri 77
Tablo 19. Hidrografik ölçümlerde kullanılan platformlarının emisyon çıktıları 79
Tablo 20. Emisyon faktör değerleri 80
Tablo 21. Hidrografik faaliyetlerde harcanan yıllık akaryakıt ve gaz miktarı.....81
Tablo 22. Hidrografik ölçümlerde kullanılan platformlarının emisyon hesaplamaları 81
Tablo 23. Hidrografik sistem ve cihazların gün bazından birim fiyatı 83
Tablo 24. Platformların bir günlük akaryakıt maliyeti 84
Tablo 25. Örnek hidrografik ölçüm platformlarının teknik özellikleri.....85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. El iskandili yöntemiyle batimetri çıkarımı 3
Şekil 2. Batimetri elde etme tekniklerinin gelişimi 5
Şekil 3. Problem temelli iş akış şeması....11
Şekil 4. Tek ışınlı iskandil 21
Şekil 5. Çok ışınlı iskandil....22
Şekil 6. Yandan taramalı sonar....23
Şekil 7. Güneş parıltısının giderilmesi....28
Şekil 8. Samsun bölgesine ait kullanılan derinlik verilerin konumları....51
Şekil 9. İzmir Körfezine ait kullanılan derinlik verilerin konumları 52
Şekil 10. İskenderun Körfezine ait kullanılan derinlik verilerin konumları 53
Şekil 11. Uydu tabanlı batimetri akış şeması....54
Şekil 12. Samsun bölgesi Sentinel-2 uydu görüntüsü....55
Şekil 13. Samsun bölgesi çalışma kesit alanı 55
Şekil 14. Samsun bölgesi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü 56
Şekil 15. İzmir Körfezi Sentinel-2 uydu görüntüsü....57
Şekil 16. İzmir Körfezi çalışma kesit alanı....57
Şekil 17. İzmir Körfezi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü....58
Şekil 18. İskenderun Körfezi Sentinel-2 uydu görüntüsü....59
Şekil 19. İskenderun Körfezi çalışma kesit alanı....59
Şekil 20. İskenderun Körfezi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü....60
Şekil 21. Samsun bölgesi yersel-uydu batimetri dağılımı 61
Şekil 22. İzmir Körfezi yersel-uydu batimetri dağılımı....62
Şekil 23. İskenderun Körfezi yersel-uydu batimetri dağılımı....63
Şekil 24. GPS'in deniz aracı üzerindeki pozisyonu....68
Şekil 25. Güneş'in azimuth açısının gösterimi 69
Şekil 26. Samsun bölgesi makine öğrenme grafiği....74
Şekil 27. İzmir Körfezi makine öğrenme grafiği 74
Şekil 28. İskenderun Körfezi makine öğrenme grafiği....75
Şekil 29. Emisyon azaltma eğrileri hemen uygulama senaryosu....88
Şekil 30. Emisyon azaltma eğrileri kademeli uygulama senaryosu....88

SİMGE LİSTESİ

cm	: santimetre
cm^3	: santimetreküp
CO_2	: karbondioksit
hp	: horse power (beygir gücü)
kg	: kilogram
km	: kilometre
km^2	: kilometrekare
kWh	: kilowatt-saat
L	: litre
m	: metre
MWh	: megawatt-saat
t	: ton
tCO_2/MWh	: ton karbondioksit eşdeğeri başına megavat-saat
TL	: Türk Lirası
$tonCO_2e$	: ton karbondioksit eşdeğeri
'	: dakika
°	: derece
.	: nokta
"	: saniye
,	: virgül
~	: yaklaşık
%	: yüzde

KISALTMA LİSTESİ

AHP	: Analytic Hierarchy Process
BWM	: Best-Worst Yöntemi
CCDR	: Country Climate and Development Report
CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales
COP	: Climate Change Conference
CTD	: Conductivity, temperature, depth
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DEFRA	: Department for Environment, Food and Rural Affairs
DGPS	: Differential Global Positioning System
E	: East (Doğu)
EMODnet	: European Marine Observation and Data Network
ERTS	: Earth Resources Technology Satellite
GHG	: Greenhouse Gas Protocol
GPS	: Global Positioning System
HRP	: Heave, roll, pitch
ICAO	: International Civil Aviation Organization
IHB	: International Hydrographic Bureau
IHO	: International Hydrographic Organization
IN-SITU	: Yerinde
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
KNN	: K-Nearest Neighbors (En Yakın Komşu Kenar)
LR	: Linear regression (Doğrusal Regresyon)
LTS	: Long Term Climate Strategy
MBES	: Multi Beam Echosounder
N	: North (Kuzey)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NIR	: Near-infrared (Kızılötesi)
NM	: Nautical Mile (Deniz Mili)
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
PH	: Potential of Hydrogen
RF	: Random Forest (Rastgele Orman)
RMSE	: Root Mean Square Error
ROV	: Remotely Operated Vehicle
RTK	: Real-Time Kinematics
SBES	: Single Beam Echosounder
SDB	: Satellite-Derived Bathymetry
SHOD	: Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi
SOLAS	: Safety Of Life At Sea (Denizde Can Güvenliği)
SVM	: Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
SVP	: Sound Velocity Profiller
TCG	: Türkiye Cumhuriyeti Gemisi
TDB	: Toplam Düşey Belirsizlik
TR	: Türk Deniz Haritası
TYB	: Toplam Yatay Belirsizlik

UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change
USACE	: United States Army Corps of Engineers
UTB	: Uydu Tabanlı Batimetri
VB	: Ve benzeri
WRI	: World Resources Institute
WBCSD	: World Business Council for Sustainable Development
WBG	: World Bank Group
YY	: Yüzyıl
Z	: UTC (Universal Time Coordinated - Eş Güdümlü Evrensel Zaman)

EK LİSTESİ

Sayfa

EK 1. Samsun bölgesi uydu görüntü metadatası 111
EK 2. İzmir Körfezi uydu görüntü metadatası.....112
EK 3. İskenderun Körfezi uydu görüntü metadatası.....113
EK 4. GHG Conversion factors for company reporting-2024.....114
EK 5. Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu. .115
EK 6. Petrol piyasası aylık ortalama bayi satış fiyatı bülteni 116

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

Yer yüzeyinin yüz ölçümü yaklaşık 500 000 000 km² olup (İnandık, 1971), bunun yaklaşık %71'i okyanuslar ile karalar tarafından izole edilmiş kenar ve iç denizlerden meydana gelmektedir (Lalli ve Parsons, 1997). Denizler yeryüzeyinin esas unsurları olup, karalar ise bu denizleri küçük ya da büyük belirli alanlara bölen toprak parçalarıdır.

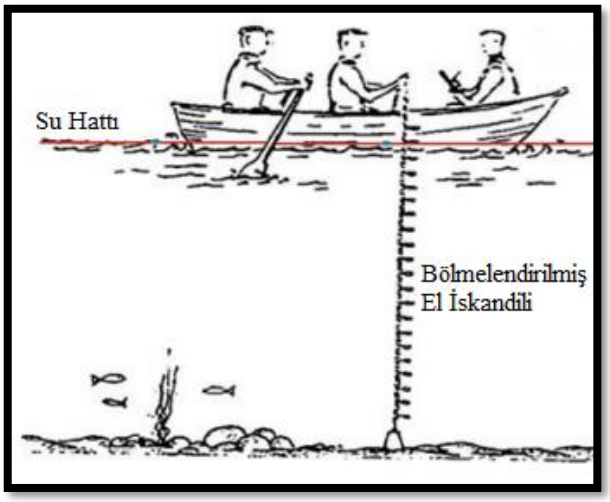
Okyanusların ortalama derinliği takriben 3 682 m (Charette ve Smith, 2010), kara parçalarının ortalama yüksekliği yaklaşık 840 metredir. Buradan anlaşılacağı üzere ortalama okyanus derinliği, ortalama karaların yüksekliğinin yaklaşık 4 katıdır (Webb, 2023). Everest dağının en yüksek noktası 8 848 m, modern metotlarla ölçülen Mariana deniz çukurunun Challenger derinliği ise 10 935 metredir (NOAA, 2017). Bu durum bize deniz çukurlarının, kara yüksekliklerine nazaran daha büyük uzunluk niteliğinde olduklarını göstermektedir.

Yer yüzeyinin ana parçasını meydana getiren denizlerle ilgili keşiflerin insan oğlu tarafından anlaşılması ve onlara ait çözümlerin araştırılması oşinografi sahasında atılan ilk adımlar olduğunu söyleyebiliriz. Bu adımlar, ihtiyaçlara bağlı olarak insanlığın ilk çağlarında çok miktarda balık avlaması, açık denizde görülebilen bir kara veya ada parçasına ulaşma biçiminde görmemiz büyük bir olasılıkla mümkündür. Bu tarihsel ihtiyaçlar ve keşif çabaları zamanla sistematik bir bilimsel araştırma alanına dönüşmüş, böylece denizleri çok yönlü olarak inceleyen oşinografi biliminin temelleri atılmıştır.

Oşinografi, deniz sularının özelliklerini ve davranışlarını, içinde yaşayan doğal canlı yaratıkları, deniz suyunun üzerindeki hava ve altındaki yer yüzeyi tabakasıyla karışımlarını ve okyanus tabanlarının şekilleri ile yapılarını inceleyen, genel olarak bünyesinde fizik, kimya, biyoloji, jeoloji ve meteoroloji gibi dallarını da kapsayan ve denizlerde meydana gelen hadiseleri bilimsel olarak açıklayan bir bilim dalıdır (Karo, 1960).

Deniz bilimlerinin uygulamalı bir alt dalı olarak değerlendirilen hidrografi ise, oşinografinin ortaya koyduğu bilgi birikimini denizcilik faaliyetleri ve seyir güvenliği alanında kullanan uzmanlık disiplinidir. Hidrografi, temel olarak seyir güvenliği amacıyla okyanusların, denizlerin kıyı bölgelerin, göllerin ve nehirlerin fiziksel özelliklerinin ölçülmesi ve tanımlanmasının yanı sıra zaman içindeki değişimlerinin tahmin edilmesiyle ilgilenen ekonomik kalkınma, güvenlik ve savunma, bilimsel araştırma ve çevrenin korunması da dahil olmak üzere diğer tüm denizcilik faaliyetlerini destekleyen uygulamalı bilim dalıdır (International Hydrographic Organization, 2019). Hidrografik çalışmalar kapsamında su kütlelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde temel unsurlardan biri derinlik ölçümleri olup, bu noktada batimetri kavramı ön plana çıkmaktadır. Burada derinlik tanımına da değinecek olduğumuzda, batimetri terimi karşımıza çıkmaktadır. Batimetri, Yunancada bathy (derin) ve metry (ölçü) anlamlarından türetilmiş olup; okyanuslar, denizler, göller, nehirler, akarsular ve kanallardaki su derinliğinin ölçümü olarak ifade edilmektedir (United Kingdom Hydrographic Office, 2020). Batimetri kavramının önem kazanmasıyla birlikte, su derinliklerinin doğru ve güvenilir biçimde ölçülmesine yönelik yöntemler tarih boyunca sürekli gelişim göstermiştir.

Bu doğrultuda, deniz tabanının topografyasını belirlemek amacıyla kullanılan ölçüm aletleri ve konumlandırma teknikleri hidrografik çalışmaların temel unsurlarını oluşturmuştur. Deniz tabanının topografyasını belirlemek için kullanılan aletlerin tarihsel gelişimine baktığımızda, ilk olarak derinlik ölçme aleti el iskandili (ip iskandil), konumlandırma ölçü aleti olarak sextant (açı ölçer) ve stadimetre (mesafe ölçer) karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemin çalışma mantığı ise: denizden bakıldığında sahil üzerinde referans olabilecek büyüklükte gözüken cami minareleri, yüksek binalar, su depoları vb. yapılar üzerinden sextant ve stadimetre sayesinde alınan kerteriz değerleri, enlem ve boylamı, enlem ve boylamın oluşturduğu kesişim noktasına atılan el iskandili ile de yükseklik, yani derinlik değeri elde edilerek kıyısal veyahut bölgesel olarak deniz haritaları yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 1. El iskandili yöntemiyle batimetri çıkarımı (Food and Agriculture Organization- FAO, 2010'dan değiştirilmiştir).

Teknolojinin gelişmesi, insan ihtiyaçlarının ve deniz ticaretinin artmasına bağlı olarak deniz topografyasının ve denizel kaynakların araştırılmasında kullanılan ölçü sistemlerinde de değişikliklere gidilmiş, deniz haritacılığının önemi ve haritalarının güncellenmesinin gerekliliği her geçen gün daha da artmıştır. Derinlik ölçüm sistemlerinde kullanılan el iskandillerinin yerini, daha hızlı, daha doğru sonuçlar veren akustik iskandiller almıştır. Konumlandırma amacıyla kullanılan sextant ve stadimetrenin yerini ise internet ve uydu teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte GPS sistemleri almıştır.

Günümüzde hidrografik ölçüm sistemleri; gemi tabanlı, uçak tabanlı (LiDAR-drone) ve uydu tabanlı sistemler olarak üç bölüme ayrılmaktadır. Gemi tabanlı batimetri çalışmalarının ana sistemi akustiktir. Bu yöntemin temel ilkesi, ses dalgalarının su içinde yayılma ve yansıma özelliklerinden yararlanılarak derinliklerin ölçülmesidir. Gemi tabanlı batimetri sistemleri, tek ışınlı ve çok ışınlı iskandil olmak üzere iki çeşittir. Tek ışınlı iskandil (SBES), cihazın özelliklerine bağlı olarak geminin ya da ilgili platformun yalnızca bulunduğu konum doğrultusunda, düşey hat boyunca derinlik verisi sağlamaktadır. Çok ışınlı iskandil (MBES) ise birden fazla ışının farklı açılarla gönderilmesi sonucu, yelpaze şeklinde deniz tabanından yansıyan sinyallerin toplanması ve elde edilen yüksek veri yoğunluğu sayesinde deniz tabanı topografyasının daha hızlı ve ayrıntılı bir şekilde elde edilmesi prensibiyle çalışmaktadır.

Mevcut gemi tabanlı sistemlerde, işin nasıl ve kim tarafından yapılması gerektiği konusunda yetiştirilmiş insan kaynağına önemli ölçüde ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrografi ve oşinografi alanında yetiştirilen personelin mesleki tecrübe kazanması ise yaklaşık iki yıl sürmektedir. Aynı zamanda çalışma sahasına intikal, lojistik faaliyetler, veri kontrolü, sistemsel arızalar, tehlikeli alanların yeniden araştırılması ve veri işleme faaliyetlerini kapsayan bu süreçler, maliyet ve zaman açısından önemli kısıtlar oluşturmaktadır.

Uçak tabanlı (LiDAR-drone) batimetriden bahsedecek olursak; kıyı hattı için kızılötesi, deniz batimetrisi için ise yeşil ışık kullanarak, yansıyan hedefin sensörden uzaklığını ve doğrultusunu yoğun bir veri bulutu şeklinde ölçen bir uzaktan algılama sistemi olarak tanımlanabilir. Bu sistem, uçan bir platform üzerinden düşey doğrultuda deniz yüzeyine gönderilen ışığın, deniz tabanına çarparak sensöre geri dönmesi prensibiyle çalışmaktadır. Gönderilen ışığın gidiş-dönüş süresi ölçülerek mesafe ve su derinliği tespit edilmektedir. Platform olarak kullanılan hava araçlarının konumunu ve ışığın yönelimini belirleyebilmek için hareket algılayıcıları ile birlikte uydu tabanlı konumlandırma (GPS) sistemleri kullanılmaktadır. LiDAR-drone tabanlı batimetri, yeşil ışık bandı sayesinde mekanik ve akustik sistemlere kıyasla çok daha hızlı ve geniş alanları kapsayarak deniz tabanının haritalandırılmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak uçak yani lidar-drone tabanlı batimetri ölçümlerinin de tıpkı akustik batimetri ölçümleri gibi insan gücüne dayanıyor olması, meteorolojik durumdan etkilenmesi ve uçuş maliyetlerinin ekonomi açısından çok yüksek olmasından kaynaklı tercih edilen bir sistem değildir.

Uydu tabanlı sistemlere bakıldığında, temel girdinin uydu görüntüleri olduğu görülmektedir. Son yıllarda yörüngeye gönderilen, yüksek çözünürlüklü multispektral görüntüler kaydedebilen uydular sayesinde, elektromanyetik spektrumda daha dar bant aralıklarında elde edilen verilerle uydu tabanlı batimetrinin gelişimi tatmin edici seviyelere ulaşmıştır. Gemi tabanlı ve uçak tabanlı sistemlere kıyasla çalışma sahasına gitmeden uydular aracılığıyla görüntülerin elde edilebilmesi, meteorolojik koşullardan kaynaklanan olumsuzlukların tarihsel veri kullanımıyla bertaraf edilebilmesi, zamandan tasarruf sağlanması ve yetişmiş insan kaynağına daha az ihtiyaç duyulması gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, gemi ve uçak tabanlı sistemlere göre daha çevreci ve düşük maliyetli olması nedeniyle, günümüzde özellikle sığ su batimetrisinde tercih edilen alternatif bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 2. Batimetri elde etme tekniklerinin gelişimi (Said, 2018'den değiştirlmiştir)

Çeşitli alanlarda batimetrik veri toplama tekniklerinin, akustik cihazlardan hava araçlarına, makine öğrenme algoritmalarından uzay platformlarına doğru gösterdiği gelişim ve değişim, Uydu Tabanlı Batimetri (SDB)'nin hidrografik ölçümlerde yeni bir yöntem olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ayrıca, günümüzde gerçekleştirilen uydu tabanlı batimetriye yönelik araştırma ve raporlar, batimetri çalışmalarının tek bir uydu görüntüsü üzerinden etkili bir keşif aracı olabileceğini göstermektedir.

1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının atmosfere salınımının engellenmesi maksadıyla, günümüzde sığ su batimetri tespit çalışmalarında kullanılan akustik cihazların yerine, uydu görüntülerinin; insan gücü gerektirmeden, ekonomik, hızlı ve anlık olarak ihtiyaç duyulacak alanın derinlik bilgisini, bilgisayar uygulamalı programlar ve makine öğrenme algoritmaları vasıtasıyla kullanıcıya kolaylıkla sunması hedeflenmiştir. Uluslararası Hidrografi Örgütü'nün deniz derinliği için belirlemiş olduğu S-44 minimum hidrografi standartları kapsamında da, uydu görüntülerinden elde edilen batimetri verilerinin seyir haritalarında ve seyir emniyeti açısından kullanılabilirliğinin araştırılması ve başta batimetrik uygulamalar olmak üzere birçok alanda sağladığı imkânların açıklanması amaçlanmıştır.

Özellikle küresel anlamda iklim değişikliğine karşı mücadele kapsamında, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması ve emisyon gazlarının azaltılması doğrultusunda, hidrografik ölçümlerde sera gazını tetikleyen tüm platformların yıl boyunca gerçekleştirdikleri karbon salınım değerleri hesaplanmış ve buna bağlı olarak maliyet analizi çıkarılmıştır. Bu çalışma, ülkemizin 2053 yılı karbon ayak izinin sıfırlanması hedefleri

doğrultusunda, gelecek nesillere daha yaşanabilir bir çevre bırakılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.3. Çalışmanın Sınırlılığı

Bu çalışma, sürdürülebilir hidrografik ölçümler kapsamında uydu tabanlı batimetri üretimi ve makine öğrenmesi ile doğruluk analizine odaklanmakta olup, belirli metodolojik ve uygulamaya yönelik sınırlılıklar içermektedir. Öncelikle araştırma sahaları, Türkiye kıyılarını temsil edecek şekilde Karadeniz'de Samsun, Ege Denizi'nde İzmir Körfezi ve Akdeniz'de İskenderun Körfezi ile sınırlandırılmıştır. Bu alanlar farklı oşinografik ve optik koşulları temsil etmekle birlikte, elde edilen bulguların tüm dünya kıyı alanlarına veya farklı iklim kuşaklarına doğrudan genellenmesi mümkün olmayabilir.

Çalışmada kullanılan uydu verileri, Sentinel-2 platformunun belirli tarihlerde elde edilen görüntüleri ile sınırlıdır. Uydu görüntülerinin bulutluluk durumu, atmosferik koşullar, güneş parıltısı, askıda sediment miktarı, su berraklığı ve dip örtüsü gibi çevresel faktörlerden etkilenmesi, batimetri doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle farklı mevsimlerde veya değişen meteorolojik şartlarda elde edilecek sonuçlar farklılık gösterebilir. Ayrıca çalışma kapsamında sığ su tanımı, en fazla 30 metre derinlik aralığı ile sınırlandırılmış olup, daha derin alanlarda uydu tabanlı batimetri yönteminin performansı değerlendirilmemiştir.

Makine öğrenmesi uygulamalarında kullanılan modeller; K-En Yakın Komşu (KNN), Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Doğrusal Regresyon (LR) algoritmaları ile sınırlandırılmıştır. Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar veya daha gelişmiş hibrit modeller çalışma kapsamına dâhil edilmemiştir. Ayrıca model performansları, temin edilen referans derinlik verilerinin miktarı ve kalitesi ile doğrudan ilişkilidir.

Karbon ayak izi değerlendirmeleri ise yalnızca Scope 1 (doğrudan) ve Scope 2 (dolaylı enerji kaynaklı) emisyonlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ölçüm ekipmanlarının üretim süreçleri, bakım faaliyetleri, personel lojistiği ve tedarik zinciri kaynaklı Scope 3 emisyonları kapsam dışında bırakılmıştır. Benzer şekilde maliyet analizlerinde personel iaşe giderleri, amortisman, bakım-onarım ve uzun dönem yatırım maliyetleri hesaba katılmamıştır. Bu nedenle ekonomik ve çevresel çıktılar, muhafazakâr bir alt sınır değerlendirmesi olarak ele alınmalıdır.

1.4. Literatür Araştırması

Tek ışınlı iskandilin zamana bağlı gelişimi sayesinde deniz tabanından batimetri verilerinin toplanması mümkün kılınmış, akabinde çok ışınlı iskandilin keşfedilmesinden sonra yüksek hassasiyet ve doğruluğa sahip batimetri verileri, deniz topografyasının araştırılması ve belirlenmesi açısından ana kaynak sağlamıştır. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, LiDAR-drone platformları ile batimetri tespit edilmesi; ayrıca yandan taramalı sonar ve insansız su altı araçları sayesinde geniş alanlarda deniz çalışmalarının yapılması mümkün hale gelmiştir. Uzay biliminin dünya üzerindeki keşif çalışmaları kapsamında, uydu platformlarına bağlı olarak elde edilen görüntüler üzerinden hem ticari hem de insani açıdan; tarım, petrol, sağlık, afet güvenliği, denizel çevre, şehir planlama ve meteoroloji gibi konularda birçok araştırma bulunmaktadır. Uydu görüntü yorumlama tekniklerinin geliştirilmesi neticesinde, deniz yüzeyi gibi deniz tabanının da araştırılmasına olan ihtiyaç, bilim insanlarının keşif arzusunu artırmıştır. Bu keşifler sayesinde, geniş alanları kapsayan uydu görüntüleri ilk olarak askerî anlamda denizaltı tespit edilmesi çalışmalarında kullanılmıştır.

1970'li yıllarda Landsat uydularının dünya yörüngesine yerleştirilmesiyle birlikte, uydu görüntüleri üzerinden batimetri tespit çalışmaları başlamıştır. Uydular üzerindeki multispektral sensörler sayesinde, deniz tabanından yansıyan enerji spektral bant aralıklarında kaydedilerek, su ile derinlik arasındaki matematiksel ilişki çeşitli algoritmalar aracılığıyla görüntü verisinin sayısal veriye dönüştürülmesini sağlamaktadır.

Günümüzde, suyun yansıtma oranının en yüksek olduğu alanlar için mavi, kırmızı ve yeşil bantlı uydu görüntüleri kullanılarak hidrografik veri eksikliğinin giderilmesi mümkündür. Uydu tabanlı batimetrinin tespit edilebilmesi için referans oluşturulması maksadıyla, öncelikle çalışma alanına ait önceden ölçülmüş veya sayısallaştırılmış derinlik noktalarının bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Deniz çayırları, kayalar, deniz yosunları ve deniz dibi tabiatı (çamur, silt vb.) gibi unsurların, ışığın emilmesi ve yansımasından kaynaklanan enerji kaybına neden olması, bu durumun uydu görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen batimetri tespit çalışmalarında hatalı derinlik verilerinin elde edilmesine sebebiyet verebilmesine yol açmaktadır.

Batimetri ve deniz dibi araştırma çalışmalarının hava ve uydu kaynaklı sistemlerle çıkarılma teknikleriyle uğraşan bilim insanları, çalışmalarında uygulamış oldukları çeşitli

algoritmalar sayesinde özellikle sığ sularda deniz topografyasının elde edilmesine katkı sağlayacak metotlar üretmişlerdir.

Lyzenga (1978), sığ sularda uydu görüntüleri üzerinden hem tek hem de çift banda dayalı algoritma geliştirmiştir. Çalışmasında farklı su kolonları ve dip yansıtma değerleri kullanmış olup su yüzeyinden yansıtma ve su kolunundaki saçılma etkileri göz ardı edilmiştir.

Clark ve diğerleri (1989), uydu görüntüleri üzerinden ikili ve çoklu bant oran algoritmaları arasında karşılaştırma yapmıştır. Çalışma öncesinde, çok bantlı algoritmanın bant sayısına bağlı olarak batimetri tespit çalışmalarında daha doğru sonuçlar verebileceğini öne sürmüş; ancak çalışma sonucunda, yalnızca iki bant mevcut olsa bile iyi sonuçlar elde edildiğini tespit etmiştir.

Philpot (1989), değişken çevresel etkiler ve farklı çalışma bölgelerine ait uydu görüntüleri üzerinde batimetri çıkarımını incelemiş; suyun berraklık değerinin sabit olduğu ve suda bulunan askıdaki sediment çeşitliliğinin az olduğu alanlarda batimetrik haritalanmanın elde edilebileceğini savunmuştur.

Baban (1993), regresyon denklemleri ile Benny ve Dawson (1983) ve Stove (1985) tarafından geliştirilen algoritmaları dahil ederek uydu görüntüleri üzerinden batimetri tespit çalışması yapmıştır.

Bierwirth ve diğerleri (1993), uydu görüntüleri üzerinden farklı bölgelerde sığ sularda elde edilen veriye, derinliğe bağlı olarak ışığın dönüşüm modelini uygulamış ve berrak sularda başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Moriterona ve diğerleri (1994), sığ sularda batimetri çıkarımında ışığın yansımasının su derinliğine, dip yapısına ve albedo ilişkisine bağlı olduğunu tespit ederek, üretmiş oldukları analitik formüller sayesinde bu tespitlerin doğruluğunu uygulamada test etmiştir.

Stumpf ve diğerleri (2003), deniz dip yapısı ve derinliğe bağlı su kolonunun düşük yansıtma değerlerine sahip olduğu bölgelerde de bant oran dönüşüm modelini geliştirmiştir.

Lyzenga ve diğerleri (2006), su yüzeyinden yansıma ve su kolonundaki saçılma etki değerlerini de dahil edecek şekilde yeni bir yöntem daha geliştirmiştir.

Deidda ve Sanna (2012), uydu görüntülerinde mavi bant yerine kıyı bandını kullanarak görüntü alanlarında kalibrasyon işlemleri sonrasında batimetri araştırmasını yapmışlardır.

Jaganilgam ve diğerleri (2015), Landsat 8 uydu görüntüsüyle Stumph ve diğerleri (2003) tarafından geliştirilen bant oran dönüşüm algoritmasını, mavi ve yeşil bandlara uygulayarak Hindistan'ın güney batı sahilinin batimetri haritasını belirlemeye çalışmışlardır.

Snyder ve diğerleri (2016), yapmış oldukları çalışmada sedimentten kaynaklı uydu görüntülerinin olması gereken derinlikten daha sığ olduğunu ve böyle bir durumda uydu kaynaklı batimetri haritaları ile deniz haritaları arasında karşılaştırma yapıldığında bu alanın maskelenmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca mevsim koşulları ve sedimentlerin bölgesel olarak değişiklik göstermesi nedeniyle uydu görüntülerinden batimetri çıkarımını tek görüntü üzerinden değil çok zamanlı uydu verileri yardımıyla sedimentlerin elemine edilmesine çalışılmıştır.

Smith ve diğerleri (2017) yapmış oldukları çalışmada, Lyzenga (1978) ile Stumph ve diğerleri (2003) yöntemlerini karşılaştırmış ve sığ sularda Stumph modelinin daha başarılı sonuçlar verdiğini tespit etmiştir.

Saeed ve diğerleri (2021), Landsat-8 OLI görüntülerinin Mısır'daki Safaga Limanı'nda denizcilik haritalarını güncellemek için kullanılabileceğini gösterirken, Koçak (2022), Sentinel-2 görüntülerini ICESat-2 ATL03 foton verileriyle entegre ederek Gülbahçe Körfezi'nde (Türkiye) 15 m'ye kadar batimetri üretmiştir. Kutup bağlamında, Gülher ve Alganci (2023), Antarktika'daki Horseshoe Adası çevresindeki sığ su haritalaması için Göktürk-1'in, Sentinel-2 ve Landsat-8'e göre uzamsal çözünürlük avantajını vurgulamıştır. Buna bağlı ek çalışmalarda ise, Türkiye'nin Karadeniz kıyısı boyunca akustik ölçüm verileriyle karşılaştırmalar (Yılmaz ve diğerleri, 2023) ve İtalya'daki Pozzuoli Körfezi'nde Elektronik Seyir Haritası (ENC) verilerine karşı doğrulama (Figliomeni ve Parente, 2024) dahil olmak üzere çeşitli optik koşullar altında SDB'nin uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Koltz ve diğerleri (2024) zamansal korelasyon ve radon dönüşümü kullanarak uydu görüntüleri üzerinden sığ sularda batimetri elde etmiştir. Son çalışmalar ayrıca, fizik tabanlı SDB yaklaşımlarının Landsat OLI görüntülerini kullanarak 30 m derinliğe kadar batimetriyi elde edebildiğini göstermiştir (Kim ve diğerleri, 2024). Ayrıca, gelgit duyarlı, çok zamanlı yöntemlerin ise İspanya kıyısı boyunca yaklaşık 14 metreye kadar (Viaña-Borja ve diğerleri, 2025), Libya'nın Al-Khoms (Homs) limanına ait uydu batimetri tespit çalışmalarında ise 18 metreye kadar güvenilir sonuçlar elde edildiğini göstermiştir (Bora ve diğerleri, 2025). Karşılaştırılabilir İHA ve çok spektrumlu tabanlı SDB uygulamaları, sensör özelliklerinin,

bant seçiminin ve kalibrasyon stratejilerinin sığ sularda batimetrik doğruluğu ve uygulanabilirliği kritik olarak kontrol ettiğini göstermiştir (Sefercik ve diğerleri, 2024).

Konu ile alakalı ayrıca makine öğrenme algoritmalarındaki gelişmeler sayesinde uydu görüntüleri kullanılarak batimetri çalışmaları yapılmaktadır.

Manessa ve diğerleri (2016), WorldView-2 uydu görüntüleri üzerinden Endonezya'daki Gilli Mantra ve Panggang Adaları'nı çevreleyen sığ mercan resifi sularında batimetriyi haritalamak amacıyla Rastgele Orman (RF) yöntemini kullanmış ve elde ettiği bulgular kapsamında su derinliğinin tahmin edilmesinde doğrusal regresyona kıyasla daha iyi performans sergilediğini tespit etmiştir.

Hakim ve diğerleri (2018), regresyon analizlerini kullanarak batimetri tahminlemesini yapmıştır.

Sagawa ve diğerleri (2019), Rastgele Orman (RF) algoritmasını kullanarak Landsat-8 uydu görüntülerinden 20 metreye kadar batimetriyi tahminlemesinde bulunmuştur.

Alevizos (2020), Rastgele Orman (RF) ve K-En Yakın Komşular (KNN) makine öğrenme algoritmalarının potansiyelini araştırmıştır.

Tonion ve diğerleri (2020), Sentinel-2 uydu verilerinden batimetriyi tahmin etmek için Rastgele Orman (RF) ve Destek Vektör Makinesi (SVM) algoritmalarını uygulamıştır.

Wu ve diğerleri (2022), uydu batimetrisi elde edilebilinmesi maksadıyla çoklu makine öğrenme algoritmalarını kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Çelik ve diğerleri (2023), makine öğrenmesi yaklaşımlarında Rastgele Ormanın etkinliğini vurgulamıştır.

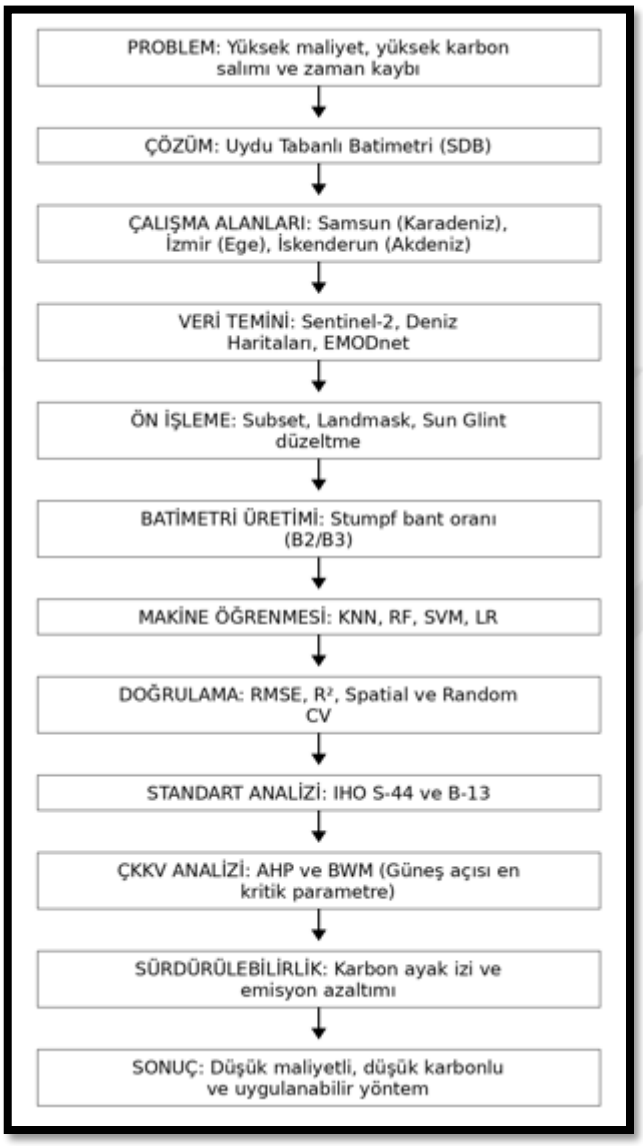
Gülher ve diğerleri (2024), makine öğrenme tabanlı SDB yaklaşımlarıyla batimetri doğruluğunun arttırabileceğini öne sürmüştür.

Ashphad ve diğerleri (2025), Landsat-7 ve Landsat-8 spektral bantlarını kullanarak özellikle Random Forest yöntemiyle uydu tabanlı batimetrinin başarılı sonuçlar elde ettiğini belirtmiştir.

Yang ve diğerleri (2026), Güney Çin Denizi'nde yapmış olduğu uydu batimetri çalışmalarında, makine öğrenme modellerinin, ampirik modellere göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir.

1.5. Problem Temelli İş Akış Şeması

Bu çalışma kapsamında izlenen metodolojik yaklaşım, problem temelli bir iş akış şeması ile Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Problem temelli iş akış şeması

Çalışmanın genel şeması, problemin belirlenmesi, veri temini, modelleme, doğrulama ve sürdürülebilirlik analizlerini içermektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Hidrografik Çalışmaların Tarihsel Süreci ve Gelişimi

Bugün bilinen en eski deniz haritası, 1829 yılında Pisalı bir aileden alınarak Paris'teki Bibliothèque Nationale'e getirilen ve bu nedenle Carte Pisane olarak adlandırılan haritadır (Ritchie, 1991). Hayvan derisi üzerine çizilen bu haritanın, 13. yüzyılın sonlarına doğru deniz haritacılığı okulunun bulunduğu Cenova'da yapılmış olabileceği düşünülmektedir. "Portolon" olarak bilinen bu haritalar, her okulda biçim ve içerik olarak benzer şekilde oluşturulmaktaydı. En göze çarpan özelliği ise bir geminin rotasını belirlemek amacıyla ayırıcılarla birlikte kullanılan, 32 rüzgâr yönünü temsil eden ve rüzgâr güllerinden yayılan birbiriyle bağlantılı kerte çizgilerinden oluşan ağlardır. Akdeniz kıyılarında, karadaki kıyı isimlerinin yanı sıra deniz altındaki kayaları göstermek maksadıyla konulan çarpı işareti de dâhil olmak üzere harita üzerinde birkaç sembol bulunsa da derinlikle ilgili hiçbir bilgi bulunmamaktadır (IHO, 2005).

15. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, Portekiz ve İspanyol portolanları sayesinde Akdenizli denizciler İngiltere'nin güneyine kadar gidebilmişlerdir. Kuzeyli denizciler ise nesiller boyu atalarından kalma "caping the ship" adıyla bilinen bir kılavuzlanma yöntemi olan yazılı yönergeler ve derinlik bilgileri ile ana hatlar üzerinde ilerlemişlerdir. Ayrıca bu dönemde matbaanın gelişmesiyle birlikte, tahta baskılar üzerine kıyı görünümlerinin basit bir şekilde resmedildiği "Routier de la Mer" ile kıyı bilgilerini ilk kez bastıran kişi Rouen'li Pierre Garcie olmuştur (IHO, 2005).

Amsterdamlı bir teknik ressam olan Cornelius Anthonisz ise, tahta baskı kalıpları sayesinde harita çizimlerinin kâğıt üzerine yapılabileceğini fark ederek Baltık ve Kuzey Denizleri'nin çizimlerini ilk defa "Karte van Ostland" adlı haritasında kullanmıştır. Kerte çizgileri ve diğer portolon özellikleri için ise, yakın bir tarihte İstanbul'da yeniden ortaya çıkarılan (Günergun, 2020) Ptolemy'nin izdüşümünden yararlanmıştır (Benabbes, 2020).

Baskı kalıplarıyla harita çizim yolunu Anthonisz açmış olsa da, kırk yıl sonra bakır levha baskılarıyla kâğıt haritalar yapan ilk kişi Hollandalı, Enkhuizen asıllı Lucas Janszoon Waghenaer olmuştur. Uzun yıllar boyunca denizlerde seyahat edip hidrografik bilgiler toplayan Waghenaer, 49 yaşında karaya çıktığında haritaları derleyebilmek amacıyla denizci arkadaşlarından yardım almıştır. Bu kapsamda; 1584 yılında Norveç'ten Cebelitarık Boğazı'na kadar Avrupa kıyılarını kapsayan 45 haritadan oluşan "De Spieghel der Zeevaerdt" (Deniz Aynası) adlı atlasını yayımlamıştır. Waghenaer, sahil şeritlerinin arkasındaki kıyı bölgelerinin tanımlanmasına yönelik profiller de dâhil olmak üzere yeni özellikler ekleyerek, yaklaşımlarını daha büyük ölçeklerde gösterebilmek için limanlar arasındaki mesafeleri azaltmış; şamandıra, fener, kilise kuleleri vb. unsurlar için, med-cezir arasında derinliklere indirgenen iskandillere yönelik semboller kullanmıştır. Waghenaer, ilk defa bir denizci tarafından hazırlanan kâğıt haritalarla büyük bir çığır açmış, 100 yıldan fazla bir süre boyunca İngiliz suları da dâhil olmak üzere birçok Hollanda kökenli harita geniş bir alanda kullanılmıştır (Utrecht University, 2023; Koeman, 1964).

Kağıt haritalarda bölgesel anlamda Hollanda hegomanyasından rahatsız olan Kral Charles, tüm İngiliz kıyılarının ve limanlarının haritasını çıkarma kararı alarak bu zorlu görev için deniz subayı Greenville Collins'i seçmiştir. Ayrıca çalışmalarını yapabilmesi maksadıyla Merlin isimli yatını tahsis eden Charles, Collins'i onurlandırmak amacıyla "Kralın Hidrografçısı" unvanını da kendisine vermiştir (Ritchie, 1991). 1681 yılında başlayan ve yaklaşık on yıl süren çalışmalarda, Collins'in haritalarına referans olabilecek Krallığa ait topografik haritalar bulunmamakta ve çalışmalarında boylamı tespit edebileceği genel bir yöntem mevcut olmamaktaydı. Dönemin şartlarında, yalnızca bulunduğu enlemi (konumu) tayin etmek için bir açı ölçme aleti bulunmaktaydı. Pusulalar sayesinde ise kıyı üzerinden sabit noktalardan referans alınarak kerterizler belirlenmiş; alçak su derinliği ile el iskandilleri (ölçüm zincirleri) tarafından ölçülen derinlik verileri elde edilmeye çalışılmıştır. 1693 yılında ise elde edilen bu veriler, seyir talimatları ve kıyı görünüşlerini içeren 47 harita ve 30 sayfalık "Great Britain's Coasting Pilot" adlı atlasta yayımlanmıştır. Özenli bir şekilde çizilen bu haritalar, derinlik bilgisi ile liman girişlerini gösteren çizgileri de içermektedir. İngiliz denizcilerin ilgi odağı olan bu atlasın devamında ise yirmi baskı daha yapılmıştır (Pastoureau, 1984).

16. yüzyılda, uzak kıyılara seyahat etmiş deniz pilotları tarafından Fransa'nın Dieppe şehrinde bir hidrografi okulu kurulmuştur (Chadelat, 1954). 1661 yılında, Kral Louis XIV'in hükümdarlığı altında devlet yönetiminde bulunan Jean Baptiste Colbert, sadece Dieppe okulu ile yetinmeyerek çeşitli Fransız limanlarında da benzer hidrografi merkezleri oluşturmuştur. Tüm Fransız kıyı şeritlerinin, Cassini hanedanlığı tarafından kurulan ulusal nirengiye bağlanacak şekilde haritalamasını yaptırmış ve sonrasında, Quebec şehrinden getirtmiş olduğu malzemeler sayesinde Paris'te Ulusal Hidrografi Dairesi olarak bilinen "Dépôt Général des Cartes et Plans"ı kurmuştur (Pritchard, 1979). Hidrografi dairesi kuran ikinci ülke Danimarka olmuş ve onu 1795'te İngiltere izlemiştir. Müteakip yıllarda da yirmi civarında ülkede benzer hidrografi daireleri kurulmaya başlanılmıştır (Heidenreich, 1985).

1775 yılında iki İngiliz mesahacı Murdoch ve Mackenzie, karada üç sabit nokta arasındaki iki yatay açının tespitiyle geminin kesin konumunun belirlenmesi devrim yaratan bir gelişmeye öncülük etmiş ve bu icat 19.yy'da deniz mesahası alanında gerek barış gerekse savaş durumunda deniz haritalarına duyulan ihtiyaçta büyük rol oynamışlardır (Robinson, 1962).

Konumlandırma tekniklerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, klasik yöntem olan el iskandilinin yerine alternatif derinlik ölçüm tekniklerinde de değişikliğe gidilmiştir. 1807 yılında ilk kez Dominique François Jean Arago tarafından, ses dalgaları sayesinde su derinliğinin tespit edilebileceği öne sürülmüş; 1828 yılında ise Daniel Calladon ve Charles Sturm tarafından Cenevre Gölü'nde suyun ses hızı değeri 1435 m/sn olarak ölçülmüştür. 1872 yılında William Thomson tarafından mekanik iskandil aleti icat edilmiş ve yaklaşık 50 yıl boyunca farklı türlerde mekanik iskandil aletleri geliştirilmiştir. 1910 yılında ise Robert Blake ve William Gunn tarafından deniz tabanına gönderilen ses dalgasının yaklaşık 2 saniye sonra yansıdığı tespit edilerek, su içerisinde ses dalgasının hareketleri izlenmiş ve iskandil ölçümlerinde bir devrimin başlamasına zemin hazırlamıştır. Bu gelişmeler neticesinde ise 1922 yılında Harvey Cornelius Hayes tarafından geliştirilen sualtı akustik (tek ışınlı) iskandil ile Güney Kaliforniya bölgesinin ilk batimetrik haritası üretilmiştir (Theberge, 1989).

Birinci Dünya Savaşı öncesinde, uluslararası iş birliği ile harita tasarımlarının standartlaştırılması konusunda fikir yürüten Marie Joseph Augustin Renaud, 1908 yılında Rusya'nın St. Petersburg kentinde düzenlenen Uluslararası Denizcilik Kongresi'nde, deniz haritalarındaki geleneksel işaretler, kısaltmalar, seyir rotalarının hazırlanması ve

düzenlenmesi, kıyıların ışıklandırılması ve şamandıraların standartlaştırılması gibi konuların denizciler ve haritacıların da dâhil olacağı uluslararası bir konferansta tartışılması gerektiğini ifade etmiş; ancak somut gerekçeler ve kaynaklar sunamadığından önerisi zayıf kalmıştır. 1912 yılında yine St. Petersburg'da düzenlenen Uluslararası Denizcilik Konferansı'nda ise, haritalar ve yayınların üretim yöntemleri konusunda ortak bir anlaşmanın denizcilere sağlayacağı büyük avantajlardan güçlü bir şekilde bahsedilerek, Denizcilik Konferansı'nda çok fazla konunun ele alındığı ve bu kapsamda yalnızca hidrografi ile sınırlandırılacak bir konferansın çok daha büyük ilerlemeler kaydedebileceği ifade edilmiştir. Fakat Birinci Dünya Savaşı'nın başlamak üzere olduğu bir dönemde, herhangi bir uluslararası iş birliği için uygun bir atmosfer bulunmamaktaydı (Baro, 2019).

Savaşın ardından İngiliz ve Fransız hidrografçılar, uluslararası bir konferansın düzenlenme olasılığını değerlendirmiş ve Renaud'un öncülüğünde Haziran 1919'da Londra'da, 24 ülke delegesinin katılımıyla gerçekleştirilen uluslararası bir konferans düzenlenmiştir. Konferansta, denizcilikle ilgili genel ve özel konuların yanı sıra, dünya üzerindeki hidrografik ofisler arasında etkin ve sürekli iş birliğinin sağlanması maksadıyla kalıcı bir örgütün kurulmasına ilişkin önemli kararlar alınmıştır. Konferans tutanaklarıyla yakından ilgilenen H.S.H. Monaco Prensi I. Albert, şu anda da örgütün aktif olarak bulunduğu ve kullandığı binayı temin etmiştir. 21 Haziran 1921 tarihinde örgüt resmî olarak kurularak faaliyetlerine başlamıştır. 1921'den 1967 yılına kadar Uluslararası Hidrografi Bürosu (IHB), sonrasında da şu anki adıyla Uluslararası Hidrografi Örgütü (IHO) olarak çalışmalarını hâlen sürdürmektedir (Bermajo, 1997).

Uluslararası Hidrografi Örgütü'nün gelişimine paralel olarak batimetri tespitinde kullanılan akustik cihazlarda da gelişmeler devam etmiştir. 1960'lı yıllarda okyanus araştırmalarına yönelik çalışmalar yapılmış, bu zamana kadar kullanılan tek ışınlı iskandilin yerine çok ışınlı iskandil sistemleri ve aynı zamanda yandan taramalı sonar sistemleri bilim dünyasına kazandırılmıştır. Çok ışınlı iskandil ilk olarak 1963 yılında kullanılmış ve 1968 yılında seri üretime geçilmiştir. 1970'li yıllardan günümüze gelindiğinde ise akustik ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi yönündeki çalışmaların ışığında, insansız su altı araçları (ROV), optik ve uydu sistemlerinden batimetri elde etmeye yönelik araştırmalar devam etmektedir (Yoerger ve diğerleri, 2007; Mayer ve diğerleri, 2018).

2.1.1. Cumhuriyet öncesi ve sonrası Türkiye'deki hidrografi çalışmaları

Türk Donanması'nın denizcilik ve hidrografiye olan ilgisi, tarih boyunca köklü bir geçmişe dayanmaktadır. Özellikle 15. yüzyıla dayanan bu önemli miras, Türk leventlerinin denizlerle olan ilişkilerini ve seyir pratiğinin gelişimini de etkilemiştir. Türk amiral ve denizci Piri Reis, bu zengin denizcilik kültürünün önemli temsilcilerinden biridir (İnancık, 1994).

Piri Reis'in 1531 yılında yazdığı Kitab-ı Bahriye, Akdeniz'in seyir rotalarını detaylı bir şekilde açıklayan önemli bir kaynaktır. Bu kitap, Akdeniz kıyıları ve denizcilikle ilgili temel konular hakkında değerli bilgileri içermektedir. Piri Reis'in deniz haritacılığındaki diğer önemli katkısı ise bilinen tüm 16. yüzyıl deniz rotalarını gösteren ünlü Piri Reis Haritası'dır. Bu harita, o dönemdeki denizcilik bilgisinin ötesinde, coğrafi keşiflere de dair önemli bir kaynaktır (Kahraman, 2013).

17. ve 18. yüzyıllar arasındaki yazılı kaynakların eksikliği nedeniyle hidrografik araştırmalarla ilgili bilgilerin sınırlı olduğu görülmektedir. 19. yüzyılın başlarına gelindiğinde ise hidrografik araştırmalara yeniden odaklanıldığı görülmektedir. Bu dönemde, Ahter ve Neyyirzafer adlı iki Türk araştırma gemisi Karadeniz'in Türkiye kıyılarında detaylı araştırmalar yapmıştır. Bu gemilerin araştırmaları, coğrafi bilgi ve denizcilik haritası oluşturma çabalarına önemli katkılar sağlamıştır (Gözügüzelli, 2022).

1824 yılında, Gülsefit araştırma gemisi, Rus hidrologlarla birlikte Marmara Denizi'nde kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu dönemde, deniz hidrografisi ve coğrafyasının anlaşılması amacıyla icra edilen araştırmalar, bölgenin denizcilik ve haritacılık alanındaki bilgi birikimini artırmaya yönelik önemli adımlardan biridir. Bu araştırmalardan birkaç yıl sonra, İngiliz Donanması da bölgedeki denizlerde araştırmalara başlamıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde denizlerin derinlikleri, akıntılar, sığlık bölgeleri ve diğer önemli hidrografik özellikler hakkında kapsamlı bilgiler sağlanmıştır (Gözügüzelli, 2022).

19. yy'ın ortalarına gelindiğinde ise Türk deniz haritacılığında önemli bir ilerleme yaşanmıştır. 1840 yılında Mekteb-i Bahriye Matbaası'nda basılan ilk sözde modern Türk deniz haritası, özellikle Karadeniz'in bir bölümünü içermektedir. Bu harita günümüzde Denizcilik Müzesi'nde muhafaza edilmektedir (Bostan, 1992).

1890 ile 1900 yılları arasında Türk denizciliğinde bir dönüşüm yaşanmıştır. 1901 yılında, iki Türk deniz subayı bakır levha tekniğini öğrenmeleri maksadıyla Bahriye Hidrografi Dairesi'ne gönderilmiş, görevleri sonrasında ülkeye dönüşlerinden yaklaşık bir yıl

sonra, 1902 yılında Türk Donanması Matbaası'nda bakır klişe haritalar üretilmeye başlanmıştır. Resmî olarak Türkiye'nin ilk hidrografik ajansı olan Denizcilik Etüt ve Seyir Bürosu, 1909 yılında Bahriye Bakanlığı'na bağlı olarak kurulmuştur. Büronun temel görevleri arasında, seyrüsefer emniyetini düzenlemek maksadıyla denizcilere ihbarda bulunmak, seyir fenerlerini düzeltmek ve ihtiyaç dâhilinde seyir aletlerini temin etmek yer almaktaydı (Ülkekul, 2009).

Bu dönemde Türk hidrografisinin gelişiminde önemli katkıları bulunan isimlerden biri de Ahmet Rasim Barkınay'dır. Osmanlı Donanması'nda görev yapan Barkınay, deniz haritacılığı ve hidrografik ölçümler alanında yürüttüğü çalışmalarla, modern Türk hidrografisinin temellerinin atılmasına katkı sağlamıştır. Özellikle deniz haritalarının hazırlanması ve seyir güvenliğinin arttırılmasına yönelik faaliyetleri ile bu alandaki kurumsallaşma sürecine önemli katkılarda bulunmuştur.

1911 yılında, Denizcilik Etüt ve Seyir Bürosu bir düzenleme sürecine girerek Deniz ve Deniz Haritaları Bürosu olarak yeniden yapılandırılmıştır. Nispeten bağımsız bir statü kazandırılan büro da ise faaliyetlerin daha etkili bir şekilde sürdürülmesine imkân sağlanılmıştır. 1928 yılına gelindiğinde ise büro, günümüzde Harita Genel Müdürlüğü olarak bilinen, o dönemde ise Jeodezi Mesahalar Genel Müdürlüğü'ne bağlanmış ve akabinde bu kurumun Harita Şubesi'ni oluşturmuştur. 1950 yılında Jeodezi Genel Bürosu'ndan ayrılarak Seyir ve Hidroloji Dairesi adı altında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlanmış ve Kasımpaşa/İstanbul'a taşınmıştır. 1956 yılında, şu an bulunduğu yer olan Çubuklu/Beykoz'daki tesislerine geçerek faaliyetlerine devam etmiştir. 1972 yılında ise Seyir ve Hidroloji Dairesi'nin adı, günümüzde de kullanılan Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı olarak değiştirilmiştir (SHOD, 2025a).

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi, çevre denizlerdeki seyir emniyeti, bilimsel araştırmalar ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığı unsurlarına destek sağlamak amacıyla faaliyet gösteren bir kurumdur. Hem askerî hem de sivil denizciler için seyir konularında, koordine ettiği hidrografik ve oşinografik araştırmalar çerçevesinde gerekli hizmetleri ve ürünleri temin ederek ulusal ve uluslararası düzeyde faaliyetlerini sürdürmektedir (SHOD, 2025b).

2.2. Uydu Tabanlı Batimetri Çalışmalarının Tarihsel Süreci ve Gelişimi

1965 yılında Uluslararası Oşinografi Komitesi'nin dördüncü toplantısında, mevcut kullanılan deniz haritalarının 19. yüzyıldan kalma ölçüm tekniklerine dayanması ve birçok

ülkenin deniz haritalarının yapılmasında batimetri tespitine yönelik teknik altyapılarının yetersiz olması nedeniyle seyrüsefer emniyetine ilişkin endişeler ele alınmıştır. Ayrıca, kullanılan haritalar üzerindeki şüpheli derinliklerin güncellenmesi ihtiyacından da bahsedilmiştir. Bu durum, dünyayı gözlemleyen sensörlere sahip uyduların sığ sular ve geniş alanlar üzerinde seyrüsefere yönelik diğer engellerin nispeten kısa sürede tespit edilmesine yardımcı olabilecek yeni bir teknik olabileceği düşüncesini ortaya çıkarmıştır (Polcyn ve Rollin, 1969).

Temmuz 1972'de, yeryüzü kaynaklarının araştırılması maksadıyla Dünya Kaynakları Teknoloji Uydusu (ERTS) olarak bilinen Landsat-1 uydusu fırlatılmıştır. Ertesi yıl yapılan çalışmalar ile Landsat-1 görüntülerinden sığ suların batimetrisinin tespit edilmesindeki potansiyel değerlendirilmiştir (Polcyn ve Lyzenga, 1973).

Ağustos 1975'te Jacques Cousteau'nun önderliğinde dalgıç ve bilim adamlarından oluşan bir ekip, NASA'nın yeni Landsat uydusunun sığ okyanus sularının derinliğini ölçüp ölçemeyeceğini tespit etmek maksadıyla çalışmalara başlamıştır. Ölçüm ekipmanları ile donatılmış Calypso isimli bir gemiyle Bahamalar ve Florida kıyı hatlarında araştırma seyirlerine çıkarak, çalışma alanları üzerinde uydunun geçişi esnasında su berraklığı, su kolonu boyunca ışık iletimi ve dip yansımanın tespit edilebilmesi amacıyla eş zamanlı ölçümler yapmışlardır (Gray, 2010).

Bilim insanları bu ölçümleri kullanarak ışığın su kolonu içerisinde ne kadar uzağa gidebileceğini ve okyanus tabanından ne kadar yansıyabileceğini incelemiş; uydu verileri ile su derinliği arasındaki ilişkiyi açıklayan matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, berrak sularda 22 metreye kadar derinliklerin Landsat uydusu tarafından ölçülebileceği tespit edilmiştir. Yapılan bu keşif sayesinde Landsat uydularının sığ okyanus sularını ölçmek için yararlı olabileceği teorik olarak ortaya konmuş; derin su çekimine sahip tankerlerin dünya çapında ham petrol taşıması ve çevresel felaketlerden kaçınmak amacıyla nakliye yolları üzerindeki suların en az 20 metreden daha derin olmasının bilinmesi önemli hâle gelmiştir. Bu sayede, uydu görüntüleri üzerinden dünya üzerindeki sığ ve temiz su alanlarına ait haritaların seyir emniyeti açısından daha güvenli hâle getirilmesine yönelik çalışmalar başlamıştır (Gray, 2010).

1980'lerin ortalarında ise Amerika Birleşik Devletleri Donanması tarafından GEOSAT uyduları üzerinden çok yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilerek kıyı bölgelerinin

batimetrisini belirlemek amacıyla kullanılmış ve uydu görüntülerinden batimetri çıkarımının popüler bir araç hâline gelmesine katkı sağlanmıştır (CNES, 2023).

Sığ kıyı sularının yüzey yansımasının su kolonu derinliğiyle ilişkilendirildiği uydu tabanlı batimetri çalışmaları, özellikle çalışma ve çıkarım tekniklerinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda derinlik verisi açısından referans olmaya devam etmektedir (Dolou ve diğerleri, 2020).

2.3. Hidrografik Ölçümlerde Kullanılan Aletler

Bu bölümde, geçmişten günümüze hidrografik ölçüm sistemlerinde kullanılan ve kullanılmaya devam eden aletlerden bahsedilmektedir.

2.3.1. Lata iskandil

Suya kolayca dalmasını ve yumuşak su altı zeminlerde batmasını önlemek üzere ucunda metal bir başlık bulunan, yaklaşık 4 ila 6 m uzunluğunda, üzerinde metre ve desimetre bölümlerine ayrılarak okumayı kolaylaştırmak maksadıyla renklendirilmiş ahşap ve metal yapılardır. Ayrıca, iskandil ucundaki metal başlık sayesinde deniz dip tabiatı hakkında da bilgi verebilmektedir (Hamden ve Din, 2018).

2.3.2. El iskandili (ip iskandil)

Üzerinde belirli aralıklarla derinliği ifade eden kumaş veya pirinç plakalar bulunan, düşey doğrultuya girmesini sağlayan ağırlık sistemi sayesinde derinlik bilgisini elde etmeye imkân tanıyan ve alt kısmındaki oyuk yapı sayesinde deniz dip tabiatı hakkında bilgi verilmesini sağlayan yapılardır. Günümüzde denizciler tarafından hâlihazırda kullanılmakta olan bu basit iskandil, uygulama esnasında telin veya ipin bükülmesi sonucu hatalı ölçümlere sebep olabilmektedir (Ingham, 1993).

2.3.3. Mekanik (Makaralı) iskandil

Genellikle 30 metreden daha derin sularda, telin makara sistemi sayesinde bir sayaç yardımıyla devir sayısı sayılarak tel uzunluğu üzerinden derinliklerin tespit edilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Telin ucundaki ağırlık zemine ulaştığında, telin daha fazla açılmasını önleyen otomatik bir fren sistemi bulunmaktadır (SHOD, 1985).

2.3.4. Hidrostatik iskandil

Derinlik, hidrostatik basınç sensörü sayesinde, ölçüm yapılacak her noktada cihazın bir halat veya tel yardımıyla su altındaki yüzeye indirilmesiyle ölçülmektedir. Ölçülen basınç değeri, diyagramlar aracılığıyla hesaplanarak derinlik değeri elde edilmektedir. Alet, hızlı ve

sürekli ölçüm yapmaya olanak vermediğinden dolayı günümüzde artık kullanılmamaktadır (Ritchie, 2000).

2.3.5. Termometrik iskandil

Yöntem, su altında belirli noktalarda sıcaklık ve basıncın ölçülmesiyle derinliğin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Genellikle 1000 m ve daha derin sularda uygulanan bu alet, hızlı bir çalışma olanağı vermediğinden günümüzde kullanım önemini kaybetmiştir (SHOD, 1985).

2.3.6. Tel süpürme yöntemi

Seyir tehlikesine neden olabilecek su altında olası kayalık, batık vb. engellerin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişimine bağlı olarak doğruluk ve hassasiyeti yüksek batimetri tespit cihazlarının ortaya çıkmasıyla birlikte tel süpürme yönteminin kullanımı etkisiz hale gelmiştir (NOAA, 2024).

2.3.7. Dalgıç (Balıkadam) sayesinde derinlik tespiti

Çalışabilecekleri derinlik sınırlı olmakla birlikte, genellikle bot ya da tekneye bağlı halat yardımıyla sığ sularda derinlik bilgisinin çıkarılması maksadıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemle deniz tabanında ya da askıda bulunan küçük ve büyük cisimlerin özellikleri kolayca tespit edilmektedir. Ayrıca dip tabiatı hakkında bilgi sağlanması maksadıyla numune alımı için de etkili bir yöntemdir (Davis, 1995).

2.3.8. Tek ışınlı iskandil (Single beam echosounder)

Transdüser sayesinde ses dalgasının su içerisinde yayılması ile yankının deniz tabanından geri dönmesi arasındaki zaman aralığını ölçerek derinliği belirleyen cihazlardır. Genel olarak ses dalgasının ana amacı, yankı izi üzerinde tutarlı ve yüksek çözünürlüklü dikey bir deniz tabanı profili oluşturmaktır. Cihaz üzerindeki bağlantı kabloları sayesinde, kullanılan bilgisayar tabanlı programlar vasıtasıyla yankı izi örneklendirilerek sayısallaştırılmaktadır. Bu sayısallaştırma, derinlik bilgisine ulaşmamıza yardımcı olmaktadır (Vallario ve Parente, 2019).

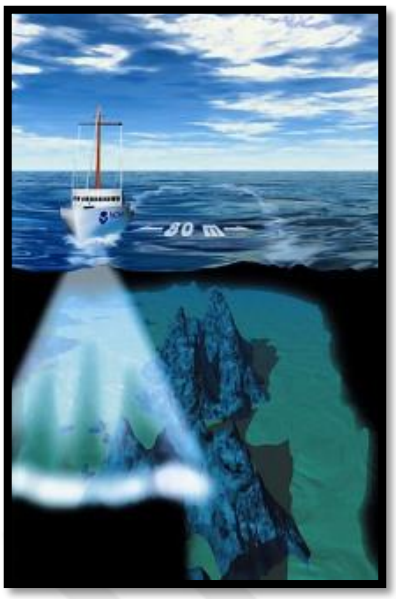


Şekil 4. Tek ışınlı iskandil (Klemm ve diğerleri, 2020).

Tek ışınlı iskandil için seçilen transdüserler, derinliğe bağlı olarak dar ya da geniş bir ışına sahip olabilmektedir. Yüksek çözünürlüklü haritalama için genellikle 2º ila 5º arasındaki dar ışınlar gerekmektedir. Bu ışınlar, ölçüm esnasında transdüserin altındaki derinliği dikey olarak ölçmek için stabilize edilebilmektedir. Geniş ışınlar ise seyir tehlikelerinin, minimum derinliklerin veya engellerin tespitinin öncelikli olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Geniş ışınlar genellikle stabilize olmamakla birlikte, deniz koşullarında transdüserin pozisyonu ölçümleri etkilememektedir. Günümüzde tek ışınlı iskandiller aktif olarak kullanılmaktadır (IHO, 2005).

2.3.9. Çok ışınlı iskandil (Multi beam echosounder)

Aynı transdüser içerisinde, belirli bir açısal oran ve yelpaze görüntüsünü anımsatan birden fazla ışının deniz tabanına çarpıp transdüsere geri gelme sürecindeki ses dalgası hareketlerinin sayısal hâle dönüştürülmesi prensibine göre çalışmaktadır. Tek ışınlı iskandil, anlık olarak yalnızca bulunduğunuz konumda derinlik bilgisi verirken, çok ışınlı iskandil sayesinde aynı anda birden fazla ışının iletim ve alım yapması sonucunda, açıya bağlı olarak bulunduğumuz konum haricindeki diğer alanların da derinlik bilgisine ulaşılabilmektedir. Işınlar arasındaki açı ne kadar dar olursa, derinlik ölçümü o kadar yüksek doğrulukta ve hassasiyette olacaktır (IHO, 2005).

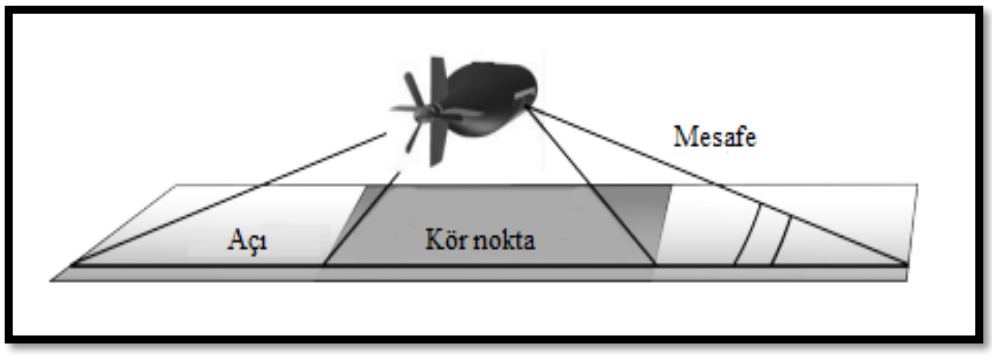


Şekil 5. Çok ışınlı iskandil (Klemm ve diğerleri, 2020).

Çok ışınlı iskandil, zamana bağlı olarak deniz tabanının batimetrisinin hızlı bir şekilde belirlenmesi maksadıyla hidrografik ofisler tarafından sıklıkla tercih edilen bir sistemdir. Güncel olarak yayımlanan deniz haritalarında kullanılmak üzere çok ışınlı verilerin kabul edilmesi de teknolojiye artan güvenin bir işaretidir. Etkileyici yeteneklerine istinaden mesaha planlamacıların, operatörlerin ve veri inceleme personelinin çok ışınlı iskandilin çalışma ilkeleri hakkında detaylı bilgi sahibi olmaları, seyir emniyeti açısından hayati önem taşımaktadır (Wu ve diğerleri, 2020).

2.3.10. Yandan taramalı sonar (Side-scan sonar)

Yandan taramalı sonar, deniz derinliği ölçümlerinde temel bir yardımcı olarak kabul edilmektedir. Araştırma hatları arasında veya üzerinde bulunan batıkların ve su altı engellerinin yerlerinin detaylı incelenmesi hakkında bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca, toplanan veriler sayesinde deniz tabanının sınıflandırılması için önem arz etmektedir. Örnek olarak, belirli bir alandaki kum dalgalanmalarının varlığı deniz tabanının hareketli olduğunun bir göstergesidir. Seyrüsefer güvenliğinin sağlanması için ana nakliye yolları üzerinde derinlik bilgisine bağlı kontur bilgisi sunmasının yanı sıra; balıkçılık ve deniz kaynaklarının etkin kullanımı bakımından ekolojik denge, askerî açıdan amfibi harekâtı, mayın arama/tarama, denizaltı operasyonları vb. konular hakkında da değerli bilgiler vermektedir (Shang ve diğerleri, 2019).



Şekil 6. Yandan taramalı sonar (Hansen ve diğerleri (2011)'den değiştirilmiştir).

2.3.11. Uzaktan kumandalı su altı aracı (Remotely underwater operating vehicle)

Uzaktan çalıştırılarak, genellikle bir kepçe veya kol aparatı yardımıyla numune toplayıp daha sonra incelenmek üzere video görüntüleri elde edilerek deniz tabanının sınıflandırılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, tek ışınlı iskandil, çok ışınlı iskandil ve yandan taramalı sonar cihazlarından elde edilen verileri de, üzerine bağlı sensörler sayesinde kıyaslama amacıyla kullanabilmektedir (Singh ve diğerleri, 2022).

2.3.12. Optik sistemler

Hidrografi ofisleri tarafından da kullanılan bu sistemler, açık ara en yüksek veri toplama oranlarına sahiptir. Özellikle kıyıya yakın ve sığ su alanların batimetrisi için uygundur. Ancak, veri toplama ve bunların işletilmesinde yer alan unsurların yüksek maliyetleri nedeniyle tek ve çok ışınlı iskandillere nazaran daha az kullanılmaktadır (Lewicka ve diğerleri, 2022).

2.3.13. Uydu görüntüleri

Geleneksel yöntemlere nazaran kıyı ortamlarını araştırmak için maliyet açısından en uygun seçenektir. Gidilmesi zor, ancak güncel batimetrik verilere ihtiyaç duyulan uzak konumlar için ekipman ve personel seferber etmeye gerek kalmadan, havadan veya denizden kullanılan yöntemlere kıyasla hem zaman hem de maliyet tasarrufuna katkı sağlamaktadır (Mumby ve diğerleri, 1999).

Uydu görüntüleri doğruluk, kesinlik ve çözünürlük açısından multibeam ve LiDAR ile rekabet edemeyecek olsa da, planlı batimetrik araştırmalar için bir keşif aracı olarak ve mevcut araştırma verileri kapsamındaki belirsiz topografik değerlerin tamamlanması amacıyla kullanılmaktadır (Quang ve diğerleri, 2024).

2.4. Kalibrasyon Düzeltmeleri

2.4.1. Akustik ölçümler

Uydu tabanlı görüntülerden batimetri çıkarımı maksadıyla, kalibrasyon uygulamalarından önce günümüzde yaygın olarak kullanılan akustik batimetri çalışmaları öncesinde gerekli düzeltme ayarlarının kavranması gerekmektedir. Küresel konumlandırma sistemi olan GPS'in çalışma mantığı; dünya çapında yörüngede bulunan uydu takımlarından her türlü hava koşuluna uygun, gerçek zamanlı ve üç boyutlu olarak gönderilen radyo sinyallerinin alınması prensibine dayanmaktadır (IHO, 2005).

Hidrografik araştırmalarda kullanılan konum ve derinlik gösteren cihazların birbirleriyle senkronize bir şekilde çalışması, batimetri çıkarımı için büyük önem taşımaktadır. Geçmişte klasik teodolitlerle yapılan konum belirleme ölçümleri, günümüzde internetin cihazlar üzerine entegre edilmesine bağlı olarak gerçek zamanlı kinematik (RTK) sayesinde yerini milimetrik düzeyde doğru ve hassas ölçüm yapabilen GPS sistemlerine bırakmıştır. Ancak milimetrik ölçüm hassasiyeti; GPS ile uydu arasındaki zaman hatası, yörünge hatası, atmosferik gecikmeler (iyonosfer ve troposfer), anten yüksekliği ve internet üzerinden alınan veri bağlantısının kalitesi gibi parametrelerden etkilenerek santimetre-desimetre (RTK/DGPS) ve metrik (DGPS) düzeylerde farklılık gösterebilmektedir (IHO, 2005).

Özellikle GPS düzeltmeleri dikkate alınmadan yapılacak bir batimetri çalışmasında, konumlandırma hatasına bağlı olarak sığ tespit edilen bir bölgenin daha derin, derin olarak tespit edilen bir bölgenin ise daha sığ ölçülmesine sebebiyet verilecektir. Ayrıca seyir emniyeti açısından, gerçekte var olan kıyı ve deniz altı topografyasında meydana gelen değişikliklerin tespit edilememesi de deniz haritalarının yapım çalışmalarında büyük hatalara neden olacaktır (Hare, 1995).

Akustik iskandil cihazlarının ölçme prensibi, deniz tabanına gönderilen ses dalgalarının su içerisindeki yayılma süresi ile ses hızının çarpılması esasına dayanmaktadır. Günümüzde batimetri çalışmaları yaygın bir şekilde tek ışınlı veya çok ışınlı iskandil cihazları ile yapılmaktadır. Bu cihazlar kullanılmaya başlanmadan önce, deniz tabanına gönderilen ses dalgalarının su kolonu içerisinde ilerlemesi ve deniz tabanından geri dönmesinin sağlanabilmesi için, suyun fiziksel özelliklerine bağlı olarak hız ölçer aletlerle ses hızı düzeltmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Calder ve Mayer, 2003).

Batimetri çalışmalarında ses hızı düzeltmesi, Sound Velocity Profiler (SVP) ve Conductivity, Temperature, Depth (CTD) olarak adlandırılan cihazlar sayesinde yapılmaktadır. SVP ve CTD cihazları suyun içine belirli bir derinliğe indirildiğinde, üzerlerindeki basınç sensörleri sayesinde cihazın su içerisinde ilerlediği iz hareketine bağlı olarak ses hızı kırılmasının hangi derinlikte gerçekleştiğini tespit etme prensibine göre çalışmaktadır (Steele ve diğerleri, 2001). Ayrıca SVP ve CTD cihazları üzerindeki diğer sensörler sayesinde suyun pH, oksijen, yoğunluk, iletkenlik, tuzluluk ve sıcaklık parametreleri de elde edilmektedir (USACE, 2002).

2.4.2. Uydu tabanlı batimetri

Seyrüsefer emniyeti için kullanılan deniz haritalarında en önemli batimetri verileri, 0 ila 30 m arasındaki ve genellikle kıyı bölgesine yakın olan alanlardır. Sığ alanlarda yapılan batimetri çıkarımları, derin sulardaki ölçümlerle kıyaslandığında kaplamaya bağlı olarak hem zahmetli olmakta hem de süre açısından oldukça zaman almaktadır. Bu bağlamda, uydu tabanlı batimetri yöntemleri IHO S-44 standartlarına uygun sonuçlar elde etmek üzere yeterince geliştirildiğinde, pratik, ekonomik ve güvenli bir batimetrik veri elde etme yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Gao, 2009).

Uydular tarafından sağlanan optik görüntüler, pankromatik, multispektral ve hiperspektral olmak üzere farklı çözünürlük türlerini içermektedir. Elektromanyetik spektrumda kaydedilen dalga boylarının sayısı arttıkça, uydu görüntülerindeki ayrıntı ve ayırt edilebilirlik düzeyi de artmaktadır. Ancak, elektromanyetik spektrumun yalnızca görünür bölgesi suya etkili bir şekilde nüfuz edebildiğinden, bu tür çalışmalarda genellikle görünür bantlar tercih edilmektedir. Su altı ve kara gibi doğrudan gözlemlenemeyen ortamlar, uydu görüntülerinin ham veri olarak analiz edilmesi durumunda yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir (Lyzenga ve diğerleri, 2006).

Uydu tabanlı batimetrinin esas girdisi, yüksek çözünürlüklü multispektral görüntüler kaydeden uydu sistemleridir. Son yıllarda yörüngeye gönderilen bu uydular sayesinde, elektromanyetik spektrumda daha dar aralıklarla elde edilen verilerle birlikte uydu kaynaklı batimetri yöntemlerinin ayırt etme kapasiteleri önemli ölçüde gelişmiştir. UTB uygulamalarında da tıpkı akustik batimetri çalışmalarında olduğu gibi, öncelikle elde edilen uydu görüntülerindeki potansiyel hataların giderilmesi ve şüpheli olabilecek derinliklerin elenmesi maksadıyla ışığın atmosfer, su yüzeyi ve su içerisinden deniz tabanına doğru kırılımı

ve yansımalarına bağlı olarak oluşan hata değerlerinin düzeltilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Düzeltme gereksinimleri, güneş ışığının atmosfer, su yüzeyi ve su sütunu içindeki yolculuğu sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, uydu tabanlı batimetri programlarının algoritma yazılımları; atmosferik düzeltme, güneş parıltısı giderme ve su sütunu düzeltmesi gibi süreçleri içermekte ve ilgili hataları düzeltme yeteneğine sahip olmaktadır (Lee ve diğerleri, 1999; Dekker ve diğerleri, 2011).

Tablo 1. Akustik ve uydu tabanlı batimetrinin kalibrasyon karşılaştırması

Akustik Batimetri	**Uydu Tabanlı Batimetri**
GPS Konum Düzeltilmesi	Atmosferik Düzeltme
HRP (Heave, roll, pitch)	Güneş Parıltısı Giderme
CTD / SVP (Su Profilliyecileri)	Su Kolonu Düzeltmesi

2.4.2.1. Atmosferik

Uydu görüntülerinde bulunan dijital sayılar, ham hâlde iken güneş radyasyonuna maruz kaldıklarından, yüzey reflektansının doğru bir şekilde elde edilebilmesi maksadıyla atmosferik etkilerin giderilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu etkiler, atmosferdeki gazlar, su buharı, toz ve diğer partiküllerin neden olduğu radyasyonun absorpsiyonu, saçılması ve yansımasıdır. Atmosferik düzeltme, uydu görüntülerinden doğru ve güvenilir bilgi elde etmek için bu etkileri minimize etmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda görüntünün yüzey özelliklerinin belirlenmesini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu süreç, özellikle su altı yüzeyinin derinlik haritası oluşturulurken doğru batimetrik verilerin elde edilmesi için kritik bir adımdır. Uygulanan düzeltmeler, atmosferin bölgesel değişkenlikleri ve görüntülerin çeşitli spektral bantlarındaki farklılıklar dikkate alınarak yapılmalıdır (Pacheco ve diğerleri, 2014).

Literatürde atmosferik düzeltme ile ilgili olarak; güneş spektrumundan uydu sinyalinin ikinci simülasyonu (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum–6S), karanlık nesne çıkarımı (Dark Object Subtraction–DOS), ampirik çizgi yöntemi (Empirical Line Method–ELM), düşük çözünürlüklü atmosferik iletim (Low-Resolution Atmospheric Transmission–LOWTRAN) ve orta çözünürlüklü atmosferik iletim (Moderate-Resolution Atmospheric Transmission–MODTRAN) gibi çalışma modelleri bulunmaktadır (Nazeer ve diğerleri, 2014).

Günümüzde uydular üzerinden elde edilen görüntüler incelendiğinde, güneşin Dünya'ya ve uydulara yansıttığı enerji sayesinde Dünya üzerindeki çok nadir bölgelerin tamamen karanlık göründüğü, buna karşılık ışığın minimum yayılma radyansının ise Denklem (2.1)'e göre hesaplandığı ifade edilmektedir (Chavez, 1988).

$$L_{1\%} = 0.01 \text{ x Egüneş}\lambda_i \frac{x\cos\theta_0}{\pi dg-d^2} \quad (2.1)$$

Bu eşitliğe göre;

Egüneşλi : λi bandı için Atmosfer dışı güneş radyansı

dg-d : Güneş ile dünya arası mesafe

Hesaplanan karanlık nesnenin radyansının yalnızca %1'i, uydu üzerindeki her bant için belirlenen değerden çıkarılarak atmosferik hataların ortadan kaldırılması sağlanmaktadır. Bu yöntem, veri toplama anındaki atmosfer koşullarının önceden bilinmesine ihtiyaç duymadan başarıyla uygulanabilmektedir (Chavez, 1988).

2.4.2.2. Güneş parıltısı

Güneş parıltısı, uydu sensörüne doğrudan ulaşan güneş ışığının su yüzeyinden yansıması sonucu, uydu görüntülerinde istenmeyen parlaklık ve yansımalara neden olan bir olgudur. Bu durum, batimetri çıkarma sürecinde su altı topografyasının doğru bir şekilde belirlenmesini zorlaştırabilmektedir. Güneş parıltısının giderilmesi süreci, uydu görüntülerinden batimetri çıkarılmasında doğruluğu artırmak için önemlidir. Bu işlemler, su yüzeyindeki parıltının belirlenmesini ve azaltılmasını sağlamak amacıyla genellikle karmaşık algoritmalar ve görüntü işleme tekniklerini içermektedir. Bu yöntemlerin etkinliği, kullanılan uydu sensörü, spektral bantlar ve bölgesel atmosfer koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Hedley ve diğerleri, 2005; Kay ve diğerleri, 2009).

Güneş parıltısını giderme kuramı ilk olarak Hochberg ve diğerleri (2003) tarafından ortaya konulmuştur. Görünür dalga boylarında NIR parlaklığı ile güneş parıltısı arasındaki doğrusal ilişkiyi belirlemek amacıyla, uydu görüntüleri üzerinde dip yapısı önceden bilinen sabit derinliklerde en parlak ve en karanlık iki referans pikselin yeterli olacağını önermiş; ancak analiz öncesinde kara ve bulut görüntülerinde yapılan maskeleme hatalarına bağlı olarak hatalı sonuç elde edilme ihtimalinin yüksek olması, kuramın geçerliliğini zayıflatmıştır.

Hedley ve diğerleri (2005), Hochberg tarafından ortaya konulan zayıf kuramı revize ederek, NIR ve görünür bantlar arasında doğrusal ilişkilere dayanan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, parlaklığın sabit olduğu birden fazla görüntü alanı seçilerek, görünür bantlardaki parlaklık ile NIR parlaklığı arasında doğrusal bir regresyon uygulanmasına dayanmaktadır (Şekil 6). Bu regresyon analizi sonucunda elde edilen eğim, güneş parıltısının olmadığı diğer piksellerin görünür bölge bantlarındaki parlaklıklarını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$\mathrm{Ri}' = \mathrm{Ri} - \mathrm{bi}(\mathrm{RNIR} - \mathrm{MinNIR}) \qquad (2.2)$$

Bu eşitliğe göre;

Ri′ : Güneş Parlaklığı Giderilmiş Yansıma

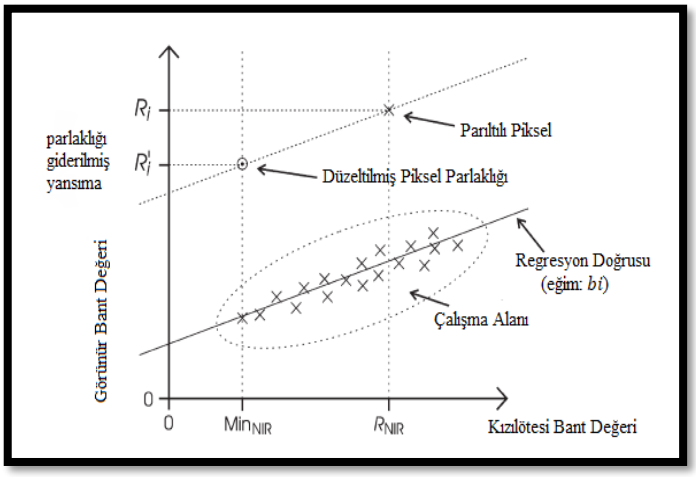
Ri : Parıltı Pikseli

bi : Regresyon Eğimi

RNIR : Kızılötesi Piksel Değeri

MinNIR : Minimum Kızılötesi Piksel Değeri

Güneş parıltısı düzeltmesi yapıldıktan sonra, su kolonu düzeltmesinin yapılabilmesi için görüntü üzerinden kara alanlarının çıkarılarak çalışma alanına ait yalnızca su görüntülerinin kalması gerekmektedir. Bu sayede NIR bandı üzerinden çeşitli algoritmalar sayesinde veri bütünlüğü korunmaktadır (Bakırman, 2019).



Şekil 7. Güneş parıltısının giderilmesi (Hedley ve diğerleri (2005)'den değiştirilmiştir.)

2.4.2.3. Su kolonu

Su kolonu düzeltmesi, algılayıcı tarafından kaydedilen radyans değerine etki eden atmosferdeki aerosol maddelerin yanı sıra su içerisinde askıda bulunan katı maddelerin de etkisini dikkate alarak, optik uydu görüntülerinde su yüzeyi ile deniz tabanı arasındaki bölgenin dip reflektansına olan etkisini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Düzeltme ile ilgili olarak Lyzenga (1978), Lyzenga (1981), Purkis ve Pasterkamp (2004) ve Sagawa ve diğerleri (2010)'ın literatürde kabul görmüş çalışmaları mevcut olup, uydu tabanlı batimetri araştırmalarında en çok kullanılan algoritma Lyzenga (1981)'a ait olan yöntemdir.

Değişken derinlikler ve aynı dip yansıtmasına sahip deniz bölgelerinde elde edilen verilerde radyans değerlerinin farklı bantlarda kaydedilmesi ve aralarında doğrusal bir ilişkinin öngörülmesine dayanan bu yöntem, genellikle dip tabiatı kum olan alanlarda hesaplanmaktadır.

Ki bandının Kj bandına göre emilim oranı;

$$\mathrm{Ki}/_{\mathrm{Kj}} = \mathrm{a} + \sqrt{(\mathrm{a}^2 + 1)} \qquad (2.3)$$

a değeri ise eşitlik xx'e göre hesaplanır.

$$\alpha = \mathrm{a_{ii}} - \mathrm{a_{jj}}/2_{\mathrm{aij}} \qquad (2.4)$$

$\mathrm{a_{ii}}$ i bandındaki ölçüm varyansını,

$\mathrm{a_{jj}}$ j bandındaki ölçüm varyansını,

$\mathrm{a_{ij}}$ i ve j bandlarındaki kovaryans değeri eşitlik xx'e göre temsil eder.

$$\mathrm{a_{ij}} = \mathrm{X_i X_J} - \bar{\mathrm{X_i}}\,\mathrm{X_J} \qquad (2.5)$$

2.5. Uydu Görüntülerinden Batimetri Çıkarımında Kullanılan Temel Modeller

Batimetri çıkarma işlemleri günümüzde, üye ülkeler tarafından da kabul edilen Uluslararası Hidrografi Örgütü (IHO)'nun belirlemiş olduğu S-44 Hidrografi Ölçüm Standartları'na göre yapılmaktadır. Kıyı mühendisliği, kıyı bölge yönetimi, liman yönetimi, araştırma ve bilimsel çalışmalar ile birlikte bölgesel turizm etkinlikleri açısından batimetrinin önemi oldukça fazladır. Batimetri çıkarımı günümüzde tek ve çok ışınlı akustik iskandillerle yapılmakta olup genellikle cm ve mm hassasiyetle gerçekleştirilmektedir. Kısa süreli

çalışmalar için ideal olan bu sistem, batimetri verisi bulunmayan kilometre ölçeğindeki uzak alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda maliyet ve zaman yükünü artırmaktadır. Ayrıca sığ su, liman yaklaşma ve derin su batimetri çıkarımları da çalışma alanının büyüklüğü ve derinliğe bağlı olarak cihazların kaplama alanlarına göre ölçüm sürelerinde maliyet ve zaman açısından artışlara sebep olmakta; bu problemlerin giderilmesi için uzaktan algılama yöntem ve teknikleri araştırılmaya başlanmıştır.

Uydu görüntüleri üzerinden batimetri çıkarımına yönelik olarak; Lyzenga tek ve çift banda dayalı algoritmalar geliştirmiş, sonraki çalışmalarında ise sığ sular üzerindeki yansımanın fiziksel modelini ele almıştır. Philpot farklı bölgelerdeki çalışmalarıyla, Stumpf ise oran dönüşüm modelini geliştirerek literatüre katkı sağlamışlardır.

Bu bölümde, uzaktan algılama yöntemleri sayesinde zaman kazancı sağlayan ve maliyet açısından avantajlı olan, uydu görüntüleri üzerinden sığ su batimetri çıkarımında literatürde en çok kabul gören Lyzenga (1978), Philpot (1989), Stumpf (2003) ve Lyzenga (2006) modellerinden bahsedilmiştir.

2.5.1. Lyzenga (1978)

Bu çalışma modelinde derinlik tespitinde kullanılan her bir bandın yansıma değeri arasındaki bağlantı Denklem (2.6)'ya göre uygulanmaktadır.

$$X_i = \mathrm{In}(L_i - L_{si}) \tag{2.6}$$

L_i yansıma değeri, L_{si} ise derin su yansıma değeridir. Bu denklemin amacı, yansımanın su derinliği arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak doğrusallaştırmaktır. Doğrusal olmama durumları yalnızca çok sığ sular ve yüksek dip yansımaları için önemlidir.

Işığın derin alanlarda yansıması sığ alanlar göre daha düşük olacağından doğrusal dönüşüm formülünde bu yansıma üstel olarakta zayıflayacaktır. Bu kapsamda ışığın su sütunundaki derinlik hesaplamaları Denklem (2.7)'e göre yapılmaktadır.

$$L(z) = L_{(0)}\exp(-Kz) \tag{2.7}$$

K zayıflama katsayısı, z ise derinliği temsil etmektedir. Işığın derinlik ve derinliğe bağlı parlaklıktaki zayıflama katsayısıda hesaba dahil edilerek Denklem (2.8)'de gösterilmiştir.

$$R_w = (A_d - R_\infty)\exp(-gz) + R_\infty \tag{2.8}$$

R, suyun optik olarak derin olması durumunda su sütunu yansımasıdır. A_d alt albedo, z derinlik ve g hem aşağı hem de yukarı doğru gelen ışık için dağınık zayıflama katsayılarının bir fonksiyonudur.

Yansıma ve albedo açısından tek bir banttan derinlik tahminin yapılması Denklem (2.9)'da uygulanır. Burada albedo A_d'ye bağlı olacağından albedodaki herhangi bir azalma, tahmini derinlikte artışına yol açacaktır.

$$z = g^{-1}[In(A_d - R_\infty) - In(R_W - R_{\infty)}] \quad (2.9)$$

Lyzenga (1978, 1985) çalışmalarında derinliği bulmada iki bandın albedo düzeltmesi sağlayabileceğini göstererek, Denklem (2.10) ve Denklem (2.11)'deki doğrusal çözümü kullanmıştır. a0, ai ve aj sabitleri genellikle çoklu doğrusal regresyondan (veya benzer bir teknikten) belirlenmektedir. Pasif sistemlerden derinlik elde etmede, su berraklığındaki değişiklikler ve emilimdeki spektral çeşitlikler hatalara sebep olmaktadır (Philpot 1989; Van Hengel ve Spitzer, 1991).

$$Z = a_0 + a_i X_i + a_j X_j \quad (2.10)$$

$$X_i = In[R_W(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_i)] \quad (2.11)$$

Yukarıdaki doğrusal dönüşüm çözümü için ampirik olarak belirlenmesi gereken beş değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler; R_∞ (λ_i), R_∞ (λ_j), a_0, a_i ve a_j'dir. Beş ampirik katsayı için suyun kalite koşullarıda nispeten küçük değişkenliklerin olması, geniş alanlardaki derinlik tespit çalışmalarında hatalara sebebiyet verecektir.

Lyzenga'nın bu çalışmasında zayıflama katsayısı düşük bantlar seçilmiştir. Bu kapsamda bariz derinlik hataları elenerek 8 metre derinliğe kadar doğru sonuçlar elde edilmiştir.

2.5.2. Philpot (1989)

Bu çalışma modeli üç farklı araştırma durumundan meydana gelmektedir. Birinci durum; değişken derinlik - diğer tüm paremetreler sabit, ikinci durum; değişken derinlik ve derinliğe bağlı yansıma, üçüncü durum; derinlik, deniz dip tabiatı ve su kolonu türüdür. Üç farklı durumda da pasif veya çok bantlı spektral verilerden sığ su derinlik bilgisi elde etme temelinde ışınımsal transfer modeli Denklem (2.12) üzerine kurulmuştur (Philpot, 1989).

$$L_d = L_b \exp(-gz) + L_w \quad (2.12)$$

L_d: Algılayıcıdaki ışıma

g: Suyun etkin zayıflama katsayısı

z: su kolunu derinliği

L_b: dip yansımasına duyarlı ışıma

L_w: Optik olarak derin su üzerinde uzaktan gözlemlenen ışıma

Derinlik dışındaki tüm parametreler dalga boyuna bağlıdır. Herhangi bir form modelinin altında yatan temel varsayım, suyun optik özelliklerinin dikey olarak homojen olmasından kaynaklıdır. Birinci duruma sadece derinlik paremetresi değişiklik göstereceğinden; algılayıcıdaki ışımanın (L_d), derin su üzerinde gözlemlene ışımadan (L_w):

Büyük olması durumunda $L_d > L_w$;

$$X = n(L_d - L_w) = n(L_b) - gz \quad (2.13)$$

Küçük olması durumunda Ld<Lw;

$$X = In(L_w - L_d) = In(-L_b) + gz \quad (2.14)$$

Denklem (2.13) ve (2.14), tek spektral bant ile kullanan derinlik çözümleridir; L_b, L_d ve g'nin mutlak değerlerinin bilinerek değişiklik göstermemesi gerekmektedir. Ancak iki veya daha fazla spektral band kullanılması durumunda ölçüm koşulların derinlik tespiti için mükemmel ortamda olsa bile "L_d-L_w" ve "g" değişken değerlerinin, Brown vd. (1971) tarafından geliştirilen Denklem (2.15)'teki "a" katsayı çarpanının kullanılması önerilmektedir.

$$Y = a \times X = a \times In(Lb) - (a \times g)z \quad (2.15)$$

Y: Skaler değişken

X: Doğrusallaşmış ölçüm vektörü (L_d-L_w)

a: Rastgele katsayı vektörü

İkinci duruma derinlik ve yansıma değişikliğine göre ;

$$Y = a \times X = -(a \times g)z \quad (2.16)$$

Üçüncü durumda derinlik, dip tabiatı ve su kolonu türünün değişikliklerine göre:

$$g_1(\lambda_1)/g_1(\lambda_2) = g_2(\lambda_1)/g_2(\lambda_2) \quad (2.17)$$

Veriler birden fazla su tipini içerdiğinde aynı derin su düzeltmesinin yanlışlıkla tüm veri setine uygulanması önemli hatalara neden olabilir. Her su tipi ayrı ayrı düzeltilmelidir.

2.5.3. Stumpf ve diğerleri (2003)

Bu çalışma modeli, iki veya daha fazla bandın farklı derinlikteki su emilim değerlerinin birbirlerine karşı oran prensibine göre tespit edilmesini sağlamaktadır. Suyun bulanıklığı çalışma koşullarında ışığın bant emilimlerini etkileyeceğinden dolayı berrak sularda kullanımı etkilidir.

Derinlik tahmin yöntemi, her uydu görüntü bandı için sensör kalibrasyon dosyalarıyla hesaplanan ve atmosferik etkiler için düzeltilen yansımaları kullanır. Suyun optik olarak sığ olduğu tabanı da içeren suyun yansıması R_w olarak tanımlanır.

$$R_w = {\pi L_W(\lambda)}\Big/{E_d(\lambda)} \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'de L_W sudan ayrılan parlaklık, E_d suya giren aşağı doğru gelen ışınım, λ ise spektral banttır. L_W ve R_w su yüzeyinin üzerindeki değerleri ifade etmektedir. R_w, yakın IR bandı tarafından tahmin edildiği üzere aerosol ve yüzey yansıması için toplam yansıma R_T'si ve Rayleigh yansıması R_r'nin düzeltilmesiyle bulunur.

$$R_w = R_T(\lambda) - Y(\lambda)R_T(\lambda_{IR}) - R_r(\lambda_i) \quad (2.19)$$

Y, spektral varyasyonu düzeltecek sabittir (Gordon ve diğerleri, 1983). R_T ise Denklem (2.20)'den bulunur.

$$R_T(\lambda_i) = \frac{\pi L_T(\lambda_i)/E_0(\lambda_i)}{\left(\frac{1}{r^2}\right)T_0(\lambda_i)T_1(\lambda_i)\cos\theta_0} \quad (2.20)$$

L_T uyduda ölçülen (toplam) ışınımı, E_0 güneş sabiti, r astronomik birim cinsinden dünya-güneş mesafesi, θ_0 güneşin başucu açısıdır. T_0 ve T_1 güneşten dünyaya, dünyadan uyduya iletim katsayılarıdır.

Ayrıca Lyzenga (1978) ve (1985) çalışmasında kullanılan (2.7), (2.8) denklemleri ile (2.9), (2.10) ve (2.11) denklemleri bu aşamada sırasıyla uygulanır.

Denklem (2,11) uygulandıktan sonra dip albedonunda düşük yansıtma değerine sahip olacağından, topografik alanlarda derinliğin fazla olduğu yerlerin tespit edilmesi için yeni bir algoritmanın kullanılması gerekmektedir. Derinliğin artması yeşil ve mavi bandın yansıtma değerlerini de azalacaktır. Ancak yeşil bandın yansıtma değeri, mavi banda göre daha hızlı azalmakla birlikte mavi bandın yeşil banda oradına da derinlik arttıkça artış gösterecektir. Bununla birlikte, dip albedosundaki değişiklikler iki bandı da etkileyecek, fakat yeşil bant bu değişimden daha fazla etkilenecektir. Dolayısıyla, derinliğin bant oranına etkisi, dip değişiminden daha fazla olacağından, farklı dip albeosuna sahip bantlar aynı derinlikte aynı orana sahip olurlar.

Bu orandan yola çıkılarak, dip albedosundan bağımsız olarak Denklem (2.21) ile derinlik kestirimi yapılabilir. Burada m_1 ayarlanabilir sabit katsayı, n değeri her koşulda logaritmanın pozitif olması ve oranın derinlikle birlikte lineer bir yanıt üretmesi için kullanılır. m_0 ise offset değerini ifade eder.

$$Z = m_1 \frac{In(nR_w(\lambda_i))}{In(nR_w(\lambda_j))} - m_0 \qquad (2.21)$$

2.5.4. Lyzenga ve diğerleri (2006)

Bu metodoloji, derinlik verisi bilinen 8 farklı çalışma alanında test edilerek, ışığın sığ su yansıması üzerindeki fiziksel bir modele dayanmaktadır. Uygulama öncesi güneş parıtılı etkilerine yönelik düzeltmelerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Derinlik algoritmasının doğruluğu, akustik iskandil ölçümleri ile karşılaştırma yoluyla belirlenmektedir. Algoritmanın su kolunu içerisinde ışığın zayıflaması ve dip yansıma değişimlerinin düzeltilmesi Denklem (2.22)'ye göre ifade edilmektedir.

$$R(h) = \frac{\pi L^-}{E_i^-} = r_v + r_b^* e^{-ah} \qquad (2.22)$$

h : Derinlik

Ei- : Suya giren radyans

L- : Sudan çıkan radyans

Rv : Su kolonundaki yansıma

Rb : dip yansıma (rb*= rb-rv)

α : zayıflama katsayısı

Uydu görüntülerinden batimetri çıkarımında kullanılan temel modeller, deniz tabanından yansıyan multispektral spektral reflektans verileri ile su derinliği arasındaki ilişkiyi matematiksel, yarı ampirik ve ampirik yaklaşımlarla açıklamayı amaçlamaktadır. Lyzenga, Philpot ve Stumpf gibi araştırmacılar tarafından geliştirilen bu modeller, uydu tabanlı batimetrinin teorik altyapısını oluşturmuş ve özellikle sığ sularda sayısal derinlik tahmini yapılabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, söz konusu yöntemlerin başarısı; su kolonundaki ışık zayıflaması, bulanıklık, dip albedosu, askıda sediment konsantrasyonu, atmosferik etkiler, güneş parıltısı ve bölgesel oşinografik farklılıklar gibi çok sayıda değişkene bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, yalnızca tek bir modele dayalı yaklaşım yerine, farklı parametrelerin birlikte değerlendirilmesini sağlayan çok değişkenli karar destek sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle çalışma alanı seçimi, veri kalitesi, konumsal çözünürlük, doğruluk düzeyi, operasyonel maliyet ve uygulanabilirlik gibi kriterlerin eş zamanlı olarak ele alınması, daha güvenilir ve sürdürülebilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu noktada çok kriterli karar verme yöntemleri, uydu tabanlı batimetri çalışmalarında alternatiflerin sistematik biçimde karşılaştırılması, kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve en uygun çözüm senaryosunun seçilmesi açısından önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

2.6. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), karmaşık sorunlara etkili çözümler üretmek için birden fazla ölçütü dikkate alan yenilikçi bir karar alma yöntemidir. Bu sistem, her bir kriterin önem derecesini belirleyerek farklı seçenekleri sıralamakta ve en uygun olanı seçme sürecine yön vermektedir. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS, PROMETHEE ve Best-Worst Method (BWM) gibi araçlarla gerçekleştirilen ÇKKV, çevre planlaması, kaynak dağıtımı ve mühendislik projeleri gibi çeşitli alanlarda yoğun bir şekilde uygulanmaktadır. Nesnel verilere dayalı bir yol haritası sunan bu yöntem, kişisel önyargıları minimize ederek kararların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır (Ogrodnik, 2023).

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemleri, birden fazla ölçütün dikkate alındığı bir çözüm havuzundan en uygun seçeneğin belirlenmesinin gerektiği durumlar olarak tanımlanabilir. Bu tür durumlarda ideal sonuca ulaşmak amacıyla çeşitli ÇKKV yöntemleri kullanılabilir. Ancak karar vericinin başlangıçta karşılaştığı en önemli zorluklardan biri, hangi yöntemin en uygun olduğuna karar vermektir. Doğru yöntemi seçerken karar verici, problemin doğasını ve sürecin kendine özgü dinamiklerini titizlikle değerlendirmelidir (Yingfang ve diğerleri, 2024).

Bu çalışmada, ÇKKV'nin uydu görüntülerinden elde edilen batimetri modellemesi için veri optimizasyonunda önemli bir rol üstlendiği ve makine öğrenimi algoritmalarının etkinliğini artırmak amacıyla AHP ve BWM kriterlerinin önceliklendirilmesinde etkili bir şekilde kullanıldığı vurgulanmaktadır.

2.6.1. Analitik hiyerarşi süresi (Analytical hierarchy process)

Karar alma, günümüz dünyasında neredeyse her alanda giderek daha karmaşık bir hâle gelmiştir. Geleceğe ilişkin belirsizliklerin artışı ve rekabetin hızla artması, bu durumu zorlaştıran başlıca nedenlerdir. Teknolojinin sürekli değişimi ve bilgi miktarındaki dikkate değer artış, yeni ve tahmin edilemeyen sorunları ortaya çıkarmıştır. Karar alıcılar için asıl mesele, bir seçim yapmak değil, karşılaşılan soruna en uygun cevabı bulmaktır. Bu bağlamda, karar alıcıların problemi etkileyen tüm faktörleri ve değişkenleri dikkatlice incelemesi gerekmektedir (Ersöz ve Kabak, 2010).

Karar alıcılar, en uygun seçenekleri belirlemek için mevcut kaynakları etkili bir şekilde kullanmalı, olasılıkları düzenli olarak incelemeli ve bu incelemeleri sayısal yöntemlerle desteklemelidir. Karar verme sürecinde, karar alıcıların bilgi birikimi, kişisel bakış açıları ve stratejik hedefleri göz önünde bulundurulurken, birçok nicel ve nitel kriterin de sürece dâhil edildiği görülmektedir. Örneğin, çok kriterli karar verme sistemlerinde hem sayısal veriler hem de öznel değerlendirmeler bir arada kullanılarak daha kapsamlı bir analiz elde edilebilir. Ayrıca, karar alıcıların psikolojik durumları, sosyal ilişkileri ve gelecek beklentileri, verdikleri kararlarda önemli bir etki yaratmaktadır (Mardani ve diğerleri, 2015).

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), matematiksel yapısı sayesinde karar alma süreçlerinde önemli faydalar sağladığı için en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. AHS, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemlerine bağımsız olarak uygulanabildiği gibi, diğer yöntemlerle birlikte de etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Bu tür durumlarda, AHS ile elde

edilen ağırlıklar genellikle diğer yöntemler için bir girdi olarak kullanılır; böylece daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilir (Vaidya ve Kumar, 2006).

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), 1968 yılında Myers ve Alpert tarafından tanıtılmış, daha sonra 1977 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş ve çok kriterli karar verme problemleri için kullanılabilir bir model hâline getirilmiştir. AHS'nin esas prensibi, karar vericinin kriterleri ve alternatifleri çiftler hâlinde karşılaştırarak değerlendirmesine dayanmaktadır. Bu karşılaştırmalar, Saaty'nin 1–9 ölçeği (1: eşit önem, 9: çok daha üstün) ile yapılmakta ve karar vericinin öznel yargıları sayısal verilere dönüştürülmektedir. Hazırlanan karşılaştırma matrisinin özvektör analizi kullanılarak kriterlerin veya alternatiflerin ağırlıkları belirlenmektedir. Bu yöntem, hem kriterlerin önem derecelerinin tespitinde hem de alternatiflerin sıralanmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Saaty ve Vargas, 2012).

AHS'nin dikkat çeken özelliklerinden biri, karar vericinin yargılarının tutarlılığını ölçme becerisidir. Karşılaştırma matrisinden elde edilen Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio, CR), değerlendirmelerin güvenilirliğini incelemeye yardımcı olmaktadır. Ayrıca, AHS'nin hiyerarşik yapısı karmaşık sorunlarda esneklik sunmakta ve grup karar verme süreçlerine rahatlıkla entegre edilebilmektedir (Bose, 2022).

Çok Kriterli Karar Verme problemlerinde güçlü bir araç olarak kabul edilen AHS, hem akademik çalışmalar hem de pratik uygulamalar için geniş bir kullanıma sahiptir. Ancak özellikle çok sayıda kriter veya alternatif içeren durumlarda, yüksek karşılaştırma sayısı ve tutarlılık sorunları gibi kısıtlamaların dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir. Hiyerarşik yapı, tutarlılık kontrolü ve esneklik özellikleri AHS'yi değerli bir yöntem hâline getirirken, bu tür kısıtlamaların uygulama sırasında dikkate alınması önemlidir (Tavana ve diğerleri, 2021).

2.6.2. En iyi-En kötü metodu (Best-worst method)

Best-Worst Yöntemi (BWM), Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) sorunlarında kriterlerin veya alternatiflerin göreli önem derecelerini, yani ağırlıklarını belirlemek amacıyla geliştirilmiş sistematik ve etkili bir ağırlıklandırma yöntemidir. 2015 yılında Jafar Rezaei tarafından tanıtılan bu yöntem, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi klasik ÇKKV yöntemlerine göre daha az karşılaştırma gerektirmesi, tutarlı sonuçlar sunması ve kullanıcı dostu özelliğiyle öne çıkmaktadır. Bu nedenlerle BWM, hem akademik araştırmalarda hem de pratik uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem, karar vericinin en önemli (en iyi) ve en az önemli (en kötü) kriterleri belirleyip diğer kriterlerle karşılaştırmasına

dayanmaktadır. Yapılan bu karşılaştırmalar, matematiksel bir optimizasyon modeli aracılığıyla kriter ağırlıklarını hassas bir şekilde belirlemektedir (Rezaei, 2015).

Best-Worst Yöntemi (BWM), karar alıcının kriterlerin önem düzeylerini belirlemesinde öznel görüşlerini düzenli bir çerçeveye yerleştirmektedir. Bu yöntem, karar vericiden en önemli (en iyi) ve en az önemli (en kötü) kriterleri seçmesini ve bu kriterleri birbirleriyle karşılaştırmasını istemektedir. Karşılaştırmalar, 1 ile 9 arasındaki bir ölçekle (1: eşit değer, 9: büyük üstünlük) yapılmaktadır. Bu süreçte iki ana vektör oluşturulmaktadır: en önemli kriterin diğerlerine göre üstünlüğünü gösteren Best-to-Others (BO) vektörü ve diğer kriterlerin en kötü kritere karşı üstünlüğünü betimleyen Others-to-Worst (OW) vektörüdür. Bu vektörler, kriterlerin ağırlıklarını hesaplamak için bir doğrusal programlama modeli aracılığıyla kullanılmaktadır. BWM'nin ana amacı, karşılaştırmaların tutarlılığını maksimize ederken kriter ağırlıklarının toplamını bir tam sayıya eşitlemektir (Rezaei, 2016).

Best-Worst Yöntemi (BWM), daha az karşılaştırma ihtiyacına sahip olması nedeniyle geleneksel tekniklere kıyasla önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu özelliğiyle, birden fazla kriter barındıran karmaşık durumlarda hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltarak karar alıcının zihinsel yükünü de hafifletmektedir. Ayrıca, BWM'nin yapılandırılmış karşılaştırma yöntemi, tutarlılık oranını artırarak daha güvenli ve tutarlı sonuçların elde edilmesine yardımcı olmaktadır (Liang ve diğerleri, 2020).

2.7. Batimetri Tahminlemesinde Kullanılan Makine Öğrenme Modelleri

Uydu tabanlı batimetri tahmini için literatürde çok sayıda makine öğrenme yöntemi kabul görmektedir. Bununla birlikte, bu çalışma mevcut tüm algoritmaları uygulamak yerine, farklı öğrenme yaklaşımlarını temsil eden ve uydu batimetrisinde yaygın olarak kullanılan modelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, batimetrik derinlik tahmini için K-En Yakın Komşular (KNN), Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Doğrusal Regresyon (LR) modelleri kullanılarak kapsamlı bir karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

K-En Yakın Komşular (KNN) algoritması, mekânsal olarak yakın uydu pikselleri arasındaki benzerliği etkili bir şekilde yakalayabildiği için; Rastgele Orman (RF) ise topluluk öğrenme yaklaşımı sayesinde aşırı öğrenmeye karşı sağladığı dayanıklılık nedeniyle çalışmaya dâhil edilmiştir. Destek Vektör Makineleri (SVM), çok sayıda girdi değişkenine

sahip durumlarda doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebildiği için seçilmiştir. Doğrusal Regresyon (LR) ise basit yapısı ve yorumlanabilirliği nedeniyle kullanılmıştır.

Seçilen modeller, veri setinin özellikleri ve tahmin performansları dikkate alınarak optimize edilip uygulanmıştır (Manessa ve diğerleri, 2016; Hakim ve diğerleri, 2018; Sagawa ve diğerleri, 2019; Alevizos, 2020; Tonion ve diğerleri, 2020; Mateo-Perez ve diğerleri, 2021; Wu ve diğerleri, 2022; Guo ve diğerleri, 2022; Zhou ve diğerleri, 2023; Çelik ve diğerleri, 2023; Gülher ve diğerleri, 2024; Yang ve diğerleri, 2026).

2.7.1. K-En yakın komşu (K-Nearest neighbors-KNN)

Bu modelde, veri noktasının en yakın komşuları (k komşu) bulunduktan sonra tahminleme işlemi bu komşuların ortalama değerine veya ortalamasına göre yapılır. Kullanılan veri kümesinde, her veri noktası bir özellik düzleminde bir nokta olarak gösterilir. Tahmin edilecek noktaya en yakın k veri noktasını bulmak için, noktalar arasındaki mesafe Denklem (2.23)'e göre yapılmaktadır (Cover ve Hart, 1967).

$$\text{Mesafe}=\sqrt{(x_1-x_1')^2+(x_2-x_2')^2+\ldots\ldots+(x_n-x_n')^2} \quad (2.23)$$

Burada $(x_1, x_2,\ldots\ldots,x_n)$ tahmin edilecek veri noktaları ve $(x_1', x_2',\ldots\ldots, x_n')$ ise veri kümesindeki diğer veri noktalarıdır.

Tahminleme süreci Denklem (2.24)'e göre ifade edilmektedir.

$$\hat{y}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_i \quad (2.24)$$

Formül sembolleri aşağıda gösterilmiştir:

$\hat{y}$: tahmini derinlik değeri

y_i : k komşunun her biri için oluşturulan veri kümesindeki gerçek derinlik değeri

k : seçilen komşuların sayısı

2.7.2. Rastgele orman (Random Forest-RF)

Bu model, son tahmini yapmak için birden fazla karar ağacının tahminlerini birleştirir. Her karar ağacı, farklı bir özellik alt kümesi ve örnekleme ile oluşturulur. Nihai tahmin, tüm ağaçların tahminlerinin ortalamasıdır (Breiman, 2001).

Tahminleme süreci Denklem (2.25)'e göre ifade edilmektedir.

$$\hat{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i(X) \quad (2.25)$$

Formül sembolleri aşağıda gösterilmiştir:

$\hat{y}$: tahmini derinlik değeri

$T_i(X)$: veri noktası X için karar ağacı tahmini

n : seçilen komşuların sayısı

2.7.3. Destek vektör makineleri (Support Vector Machine-SVM)

Bu modelde veriler doğrusal veya doğrusal olmayan bir hiper düzlemle ayırılma ilkesine dayanmaktadır. Hiper düzlem, verileri en iyi şekilde ayıran sınır olup tahminler bu sınır kullanılarak yapılır (Cortes ve Vapnik, 1995).

Çalışmada doğrusal olmayan SVM modeli kullanılmış olup tahmin süreci Denklem (2.26)'ya göre ifade edilmektedir.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{n} a_i y_i K(X_i, X) + b \quad (2.26)$$

Formül sembolleri aşağıda gösterilmiştir:

$\hat{y}$: tahmini derinlik değeri

a_i : optimizasyon sonunda elde edilen katsayılar

y_i : eğitim veri setindeki hedef değerler

X_i : eğitim veri setindeki veri noktaları

X : tahmin etmek istediğimiz veri noktası (test verisi)

$K(X_i, X)$: çekirdek fonksiyonu (doğrusal, polinom, radyal baz fonksiyonu)

b : hiper düzlemin y eksenini hangi noktada kestiğini belirler

2.7.4. Doğrusal regresyon (Linear regression-LR)

Bu algoritma, bağımlı değişkenin (çıktı) birden fazla bağımsız değişkenle (girdi) ilişkisini modellemek için kullanılır. Model, birden fazla bağımsız değişkenin doğrusal bir kombinasyonu olarak ifade edilmektedir (Seber ve Lee, 2012).

Tahminleme süreci Denklem (2.27)'ye göre ifade edilmektedir.

$$y = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n + b \quad (2.27)$$

Formül sembolleri aşağıda gösterilmiştir:

y : bağımlı değişken (tahmin edilen sonuç)

$x_1, x_2, \ldots, x_n$: bağımsız değişkenler (özellikler/girdiler)

$w_1, w_2, \ldots, w_n$: ağırlık katsayıları (her bağımsız değişkenin etkisini ifade eden katsayılar)

b : doğrusal fonksiyonun y eksenini kestiği nokta

Doğrusal regresyon modelinde amaç, y (gerçek değer) ile model tarafından tahmin edilen $\hat{y}$ arasındaki farkı en aza indirmektir. Bu farkı ölçmek için genellikle Ortalama Karesel Hata (MSE) kullanılmakta olup Denklem (2.28)'de gösterilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{2.28}$$

Formül sembolleri aşağıda gösterilmiştir:

y_i : gerçek değer

$\hat{y}$: tahmini değer

n : veri nokta sayısı

Batimetri tahminlenmesinde kullanılan makine öğrenmesi modelleri, uydu görüntülerinden elde edilen çok bantlı verilerin işlenmesiyle doğruluk, hız ve ölçeklenebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. KNN, RF, SVM ve LR gibi algoritmalar sayesinde klasik ampirik modellere kıyasla daha düşük hata oranları ve daha güçlü genelleme performansı elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojik gelişmeler yalnızca teknik doğruluk perspektifinden değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve operasyonel etkiler bakımından da değerlendirilmelidir. Özellikle geleneksel gemi tabanlı ölçüm sistemlerinin yüksek yakıt tüketimi, zaman maliyeti ve karbon emisyonları dikkate alındığında, veri odaklı yeni yöntemlerin sürdürülebilirlik boyutu ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, hidrografik ölçümlerde kullanılan yöntemlerin performansı kadar doğal kaynak kullanımı, enerji verimliliği ve iklim politikalarıyla uyumu da incelenmesi gereken temel unsurlar arasında yer almaktadır.

2.8. Hidrografik Ölçümlerde Sürdürülebilirliğin Yeri

2.8.1. Sürdürebilirlik

Sürdürülebilirlik tanımı, günümüz nesillerinin doğal kaynakları ve çevrenin korunumu ile ekonomik ve sosyal kalkınmanın mevcut hâliyle dengeli ve dikkatli bir biçimde

kullanılarak, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme durumlarını tehlikeye atmadan toplumsal refah ve eşitlik kapsamında değerlendirilmesi anlamına gelmektedir (Brundtland, 1987).

Sürdürülebilirlik; çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç temel boyuttan oluşmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik; doğal kaynakların korunması ve yenilenebilir enerjiyi, ekonomik sürdürülebilirlik; kaynakların verimli kullanımı ve uzun vadeli ekonomik büyümeyi, sosyal sürdürülebilirlik ise eğitim, eşitlik ve sağlık gibi refahın artırılmasına yönelik konuları ele almaktadır (Robert ve diğerleri, 2005).

Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çevresel etkilerin sistematik olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme bağlamında karbon ayak izi kavramı temel bir ölçüt olarak ön plana çıkmaktadır.

2.8.2. Karbon ayak izi

Bir bireyin, kuruluşun, etkinliğin, ürünün veya ülkenin faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının toplam miktarını ifade eden bir ölçümdür. Genellikle "ton CO_2 eşdeğeri" (tCO_2e) cinsinden hesaplanır ve iklim değişikliği üzerindeki etkiyi değerlendirmek için kullanılır. Karbon ayak izi hesaplaması genellikle belirli metodolojilere dayanır ve farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Karbon emisyon hesaplamalarında en yaygın olarak Intergovernmental Panel on Climate Change ile Greenhouse Gas Protocol kullanılmaktadır. Her ne kadar birbirlerinden ayrı gibi görünseler de, iklim değişikliği ve karbon emisyon hesaplamalarında tamamlayıcı roller oynayarak sıklıkla birlikte referans alınırlar.

Birleşmiş Milletler bünyesinde kurulan Intergovernmental Panel on Climate Change, iklim değişikliğiyle ilgili bilimsel verilerin toplanması ve analiz edilmesini sağlayarak hükümetlere politika önerileri sunmaktadır. Daha çok ulusal düzeyde emisyon raporlamasının temellerini oluşturmak amacıyla faaliyet gösteren IPCC'nin ana rolü, sera gazı emisyonlarının nasıl ölçülebileceğine dair bilimsel metodolojiler ve rehberler geliştirmektir. Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 seviyeleri bulunmaktadır. Bu "Tier" (seviye) yaklaşımı, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Ulusal Sera Gazı Envanterleri İçin Kılavuzlar) kapsamında sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan bir yapıdır.

Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Dünya Sürdürebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) tarafından geliştirilen Greenhouse Gas (GHG) Protokolü, sera gazı emisyonlarını

hesaplama ve raporlama standartlarını sunan; özellikle şirketler, işletmeler, kuruluşlar, şehirler, bireyler ve diğer organizasyonlar için kolaylıkla kullanılabilen bir araçtır. Scope 1 (doğrudan) , Scope 2 (dolaylı) ve Scope 3 (diğer dolaylı) emisyonlar olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Scope, diğer bir ifadeyle "kapsam" yaklaşımı, küresel bir çerçeve olup her sektör ve bölge için uyarlanabilmektedir (Pandey ve diğerleri, 2011).

Karbon ayak izi hesaplama formülü Denklem (2.29)'da gösterilmiştir.

Karbon Ayak İzi : Aktivite Verisi x Emisyon faktörü (2.29)

Aktivite Verisi : Bir faaliyetin miktarı (kullanılan yakıt litresi, tüketilen elektrik kWh)

Emisyon faktörü: Belirli bir faaliyetin birim başına ürettiği CO_2 eşdeğeri emisyon (kg CO_2e/litre yakıt ya da kg CO_2e/kWh)

2.8.3. Uluslararası anlaşmalar ve hedefler

Bu bölümde, dünya üzerindeki sera gazlarının olumsuz etkilerinin azaltılması yönünde uluslararası platformda onaylanan anlaşma ve protokollerden bahsedilmektedir.

2.8.3.1. Birleşmiş Milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi (UNFCCC)

1992 yılında Rio de Janeiro'da yapılan Dünya Zirvesi'nde kabul edilen bu sözleşmede, iklim değişikliğinin stabilize edilmesi ve sera gazı emisyonlarının güvenli bir seviyede tutulması amaçlanmıştır. 1994 yılında yürürlüğe giren sözleşmeye ülkemiz 24 Mayıs 2004 tarihinde katılmıştır. Bugün neredeyse tüm ülkeler tarafından onaylanmış durumdadır (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2025a).

2.8.3.2. Kyoto protokolü

11 Aralık 1997 tarihinde Kyoto'da kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Ülkemiz 2009 yılında protokole taraf olmuş, ancak protokol kapsamında 1997 yılında UNFCCC'ye taraf olmadığı için sera gazı emisyonu azaltımına yönelik bir taahhüdü bulunmamıştır. Protokol 2020 yılında sona ermiştir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2025b).

2.8.3.3. Paris anlaşması

Temeli, UNFCCC'ye dayanan bu sözleşmede, sanayileşme öncesi küresel sıcaklık artışının 2°C ile sınırlandırılması, mümkünse 1.5°C hedefinin tutturulması amaçlanmıştır. Günümüzde iklim değişikliğiyle mücadelenin ana çerçevesi olarak görülen bu anlaşmada, 2050 yılına kadar birçok ülke karbon emisyonu için "net sıfır", Avrupa Birliği ise Yeşil Mutabakat kapsamında "karbon nötr" taahhüdünde bulunmuştur. Türkiye, Ekim 2021'de

anlaşmaya taraf olmuş ve 2053 yılına kadar karbon emisyonlarını sıfırlama hedefini taahhüt etmiştir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2025c).

2.8.3.4. Türkiye'nin 2053 hedefleri

Dünya Bankası Grubu (WBG) tarafından ülkemiz için hazırlanan Türkiye Ülke İklim ve Kalkınma Raporunda (CCDR); Türkiye'nin 2053 hedeflerinin nasıl ulaşılabileceği konusunda kalkınma ve büyüme süreçlerinin etkilerinin neler olabileceği, yeşil enerjinin öneminin belirlenmesi, karbon salınımının devam etmesinin uzun vadedeki riskleri vb. konularda referans veren bu rapor, bu dizide yayınlanan ilk rapor olma özelliğini de taşımaktadır. Raporda elektrikli ulaşım, enerji çeşitliliğinin arttırılması, dekarbonizasyon ve karbon emisyonu yayan diğer sektörlerin emisyon azaltımı konularında değişiklik yaparak 2053 Türkiye hedeflerinin gerçekleştirilebileceği ifade edilmektedir (World Bank Group, 2022; (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).

Türkiye, net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda 2053 Uzun Dönemli İklim Strateji (LTS) belgesini hazırlamış ve 11-22 Kasım 2024 tarihleri arasında Azerbaycan'ın başkenti Bakü'de gerçekleştirilen 2024 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP29) kapsamında sunarak yol haritasını belirlemiştir. Ayrıca 2026 yılında yapılması planlanan İklim Değişikliği Konferansı'na ev sahipliği yapmak için adaylığını açıklamıştır. Ülkemiz hazırlamış olduğu Uzun Dönem İklim Strateji belgesinde, 2038 yılına kadar sera gazı salınımının artmaya devam edeceği ve sonrasında azalarak 2053 yılında net sıfır emisyona ulaşılacağı ifade edilmiştir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2025ç).

2.8.4. Hidrografik ölçüm araçlarında karbon ayak izi

Hidrografik ölçümler, su kütlelerinin (denizler, göller, nehirler) derinlik, yapı ve özelliklerini haritalamak amacıyla yapılan çalışmalardır. Bu süreçte kullanılan araçlar (gemiler, tekneler, kara taşıtları) ve yöntemlerin neden olduğu yakıt tüketimi, özellikle çevresel etki kapsamında karbon ayak izi açısından değerlendirilebilir.

Hidrografik ölçümlerde çalışma alanları derin su ve sığ su olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Derin su çalışmaları, karineye entegre sabit sonar sistemi ve diğer ekipmanlarla donatılmış gemilerle; sığ su çalışmaları ise genellikle hidrografi ölçüm tekniklerine uygun şekilde hazırlanmış tekne veya katamaran tarzı deniz araçları ile gerçekleştirilmektedir. Sığ su derinlik ölçüm çalışmalarında, araştırma yapılacak bölgenin ölçüm yapacak deniz vasıtasının

bağlı olduğu limana uzaklığı göz önüne alındığında, ulaşım kara araçlarına bağlı römorklar sayesinde sağlanmaktadır.

Her iki çalışma türünün, çevre koşullarına bağlı olarak yaydığı karbon ayak izi çıktıları birbirinden farklılık göstermektedir. Örneğin, gemiler seyir emniyeti açısından gerekli radar ve elektronik seyir cihazlarına sahip olması nedeniyle günün 24 saatinde tam kapasiteyle ölçüm yapabilmekteyken, tekne veya katamaran tipi deniz araçlarında bu süre, ölçümü etkileyebilecek meteorolojik ve deniz koşullarına bağlı olarak yaklaşık 8 saat ile sınırlıdır. Her ne kadar sığ su çalışmalarında kara aracının intikali kapsamında tüketilen yakıt miktarı karbon salınımına etki etse de, gemilerin kendilerine özgü makine dizaynı, iklimlendirme ve soğutma sistemleri ile yangın emniyeti kapsamında CO_2 tüplerinin bulundurulması göz önüne alındığında karbon ayak izi çıktısının daha fazla olduğu değerlendirilmektedir.

2.8.5. Uydu tabanlı batimetri yöntemlerinin karbon azaltım potansiyeli

SDB'nin, geleneksel hidrografik ölçüm yöntemleriyle kıyaslandığında, özellikle büyük alanlı çalışma sahalarında daha çevresel bir yöntem olduğu görülmektedir. Geleneksel yöntemler daha fazla yakıt tüketirken, SDB'nin emisyonunun sabit kalması karbon azaltımı kapsamında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak SDB'nin 30 metreden daha derin sularda yeterince etkili olmaması nedeniyle sonar çalışmaları kaçınılmazdır. Bu kapsamda, derin alanlarda hibrit bir yaklaşım (SDB + sınırlı sonar) ihtiyacı karbon izinin az da olsa artmasına sebebiyet verebilir. Ayrıca bulutluluk, su bulanıklığı veya deniz tabanı özellikleri gibi faktörler uydu tabanlı batimetri çalışmalarını etkileyeceğinden, sığ sularda çalışma aciliyetine bağlı olarak gerçekleştirilecek ek saha çalışmaları (sonar) karbon izinin artmasına etki edebilir.

3. BULGULAR

3.1. Uydu Görüntü Verilerinin Seçimi, Kullanılan Program ve Modeller

Bu bölümde, farklı enlemlerde bulunan deniz alanlarına ait batimetri verisinin, Sentinel-2 uydusuna ait görüntülerin 10 metre çözünürlüklü B2 (Mavi) ve B3 (Yeşil) bantları üzerinden elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanları Türkiye'nin üç önemli kıyı bölgesinde yürütülmüştür. Bu kapsamda, Karadeniz Bölgesi için Samsun önleri, Ege Bölgesi için İzmir Körfezi–İncirlikoy–Aliağa arasında kalan deniz alanı ve Akdeniz Bölgesi için İskenderun Körfezi çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanlarının seçiminde stratejik ve pratik faktörler etkili olmuştur. Bahsi geçen alanlar, Türkiye'nin deniz ticareti açısından büyük önem taşıyan limanlarını içermektedir. Samsun Limanı, Karadeniz'de aktif bir ticaret ve lojistik merkezi olarak yoğun gemi trafiğine ev sahipliği yapmaktadır. İzmir Körfezi, Ege Denizi'nde yer almakta olup Türkiye'nin önemli liman bölgelerinden biridir. Burada hem ticaret hem de yolcu taşımacılığı açısından yoğun deniz trafiği görülmektedir. Öte yandan İskenderun Körfezi, Doğu Akdeniz'de yer almakta olup sanayi ve enerji taşımacılığında önemli bir rol oynayan İskenderun Limanı ile dikkat çekmektedir. Son yıllarda artan bölgesel ticaret hacmiyle öne çıkmaktadır (Deniz Ticaret Odası, 2024).

Bu üç bölge farklı deniz ve oşinografik koşulları temsil etmektedir. Karadeniz'in bulanık ve nehir etkisindeki yapısı, Ege Denizi'nin yarı kapalı ve nispeten açık su karakteri ile Akdeniz'in daha tuzlu ve berrak yapısı, farklı çevresel koşullarda uydu görüntülerinden batimetri yöntemlerinin test edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, geliştirilen yöntemlerin farklı hidrolojik ve optik koşullar altındaki performanslarının karşılaştırılmasına imkân vererek çalışmanın genellenebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca bu alanlarda, Türkiye'nin kıyı yönetimi ve 2053 net sıfır emisyon hedefleri ile uyumlu olmasının yanı sıra, geçmiş batimetrik ölçümler ve mevcut haritalar sayesinde elde edilen uydu tabanlı verilerin

doğrulanması imkânı da bulunmaktadır. Bu nedenle çalışmaya, yalnızca metodolojik bir uygulama değil, aynı zamanda bir doğrulama ve değerlendirme sürecini içeren bütünsel bir yaklaşımla yaklaşılmıştır. Batimetrik tahminlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla analizler 30 metreye kadar olan derinliklerle sınırlandırılmıştır.

Çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Sentinel-2 uydu görüntülerinden çeşitli bant kombinasyonlarına sahip Stumpf modeli kullanılarak veri işleme ve sınıflandırma için Sentinel Uygulama Platformu (SNAP) üzerinden elde edilen verilerin doğruluğunu araştırmaktır.

Tüm çalışma alanlarında Avrupa Uzay Ajansı'nın Copernicus Programı kapsamında fırlatılan Sentinel-2 multispektral uydu görüntüleri kullanılmış olup, analizlerin yapılabilmesi maksadıyla açık kaynak ve ücretsiz bir yazılım olan Sentinel Application Platform (SNAP) üzerindeki "Sen2Coral" algoritmasından yararlanılmıştır.

Önceki araştırmalarda birçok model kullanılmış olmasına rağmen, çalışmaya konu olan batimetrinin derinlik bilgisi açısından doğru sonuçlar vermesi ve analiz imkânı sağlaması maksadıyla SNAP programı tercih edilmiştir (Leder ve diğerleri, 2019; Poursanidis ve diğerleri, 2019; Mateo-Perez ve diğerleri, 2020; Setiawan ve diğerleri, 2020; Pisyam ve diğerleri, 2021; Guo ve diğerleri, 2022; Suardana ve diğerleri, 2024).

Sentinel-2, Sentinel-2A ve Sentinel-2B olmak üzere iki takımyıldız uydusundan oluşmakta olup yaklaşık 786 km yükseklikte güneşle senkronize bir yörüngede, kutuplar etrafında hareket etmektedir. İki özdeş uydu birbirinden yaklaşık 180° konum farkına sahiptir. Sentinel-2, tek uydu ile 10 gün, iki uydu birlikte kullanıldığında ise 5 gün zamansal çözünürlüğe sahip orta çözünürlüklü bir uydu sistemidir. Bu uydu aynı zamanda arazi örtüsü haritaları, arazi değişim tespiti ve çeşitli jeofizik değişkenlerin izlenmesi gibi operasyonel gözlemleri desteklemek amacıyla da kullanılmaktadır.

Tablo 2. Sentinel-2 uydusunun teknik özellikleri (ESA Standart Document, 2015)

Özellik	**Açıklama**
Fırlatılma Tarihi	23 Temmuz 2015 (Sentinel-2A), 07 Mart 2017 (Sentinel-2B)
Multispektral Çözünürlük	10, 20, 60 m
Bant Sayısı	13
Görüntüleme Genişliği	290 km

Sentinel-2 uydu görüntü verileri, 290 km'lik alan genişliğinde, 10 m (B2, B3, B4 ve B8), 20 m (B5, B6, B7, B8a, B11 ve B12) ve 60 m (B1, B9 ve B10) uzaysal çözünürlüğe sahip 13 banttan elde edilmektedir.

Tablo 3. Sentinel-2 bant özellikleri (ESA Standart Document, 2015)

Sentinel-2 Uydu Bant Aralıkları	**Dalga Boyu (µm)**	**Çözünürlük (m)**
Bant 1 – Kıyı/Aerosol	0.443	60
Bant 2 – Mavi	0.490	10
Bant 3 – Yeşil	0.560	10
Bant 4 – Kırmızı	0.665	10
Bant 5 – Kırmızı Kenar (Bitki örtüsü)	0.705	20
Bant 6 – Kırmızı Kenar (Bitki örtüsü)	0.740	20
Bant 7 – Kırmızı Kenar (Bitki örtüsü)	0.783	20
Bant 8 – Yakın Kızılötesi	0.842	10
Bant 8a – Kırmızı Kenar (Bitki örtüsü)	0.865	20
Bant 9 – Su buharı	0.945	60
Bant 10 – Kısa Dalgaboyu Kızılötesi - Sirrus	1.375	60
Bant 11 – Kısa Dalgaboyu Kızılötesi	1.610	20
Bant 12 – Kısa Dalgaboyu Kızılötesi	2.190	20

Çalışmalarda kullanılan uydu veri setleri; Samsun için 16 Ağustos 2023 tarihli Sentinel 2B, İzmir Körfezi için 15 Ağustos 2023 tarihli Sentinel 2B ve İskenderun Körfezi için 18 Ağustos 2023 tarihli Sentinel 2A görüntüleridir.

Çalışmanın ikinci amacı ise, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak oluşturulan veri kümelerine göre hangi algoritmanın daha üstün ve uygulanabilir olduğunun tespit edilmesidir. Ayrıca bu aşamada, Sentinel-2 uydu verileri ve derinlik verileri kullanılarak aynı çalışma alanlarında makine öğrenmesi (ML) adımları uygulanmış ve batimetrik verilerin türetilmesi için etkili bir yöntem sunulması hedeflenmiştir. SDB'yi tahmin etmek için K-En Yakın Komşular (KNN), Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Doğrusal Regresyon (LR) olmak üzere dört farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır (Manessa ve diğerleri, 2016; Misra ve diğerleri, 2018; Tonion ve diğerleri, 2020; Alvevizos,

2020; Mateo-Perez ve diğerleri, 2021; Zhou ve diğerleri, 2023; Gülher ve diğerleri, 2024; Yang ve diğerleri, 2026).

Bir makine öğrenmesi modelinin performansı, hem veri kümesinin büyüklüğünden hem de model parametrelerinin seçiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu durumda, her bir parametrenin farklı deneylerin özel gereksinimlerine göre ince ayarlanması gerekmektedir.

Tablo 4. Makine öğrenme modellerinin karşılaştırılması

Model	**Tür**	**Avantajları**	**Dezavantajları**
KNN	Sınıflandırma	Basit ve uygulaması kolay	Yüksek boyutlu verilerde performans düşer.
RF	Sınıflandırma Regresyon	Yüksek doğruluk, aşırı öğrenmeye karşı dayanıklı	Yavaş ilerleyebilir ve yorumlanması zor olabilir.
SVM	Sınıflandırma Regresyon	Verimli, yüksek boyutlu verilerle iyi çalışır	Büyük veri kümeleri ve ayarlama gerektiren parametreler söz konusu olduğunda bu zor olabilir.
LR	Regresyon	Basit, hızlı ve net sonuçlar verir	Doğrusal olmayan ilişkiler modellenemez.

Manessa ve diğerleri (2016), WorldWiev-2 uydu görüntüleri üzerinden Endonezya'daki Gilli Mantra ve Panggang Adaları'nı çevreleyen sığ mercan resif sularında batimetriyi haritalamak için Rastgele Orman (RF) regresyon algoritmasını uygulamıştır. Bulguları sonucunda RF yönteminin su derinliğini tahmin etmede doğrusal regresyondan daha iyi performans sergilediğini tespit etmiştir. Hakim ve diğerleri (2018) regresyon analiz üzerinden uydu batimetri tahminlemelerini denemiştir. Sagawa ve diğerleri (2019) RF algoritmasını kullanarak Landsat-8 uydu görüntülerinden 20 metreye kadar batimetriyi tahmini yapmıştır. Alevizos (2020), RF ve K-En Yakın Komşular (KNN) makine öğrenme algoritmalarının uydu görüntüleri üzerindeki potansiyelini araştırmıştır. Tonion ve diğerleri (2020), Sentinel-2 uydu verilerinden batimetriyi tahmin etmek için RF ve Destek Vektör Makinesi (SVM) algoritmalarını uygulamıştır. Wu ve diğerleri (2022), rastgele orman, regresyon ve çeşitli algoritmalar kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir. Çelik ve diğerleri (2023), makine öğrenmesi yaklaşımlarında Rastgele Ormanın etkinliğini vurgulamıştır. Zhu

ve diğerleri (2026), topluluk öğrenmesi ve yapay sinir ağlarını içereren denetimli bir makine öğrenme yöntemlerine dayalı tahmini bir batimetri yaklaşımı sunmaktadır.

3.2. Çalışma Alanlarına Ait Bölgelerdeki Yersel Verilerin Temini

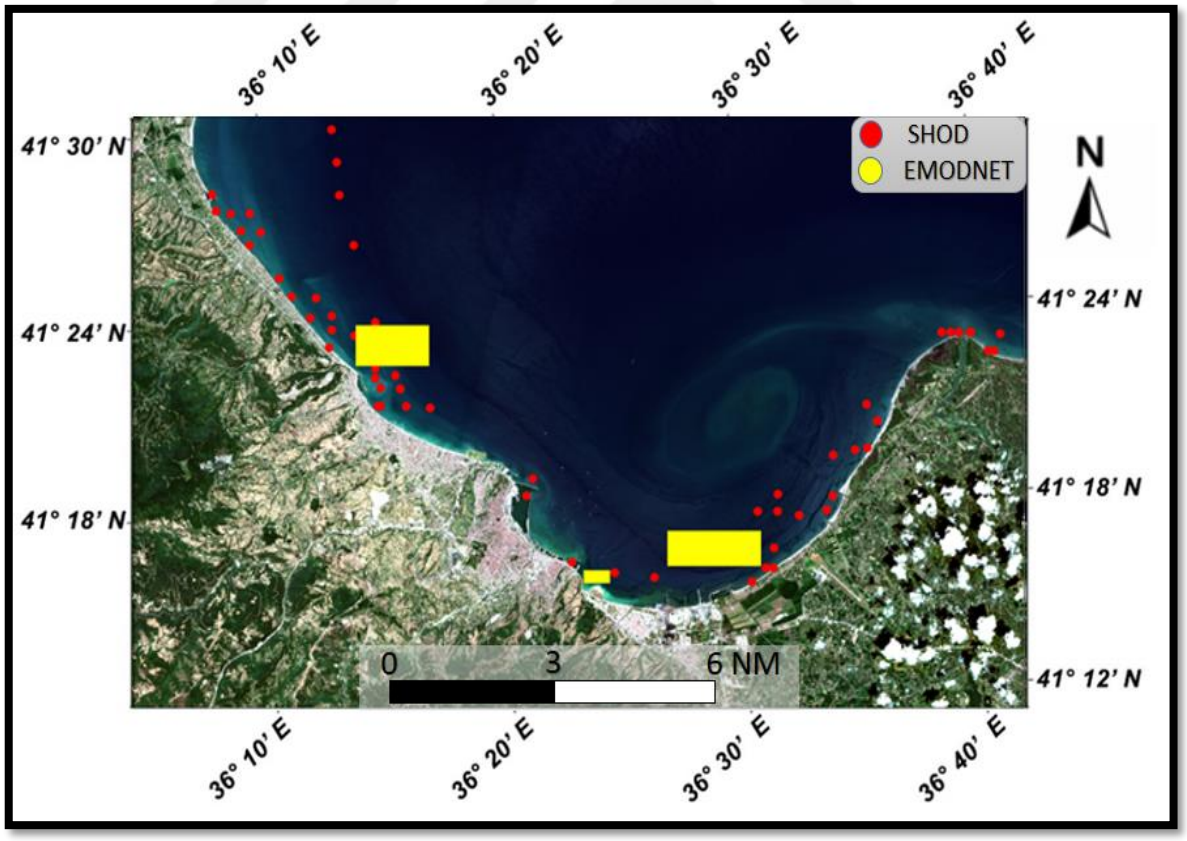
Uydu görüntüleri üzerinden batimetri çıkarımının elde edilebilmesi için öncelikli olarak çalışma alanlarına ait yersel verilerin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İlk aşamada, SNAP programında kullanılacak çalışma sahalarına referans oluşturacak veriler, Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Daire Başkanlığı (SHOD) tarafından üretilen TR 131, TR 221 ve TR 334 numaralı deniz haritaları üzerinden enlem, boylam ve derinlik verilerinin sayısallaştırılmasıyla elde edilmiştir.

Bu kapsamda, TR 131 numaralı haritada Samsun deniz alanı çalışma sahasına referans olacak 57 derinlik noktası, TR 221 numaralı haritada İzmir Körfezi–İncirliköy–Aliağa arasında kalan deniz alanı çalışma sahasına referans olacak 63 derinlik noktası ve TR 334 numaralı haritada İskenderun Körfezi deniz alanı çalışma sahasına referans olacak 68 derinlik noktası oluşturulmuştur.

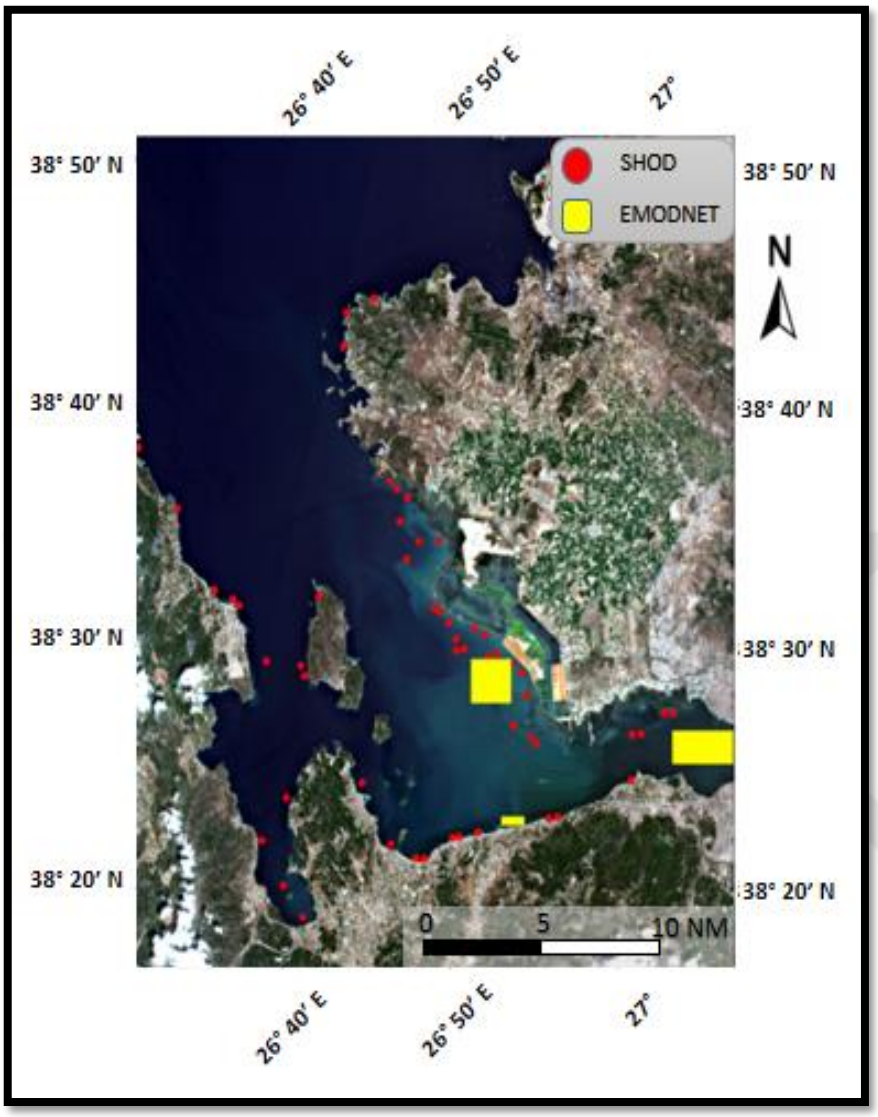
İkinci aşamada, makine öğrenmesi modelleri kapsamında Avrupa Deniz Gözlem ve Veri Ağı'ndan (EMODnet) elde edilen batimetri verileri kullanılmıştır. EMODnet, Avrupa denizlerinde deniz tabanı topografyası ve derinlik bilgisi sağlamak amacıyla ulusal hidrografi ofisleri, araştırma kurumları, özel sektör, kamu kurumları, açık veri depoları, uydu ve hava tabanlı ölçüm sistemlerinden elde edilen verileri standartlaştırıp birleştirerek yüksek çözünürlüklü bir dijital batimetrik yükseklik modeli oluşturmaktadır (Calewaert ve diğerleri, 2016; Giorgetti ve diğerleri, 2018; Villasante ve diğerleri, 2023; Schmitt ve diğerleri, 2023). EMODnet verilerinin, farklı ölçüm yöntemlerinin birleşiminden kaynaklanan tutarlı bir batimetrik veri derlemesi olduğu ve bu nedenle tek başına yerinde ölçümlerle eşdeğer kabul edilemeyeceği dikkate alınmalıdır. Çok ışınlı iskandil verilerine kıyasla EMODnet batimetrik verileri daha sınırlı bir mekânsal detay seviyesine sahiptir. Bununla birlikte, geniş coğrafi alanları kapsaması ve tutarlı derinlik bilgisi sağlaması sayesinde bu veriler, bölgesel ölçekli haritalama çalışmalarında hem uydu tabanlı batimetri hem de makine öğrenmesi modelleri için kullanılabilir bir referans veri hâline gelmektedir. Bu nedenle EMODnet verileri, belirli bir belirsizlik seviyesi içeren ikincil referans veri olarak kabul edilmiştir. Çalışma alanları için yerinde derinlik verileri ile EMODnet derinlik verileri arasındaki tutarlılığı kontrol etmek amacıyla çapraz doğrulama yapılmıştır. EMODnet verileri üzerinden yapılan ön testler

sonucunda, her çalışma alanı için 2000 derinlik veri noktası elde edilmiş; daha küçük veri kümelerinin (örneğin 500–1000 nokta) daha yüksek RMSE değerleri ürettiği belirlenmiştir. Oluşturulan veri setlerine uydu görüntü değerleri (görünür bant değerleri, koordinatlar, piksel değerleri ve güneşin açısal konumu) dâhil edilerek Python (Vagizov ve diğerleri, 2021; Buitinck ve diğerleri, 2013) programı kullanılarak eğitilmiş ve işlenmiştir.

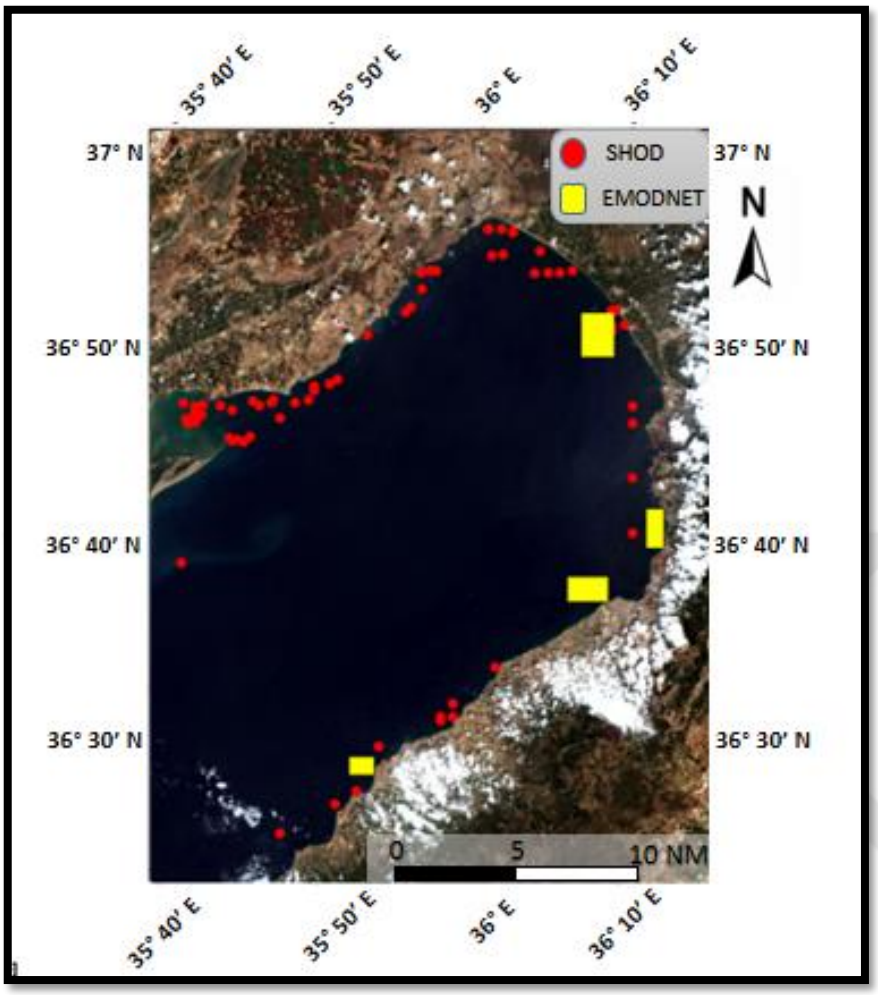
Uydu bantlarının yansıma değerlerine ve güneş ile sensör geometrisini tanımlayan parametrelere ek olarak, coğrafi koordinatlar yardımcı girdi değişkenleri olarak modele dâhil edilmiştir. Koordinatların modele dâhil edilmesinin amacı, çalışma alanındaki suyun fiziksel özelliklerindeki, çevresel koşullardaki ve sediment varyasyonlarındaki farklılıkları mekânsal değişkenliğe bağlı olarak dolaylı biçimde temsil etmektir. Bu tür bölgesel değişkenliğin, farklı kıyı ortamlarında yansıma ile derinlik arasındaki ilişkiyi etkilediği bilinmektedir. Bu bağlamda, özellikle rastgele veri bölümleme yaklaşımlarında mekânsal bağımlılık nedeniyle sızıntı riskini artırabileceği göz önünde bulundurularak, coğrafi koordinatların girdi değişkenleri olarak kullanımı doğrulama sürecinde dikkatle değerlendirilmiştir.



Şekil 8. Samsun bölgesine ait kullanılan derinlik verilerin konumları



Şekil 9. İzmir Körfezine ait kullanılan derinlik verilerin konumları



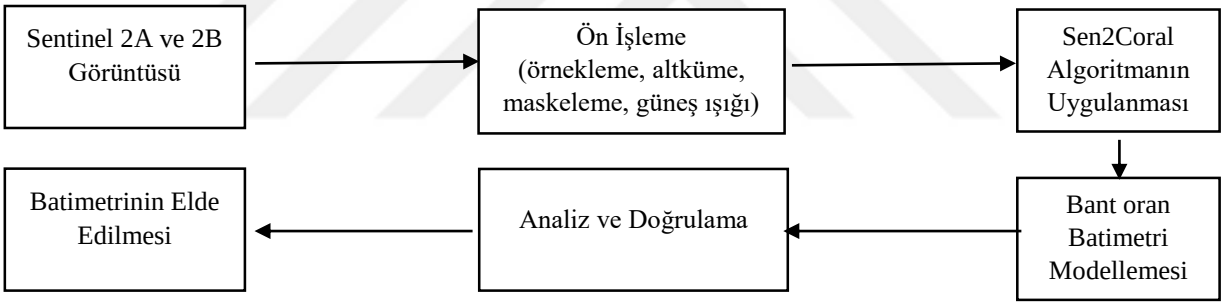
Şekil 10. İskenderun Körfezine ait kullanılan derinlik verilerin konumları

3.3. Uydu Görüntülerinden Batimetri Temini

Uydu görüntü verilerinin analiz süreçleri; ön işleme, batimetri çıkarma ve doğruluk değerlendirmesi aşamalarından oluşmaktadır. Çalışma alanlarındaki görüntü verileri için uygulanan ön işleme süreçleri; yeniden örnekleme (resample), alt küme (subset), kara ve deniz alanı maskesi (landmask) ile güneş ışığı (sun glint) düzeltmesini içermektedir. Çalışma alanlarını kapsayan, atmosferik ve radyometrik düzeltmeleri yapılmış "L2A" formatlı uydu görüntüleri kullanıldığından, görüntüler üzerinde ilave bir düzeltme uygulanmamıştır. Yeniden örnekleme ve veri alt kümesi oluşturulması maksadıyla, gerekli konuma uyacak şekilde görüntü verisi çağrılmış ve çalışma alanı uydu görüntüsünden kestirilerek elde edilmiştir.

Çalışma alanlarındaki uydu görüntülerine, güneşin su yüzeyindeki yansımasının uydu görüntüsündeki spektral değerleri etkilememesi maksadıyla güneş ışığı düzeltmesi uygulanmıştır. Batimetri çıkarımı için ihtiyaç duyulan referans derinlik verileri, Uluslararası Hidrografi Örgütü (IHO)'nun S-44 standartlarına uygun çalışma bölgelerine ait seyir haritalarının sayısallaştırılmasıyla elde edilmiştir.

Sentinel-2A ve Sentinel-2B uydu görüntülerinden batimetri tespiti, tıpkı akustik cihazlarda ses dalgalarının sudaki yayılım hareketine benzer şekilde, ışığın su içerisindeki yayılım prensibine dayanmaktadır. Yansıyan enerji değeri, görüntünün spektral değeri ile temsil edilmektedir. SNAP programında Sen2Coral algoritması kullanılarak, uydu görüntüleri üzerinden batimetri tespiti; sayısallaştırılmış derinlik verileri ile mavi bantın yeşil banda oran değeri arasında gerçekleştirilen regresyon analizi ile elde edilmiştir. Analiz sonucunda algoritmanın çıktısı metre cinsinden batimetri bilgisidir. Elde edilen batimetri değerleri daha sonra doğruluk hesaplamaları için yerinde derinlik (harita) verileriyle karşılaştırılmıştır. Uydu görüntüsü üzerinden batimetri elde edilmesinin akış şeması Şekil 11'da gösterilmiştir.

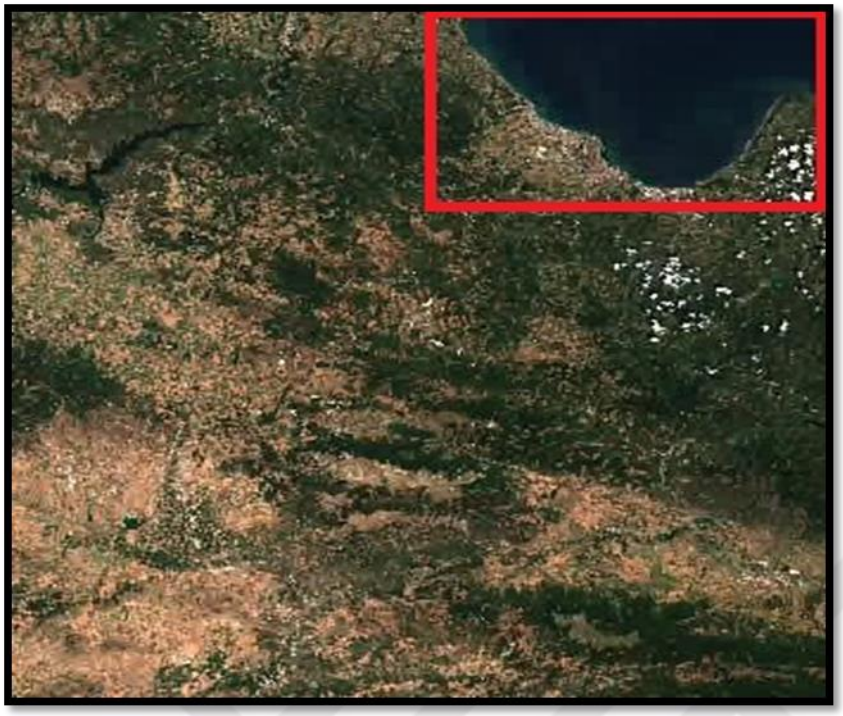


Şekil 11. Uydu tabanlı batimetri akış şeması

Tahmini batimetri değeri, Sentinel-2A ve Sentinel-2B uydu görüntülerindeki mavi, yeşil ve kırmızı olmak üzere üç görünür bandın işlenmesiyle belirlenmiştir. Yersel veriler ile elde edilen batimetri değerleri arasındaki farklılıkları gözlemlemek amacıyla karşılaştırmalar yapılmış ve her bir batimetrik veri çıkarımının doğruluğu hesaplanmıştır.

3.3.1. Samsun

Samsun bölgesi için atmosferik düzeltmesi yapılmış, yaklaşık %1'lik bulutluluk oranı ile seçilmiş, Şekil 12'de gösterilen S2B_MSIL2A_20230816T082609_N0509_R021_T36TYL_20230816T131702.SAFE isimli uydu görüntüsü, 16 Ağustos 2023 tarihinde saat 08:26:09.024Z zaman diliminde toplanmış olup, görüntüye ait metadata Ek-1'de sunulmuştur.



Şekil 12. Samsun bölgesi Sentinel-2 uydu görüntüsü

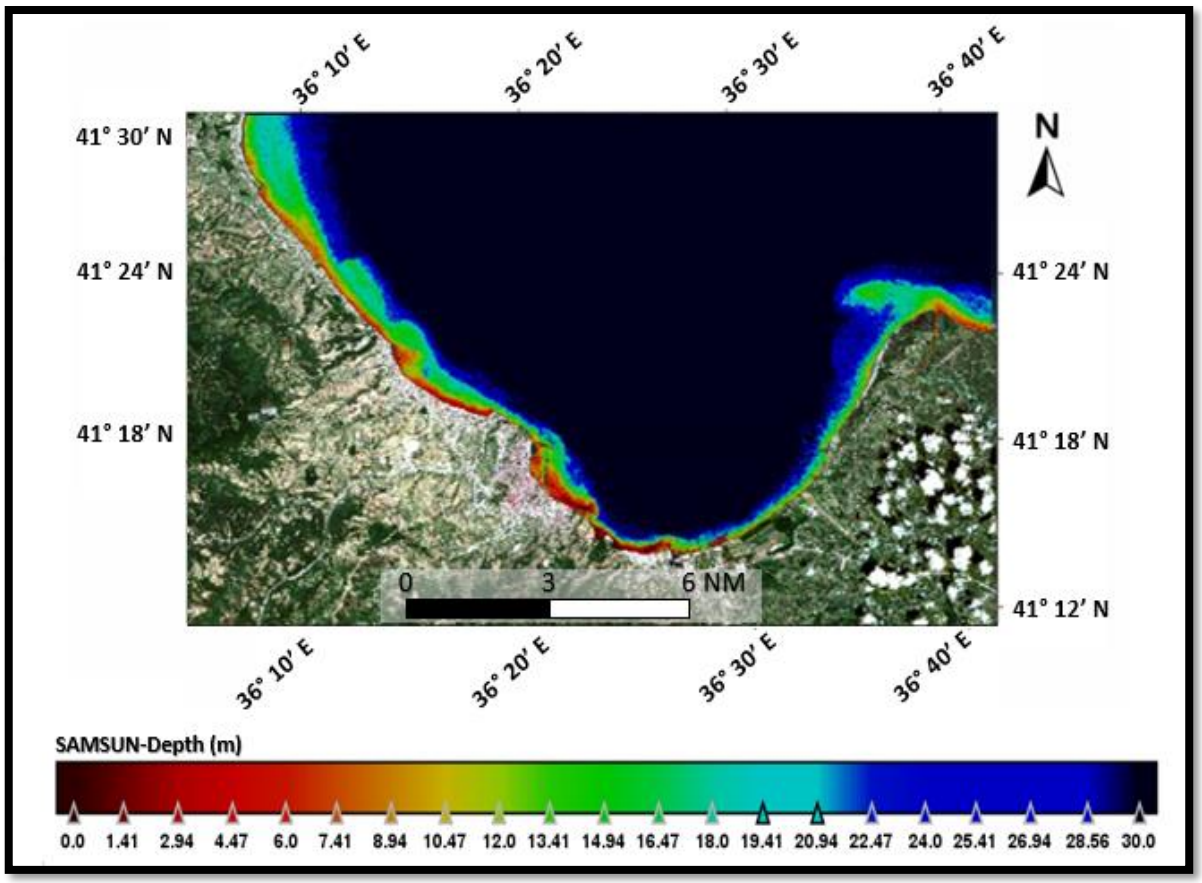
Uydu tabanlı batimetri çalışmaları kapsamında çalışma alanı için SNAP programı üzerinden 41° 30' 39" N - 36° 4' 44" E ve 41° 11' 9" N- 36° 41' 34" E koordinatları arasında 973 km²'lik çalışma kesiti oluşturulmuş olup Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Samsun bölgesi çalışma kesit alanı

Ön işleme adımları SNAP araç kutusuntaki (Toolbox) "Band Maths" modulunden önce arazi maskelemesi için yansıma açısından en iyi kontrasta sahip olan Yakın Kızılötesi

(Near Infra-Red) bant kullanılarak kara ile deniz hattının ayrımı yapılmıştır. Arazi maskeleme sonrasında güneş parıltısı düzeltmesi, karanlık nesnelerin görüntüden kaldırılması ve akabinde mavi ve yeşil bantlar kullanılarak "Extract Pixel Value" modulü üzerinden çalışma alanına ait bilinen koordinat ve derinlik bilgisi girilerek uydu tabanlı batimetri görüntüsü Şekil 14'de elde edilmiştir.



Şekil 14. Samsun bölgesi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü

3.3.2. İzmir Körfezi

İzmir Körfezi için atmosferik düzeltilmesi yapılmış, yaklaşık %3'lük bulutluluk oranı ile seçilmiş ve Şekil 15'te gösterilen S2B_MSIL2A_20230815T085559_N0509_R007_T35SMC_20230815T121643.SAFE isimli uydu görüntüsü, 15 Ağustos 2023 tarihinde saat 08:55:59.024Z zaman diliminde toplanmış olup, görüntüye ait metadata Ek-2'de sunulmuştur.



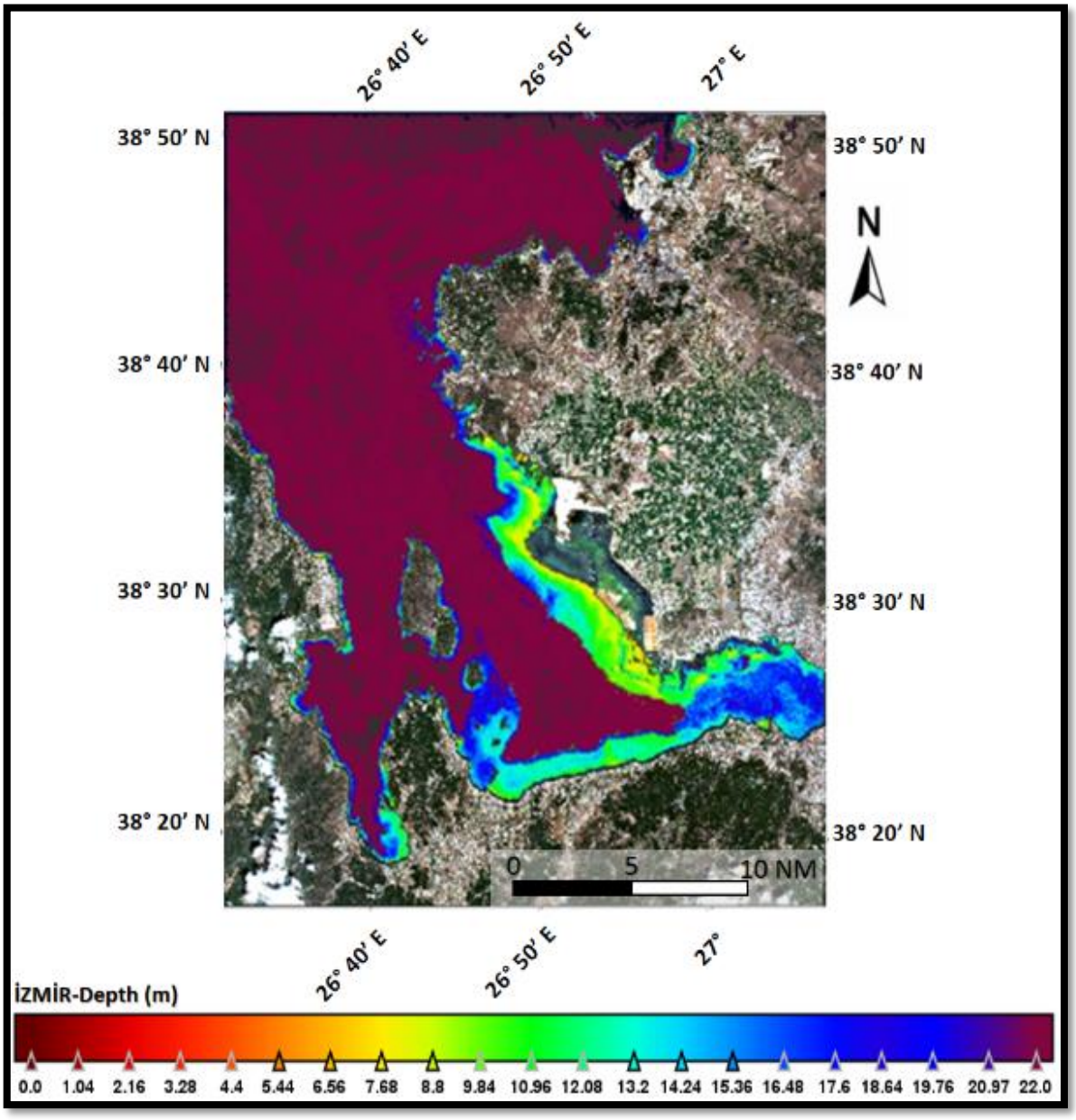
Şekil 15. İzmir Körfezi Sentinel-2 uydu görüntüsü

Uydu tabanlı batimetri çalışmaları kapsamında çalışma alanı için SNAP programı üzerinden 38° 50' 52" N - 26° 31' 15" E ve 38° 18' 32" N - 27° 6' 43" E koordinatları arasında 1406 km²'lik çalışma kesiti oluşturulmuş olup Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. İzmir Körfezi çalışma kesit alanı

Ön işleme adımları SNAP araç kutusuntaki (Toolbox) “Band Maths” modulunden önce arazi maskelemesi için yansıma açısından en iyi kontrasta sahip olan Yakın Kızılötesi (Near Infra-Red) bant kullanılarak kara ile deniz hattının ayrımı yapılmıştır. Arazi maskeleme sonrasında güneş parıltısı düzeltmesi, karanlık nesnelerin görüntüden kaldırılması ve akabinde mavi ve yeşil bantlar kullanılarak “Extract Pixel Value” modulü üzerinden çalışma alanına ait bilinen koordinat ve derinlik bilgisi girilerek uydu tabanlı batimetri görüntüsü Şekil 17’de elde edilmiştir.



Şekil 17. İzmir Körfezi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü

3.3.3. İskenderun Körfezi

İskenderun Körfezi için atmosferik düzeltilmesi yapılmış, yaklaşık %10'luk bulutluluk oranı ile seçilmiş, Şekil 18'de gösterilen S2B_MSIL2A_20230818T081611_N0509_R121_T37SBA_20230818T125657.SAFE isimli uydu görüntüsü, 18 Ağustos 2023 tarihinde saat 08:16:11.024Z zaman diliminde toplanmış olup, görüntüye ait metadata ise Ek-3'de sunulmuştur.



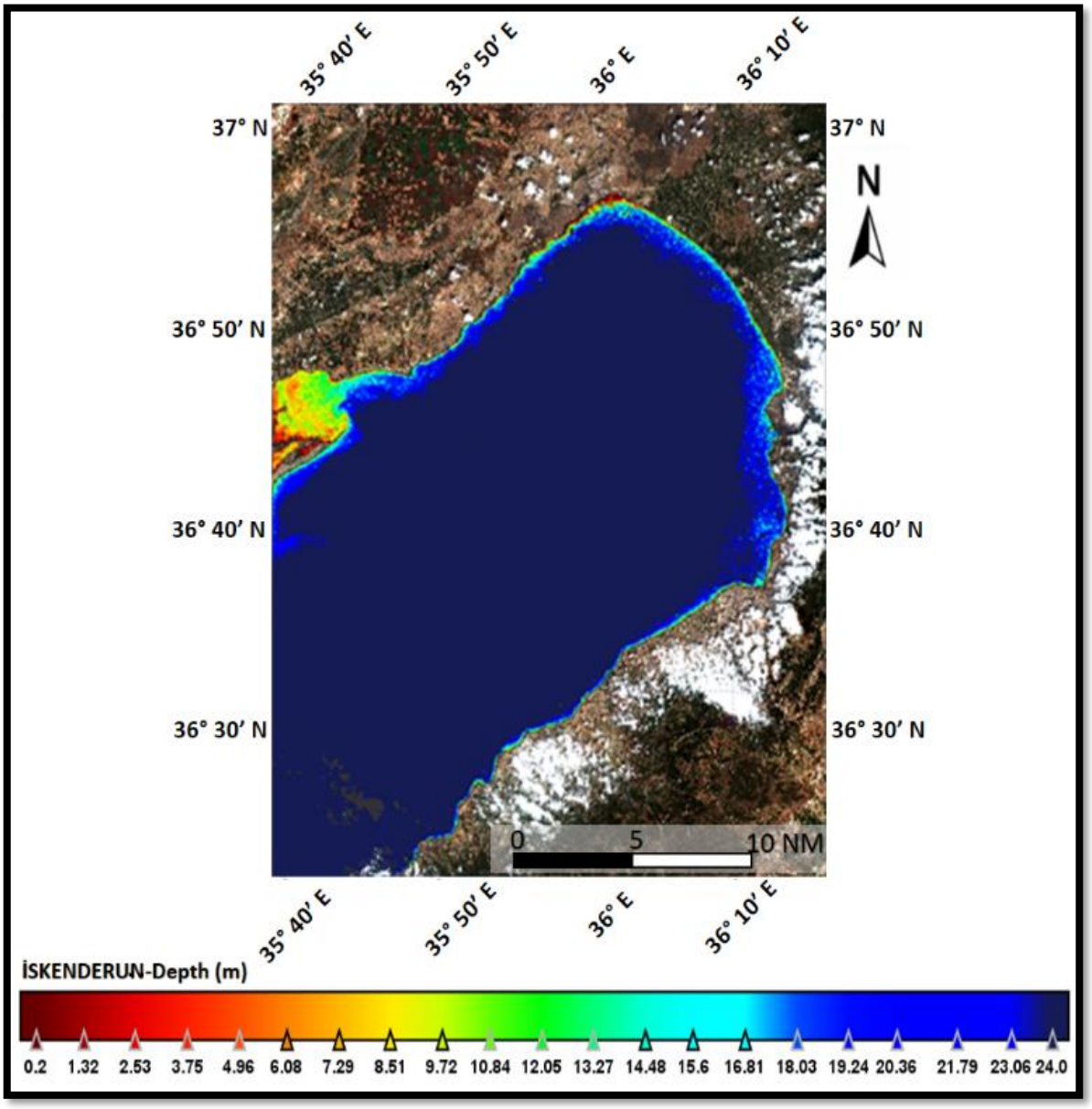
Şekil 18. İskenderun Körfezi Sentinel-2 uydu görüntüsü

Uydu tabanlı batimetri çalışmaları kapsamında çalışma alanı için SNAP programı üzerinden 36° 59' 56" N - 35° 37' 44" E ve 36° 20' 31" N - 36° 16' 30" E koordinatları arasında 2178 km²'lik çalışma kesiti oluşturulmuş olup Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 19. İskenderun Körfezi çalışma kesit alanı

Ön işleme adımları SNAP araç kutusuntaki (Toolbox) “Band Maths” modulunden önce arazi maskelemesi için yansıma açısından en iyi kontrasta sahip olan Yakın Kızılötesi (Near Infra-Red) bant kullanılarak kara ile deniz hattının ayrımı yapılmıştır. Arazi maskeleme sonrasında güneş parıltısı düzeltmesi, karanlık nesnelerin görüntüden kaldırılması ve akabinde mavi ve yeşil bantlar kullanılarak “Extract Pixel Value” modulü üzerinden çalışma alanına ait referans koordinat ve derinlik bilgisi girilerek uydu tabanlı batimetri görüntüsü Şekil 20’de elde edilmiştir.

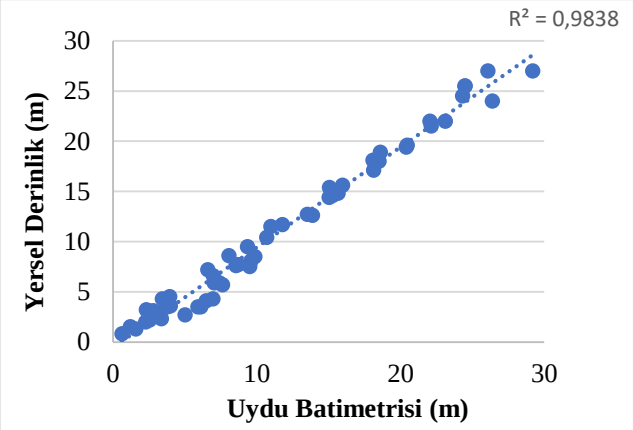


Şekil 20. İskenderun Körfezi uydudan türetilmiş batimetri görüntüsü

3.4. Yersel Batimetri ile Uydu Batimetri Arasındaki İstatiksel İlişkinin Belirlenmesi

Sayısallaştırma işlemine tabi tuttuğumuz deniz haritaları üzerindeki batimetri verileri ile uydu görüntüsünden elde edilen batimetri verileri arasındaki istatistiksel ilişkinin hassas bir şekilde incelenebilmesi için, çalışma bölgelerine ait Sentinel-2 uydu görüntülerinin elde edilme zaman aralığı baz alınarak uydudan elde edilen batimetri verilerine su seviyesi düzeltmesinin yapılması gerekmektedir. Deniz haritalarındaki batimetri değerleri ortalama deniz seviyesine (Mean Sea Level – MSL) göre hesaplanmaktadır. Bu kapsamda, uydu görüntüsünden elde edilen verilere Harita Genel Müdürlüğü Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) portalındaki su seviyesi (gelgit) düzeltmesi uygulanmış olup, Samsun çalışma alanı için 0,593 cm ve İskenderun çalışma alanı için 0,505 cm değerleri verilere eklenmiş, İzmir çalışma alanında ise 0,278 cm çıkarma işlemi uygulanmıştır.

Sentinel-2A ve Sentinel-2B görüntülerinden elde edilen batimetri verileri ile yersel batimetri verileri karşılaştırılarak, belirleme katsayısı (R^2) ve ortalama karekök hata (RMSE) kullanılarak doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu kapsamda, Samsun önleri için R^2: 0,98 – RMSE: 0,89 metre, İzmir önleri için R^2: 0,99 – RMSE: 0,55 metre ve İskenderun önleri için R^2: 0,98 – RMSE: 0,83 metre olarak tespit edilmiştir.



Şekil 21. Samsun bölgesi yersel-uydu batimetri dağılımı

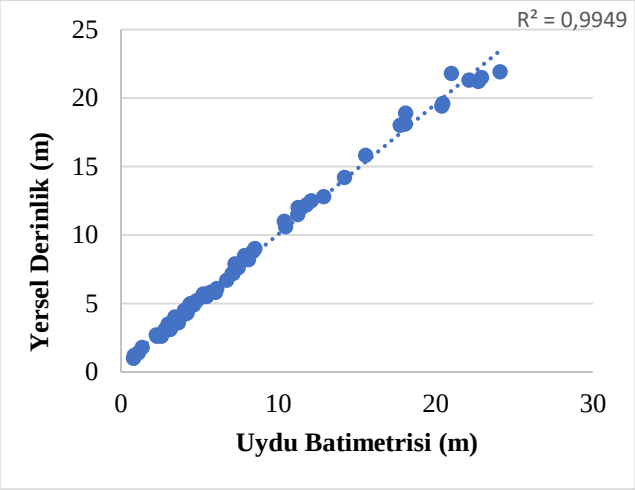
Samsun bölgesinde yapılan çalışmada, uydu tabanlı batimetri modelinin doğrulanması, çalışma alanı içerisinde yer alan 57 yersel batimetri verisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, uydu görüntüsünden elde edilen batimetri bilgilerinin Şekil 21'de 29,18 m'ye kadar derinlik bilgisini ortaya çıkarabildiğini göstermektedir.

RMSE değerini daha detaylı gözlemlemek amacıyla 0-2 m, 2,01-5 m, 5,01-10 m, 10-20 m, >20 m aralıklarında derinlik sınıfları oluşturulmuştur. Bu kapsamda her bir derinlik sınıfı için hesaplanan RMSE değerleri sırasıyla 0,26 m, 0,59 m, 0,68 m, 0,65 m ve 1,23 m olarak tespit edilmiş olup matris sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Samsun bölgesi doğruluk matris sonuçları

Yersel (m) / Uydu (m)	0-2	2,01-5	5,01-10	10,01-20	> 20,01	Toplam	RMSE
0-2	3	0	0	0	0	3	0,26 m
2,01-5	1	11	0	0	0	12	0,59 m
5,01-10	0	5	12	0	0	17	0,68 m
10,01-20	0	0	0	14	0	14	0,65 m
> 20	0	0	0	2	9	11	1,23 m
Toplam	4	16	12	16	9	57	0,89 m

İzmir Körfezi'nde yapılan çalışmada, uydu tabanlı batimetri modelinin doğrulanması, çalışma alanı içerisinde yer alan 63 yersel batimetri verisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup uydu görüntüsünden elde edilen batimetri bilgilerinin Şekil 22'de 20,97 m'ye kadar derinlik bilgisini ortaya çıkarabildiğini göstermektedir.



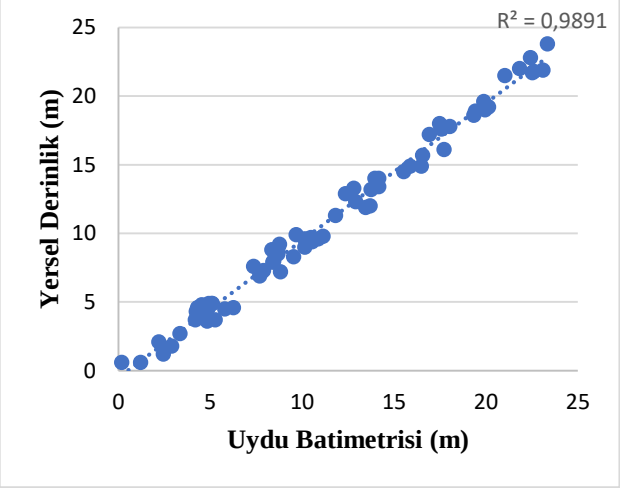
Şekil 22. İzmir Körfezi yersel-uydu batimetri dağılımı

RMSE değerini daha detaylı gözlemlemek amacıyla 0-2 m, 2,01-5 m, 5,01-10 m ve 10-20 m aralıklarında derinlik sınıfları oluşturulmuştur. Bu kapsamda her bir derinlik sınıfı için hesaplanan RMSE değerleri sırasıyla 0,34 m, 0,33 m, 0,33 m ve 0,39 m olarak tespit edilmiş olup, matris sonuçları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. İzmir Körfezi doğruluk matris sonuçları

Yersel (m) / Uydu (m)	0-2	2,01-5	5,01-10	10,01-20	> 20,01	Toplam	RMSE
0-2	4	0	0	0	0	4	0,34 m
2,01-5	0	23	1	0	0	24	0,33 m
5,01-10	0	0	16	0	0	16	0,33 m
10,01-20	0	0	0	12	0	12	0,52 m
> 20	0	0	0	2	5	7	1,07 m
Toplam	4	23	17	14	5	63	0,55 m

İskenderun Körfezi'ndeki çalışmada uydu tabanlı batimetri modelinin doğrulanması, çalışma alanı içerisinde yer alan 68 yersel batimetri verisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup uydu görüntüsünden elde edilen batimetri bilgilerinin, Şekil 23'de 23,34 m'ye kadar derinlik bilgisini ortaya çıkarabildiğini göstermektedir.



Şekil 23. İskenderun Körfezi yersel-uydu batimetri dağılımı

RMSE değerini daha detaylı gözlemlemek amacıyla 0-2 m, 2,01-5 m, 5,01-10 m, 10-20 m ve >20 m aralıklarında derinlik sınıfları oluşturulmuştur. Bu kapsamda, her bir derinlik sınıfı için hesaplanan RMSE değerleri sırasıyla 0,52 m, 0,65 m, 0,87 m, 0,91 m ve 0,73 m olarak tespit edilmiş olup, matris sonuçları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. İskenderun Körfezi doğruluk matris sonuçları

Yersel (m) / Uydu (m)	**0-2**	**2,01-5**	**5,01-10**	**10,01-20**	**> 20,01**	**Toplam**	**RMSE**
0-2	2	0	0	0	0	2	0,52 m
2,01-5	2	10	0	0	0	12	0,65 m
5,01-10	0	5	12	0	0	17	0,87 m
10,01-20	0	0	6	23	0	29	0,91 m
> 20	0	0	0	1	7	8	0,73 m
Toplam	4	15	18	24	7	68	0,83 m

3.5. Uydu Tabanlı Batimetri Verilerinin Hidrografik Ölçüm Standartları (S-44) ve Uydudan Türetilmiş Batimetri Rehberi (B-13) Kapsamında İncelenmesi

Hidrografik Ölçüm Standartları (S-44), seyrüsefer güvenliği, deniz ortamının korunması ve araştırılması maksadıyla icra edilen batimetri çalışmalarına yönelik bir dizi minimum standardı belirleyen Uluslararası Hidrografi Örgütü (IHO)'nun bir yayınıdır. Bu yayın ayrıca IHO üyesi ülkelere bağlı hidrografi ofisleri ve kuruluşları tarafından ölçüm standartlarının ulusal ve bölgesel gereksinimlerini tanımlanmasını da sağlamaktadır (IHO, 2022).

Kullanım ve araştırma amacına göre her biri çeşitli ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmış beş farklı ölçüm standartı Tablo 8'de belirtilmiştir.

Tablo 8. IHO S-44 ölçüm standartları

Derece	**2**	**1b**	**1a**	**Özel (Special)**	**Sınırlı (Exclusive)**
Saha Tanımlamaları	Deniz tabanının genel tanımının tehlikesiz olduğu düşünülen alanlar.	Omurga altı açıklığının, bölgeden geçmesi beklenen gemiler açısından bir sorun olarak görülmediği alanlar.	Omurga altı açıklığının kritik olmadığı ancak gemileri ilgilendiren özelliklerin mevcut olabileceği alanlar.	Omurga altı açıklığının kritik olduğu alanlar.	Minimum omurga altı açıklığının ve manevra kabiliyeti kriterlerinin mutlak olduğu alanlar.
%95 güvenilirlik seviyesinde izin verilen azami TYB	20 m. + derinliğin %10'u	5 m. + derinliğin %5'i	5 m. + derinliğin %5'i	2m	1m
%95 güvenilirlik seviyesinde izin verilen azami TDB	a = 1.0 m. b = 0.023	a = 0.5 m. b = 0.013	a = 0.5 m. b = 0.013	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.15 m b = 0.0075
Cisim tespiti	Uygulanmaz	Uygulanmaz	40 m.'den sığ derinliklerde 2 m³; 40 m.'den sonra derinliğin %10'u	1 m³ büyük cisimler	0.5 m³ büyük cisimler
Tam dip araştırması	Zorunlu değil	Zorunlu değil	%100	%100	%200
Batimetri Kaplaması	%5	%5	≤ 100%	%100	%200

Toplam Düşey Belirsizlik (TDB), her batimetri çıkarımı için ulaşılması gereken belirsizlikleri içermektedir. %95 güvenilirlik seviyesine ilişkin belirsizlik, sistematik hatalar düzeltildikten sonra kalan artıklar ile rastlantısal hataların birleşik katkısından oluşan hatanın kestirimine işaret etmektedir. Batimetri sisteminin kabiliyeti, TDB hesabı ile kanıtlanmalıdır. Derinliklerin belirsizliğini etkileyen hem derinlikten bağımsız hem de derinliğe bağlı hatalar olduğu göz önünde bulundurularak, en yüksek kabul edilebilir TDB'nin %95 güvenilirlik seviyesinde hesaplanması için Tablo 8'de verilen a ve b değerlerinin Denklem (3.1) ile kullanılması gerekmektedir.

$$\pm\sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \tag{3.1}$$

a : belirsizliğin derinliğe bağlı olmayan kısım

b : derinliğe bağlı belirsizlik katsayısı

d : derinlik

b x d : derinliğe bağlı belirsizliği simgeler

IHO S-44 kapsamında, batimetriye bağlı değerlerin 5 m, 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m derinliklerindeki hata sınırlarının hesaplaması Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. IHO S-44'e göre derinliğe bağlı hata miktarı

Deniz Derinliği	**5 m**	**10 m**	**15 m**	**20 m**	**25 m**	**30 m**
Sınırlı (Exclusive)	0,15	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27
Özel (Special)	0,25	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33
1a ve 1b	0,50	0,51	0,53	0,56	0,59	0,63

Bu kapsamda, çalışma alanlarındaki uydu tabanlı en yüksek batimetri değerlerine göre sınırlı, özel, 1a ve 1b derece standartlarına ait düşey belirsizlik değerleri sırasıyla Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. IHO S-44'e göre çalışma alanlarının kıyaslanması

Yer	**Sınırlı**	**Özel**	**1a**	**1b**	**Derinlik**	**RMSE**
Samsun	0,26	0,33	0,62	0,62	29,18 m	0,89 m
İzmir	0,21	0,29	0,57	0,57	20,97 m	0,55 m
İskenderun	0,23	0,30	0,58	0,58	23,34 m	0,83 m

İstatistiksel analize göre elde edilen hata değerleri göz önüne alındığında, sadece İzmir bölgesinde yapılan çalışmanın IHO S-44 standartları (1b) ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Uydudan Türetilen Batimetri Rehberi (B-13), deniz ortamının haritalanması ve izlenmesi için teknolojinin kullanımının anlaşılmasını iyileştirmek amacıyla tasarlanmış Uluslararası Hidrografi Örgütü'nün (IHO) bir yayınıdır. Rehber, ulusal veya uluslararası yasaların, standartların ve yönetmeliklerin yerini almamakta olup, yalnızca uydu batimetri çalışmalarında teknik uygulamaları kullanıcılara sunmak amacıyla hazırlanmış bir belgedir. Ayrıca bu rehberde, uydu tabanlı batimetri çalışmalarından elde edilen derinlik bilgilerinin sınıflara ayrılması önerilmektedir (International Hydrographic Organization, 2024).

Tablo 11. SDB derinlik aralıkları ve genel açıklama

Derinlik (m)	SDB Derinlik Aralıkları ve Genel Açıklama
0-3	Genellikle araştırma yapmanın neredeyse imkânsız olduğu alanlar (sığ sular, tehlikeli su altı engelleri, vb.)
3-5	Sığ draftlı, hafif teknelerin manevra yapabileceği alanlar.
5-10	Sığ su çekimine sahip teknelerin güvenli bir şekilde yaklaşıp manevra yapabileceği alanlar.
10-15	Yaklaşık 3,5 m yüklü drafta sahip büyük açık deniz gemilerinin operasyon alanları.
15-25	Genellikle çoğu gemi tipi için seyir açısından güvenli olan alanlar.
25 m ≤	Her türlü gemi tipinin genel seyir için güvenli olduğu alanlar.

3.6. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Hesaplanması

Elde edilen verilere istinaden uydu görüntüleri üzerinden batimetri çıkarımına etki edebilecek parametrelerin belirlenmesi için hidrografi dalında en az 7 yıl ve üzeri deneyime sahip, Uluslararası Hidrografi Örgütü FIG/IHO/ICA Kategori kursunu almış 9 uzmana başvurulmuştur. Karar vericilerle yapılan görüşmeler sonrasında sonuçlar Microsoft Office Excel 2016 yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu kapsamda batimetriyi etkileyebilecek çalışma alanlarına ait uydu görüntü metadatası, bulutluluk oranı ve deniz dip tabiatına ait bilgilerin ÇKKV (Analitik Hiyerarşi Süreci-AHP ve Best-Worst Yöntemi-BWM) yöntemleri ile Tablo 12'ye göre ikili karşılaştırmalar çerçevesinde en önemli faktörden en önemsiz faktöre doğru sıralama yapılarak, en uygun ve önemli alternatif seçilmiştir.

Tablo 12. ÇKKV karşılaştırma ölçeği

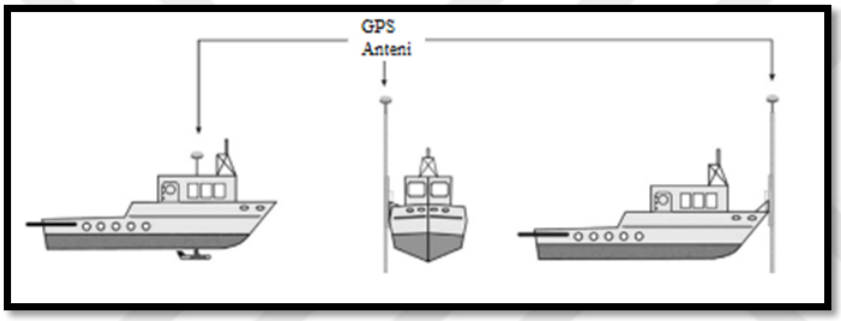
Önem Derecesi	Kavramsal Karşılığı	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	İki seçenek eşit dercede önemli
3	Biraz daha fazla önemli	Bir seçenek diğerine göre biraz daha önemli
5	Kuvvetli derecede önemli	Bir seçenek diğerine göre oldukça önemli
7	Çok kuvvetli önemli	Bir seçenek diğerine göre çok önemli
9	Kesin önemli	Bir seçeneğin diğerinden önemli olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenirliğe sahiptir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Yakın cevaplar uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler

Uydu batimetrisinin belirlenmesini etkileyebilecek parametreler, gerekçeleriyle birlikte ÇKKV karşılaştırma ölçeğinde elde edilen sonuçlara istinaden aritmetik

ortalamalarıyla değerlendirmeye alınmıştır. Belirtilen parametrelerin altlığı ise akustik ölçümlerle yapılan batimetri çalışmalarında ölçüm hassasiyetini etkileyebilecek gerekli referanslardan oluşturulmuştur.

Parametre-1: Uydu görüntüleri üzerinden deniz batimetrisinin tespit edilmesinde Güneş'in yerden yüksekliği (zenith) önemlidir (Ek-1, 2 ve 3).

Gerekçe: Konumlandırma, hidrografik ölçüm işleminin temel parçasıdır. Akustik ölçümlerde hassas konumlandırmada kullanılan internet özellikli GPS cihazlarının doğru koordinatlama yapabilme ve anteninin çevresel etkenlerden az etkilenmesi için deniz seviyesinden yüksek ve dik bir pozisyonda olması gerekmektedir (IHO Manual on Hydrography, 2005; Wanjun, 2012; NOAA, 2021; IHO Standarts, 2022).



Şekil 24. GPS'in deniz aracı üzerindeki pozisyonu (Grządziel ve diğerleri (2015)'den değiştirilmiştir).

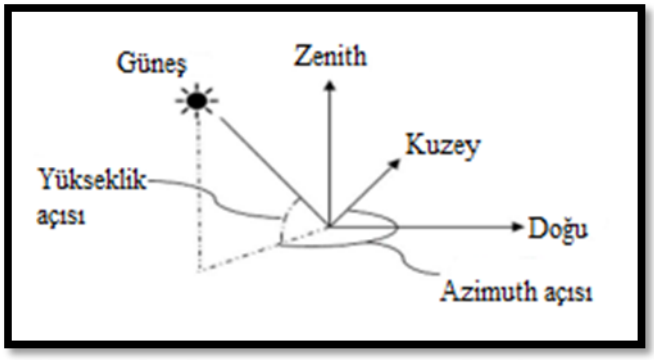
Zenith, güneşin gökyüzündeki yatay düzlemden ölçülen açısal yüksekliğidir. Sabah güneş doğarken yükseklik 0°, tam tepede olduğunda ise maksimum yükselme açısı 90° olur. Yükseliş açısı gün boyunca sürekli olarak değişmekle birlikte yılın gününe ve konumun enlemine bağlıdır (Rashid ve diğerleri, 2015).

Çalışma bölgelerine ait uydu görüntüleri incelendiğinde güneşin yükseklik açısı Samsun bölgesi için 30°, İzmir ve İskenderun bölgeleri için 28° olarak tespit edilmiştir.

Parametre-2: Uydu görüntüleri üzerinden deniz batimetrisinin tespit edilmesinde Güneş ışığının açısal uzaklığı (azimuth) önemlidir (Ek-1, 2 ve 3).

Gerekçe: Azimuth açısı, güneş ışınlarının yatay düzlem üzerindeki izdüşümü ile gerçek kuzey arasındaki pusula yönü olarak tanımlanmaktadır. Güneşin belirli bir tarih ve saatte belirli bir konumdaki konumunu belirlemek için düzleme göre yükseklik açısı ve azimut açısının bilinmesi önemlidir. Kuzey yarımkürede öğle vakti güneş tam güneydedir. Bu

da azimut açısının 0° olduğu anlamına gelmektedir. Güneş ekinoks enlemlerinden bağımsız olarak doğudan doğar ve batıdan batar. Bu, azimut açılarını gün doğumunda 90° ve gün batımında 270° yapmaktadır (Rashid ve diğerleri, 2015; Kacira ve diğerleri, 2004).



Şekil 25. Güneş'in azimuth açısının gösterimi (Rashid ve diğerleri, (2015)'den değiştirilmiştir).

Çalışma bölgelerine ait uydu görüntüleri incelendiğinde güneşin açısal uzaklığı Samsun bölgesi için 150°, İzmir bölgesi için 144° ve İskenderun bölgesi için 141° olarak tespit edilmiştir.

Parametre-3: Uydu görüntülerinin analizinde deniz dip tabiatının sabit zemin özellikleri göstermemesi (kum, çamur, kaya vb.) batimetrik ölçüm boşluklarına veya hatalara neden olabilir (TR 131; TR 221; TR 334).

Gerekçe: Uydu görüntüleri üzerinden batimetri çıkarımı, kıyıya yakın sığ alanlardaki güneş ışığının deniz dibi tabiatı bağlı saçılma ve emilim hareketleri nedeniyle etkilemektedir. Su, elektromanyetik radyasyonun zayıf bir yansıtıcısı olduğundan alınan radyasyonun ~%10'unu, bitki örtüsü için ~%50'sini ve toprak için ~%30-40'ını yansıtır. Uydu görüntülerindeki yansıma karasal alanlar için oldukça etkili ancak su altı ortamları için daha az etkilidir. Analiz edilecek deniz tabanının yapısıda güneş ışığının yansımasına bağlıdır. Dip yapısının kaya veya tortul olduğu bölgelerde ışığın geliş açısına bağlı olarak nispeten engebeli deniz tabanını gösteren açısal bir geri saçılım eğrisine sebep olacaktır. Bu nedenle deniz tabanının özelliğine göre sığ alanlarda yansıma batimetri tespiti için önemlidir (Eugenio ve diğerleri, 2015; Westley, 2021; Jacops, 2002; Beyer, 2006).

Çalışma bölgelerine ait deniz dip tabiatının incelenmesi yapıldığında Karadeniz bölgesi için; 19 Mayıs-Samsun-Cıva Burnu hattı arası dip tabiatı 0-5 m arası kum, 5-20 m arası siltli kum, 20 m ve sonrasında ise silt hakimdir. Ayrıca 19 Mayıs önlerinde 10-20 m

arası dip tabıatı çakıllı kum, Samsun merkez önleri 20 m ve sonrasında çamur ve kumlu çamur, Samsun limanı doğusu yaklaşık 5 deniz mili içerside 20 m ve sonrasında dip tabiatı ağırlıklı olmasada çamur bulunmaktadır (TR 133).

Ege Bölgesi için; İzmir-İçmeler-Karaburun hattı üzerinde Balçova-Menteş arası 0-10 m derinlikte dip tabiatı ağırlıklı çakıllı kum, Menteş-İçmeler arası ağırlıklı kumlu çakıl, İçmeler Yılan adası etrafı kum ve İçmeler-Karaburun hattı kumlu çakıldır. İzmir-Foça-Aliağa hattı üzerinde Karşıyaka-Foça'nın yaklaşık 3 deniz mili güneyi 0-10 m arası dip tabiatı ağırlıklı kumlu çamur'dur. Foça halk plajı ile Aliağa arasında kalan 0-10 m derinlik arası dip tabiatı ise çakıllı kum'dur. Çalışma alanının 10-20 m arası genellikle silt mevcut olup, 20-50 m arası silt ve çamur dip tabiatlarından oluşmaktadır. Körfez içerisinde bulunan Uzunada'nın derinliğe bağlı dip tabiatı ise 0-10 m arası çakıllı kum, 10 m fazla derinliklerde ise kumlu çamur, çamurlu kum ve çakıllı çamurlu kum mevcuttur (TR 221).

Akdeniz bölgesi için; Uluçınar-İskenderun Merkez hattı 0-10 m arası dip tabiatı kum, İskenderun Merkez-Gübretaş Limanı arası dip tabiatı çamurlu kumlu çakıl, Atakaş Limanı-Yeniyurt İskelesi arası çakıllı kumlu çamur ve Sönmez Port İskelesi-Yumurtalık arası dip tabiatı kum'dur. Çalışma alanında 10-20 m arası genellikle siltli kum ve 20 m sonrası kumlu silt ve çamur ağırlıklı olmak üzere, kumlu çamur, çamurlu kum, çakıllı çamurlu kum, çamurlu çakıl, kil ve çakıllı çamur görülmektedir (TR 334).

Parametre-4: Meteorolojik koşullara göre uydu görüntüsünde bulutluluk oranının fazla olması batimetri verisinin tespitinde veri boşluklarına/hatalara sebep olur (Ek-1, 2 ve 3).

Gerekçe: Deniz yüzeyindeki yansıma olayını engellememesi için çalışma alanlarındaki uydu görüntülerinin meteorolojik koşullara gözönüne alındığında, bulutsuz ve rüzgarsız görüntüler uydu görüntülerinden batimetri elde edilmesi için idealdir (Ashphaq ve diğerleri, 2021; Evagorou ve diğerleri, 2022; Mudiyanselage ve diğerleri, 2024).

Bu kapsamda, çalışma alanlarındaki uydu görüntülerine ait bulutluluk oranına bakıldığında Samsun ve çevresi için ~%1, İzmir ve çevresi için ~%3 ve İskenderun ve çevresi için ~%9 olarak elde edilmiştir. İskenderun ve çevresindeki çalışma alanına ait en uygun uydu görüntüsü seçildiğinden batimetri çıkarımı yapılan alanda bulutluluk oranı fazladır.

Parametre değerleri ve uzman görüşüne dayanılarak geliştirilen AHP modeline göre, uydu tabanlı batimetri analizlerinde etkili olan ana kriterler, güneşin yerden yüksekliği, güneş ışığının geliş açısı, deniz dibi tabiatı ve bulutluluk oranıdır. Samsun, İzmir ve İskenderun

çalışma alanları bu kriterler kapsamında değerlendirilmiş olup sonuçlar Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. AHP en önemli parametre seçimi

Karar Vericiler	Güneşin Yerden Yüksekliği	Güneş Işığının Açısı	Dip Tabiatı	Bulutluluk Oranı
Ağırlıklı Ortalama	0,1141	0,6485	0,0452	0,1922

Tablo 13'e göre uydu görüntülerinden batimetri tespitinde en önemli parametre %64 ile güneş ışığının açısı olarak belirlenmiştir. Sırasıyla %19 ile bulutluluk, % 11 ile güneşin yerden yüksekliği ve % 4 ile deniz dip tabiatı tespit edilmiştir.

Tablo 14'te ise çalışma alanına ait belirlenen kriterlerinin rastgele mi yoksa mantıklı bir düzene dayandığını kontrol edilmesi maksadıyla tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Bu kapsamda çalışma alanlarında belirlenen seçim kriterleri göz önüne alındığında tutarlılık oranı 0,0703 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen tutarlılık oranı 0,1'den küçük olduğundan karşılaştırmalar yeterince tutarlı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 14. AHP en uygun yer seçimi ve tutarlılık oranı

Çalışma Alanı	Güneşin Yerden Yüksekliği	Güneş Işığının Açısı	Dip Tabiatı	Bulutluluk	Sonuçlar	Tutarlılık Oranı
Samsun	0,0571	0,3499	0,0073	0,0769	0,4912	0,0703
İzmir	0,0285	0,1926	0,0348	0,0769	0,3328	
İskenderun	0,0285	0,1060	0,0031	0,0384	0,1760	

Bu sonuçlara göre uydu batimetrisi için belirlenen parametrelere istinaden en uygun yerin Samsun olarak belirlenmiştir.

Uygulamada kullanılan Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden diğeride Best-Worst Yöntemi (BWM)'dir. BWM'de amaç en iyi kriterler ile diğer kriterlerin en kötü kriterle karşılaştırmaya olanak sağlayan bir yöntemdir (Rezaei, 2015).

Yöntemde en iyi kriter olarak güneş ışığının açısı en kötü olarakta bulutluluk seçilmiş ve Tablo 12'deki ölçek değerlerine göre uzman personel 1-9 arasında numaralandırma yapmıştır.

BWM uygulamasına göre uydu görüntülerinden batimetri tespitinde en önemli parametre %54 ile güneş ışığının açısı olarak belirlenmiştir. Sırasıyla %29 ile güneşin yerden yüksekliği, % 10 ile bulutluk oranı ve % 5 ile deniz dip tabiatı tespit edilmiştir.

Tablo 15. BWM en önemli parametre seçimi

Karar Vericiler	**Güneşin Yerden Yüksekliği**	**Güneş Işığının Açısı**	**Dip Tabiatı**	**Bulutluluk Oranı**
Ağırlıklı Ortalama	0,2955	0,5471	0,0503	0,1069

Her iki yöntem sonucuna göre, uydu batimetrisinde "Güneş Işığının Açısı" en önemli parametre olarak belirlenmiştir.

3.7. Makine Öğrenme Modellerinin Kıyaslanması

Bu bölümde, çalışma alanları için oluşturulan veri setleri üzerinde batimetri tahmini amacıyla makine öğrenmesi yaklaşımlarının karşılaştırılması ve en etkili modelin belirlenmesi ele alınmıştır.

Makine öğrenmesi yaklaşımlarının kullanılmasının temel amacı, uydu görüntülerinden elde edilen özellikler üzerinden derinlik tahmini yaparak hem önerilen yöntemin performansını hem de yöntemlerin başarımlarını karşılaştırmaktır.

Makine öğrenmesi algoritmalarının ve önerilen yöntemin performansını daha etkin bir şekilde ölçebilmek için veri setinin %80'i eğitim, %20'si ise test verisi olarak kullanılmış ve test setinin performansını gerçekçi bir şekilde değerlendirebilecek yeterli veri sağlanmıştır.

KNN modeli için, veri setinin orta büyüklükte olması ve mekânsal kümeleme yapısı göz önünde bulundurularak optimum komşu sayısı (k) 1 ila 10 arasında değişen değerler için test edilmiş ve en düşük Kök Ortalama Kare Hatası'nı (RMSE) veren k = 3 değeri seçilmiştir. KNN algoritması, bu çalışmadaki veri kümesi üzerinde k değeri 3 olarak eğitildiğinde en yüksek başarı oranına ulaşmıştır. Bu seçim, modelin mekânsal verilerle olan etkinliğini artırmak ve daha büyük k değerlerinin neden olabileceği aşırı uyum riskini en aza indirmek amacıyla yapılmıştır. KNN uygulamasında, mesafe ölçütü olarak Öklid mesafesi kullanılmış ve seçilen en yakın komşulara tekdüze ağırlıklandırma uygulanmıştır.

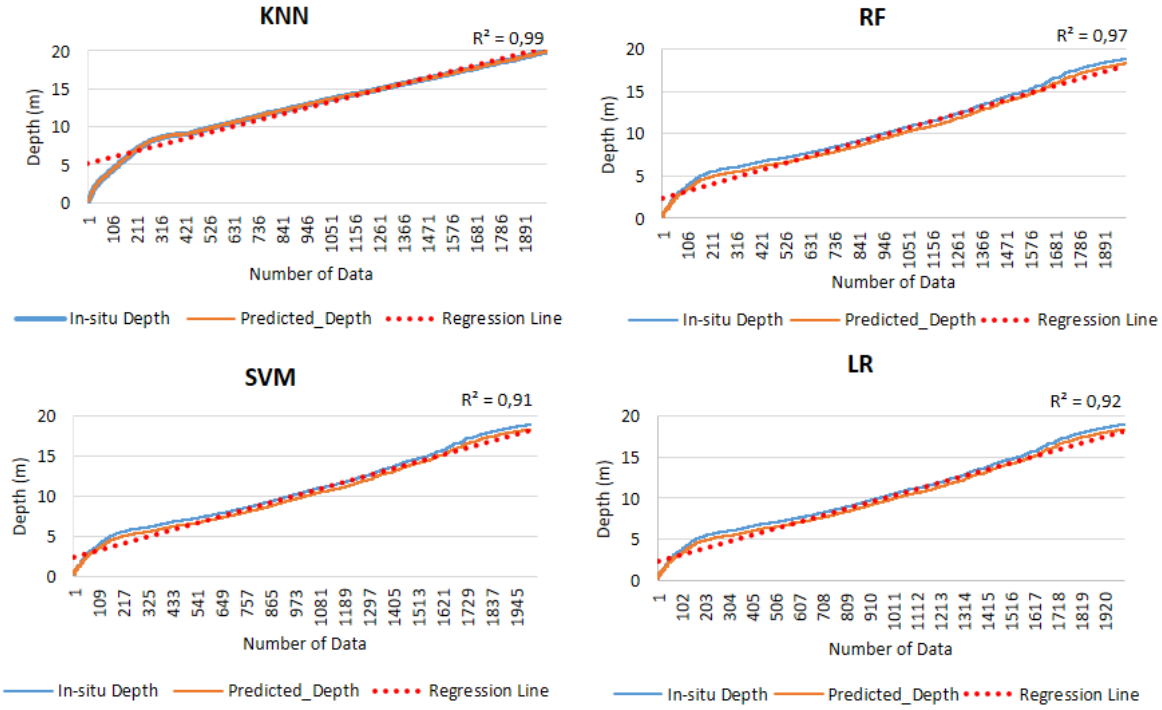
SVM modeli, veri setindeki doğrusal olmayan ilişkileri yakalamak için yeterli esneklik sağlayan radyal baz fonksiyonu (RBF) çekirdeği ve düzenleme parametresi C = 1 değeri ile incelenmiştir. RF algoritması için, bir yaprak düğümündeki minimum örnek sayısı 1, bir düğümü bölmek için gereken minimum örnek sayısı 2 ve ağaç sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, makul bir hesaplama süresi sağlarken modelin genelleme yeteneğini artırmak amacıyla dikkatlice seçilmiştir. LR modeli ise diğer modellerle karşılaştırma yapmak için verilerdeki basit ilişkileri temsil eden referans bir doğrusal model olarak kullanılmıştır.

Çalışma bölgelerinde makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanmasıyla oluşturulan veri kümesinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Tablo 16'da sunulmaktadır.

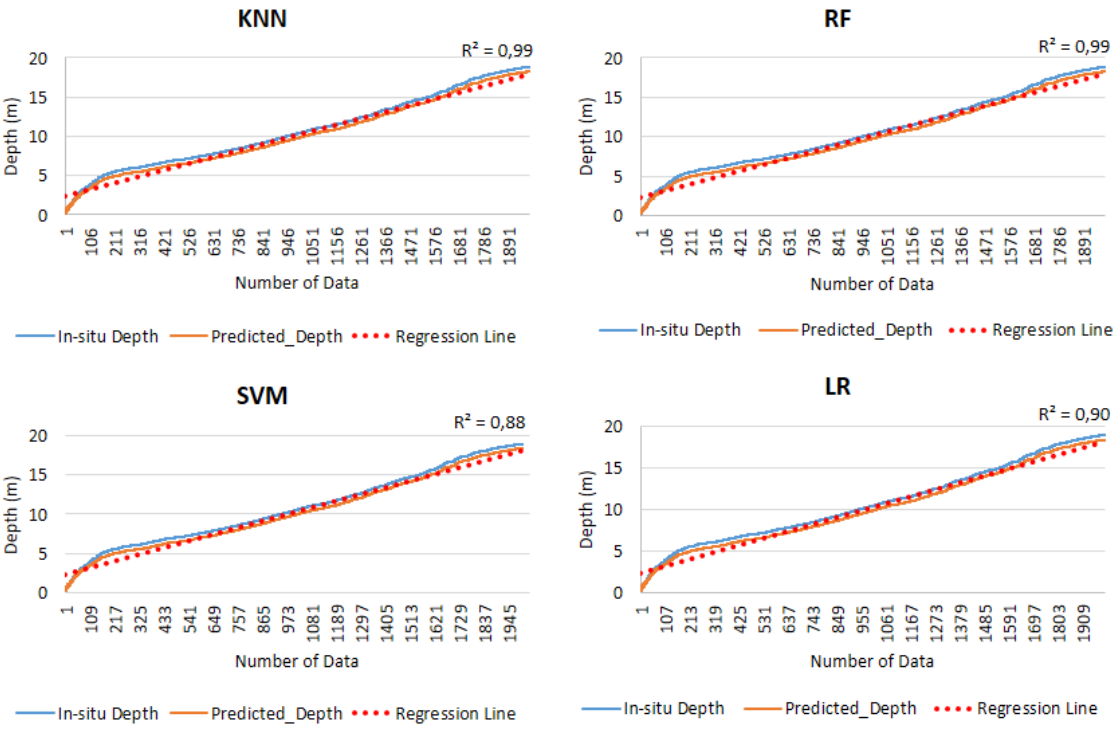
Tablo 16. Makine öğrenme sonuçları

Model	Samsun		İzmir		İskenderun	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
KNN	0.50	0.99	0.44	0.99	0.46	0.96
RF	0.45	0.97	0.44	0.99	0.53	0.95
SVM	0.52	0.91	0.45	0.88	0.42	0.91
LR	0.48	0.92	0.40	0.90	0.38	0.93

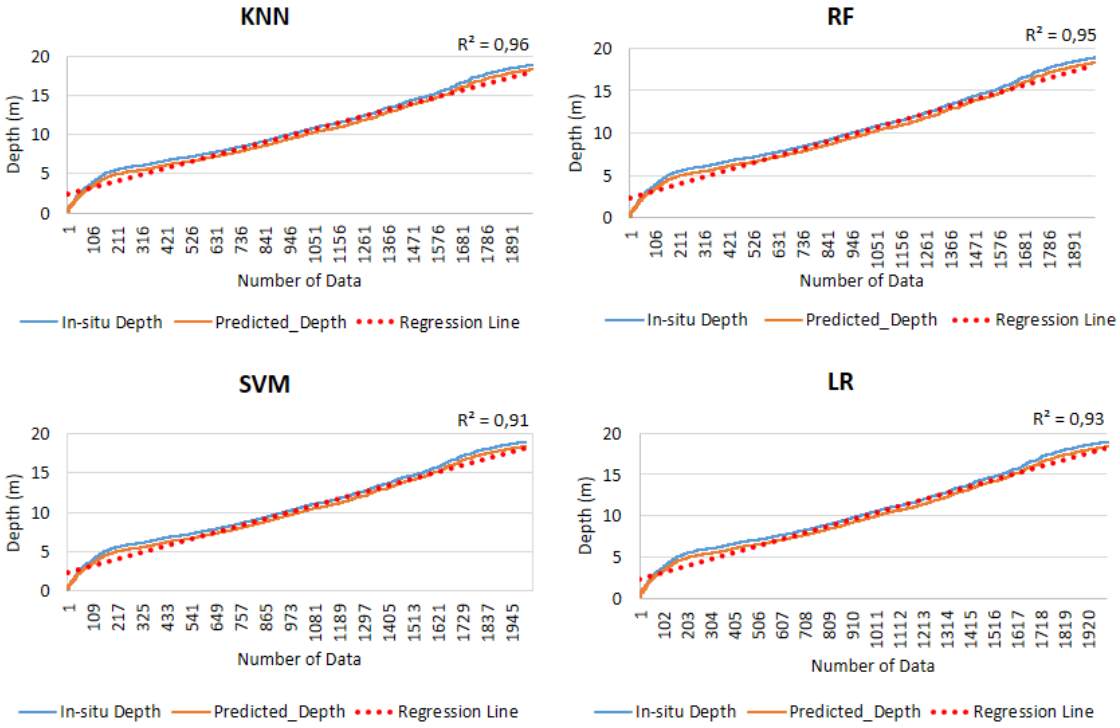
Dört modelin karşılaştırılması sonucunda, en iyi sonuçların KNN ve RF algoritmalarından elde edildiği görülmüştür. KNN, Samsun'da 0,50 m, İzmir'de 0,44 m ve İskenderun'da 0,46 m gibi düşük RMSE değerleriyle dikkat çekerken, tüm bölgelerde 0,96–0,99 aralığında yüksek R^2 değerleri sağlayarak tutarlı bir performans sergilemiştir. RF ise Samsun'da (RMSE: 0,45 m; R^2: 0,97), İzmir'de (RMSE: 0,44 m; R^2: 0,99) ve İskenderun'da (RMSE: 0,53 m; R^2: 0,95) elde edilen sonuçlarla KNN'nin performansına eşdeğer bir performans göstermiştir. Buna karşılık, SVM ve LR modelleri çalışma alanları için daha düşük R^2 değerleri (SVM: 0,88–0,91; LR: 0,90–0,93) ve RMSE değerleri (SVM: 0,42–0,52; LR: 0,38–0,48 m) ile birbirine yakın bir performans sergilemiştir. Elde edilen makine öğrenmesi sonuçlarının, Traganos ve diğerleri (2018) ile Zhou ve diğerleri (2023) tarafından ortaya konulan yaklaşımlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 26. Samsun bölgesi makine öğrenme grafiği



Şekil 27. İzmir Körfezi makine öğrenme grafiği



Şekil 28. İskenderun Körfezi makine öğrenme grafiği

Tablo 16'daki sonuçlara göre, Samsun bölgesi, İzmir Körfezi ve İskenderun Körfezi'ne ait makine öğrenmesi modellerinin, Tablo 8'deki IHO S-44 standardı kapsamında "Derece 1b"ye uygun olduğu tespit edilmiştir.

Makine öğrenmesi modellerinin eğitim bölgesinin dışındaki coğrafi alanlarda nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek amacıyla mekânsal çapraz doğrulama analizi yapılmıştır. Bu bağlamda, çalışma alanı mekânsal olarak eşit büyüklükte (1 km × 1 km) ızgara tabanlı bloklara bölünmüştür. Test ve eğitim blokları arasındaki mekânsal bağımlılığı azaltmak için bir tampon bölge tanımlanmış olup, bu bölgede kalan örnekler eğitim sürecine dâhil edilmemiştir. Mekânsal koordinatlara göre oluşturulan bloklar kullanılarak 5 katlı çapraz doğrulama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her yinelemede dört blok (%80) eğitim seti ve bir blok (%20) test seti olarak ayrılmıştır. Çapraz doğrulama modelinde kullanılan parametreler, modelin mekânsal genelleştirilebilirliğini yansıtan bağımsız ve tarafsız bir değerlendirme sağlamayı amaçlayan ve makine öğrenmesi modellerinde (KNN, RF, SVM ve LR) kullanılan sabit değerlerdir.

Rastgele çapraz doğrulama, modelin tahmin başarısını veri kümesi ve mevcut örnekler temelinde istatistiksel olarak incelerken, mekânsal çapraz doğrulama modelin farklı bölgelerdeki genelleme yeteneğini değerlendirmektedir. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, model performansının daha gerçekçi bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Mekânsal çapraz doğrulama (Spatial CV) Tablo 17'deki sonuçlara göre, Samsun çalışma alanında RMSE değerleri 0,59–0,70 m, R^2 değerleri ise 0,80–0,84 aralığındadır. İzmir Körfezi için RMSE değerleri 0,50–0,61 m, R^2 değerleri ise 0,76–0,84 aralığındadır. İskenderun Körfezi'nde RMSE değerleri 0,49–0,70 m arasında değişirken, R^2 değerleri 0,79–0,81 aralığında kalmaktadır.

Tablo 17. Rastgele ve mekansal çapraz doğrulama yöntemlerinin model performansının karşılaştırılması

Bölge	**Model**	**Rastgele RMSE (m)**	**Spatial RMSE (m)**	**Rastgele R^2**	**Spatial R^2**
Samsun	KNN	0.50	0.70	0.99	0.84
	RF	0.45	0.59	0.97	0.81
	SVM	0.52	0.64	0.91	0.80
	LR	0.48	0.66	0.92	0.82
İzmir	KNN	0.44	0.59	0.99	0.80
	RF	0.44	0.61	0.99	0.84
	SVM	0.45	0.56	0.88	0.76
	LR	0.40	0.50	0.90	0.79
İskenderun	KNN	0.46	0.59	0.96	0.79
	RF	0.53	0.70	0.95	0.81
	SVM	0.42	0.53	0.91	0.80
	LR	0.38	0.49	0.93	0.79

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, mekânsal çapraz doğrulamanın rastgele doğrulamaya kıyasla biraz daha yüksek RMSE ve daha düşük R^2 değerleri verdiği görülmektedir. Bu sonuçlarla uyumlu olarak, mekânsal bağımlılığı dikkate alan yaklaşımın model performansına daha gerçekçi bir değerlendirme sunduğu gösterilmiştir.

3.8. Hidrografik Ölçümlerin Çevresel, Ekonomik ve Politika Değerlendirmesi

3.8.1. Karbon ayak izi

Türkiye'de deniz haritalarının yapımındaki yetkili tek kurum, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığıdır. Hidrografi ve oşinografi araştırma faaliyetlerinde; orta ve derin su ölçüm çalışmalarında TCG Çeşme, orta ve sığ sularda TCG Çubuklu araştırma gemileri (SHOD, 2025c), kıyı kenar çizgisi ile sığ su derinlik çalışmalarında ise düşük draft özellikli katamaranlar ile fiber karinalı tekneler kullanılmaktadır (Lurton, 2010; IHO, 2022).

Hidrografik ve oşinografik faaliyetleri icra eden platformlar, meteorolojik koşullar da göz önünde bulundurulduğunda, genellikle yılın Mart–Ekim periyotları arasında denizde aktif olarak çalışmaktadır. Bu periyotlar dışında kalan aylarda ise arazi araçları, tekne ve katamaranlar kara üzerine alınarak yıllık bakım faaliyetleri icra edildiğinden bu süre zarfında karbon salınımı yapılmamaktadır. Gemiler ise ana görev fonksiyonları kapsamında limanda bulundukları zaman aralığında; mesai, eğitim, nöbet, iaşe ve ibate, iklimlendirme ve soğutma, sahil elektriği kullanımı gibi faaliyetlerin devam etmesi nedeniyle düşük düzeyde karbon salınımına devam etmektedir.

Tablo 18. Hidrografik ölçüm platformlarının teknik özellikleri

Platform	Boy/En	Ana Makine	Yardımcı Makine	Draft
TCG Çeşme	87 m / 14,6 m	2 x Alco 251-V12	3 x Detroit Diesel	4,6 m
TCG Çubuklu	40,47 m / 9,58 m	1 x General Motors 12/278	2 x Volvo Penta	4,2 m
Katamaran x 4	9,2 m / 3,7 m	2 x Honda 80 HP (dıştan takma sabit motor)		30 cm
Fiber Tekne-1	4,1 m / 1,9 m	1 x Yamaha 40 HP (dıştan takma sabit motor)		40 cm
Fiber Tekne-2	5,1 m / 2,2 m	1 x Yamaha 40 HP (dıştan takma sabit motor)		40 cm
Arazi Aracı x 3	Motor Hacmi: 2001-2500 cm^3Motor Gücü: 151-175 hp			

TCG Çeşme, 1965 yılında ABD'de inşa edilmiş ve 1999 yılında Türk Donanması'na katılmış bir okyanus araştırma gemisidir. 2002 yılında ise hidrografik ve oşinografik faaliyetlerin daha etkin bir şekilde icra edilmesi maksadıyla modernizasyon faaliyeti tamamlanmıştır. En ve boy uzunluklarına bağlı olarak araştırma faaliyetlerinde olumsuz hava ve deniz koşullarına karşı ölçüm hassasiyetini etkilemeyecek dayanıklılık ve stabilite özelliklerine sahip olan TCG Çeşme, hidrografik ölçüm faaliyetlerinin yanı sıra; yandan taramalı sonar cihazı ile su altındaki nesnelerin, batıkların ve zemin yapısının tespiti ve

haritalanması, farklı derinliklere bağlı olarak su ve dip numunesi alma, ses hızı ölçümü gibi faaliyetleri de icra etmektedir. Genellikle deniz haritalarında mesaha planlamalarında, deniz altı topografik yapıya uygun olacak şekilde 20 m kontur hattının üzerindeki derinliklerde faaliyetlerini sürdürmektedir.

TCG Çubuklu, 1983 yılında Gölcük Tersanesi'nde inşa edilmiş ve 1986 yılında Türk Donanması'na katılmıştır. Hidrografi faaliyetlerinin yanı sıra yandan taramalı sonar, ses hızı ölçümü ile su ve dip numunesi alma işlemleri için uygun imkânlara sahiptir.

Bu bölümde, deniz haritası yapımında kullanılan platformların hem liman hem de denizde kalma süreleri göz önünde bulundurularak bir yıllık süre içerisinde karbon salınımı tespit edilmiştir. Hidrografik gemiler, müteakip dönemlerde belirli bir periyot dâhilinde planlı bir şekilde rutin bakım, onarım, yenileme veya yeni ekipman montajı gibi nedenlerle geminin güvenliğini, performansını ve operasyonel ömrünü korumak ve artırmak maksadıyla tersaneye girmektedir. Bu kapsamda, TCG Çubuklu gemisinin bir yılı kapsayacak şekilde uzun süreli tersaneye girdiği varsayılmış ve hesaplamaya dâhil edilmemiştir. Her ne kadar geminin sahip olduğu draft değeri kapsamında 20 m altındaki derinliklerde ölçüm yapabilmesine imkân tanınsa da, seyir emniyeti açısından (dümen arızası, ani derinlik değişikliği vb.) genellikle katamaran veya fiber tekneler tercih edilmekte ve bu deniz vasıtalarının intikali karayolu üzerinden arazi araçlarına bağlı römorklar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sığ su ölçüm platformlarında kullanılan deniz araçlarına ait sistem ve ölçüm cihazları için gerekli olan elektrik, ilgili platform üzerinde sabit olarak bulunan jeneratörler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Jeneratörün çalışması için ihtiyaç duyulan yakıt kaynağı benzindir. Gemi, kara aracı ve tekne her ne kadar farklı ortamlar için tasarlanmış olsalar da, hepsi bir yerden başka bir yere hareket etme yeteneğine sahip platformlar olarak sınıflandırılmaktadır. Teknenin çalışması için ihtiyaç duyulan yakıt kaynağı benzin iken, gemi ve arazi aracının yakıt kaynağı ise motorindir.

Bir gemide veya teknede bulunması gereken karbondioksit (CO_2) tüpü sayısı, platformun büyüklüğüne, kullanım amacına ve uluslararası düzenlemelere bağlı olarak değişmektedir. Denizde Can Güvenliği Uluslararası Sözleşmesi (2024) Bölüm II-2'ye göre;

- 8 metre alındaki teknelerde motor veya yakıt tankı varsa 1 adet,
- 8-12 metre arası vasıtalarda 2 adet,

- 20 metre üzeri gemilerde ise risk alanına bağlı olarak CO_2 tüpü sayısının arttırılması yönünde tavsiye vermektedir.

Gemilerde CO_2 söndürücüler genellikle makine dairesi, mutfak veya elektrik ekipmanlarının yoğun olduğu alanlar gibi yüksek riskli bölgelerde bulunur. Ayrıca gemilerden olması gereken sabit CO_2 yangın söndürme sistemi, bu sistemde kullanılan CO_2 tüpü sayısından ayrı hesaplanır. SOLAS'a göre, bu sistemin toplam CO_2 miktarı, korunan hacmin %40-50'sini kapyalacak şekilde tasarlanır ve tüp sayısıda gemi büyüklüğüne bağlı olarak belirlenir. Gemi içerisinde sıcaklık, nem ve hava kalitesini kontrol etmek özellikle uzun seyrüseferlerde ve liman periyotlarında personelinin yaşam alanlarının uygun koşulların sürdürülmesi iklimlendirme sistemi sayesinde yapılmaktadır. İklimlendirmeye bağlı chiller (soğutma) ve klima (ısıtma) sisteminde kullanılan soğutucu akışkan olarak sınıflandırılan R404A gazı kullanılmaktadır.

Tüm platformların karbon ayak izi hesaplamaları tek çatı altında olacak şekilde sabit yanma kaynaklı, hareketli yanma kaynaklı, kaçak emisyonlar Scope 1 (doğrudan) olarak, ithal edilen enerji ise Scope 2 (dolaylı) olmak üzere dört bölümde belirlenmiş ve hidrografik ölçüm çalışmalarında kullanılan deniz ve kara araçlarının yıllık düzeyde toplam karbon sayısı hesaplanmıştır. Hidrografik ölçümlerde kullanılan platformlar ait emisyon çıktıları Tablo 19'de sunulmuştur.

Tablo 19. Hidrografik ölçümde kullanılan platformlarının emisyon çıktıları

Sabit Yanma Kaynaklı Emisyonlar		
Emisyon Kaynak Adı	**Yakıt Türü**	**Uygulama Platformu**
Jeneratör	Benzin	Katamaran / Fiber Tekne
Hareketli Yanma Kaynaklı Emisyonlar		
Emisyon Kaynak Adı	**Yakıt Türü**	**Uygulama Platformu**
Ana ve Yardımcı Makine	Motorin	Gemi
Dıştan Takma Motor	Benzin	Katamaran / Fiber Tekne
Taşıt (Kara Vasıtası)	Motorin	Arazi Aracı
Kaçak Emisyonlar		
Emisyon Kaynak Adı	**Kullanılan Madde**	**Uygulama Platformu**
Yangın Tüpleri (Sabit ve Seyyar)	CO_2	Gemi/Katamaran/Fiber Tekne
Chiller ve Klima	R404A	Gemi
İthal Edilen Enerji		
Emisyon Kaynak Adı	**Kullanılan Madde**	**Uygulama Platformu**
Trafo	Elektrik	Sahilden Gemiye

Sabit yanma, hareketli yanma ve kaçak emisyon bazında kilogram türünde karbon salınım katsayıları, İngiltere Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2024)'nın "GHG Conversion Factors for Company Reporting–2024" dokümanının Ek-4'ü; geminin ana liman periyodunda sahilden aldığı elektriğin kWh bazında emisyon katsayısı ise T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın "Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu–2024" dokümanının Ek-5'i baz alınarak belirlenmiştir.

Bu kapsamda, yakıt türü ve kullanılan maddelere göre emisyon faktör değerleri Tablo 20'de gösterilmiştir.

Tablo 20. Emisyon faktör değerleri

Emisyon Çıktısı	**Birim**	**Emisyon Değeri**
Benzin	L	2,35372
Motorin	L	2,66155
CO_2	kg	1
R404A	kg	3 943
Trafo	tCO_2/MWh	0,442

Hesaplamalar, yazarın mesleki ve hidrografi tecrübesine istinaden; her bir fiber tekne ve katamaranın bir yılda ortalama 120 gün, geminin ise ortalama 150 gün olmak üzere toplamda 870 gün hidrografik faaliyet icra ettiği varsayımıyla hazırlanmıştır. Tüm platformlar üzerindeki sabit ve seyyar yangın tüplerinin boş darası hariç toplam CO_2 miktarı yaklaşık 1.030 kg (80 adet) olarak belirlenmiştir. İki adet fiber teknenin harcadığı toplam benzin miktarı ~9.600 litre, dört adet katamaran tipi teknenin harcadığı toplam benzin miktarı ~38.400 litre, teknelerde kullanılan jeneratörlerin harcadığı toplam benzin miktarı ~5.760 litre olarak hesaplanmıştır. Geminin liman ve seyir periyodu boyunca harcadığı ortalama motorin miktarı ~1.050 ton (1.235.000 L) olarak tespit edilmiştir. Üç adet arazi aracı için harcanan motorin miktarı ~7.050 litre olarak belirlenmiştir. Geminin iklimlendirme sistemi kapsamında chiller ve klima sistemleri için gerekli olan toplam R404A gazı miktarı ~80 kg olup, geminin liman periyodu boyunca (Kasım–Şubat) sahil trafosundan aldığı elektrik miktarı ise ~230,4 MWh olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Tablo 21. Hidrografik faaliyetlerde harcanan yıllık akaryakıt ve gaz miktarı

Tür	Fiber Tekne x 2	Katamaran x 4	Jeneratör x 6	Gemi	Toplam
Benzin	9 600 L	38 400 L	5 760 L	-	53 760 L
Motorin	-	-	-	1 050 t	1 050 t
CO_2 Tüpü	2 adet	8 adet	-	70 adet	80 adet
R404A	-	-	-	80 kg	80 kg
Trafo	-	-	-	230,4 MWh	230,4 MWh

Katamaran ve fiber tipi tekneler günde ~8 saat çalışmaktadır. Bu çalışma süresince katamaran tipi teknenin bir saatlik yakıt sarfiyatı ortalama 10 litre, fiber tipi teknenin ise yakıt sarfiyatı ortalama 5 litredir. Her iki tekne türünde ise sistem ve cihazların elektriksel beslemesi için gerekli jeneratörün saatlik ortalama yakıt sarfiyatı 1 litre, geminin seyir periyodunda ise günlük yakıt tüketimi ~7 ton (8 230 litre) olarak belirlenmiştir.

Geminin liman periyodu içerisinde personel iş gücü, jeneratörlerin bakım maliyetinin düşürülmesi, sistem ve cihazların materyal ömrünün uzatılması, yakıt tasarrufu gibi nedenlerle sahil elektriğine ihtiyaç duymaktadır. Geminin sahil trafosundan aldığı ortalama güç 80 kW'dir.

Hidrografik ölçümde kullanılan platformların emisyon hesaplamaları Denklem (2.29)'a göre hesaplanan sonuçları Tablo 22'de gösterilmiştir.

Tablo 22. Hidrografik ölçümde kullanılan platformlarının emisyon hesaplamaları

Emisyon Adı	Aktivite Verisi x Emisyon Faktörü	Karbon Ayak İzi (kgCO2e)
Jeneratör	5 760 L x 2,35372	13 557,4272
Dıştan Takma Motor	48 000 L x 2,35372	112 978,56
Ana ve Yardımcı Makine	1 235 000 L (1 050 t) x 2,66155	3 287 014,25
Arazi Aracı	7 050 L x 2,66155	18 763,9275
Yangın Tüpleri	1 030 kg x 1	1 030
Chiller ve Klima	80 kg x 3 943	315 440
Trafo	230,4 MWh x 0,442	101836,8
TOPLAM		3 850 620,96
		~3 850 ($tonCO_2e$)

Bir yıllık hidrografik iş planına istinaden, karbon salınımına etki eden yüzer platformlar, arazi araçları, jeneratörler, yangın tüpleri ve iklimlendirme sistemlerinin emisyon çıktılarının toplamı yaklaşık 3 850 ton CO_2e olarak hesaplanmıştır.

Sığ su batimetri çalışmalarında kullanılan yüzer ve kara platformları ile bunlara ait ekipmanların (dıştan takma motorlu tekneler, arazi araçları, jeneratörler ve seyyar yangın tüpleri), derin su batimetri çalışmalarında kullanılan gemi sistemlerine kıyasla daha fazla karbon salınımına neden olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen yaklaşık 3 850 ton CO_2e karbon salınımı, farklı sektörlerdeki yıllık karbon ayak izi değerleri ile kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

Karayolu Taşımacılığı (Kamyonlar): Orta büyüklükte bir dizel kamyon, km başına ~0,9-1,2 kg CO_2 salınımı yapmaktadır. ~567 ton CO_2 salınımı yapabilmesi için tek bir kamyonun yılda ~466 000 ila 622 000 km yol kat etmesi gerekmektedir. Bu, 40-47 adet kamyonun bir yılda orta mesafeli lojistik operasyonlarında (şehirler arası ürün taşımacılığı vb.) çalışmasına eşdeğer olabilir (European Environment Agency, 2024).

Küçük Ölçekli Üretim Tesisi: Bir tekstil atölyesi, elektrik üretimi ve ısıtma gibi süreçler nedeniyle yıllık ~500 ila 600 ton CO_2 salabilmektedir (Hasanbeigi ve Price, 2015). Bu kapsamda ortalama 7 tesisin yıllık değerine eşdeğerdir.

Havacılık (Kısa Mesafeli Uçuşlar): Boeing 737 gibi orta boy bir yolcu ucağı saat başına ~10 ila 12 ton CO_2 salmaktadır. Hidrografik ölçüm platformların yıllık olarak salmış oldukları CO_2 miktarı göz önüne alındığında Boeing uçakları için ~312-380 saatlik uçuş süresine denk gelmektedir. Bu, bir bölgesel havayolu şirketinin yaklaşık 156-190 adet kısa mesafeli uçuşu (1 ila 2 saatlik iç hat uçuşları) ile eş değer olabilir (International Civil Aviation Organization, 2024).

Tarım (Traktör ve Makine Kullanımı): 100 hektarlık bir tarım arazisinde kulanılan dizel traktörler ve sulama sistemleri vb., yıllık 500-600 ton CO_2 salınımına yol açabileceği ön görülmektedir. Bu da, 700 hektarlık bir arazide yoğun tarım yapan bir çiflik, bu miktarda emisyona ulaşabileceği varsayılmaktadır (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2022).

İnşaat Sektörü (Küçük Proje): Bir apartman binası yapımı için beton üretimi, iş makineleri ve nakliye araçlarının faaliyetleri nedeniyle ~500 ila 700 ton CO_2 salabilir (Miller ve diğerleri, 2018). Bu da ~6-7 adet apartman binasına eşdeğerdir.

United States Environmental Protection Agency-EPA (2024) “Sera Gazı Eş Değer Hesaplama” verilerine göre ~3 850 tonCO_2e;

Bir yıl boyunca kullanılan 815 adet benzinle, 3 085 adet elektrikle çalışan binek aracının yaymış olduğu sera gazına,

Tüketilen ~393 008 L benzin ile ~343 090 L dizel akaryakıta, yakılan 1 759 802 kg kömüre, 728 adet evin bir yıllık elektrik kullanımına, 8 086 adet petrol variline, 160 450 adet ev tipi mutfak tüpüne, 282 370 380 şarj edilen akıllı telefon sayısı CO_2 emisyon değerine eş değerdir.

3.8.2. Maliyet analizi

Bu bölümde batimetri ölçümlerine katkı sağlayan tüm platformların “Fiyat x Gün” bazında yazarın mesleki tecrübesi istinaden ölçüm platformlarının bir günlük kiralama bedelleri dikkate alınarak 2025 yılına ait piyasa araştırmaları doğrultusunda ortalama bir maliyet analizinin hesaplanmıştır. Bahse konu hesaplamalarda, sığ su batimetri ölçümleri için 15 gün, derin su batimetri ölçümleri için ise 30 gün esas alınmış ve bu kapsamda Tablo 23’te fiyat tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 23. Hidrografik sistem ve cihazların gün bazında birim fiyatı

PLATFORM	**BİRİM**	**SIĞ SU**	**DERİN SU**
Gemi	95 000 TL / Gün	-	2 850 000 TL
Katamaran / Fiber Tekne	1 450 TL / Gün	21 750 TL	-
Kara (Arazi) Aracı	1 450 TL / Gün	21 750 TL	-
DERİNLİK ÖLÇÜM CİHAZLARI	**BİRİM**	**SIĞ SU**	**DERİN SU**
Çok Işınlı İskandil Ölçüm Sistemi	7 300 TL / Gün	110 000 TL	220 000 TL
Tek Işınlı İskandil Ölçüm Sistemi	2 200 TL / Gün	33 000 TL	66 000 TL
Yandan Taramalı Sonar (Sığ Su)	5 800 TL / Gün	87 000 TL	-
Yandan Taramalı Sonar (Derin Su)	14 600 TL / Gün	-	438 000 TL
Ses Hızı Ölçüm Sistemi	2 950 TL / Gün	44 250 TL	88 500 TL
KONUMLANDIRMA	**BİRİM**	**SIĞ SU**	**DERİN SU**
GPS	1 900 TL / Gün	28 500 TL	57 000 TL
DİĞER	**BİRİM**	**SIĞ SU**	**DERİN SU**
Personel	800 TL / Gün	12 000 TL	24 000 TL
Veri Analizi	2 150 TL / Gün	32 250 TL	64 500 TL

Sığ su batimetri ölçümlerine biri kara aracı sorumlusu, üçü tekne-ölçüm, biri araç sorumlusu olmak üzere toplamda 4 personel katılım sağlamaktadır. 15 günlük ölçüm periyodu göz önüne alındığında personel 48 000 TL, kara aracı 21 750 TL, deniz aracı 21 750 TL, çok ışınlı iskandil 110 000 TL, ses hızı ölçümü 44 250 TL, GPS kiralama 28 500 TL ve görev sonrası ölçülen verilerin analizinin yapılması 32 250 TL, toplamda 306 500 TL bir maliyete tekabül etmektedir.

Derin su batimetri ölçümlerinde ise gemiye ait sabit iskandilin, GPS ve ses hızı cihazlarının bulunması ve 30 günlük batimetri araştırmasının gemi personel tarafından yürütülmesi nedeniyle hesaplamaya yalnızca gemi kiralama ve veri analizi kalemleri dahil edilmiştir. Bu kapsamda gemi 2 850 000 TL, veri analiz 64 500 TL toplamda 2 914 500 TL bir maliyete tekabül etmektedir.

Sığ ve derin su ölçümlerinde kullanılan yakıt ücreti, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine istinaden, Türkiye üzerinde faaliyet gösteren en yüksek işlem hacimli 8 akaryakıt firmasının Aralık 2025 yılı fiyatlarının ortalaması Ek-6 baz alınarak belirlenmiştir. Bir adet arazi aracı için günlük yakıt tüketimi, üç adet arazi aracının yıllık toplam tüketim üzerinden aritmetik olarak hesaplanmıştır.

Tablo 24. Platformların bir günlük akaryakıt maliyeti

Platform	**Günlük Ort.Yakıt Tüketimi**	**1 L Akaryakıt Bedeli**	**Toplam**
Gemi	8 230 L (Motorin)	53,17 TL	437 589 TL
Katamaran	80 L (Benzin) + 8 L (Jeneratör)	51,73 TL	4 552,24 TL
Fiber Tekne	40 L (Benzin) + 8 L (Jeneratör)	51,73 TL	2 483,04 TL
Arazi Aracı	20 L (Motorin)	53,17 TL	1 063,4 TL

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde 15 günlük sığ su batimetri çalışmasında tekne kullanımına göre maliyetin ~246 697 TL ila ~354 734 TL aralığında, 30 günlük derin su batimetri çalışmasında ise toplam maliyetin ~15 977 670 TL olduğu tespit edilmiştir.

3.8.3. Uluslararası hidrografik araştırma platformlarının karşılaştırmalı karbon emisyonları

Çalışmada; **S**eyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi'nin hidrografik ölçüm platformlarının yanı sıra, diğer kurum ve kuruluşlara ait hidrografik platformlarının karbon ayak izi de incelenmiştir. Antarktika'da faaliyet gösteren bir bilimsel araştırma gemisi olan

R/V S.A. Agulhas II'nin, farklı motor yükleri altında özgül yakıt tüketim oranlarına dayanarak, 60 günlük bir görev için yaklaşık 2 142 ton CO_2 salınımı tahmin etmiştir (Özcan ve diğerleri, 2022). Ayrıca, çeşitlendirilmiş bir hidrografik platform filosu işleten Finlandiyalı bir denizcilik şirketi olan Arctia, 2024 yılında tüm filosu için toplam 59 001 ton CO_2 emisyonunun yaklaşık 5 787 tonunu hidrografik ölçümlerde kullanılan platformlardan kaynaklandığını bildirmiştir (Arctia, 2024). Bu dış örnekler, modern teknoloji ve sürdürülebilirlik politikalarına rağmen hidrografik operasyonların karbon emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Söz konusu verilerin çalışmaya dahil edilmesi, emisyon ölçütlerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamakta ve bu çalışmanın bulgularının genelleştirilebilirliğini desteklemektedir. Platformların özellikleri Tablo 25'te sunulmaktadır.

Tablo 25. Örnek hidrografik ölçüm platformlarının teknik özellikleri

Platform	Boy/En	Ana Makine	Yardımcı Makine	Draft
R/V S.A. Agulhas II	134 m / 22,0 m	Wartsila 6L20	General Electric	4,3 m
R/V Pohjanmeri	78,3 m / 11,56 m	2 x Wartsila 16V22B	4 x Cummins	3,2 m
R/V Kaiku	22,5 m / 1,3 m	2 x Scania DSI	2 x Westerbeke	1,3 m
Keila	13 m / 3,9 m	2 x Scania DSI	2 x Westerbeke	0,9 m
Survey Boat M620	14,12 m / 4,5 m	Scania DSI	Fore Propeller	1,9 m
Survey Boat M640	14,12 m / 4,5 m	Scania DSI	Fore Propeller	1,8 m
Surbey Boat Keila 1	6,35 m / 2,4 m	Mercury	-	0,5 m
Nordenskiöld	7,15 m / 2,48 m	Mercury	-	0,5 m

3.8.4. Karbon emisyon tahminlerinin hassasiyet analizi

Bu çalışmada sunulan karbon emisyon tahminlerinin sağlamlığını değerlendirmek için, hidrografik faaliyetlerin süresi, motor yükü ve ortalama günlük yakıt tüketimi gibi temel operasyonel parametrelerde ± %10'luk bir değişime dayalı bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, değişken deniz koşulları, personel programları ve ekipman performansı nedeniyle doğal olarak operasyonel belirsizlikler içermektedir.

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi hidrografik filosunun temel toplam yıllık karbon emisyonu 3 850 ton CO_2e olarak hesaplanmıştır. Ana etki eden değişkenlere ± %10'luk bir değişim uygulandığında, yaklaşık 3 465 ton (- %10) ile 4 235 ton (+ %10)

arasında bir emisyon aralığı elde edilmektedir. Bu da tahmini değer etrafında ± 385 tonluk bir sapmaya işaret etmektedir.

Bu aralık gerçekçi bir belirsizlik marjını temsil etmekte ve girdi varsayımlarındaki orta düzeydeki dalgalanmalar altında sonuçların istikrarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, diğer çalışmalar ve filolarla karşılaştırıldığında, tahminler makul bir yelpazede yer almaktadır. Örneğin; Özcan ve diğerleri (2022), Antarktika'da R/V S.A. Agulhas II'yi kullanarak 60 günlük bir bilimsel keşif gezisinden 2 142 ton CO_2e emisyonu bildirirken, Finlandiyalı denizcilik şirketi Arctia, 2024 yıllık raporunda hidrografik platformlarından 5 787 ton CO_2e emisyon yaydığını açıklamıştır (Arctia, 2024). Bu dış karşılaştırmalar, bu çalışmada uygulanan metodolojinin geçerliliğini desteklemekte ve Uydudan Türetilen Batimetri (SDB) gibi alternatif, düşük emisyonlu tekniklere olan ihtiyacı pekiştirmektedir.

3.8.5. Politika hedefleriyle uyum

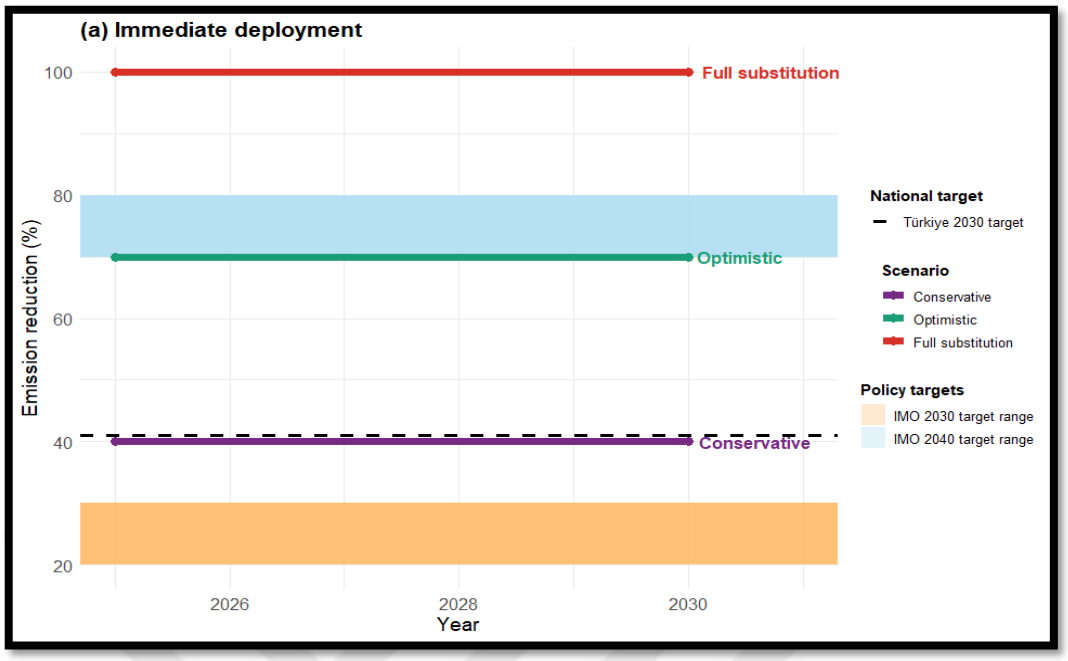
Denizcilik sektörü, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında giderek daha sıkı düzenlemelere karşı karşıya kalmaktadır. Paris Anlaşması'nın 1,5°C hedefi doğrultusunda, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) 2023 yılında Sera Gazı Stratejisi'ni güncellemiş ve yaklaşık 2050 yılına kadar net sıfır emisyona ulaşmayı, 2030 yılına kadar en az %20 (ek önlemler alınırsa %30) ve 2040 yılına kadar en az %70 (veya %80) azaltım sağlamayı hedeflemiştir (International Maritime Organization, 2023). Avrupa Birliği de "Fit fot 55" paketi kapsamında denizcilik sektörünü Emisyon Ticaret Sistemi'ne dahil etmiş (European Commission, 2024) ve FuelEU Maritime Yönetmeliği aracılığla yakıt karbon yoğunluğunda 2025'te %2, 2030'da %6, 2040'ta %31 ve 2050'de %80 oranında azaltım hedefleri belirlenmiştir (European Commission, 2023).

Türkiye ise 2021 yılında Paris Anlaşması'nı onaylamış, 2053 yılı için net sıfır hedefini açıklamış ve 2025 tarihli 7552 sayılı İklim Kanunu ile ulusal bir Emisyon Ticaret Sistemi'nin (ETS) yasal altyapısını oluşturmuştur (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025; Resmi Gazete, 2025). Türkiye, 2038 yılını emisyonların tepe yılı olarak öngörmekte ve 2030 yılına kadar %41 oranında azaltım taahhüdünde bulunmaktadır. Bu politika çerçevesinde, uydu tabanlı batimetri gibi hidrografik ölçüm operasyonlarının karbon yoğunluğunun azaltan yöntemlerin tercih edilmesi artık teknik bir seçenek değil, ulusal ve uluslararası yükümlülüklere uyumlu bir zorunluluk haline gelmiştir.

Saha ölçümlerine dayanarak, SDB yöntemi İzmir Körfezi'nde düşük RMSE değerleri üretmiş ve doğruluk açısından IHO S-44 standartlarına yaklaşmıştır. Samsun Körfezi'nde yüksek bulanıklık ve değişkenlik nedeniyle yalnızca %25-40 oranında ikame mümkün olurken, İskenderun Körfezi'nde %25-60 arasında değişen ikame oranları orta düzeyde başarı göstermiştir. Bu yaklaşım, teorik varsayımlardan ziyade doğrudan saha verilerine dayalı hibrit senaryoların oluşturulmasını sağlamıştır. Bulgular, bu gerçekçi senaryolarda toplam emisyonların %40-70 oranında azaltılabildiğini ve bunun IMO (2023), Avrupa Birliği ETS (European Commission, 2024), FuelEU Maritime (European Commission, 2023) ve Türkiye'nin 2053 hedefi (UNFCCC, 2023) ile uyumlu bir seviyeye ulaştığını göstermektedir. Ayrıca hibrit modelin uygulanması, Mavi Ekonomi perspektifinden daha az gemi operasyon günü, yakıt tüketiminin azaltımının yanı sıra limanlarda ve kıyı şehirlerinde hava kirliliğini, gürültü emisyonlarını ve ekosistem üzerindeki baskıyı da düşürerek çok yönlü faydalar sunmaktadır. SDB ile haritalama döngülerinin hızlanması, deniz güvenliği, balıkçılık ve turizm gibi sektörlerde risk yönetimini güçlendirmekte ve ekonomik verimliliği artırmaktadır (European Commission/ Joint Research Centre – JRC, 2024).

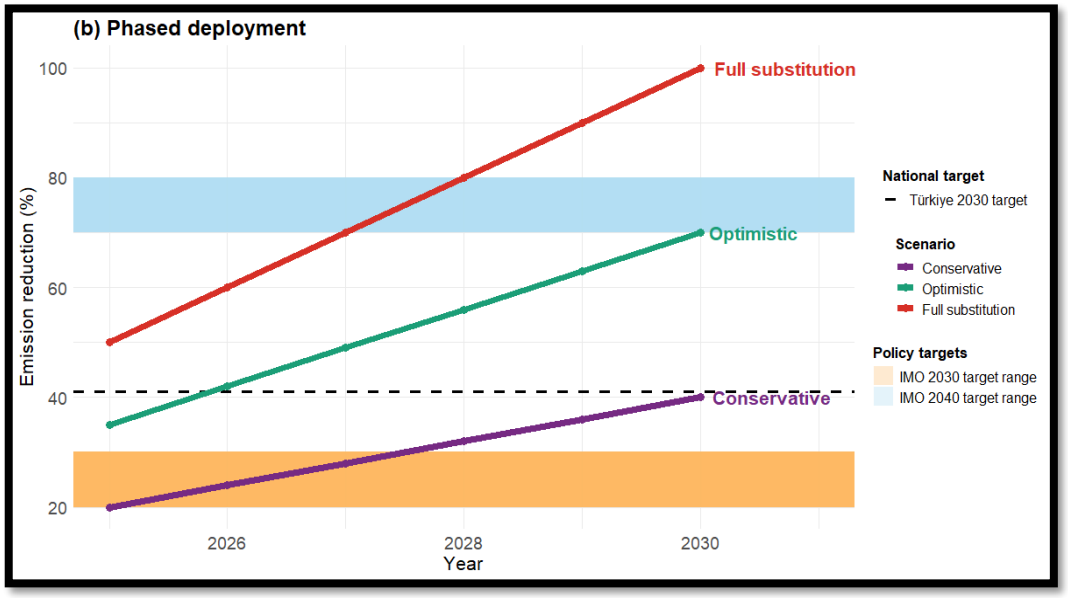
SDB yönteminin politika hedefleriyle uyumunu daha somut biçimde değerlendirmek için "Hemen Uygulama Senaryosu" ve "Kademeli Uygulama Senaryosu" olmak üzere iki uygulama senaryosu geliştirilmiştir. Hemen uygulama senaryosu, SDB'nin geniş ölçekte ve gecikmeden devreye alınmasını varsayarken; kademeli uygulama senaryosu, teknolojik, idari ve operasyonel uyum süreçlerini yansıtan, 2030 yılına kadar aşamalı bir geçiş öngörmektedir. Bu ikili yaklaşım, yalnızca teorik en iyi durumu değil, aynı zamanda daha gerçekçi bir geçiş yolunu da ortaya koymakta ve her iki durumu uluslararası iklim hedefleriyle karşılaştırmaktadır.

Şekil 29 ve 30, bu senaryolar altında uluslararası politika hedeflerine göre SDB ikamesinin emisyon azaltım potansiyelini göstermektedir. Hemen uygulama senaryosunda (Şekil 28), iyimser ikame oranı (%70), IMO'nun 2040 yılı için belirlediği alt sınır hedefini (%70) zaten karşılamakta, tam ikame (%100) ise tüm ulusal ve uluslararası hedefleri aşmaktadır. Muhafazakâr senaryo (%40) Türkiye'nin 2030 yılı azaltım hedefi %41'in biraz altında kalsa da, IMO'nun 2030 hedef aralığı (%20-30) üzerinde kalmaktadır.



Şekil 29. Emisyon azaltma eğrileri hemen uygulama senaryosu

Kademeli uygulama senaryosunda (Şekil 29), azaltımlar başlangıçta daha düşük seviyelerde olmakla birlikte, 2030 yılına kadar iyimser senaryoda %70'e, tam ikamede %100'e ulaşmaktadır. Bu eğilimler altında, SDB ikame senaryoları yalnızca Türkiye'nin 2030 hedefi ile IMO'nun 2030 aralığını aşmakla kalmayıp, IMO'nun 2040 hedefini de yaklaşık on yıl öncesinden gerçekleştirmektedir.



Şekil 30. Emisyon azaltma eğrileri kademeli uygulama senaryosu

Bu bulgular, saha verilerine dayalı gerçekçi SDB ikamesinin yalnızca operasyonel optimizasyon önlemleriyle elde edilebilecek sonuçların çok ötesinde emisyon azaltımı sağladığını ve hidrografiyi küresel iklim azaltım yolları ile doğrudan uyumlu stratejik bir araç haline getirdiğini göstermektedir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma, Türkiye kıyı şeritleri boyunca farklı enlemlerdeki sığ su ortamlarında Uydu Tabanlı Batimetri (SDB)'nin doğruluğunu, uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sentinel-2 multispektral görüntüleri, istatistiksel modeller ve makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu yoluyla araştırma, SDB'nin IHO S-44 gibi geleneksel hidrografik standartlarla uyumlu ve güvenilir derinlik bilgisi üretme kabiliyetini göstermiştir. Temsili üç çalışma alanı olan Samsun (Karadeniz), İzmir Körfezi (Ege Denizi) ve İskenderun Körfezi (Akdeniz)'nden elde edilen sonuçlar, hem bölgesel benzerlikleri hem de farklılıkları ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuştur.

Yerinde ölçümler ve SDB türevli derinlikler arasındaki karşılaştırmalı değerlendirme, uydu görüntülerinin özellikle optik olarak berrak sularda, batimetrik desenleri dikkate değer bir hassasiyetle yeniden üretebileceğini göstermektedir. Uygulanan algoritmalar arasında, K-En Yakın Komşular (KNN) ve Rastgele Orman (RF) modellerinin üç sahada da tutarlı bir şekilde en yüksek belirleme katsayılarını (R^2) ve en düşük RMSE değerlerini elde ederek Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Doğrusal Regresyon (LR) gibi diğer modelleri geride bırakmıştır. Bu bulgular, yöntemlerinin spektral yansıma ve su altı topoğrafyası arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri etkili bir şekilde modelleyebildiğini öne süren diğer bilimsel araştırmalarla örtüşmektedir.

Ancak, tüm modellerin tahmin gücünün, özellikle mavi-yeşil spektrumdaki sinyal zayıflamasının belirgin haline geldiği 20-25 metrenin ötesinde artan derinlikle birlikte azalma eğiliminde olduğunu belirtmek önemlidir. Bu sınırlama, SDB'nin özellikle geleneksel akustik sistemlerin maliyetli ve lojistik açıdan zorlu olduğu sığ kıyı sularında hidrografik araştırmalar için tamamlayıcı bir yöntem olarak rolünü pekiştirmektedir.

Üç araştırma sahası arasındaki farklılıklar, SDB'nin bölgesel optik özelliklere ve su berraklığına olan duyarlılığını göstermiştir. Karadeniz, daha yüksek bulanıklık ve askıda tortu

konsantrasyonları nedeniyle daha düşük model doğruluğu sergilerken, Ege ve Akdeniz sahalarında daha iyi batimetrik geri kazanımlara olanak tanıyan spektral imzalar elde edilmiştir. Güneş parıltısı gibi mevsimsel ve meteorolojik faktörler, atmosferik düzeltmeler ve filtreleme prosedürleriyle etkili bir şekilde azaltılmıştır. Bununla birlikte, deniz tabanı bileşimi (kum, silt veya bitki örtüsü) gibi yerel faktörler yansımayı etkilemeye devam etmiştir. Bulgular, değişen kıyı koşullarında SDB'nin sağlamlığını artırmak için optik su tipi sınıflandırılması ve uygun algoritmaların entegre edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

SDB çıktılarının IHO S-44 ve B-13 kılavuzlarıyla karşılaştırılması, 0-20 m derinlik aralığında, konumsal ve düşey doğruluğunun seyir güvenliği açısından "1b Derece" hidrografi standardını karşıladığını doğrulamıştır. Yöntem, daha derin veya oldukça dinamik ortamlarda yüksek hassasiyetli deniz haritalarının oluşturulması için henüz uygun olmasa da, değerli bir keşif ve ön etüt aracı olarak öne çıkmaktadır. Bu araştırmanın sonuçları, ulusal hidrografi ofisleri ve kıyı yönetim kurumlarının iş akışlarında uydu tabanlı metodolojilerin giderek daha fazla benimsenmesini desteklemektedir.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve En İyi-En Kötü Yöntemi'nin (BWM) uygulanması, model doğruluğunu etkileyen optimum parametre kombinasyonlarını belirlemek için nesnel bir çerçeve sağlamıştır. Bu analizler, güneşin yerden yüksekliği (zenith), güneş ışığının açısal uzaklığı (azimuth), su şeffaflığı, dip albedo ve atmosferik düzeltme parametrelerinin en belirleyici faktörler arasında olduğunu ortaya koymuştur. AHP/BWM'nin makine öğrenmesiyle metodolojik entegrasyonu, daha sistematik bir model seçme sürecini mümkün kılarak öznelliği en aza indirmiş ve gelecekteki uygulamalar için tekrarlanabilirliği artırmıştır.

Bu araştırmanın en önemli katkılarından biri, SDB'nin geleneksel hidrografik yöntemlere kıyasla çevresel ve ekonomik avantajlarını nicel olarak ortaya koymasıdır. **S**eyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi'nin hidrografik ölçüm platformlarının yıllık karbon ayak izi yaklaşık 3 850 tCO_2e olarak tahmin edilmiştir. Buna karşılık, uzaktan algılama ve hesaplamalı işleme yoluyla gerçekleştirilen SDB operasyonlarının, gemi yakıt tüketimi veya yoğun insan gücü kullanımı gerektirmeden emisyonları %95'ten fazla azalttığı görülmüştür. Maliyet analizi de çevresel değerlendirmeyi destekleyerek lojistik, personel ve bakım giderlerinde önemli azalmalar olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla SDB, yalnızca teknik olarak uygulanabilir bir alternatif olarak değil, aynı zamanda Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon

hedefleri doğrultusunda sürdürülebilir hidrografinin temel taşı olarak da kendini göstermektedir.

Sonuçlar ümit verici olsa da, bazı sınırlamaların da kabul edilmesi gerekmektedir. SDB doğruluğunun optik olarak su kalitesine bağımlılığı kritik bir kısıtlama olmaya devam etmektedir. Atmosferik düzeltme belirsizlikleri, değişken deniz tabanı yansıması ve zamansal olarak uyumlu saha verilerinin eksikliği sistematik hatalara yol açabilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu zorlukların üstesinden gelmek için daha yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerini (örneğin; WorldView, PlanetScope, Göktürk) ve hiperspektral sensörleri içermelidir. Ayrıca, SDB'nin LİDAR veya drone tabanlı fotogrametri ile birleştirilmesi, dikey doğruluğu ve zamansal izleme yeteneklerini artırabilir. Derin öğrenme mimarilerinin kullanımı, doğrusal olmayan mekansal-spektral ilişkileri etkili bir şekilde yakalayarak derinlik tahminini daha da iyileştirebilir.

Bu tez, makine öğrenimi ve çok kriterli karar analizi ile desteklenen Uydu Tabanlı Batimetrinin, Türkiye'nin farklı enlem bölgelerinde sığ su haritalaması için pratik, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Yöntem, uluslararası karbon azaltım gündemiyle uyumlu olup, kıyı bölgesi yönetimi, deniz mekansal planlaması ve çevresel izleme süreçlerine entegrasyonu için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Sonuç olarak, elde edilen veriler güvenli seyir ve kıyı sürdürülebilirliği için gerekli doğruluk standartlarını korurken, hidrografik bilimin düşük karbonlu bir geleceğe doğru ilerlemesine katkıda sağladığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Alevizos, E. (2020). A combined machine learning and residual analysis approach for improved retrieval of shallow bathymetry from hyperspectral imagery and sparse ground truth data. Remote Sensing, 12, 3489.

Arctia. (2024).Sustainability-Annual Report 2024. Arctia LTD: Helsinki, Finland.

Ashphaq, M., Srivastava, P.K., Mitra, D. (2021). Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. Journal of Ocean Engineering and Science, 6(4), 340-359. doi:10.1016/j.joes.2021.02.006

Ashphaq, M., Srivastava, P.K., Mitra, D. (2025). Optimizing satellite-derived bathymetry in coastal turbid waters through integration with optically active substances: Insights from the SATCORE project. Regional Studies in Marine Science, 86. https://doi:10.1016/j.rsma.2025.104208

Baban, S.M.J. (1993), The evaluation of different algorithms for bathymetric charting of lakes using landsat imagery, International Journal of Remote Sensing, 14(12), 2263-2273. https://doi: 10.1080/01431169308954035

Bakırman, T. (2019). Uzaktan Algılama ve Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Deniz Çayırı Habitatlarının Belirlenme Olanaklarının Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Benabbes, M. (2020). An Ottoman translation of ptolemy's geography made in the 15th century: the importance of an unknown work. F. Başar, M. Kaçar, C. Kaya, A. Z. Furat (Eds.), The 1st International Prof. Dr. Fuat Sezgin Symposium on History of Science in Islam Proceedings Book (s. 417-427).

Benny, A.H., Dawson, G.J. (1983). Satellite imagery as an aid to bathymetric charting in the Red Sea, The Cartographic Journal, 20(1), 5-16.

Bermejo Baro, F. (2019). The IHO and Its Secretariat 1921-2017. Monaco: International Hydrographic Organization.

Beyer, A. (2006). Seafloor Analysis Based On Multibeam Bathymetry And Backscatter Data, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany.

Bierwirth, P.N., Lee, T.J., Burne, R.V. (1993). Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 59, 331–338.

Bora, A.G., Usluer, H.B., Gazioğlu, C. (2025). Satellite Bathymetry Detection of Al Khoms Port within the Scope of Türkiye-Libya Maritime Policies. International Journal of Environment and Geoinformatics, 12(4), 432-439. https://doi.org/10.26650/ijegeo.1577164

Bose, A. (2022). Consistency re-evaluation in analytic hierarchy process based on simulated consistent matrices. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 29(5-6), 393–401.

Bostan, İ. (1992). Osmanlı Bahriyesinde Modernleşme Hareketleri, Türk Tarih Kurumu Yayınları, Ankara.

Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Brundtland, G. H. (1987). Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development. United Nations General Assembly Document A/42/427. Erişim adresi: https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf#files (Erişim tarihi: 15.03.2025)

Brown, W. L., Polcyn, F. C., Stewart, S. R. (1971). A method for calculating water depth attenuation coefficients and bottom reflectance characteristics. Seventh International Symposium on Remote Sensing of Environment, 663-682, 17-21 May 1971, Michigan, USA.

Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., Niculae, V., Prettenhofer, P., Gramfort, A., Grobler, J., Layton, R., VanderPlas, J., Joly, A., Holy, B., Varoquaux, G. (2013). API design for machine learning software: experiences from the Scikit learn project. In proceedings of the ECML PKDD workshop: languages for data mining and machine learning, Prague, Czech Republic, 23–27 September 2013, pp. 108–122.

Calder, B.R., Mayer, L.A. (2003). Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosunder data. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 4. doi:10.1029/2002GC000486.

Calewaert, J.B, Weaver, P., Gunn, V., Gorringe, P., Novellino A. (2016). The European Marine Data and Observation Network (EMODnet): Your Gateway to European Marine and Coastal Data. In: Zerr, B., et al. Quantitative Monitoring of the Underwater Environment. Ocean Engineering and Oceanography, vol 6. Springer, Cham.

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). (2023). The Advent of Satellite Altimetry. Erişim adresi: https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html (Erişim tarihi: 19.12.2023).

Chadelat, J. (1954). L'elaboration de l'ordonnance de la marine d'aout 1681. Revue Historique de Driot Français et Etranger (1922-), 31, 74-98. Erişim adresi: http://www.jstor.org/stable/43844451 (Erişim tarihi: 22.02.2024).

Charette, M.A., Smith, W.H. (2010). The volume of earth's ocean. Oceanography, 23(2), 112-114.

Chavez, P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24(4), 459–479. doi: 10.1016/0034-4257(88)90019-3

Clark, R.K., Fay, T.H., Walker, C.L. (1989). Bathymetry calculation with landsat 4 TM imagery under a generalized ratio assumption. Applied Optics, 26(19), 4036-4038.

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

Cover, T., Hart, P. (1967). Nearest neighbours pattern classification. IEEE Transactions on Information Theory, 13(1), 21–27. doi:10.1109/tit.1967.1053964.

Çelik, O.İ., Büyüksalih. G., Gazioğlu. C. (2023) Improving the Accuracy of Satellite-Derived Bathymetry Using Multi-Layer Perceptron and Random Forest Regression Methods: A case study of Tavşan Island. Journal of Marine Science and Engineering., 11, 2090. https://doi.org/10.3390/jmse11112090.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Türkiye, 2053 İklim ve Kalkınma Hedefine Emin Adımlarla İlerliyor. Erişim adresi: https://www.csb.gov.tr/turkiye-2053-iklim-ve-kalkinma-hedefine-emin-adimlarla-ilerliyor-bakanlik-faaliyetleri-34164 (Erişim Tarihi: 04.04.2025)

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). 7552 Sayılı İklim Kanunu. Ankara: T.C. Hükumeti.

Davis, R.H. (1995). Deep Diving and Submarine Operations, A Manual for Deep Sea Divers and Compressed Air Workers. Siebe, Gorman, & Co. LTD Cwmbran: Gwent, England.

Deidda, M., Sanna, G. (2012), Bathymetric extraction using worldview-2 high resolution images. XXII ISPRS Congress, 153-157, 25 August-01 September 2012, Melbourne, Australia.

Dekker, A. G., Phinn, S. R., Anstee, J., Bissett, P., Brando, V. E., Casey, B., Fearns, P., Hedley, J., Klonowski, W., Lee, Z. P., Lynch, M., Lyons, M., Mobley, C., Roelfsema, C. (2011). Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthic mapping techniques. Remote Sensing of Environment, 115(8), 1731-1743. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.012

Denizde Can Güvenliği Uluslararası Sözleşmesi (SOLAS). (2024). Safety of Life at Sea (Consolidated Edition). International Maritime Organization: London.

Deniz Ticaret Odası. (2024). Denizcilik Sektör Raporu. İstanbul: İMEAK DTO

Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). (2024). Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024. Erişim adresi: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024 (Erişim tarihi: 21.03.2025)

Dolou, H., Laporte, J., Avis, J., Arino, O. (2020). Thırty years of satellıte derıved bathymetry: The charting tool that Hydrographers can no longer ignore. B.Connon (Ed.), The International Hydrographic Review Publication P-1 (s. 129-154), Monaco: International Hydrographic Organization.

Ersöz, F., Kabak, M. (2010). Savunma Sanayi Uygulamalarında Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Literatür Araştırması, Savunma Bilimleri Dergisi, 9(1), 97–125. https://doi: 10.17134/sbd.85950

European Commission. (2023). FuelEU Maritime Regulation (Regulation (EU) 2023/1805 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport). Official Journal of the European Union, L 238, 1-59.

European Commission (2024). Reducing emissions from the shipping sector – Inclusion of maritime in the EU ETS. Brüksel:European Commission. Erişim adresi: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector_en (Erişim tarihi: 01.09.2025)

European Commission / Joint Research Centre (JRC). 2024. The EU Blue Economy Report 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

European Environment Agency. (2024). Road Transport. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Eugenio, F., Marcello, J., Martin, J. (2015). High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53, 3539–3549.

Evagorou, E., Argyriou, A., Papadopoulos, N., Mettas, C., Alexandrakis, G., Hadjimitsis, D. (2022). Evaluation of satellite-derived bathymetry from high and medium-resolution sensors using empirical methods, Remote Sensing, 14(772), 2-19. https://doi:10.3390/rs14030772

Figliomeni, F.G., Parente, C. (2024). Methods for satellite derived bathymetry from sentinel-2 images: a comparison. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVII(4/WP), 165-173. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVII-4W9-2024-165-2024

Food and Agriculture Organization (FAO, 2010). Fisheries and Aquaculture Technical Paper-Fishing harbour planning construction and management. Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO).

Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by satellite remote sensing: A review. International Journal of Remote Sensing, 30(19), 5133-5155. https://doi.org/10.1080/01431160902893419

Giorgetti, A., Partescano, E., Barth, A., Buga, L., Gatti, J., Giorgi, G., Iona, A., Lipizer, N., Holdsworth, N., Larsen, M.M., Schaap, D., Vinci, M., Wenzer, M. (2018). EMODnet Chemistry spatial data infrastructure for marine observations and related information. Ocean and Coastal Management, 166, 9-17. https://doi.org/ 10.1016/j.ocecoaman.2018.03.016

Gordon, H.R., Clark, D.K., Brown, J.W., Brown, O.B., Evans, R.H., Broenkow, W.W. (1983). Phytoplankton pigment concertrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. Applied Optics, 22, 20-36.

Gözügüzelli, E. (2022). Hukuki ve Teknik Bakış Açısıyla Uluslararası Deniz Hukuku. Nobel Yayın, Ankara.

Gray, E. (2010). Chasing satellites with Jacques Cousteau. Nasa Earth Expeditions. Erişim adresi: https://blogs.nasa.gov/earthexpeditions/2020/07/21/chasing-satellites-with-jacques-cousteau/ (Erişim tarihi: 22.02.2024).

Grzadziel, A., Felski, A., Mariusz, W. (2015). Experience with the use of a rigidly-mounted side-scan sonar in a harbour basin bottom investigation. Ocean Engineering, 109, 439–443.

Guo, X., Jin, X., Jin, S. (2022). Shallow Water Bathymetry Mapping from ICESat-2 and Sentinel-2 Based on BP Neural Network Model. Water 2022. 14, 3862. https://doi.org/10.3390/w14233862

Gülher, E., Alganci, U. (2023). Satellite-derived bathymetry in shallow waters: Evaluation of Gokturk-1 satellite and a novel approach. Remote Sensing, 15(21), 5220. https://doi.org/10.3390/rs15215220

Gülher, E., Pala, İ., Algancı, U. (2024). Assessing the contribution of super-resolution in satellite derived bathymetry in the Antarctic. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 15, 109007. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.109007

Günergun, F. (2020). Batlamyus'un coğrafya'sının yeni bir tıpkıbasımı: Bizans İstanbulunda kopyalanan codex seragliensis gi 57. Osmanlı Bilimi Araştırmaları 21(2), 435-444. doi:10.26650/oba.728039

Hakim, L., Lazuardi, W., Astuty, I.S., Al Hadi, A., Hermayani, R., Noviandias, D., Dewi, A.C. (2018). Assessing worldview-2 satellite imagery accuracy for bathymetry mapping in Pahawang Island, Lampung, Indonesia. IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 165, 012027.

Hamden, M.H., Din, A.H.M. (2018). A review of advancement of hydrographic surveying towards ellipsoidal referenced surveying technique. IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 169, 012019. https://doi: 10.1088/1755-1315/169/1/012019

Hansen, R.E., Callow, H. J., Sabo, T. O., Synnes, S. A. V. (2011). Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(10), 3677-3687. doi: 10.1109/TGRS.2011.2155071

Hare, R. (1995). Depth and position error budgets for multibeam echosounding. The International Hydrographic Review, 72(2), 37-69.

Hasanbeigi, A., Price, L. (2015). A Technical Review of Emerging Technologies for Energy and Water Efficiency and Pollution Reduction in the Textile Industry. Journal of Cleaner Production, 95, 30-44. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.079

Hedley J.D., Harborne A.R., Mumby P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos, International Journal of Remote Sensing, 26(10), 2107-2112. https://doi.org/10.1080/01431160500034086

Heidenreich, C. E. (1985). The Mapping of Canada 1500-1760, 11th International Conference on the History of Cartography, 8-12 July 1985, Ottowa, Canada.

Kim, M., Danielson, J.J., Storlazzi, C.D., Park, S. (2024). Physics-based satellite-derived bathymetry (sdb) using Landsat OLI images. Remote Sensing, 16(5), 843. https://doi.org/10.3390/rs16050843

Hochberg, E.J., Andre Foue T, S., Tyler, M.R. (2003). Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 1724–1729. https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.815408

Ingham, A.E. (1993). Hydrography for Surveyor and Engineer. Wiley-Blackwell; 3rd edition.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2022). Agriculture, Forestry and Other Land Uses (Chapter 7). In: IPCC 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Shukla, A.R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., et al., pp. 747-860 Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.009

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology Version 13.1, Montreal, Canada.

International Hydrographic Organization (IHO). (2005). Manuel on Hydrography. Monaco, France: International Hydrographic Bureau.

International Hydrographic Organization (IHO). (2009). Proposal to approve new definition of hydrography. 4th Extraordinary International Hydrographic Conference, Report of Proceedings, 38-40, 2–4 June 2009, Monaco, France.

International Hydrographic Organization (IHO). (2022). International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys: S-44 Edition 6.1.0, Monaco, France: International Hydrographic Organization.

International Hydrographic Organization (IHO). (2024). Guidance to Satellite-Derived Batyhmetry, Monaco, France: International Hydrographic Organization.

International Maritime Organization (IMO). (2023). Imo Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. London: IMO Publishing.

İklim Değişikliği Başkanlığı (2025a). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi. Erişim adresi: https://iklim.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-i-33 (Erişim tarihi: 03.04.2025)

İklim Değişikliği Başkanlığı (2025b). Kyoto Protokolü. Erişim adresi: https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35 (Erişim tarihi: 03.04.2025)

İklim Değişikliği Başkanlığı (2025c). Paris Anlaşması. Erişim adresi: https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34 (Erişim tarihi: 03.04.2025)

İklim Değişikliği Başkanlığı (2025ç). Türkiye 2053 Uzun Dönemli İklim Stratejisi. Erişim adresi: https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/T%C3%BCrkiye'nin%20Uzun%20D%C3%B6nemli%20%C4%B0klim%20Stratejisi.pdf (Erişim tarihi: 04.04.2025)

İnandık, H. (1971). Deniz ve Kıyı Coğrafyası. İstanbul Üniversitesi.

İnancık, H. (1994) The Ottoman Empire: The Classical Age 1300-1600. Phoneix Press.

Jacops, M. (2002). Analyses of high resolution bathymetric data in the Eltanin Impact Area. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven.

Jagalingan, P., Akshaya, B.J., Hedge, A.,V. (2015). Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satelitte Imagery. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts, 560-566, 7-10 September 2015, Chennai, India.

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. Renewable Energy, 29, 1265-1275.

Kahraman, S.A. (2013). Piri Reis'in Kitab-ı Bahriye'sinde Denizcilik ve Haritacılık. Osmanlı Araştırmaları Dergisi, 41, 123-150.

Karo, H. A. (1960). Oceanography in the U.S. coast and geodetic survey. The International Hydrographic Review, XXXVII(2), 127-136. https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/26551 (Erişim tarihi:11.01.2024).

Kay, S., Hedley, J. D., Lavender, S. (2009). Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths. Remote Sensing, 1(4), 697-730. https://doi.org/10.3390/rs1040697

Klotz, A.N., Almar, R., Quenet, Y., Bergsma, E.W.J., Youssefi, D., Artigues, S., Rascle, N., Sy, B.A., Ndour, A. (2024). Nearshore satellite-derived bathymetry from a single-pass satellite video: Improvements from adaptive correlation window size and modulation transfer function. Remote Sensing of Environment, 315. https: doi.org/10.1016/j.rse.2024.114411

Koçak, M.G. (2022). Investigation on the generation of bathymetric maps by combing Sentinel-2 imagery and ICESat-2 ATL03 photon height data. Journal of Geodesy and Geoinformation, 9(1), 47-58. https://doi.org/10.9733/JGG.2022R0004.T

Koeman, C. (1964). The History of Lucas Janszoon Waghenaer: And His Spieghel Der Zeevaerdt. Lausanne: Sequoia.

Klemm, A., Platel, A., Gallagher, B., Schroeder, C., Meyer, E., Rice, G., Riley, J., Burkhalter-Castro, R. (2020). Hydrography from fisheries surveys: Filling coverage gaps with bathymetry extracted from simrad EK60 water column data. The International Hydrographic Review, (24), 37-60.

Lalli, C., Parsons, T. R. (1997). Biological Oceanography An Introduction. Amsterdam: Elsevier.

Leder, T.D., Leder, N., Peros, J. (2019). Satellite derived bathymetry survey method – example of Hramina Bay. Transactions on Maritime Science. 8(1), 99-108. doi.org/10.7225/toms.v08.n01.010.

Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G., Patch, J. S. (1999). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. Applied Optics, 38(18), 3831-3843. https://doi.org/10.1364/AO.38.003831

Lewicka, O., Specht, M., Stateczny, A., Specht, C., Dardanelli, G., Brčić, D., Szostak, B., Halicki, A., Stateczny, M., Widzgowski, S. (2022). Integration data model of the

bathymetric monitoring system for shallow waterbodies using UAV and USV platforms. Remote Sensing, 14(16), 4075. https://doi.org/10.3390/rs14164075

Li, Y., He, X., Martinez, L., Zhang, J., Wang, D., Liu, X.A. (2024). Comparative analysis of three categories of multi-criteria decision-making methods, Expert System with Applications, 238, 121824. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121824

Liang, F., Brunelli, M., Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds, Omega, 96, 102175. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102175

Lurton, X. (2010). An Introduction to underwater acoustics: Principles and applications, 2nd. ed.;. U.K.: Springer.

Lyzenga, D.R. (1978). Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and bottom feature. Applied Optics, 17(3), 379-383. https://doi.org/10.1364/AO.17.000379

Lyzenga, D.R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. International Journal of Remote Sensing, 2, 71-82. https://doi.org/10.1080/01431168108948342

Lyzenga, D. R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. International Journal of Remote Sensing, 6(1), 115– 125. https://doi.org/10.1080/01431168508948428

Lyzenga, D.R., Malinas, N.P., Tanis, F.J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 2251-2259. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909

Manessa, M.D.M., Kanno, A., Sekine, M., Haidar, M., Yamamoto, K., Imai, T., Higuchi, T. (2016). Satellite-derived bathymetry using random forest algorithm and worldview-2 imagery. Geoplanning: Journal of Geomatics and Planing, 3. 117. https://doi.org/10.14710/geoplanning.3.2.117-126

Mardani, A., Jusoh, A., MD Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. Economic Research-Ekonomska Istrazivanja, 28(1), 516–571. https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139

Maritorena, S., Morel, A., Gentili, B. (1994). Diffise reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. Limnology and Oceanography, 39, 1689-1703. https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.7.1689

Mateo-Perez, V., Coral-Bobadilla, M., Ortega-Fernandez, F., Vergara-Gonzalez, E.P. (2020). Port bathymetry mapping using support vector machine technique and Sentinel-2 satellite imagery. Remote Sensing. 12(13), 2069. https://doi.org/10.3390/rs12132069

Mateo-Perez, V., Corral-Bobadilla, M., Ortega-Fernandez, F., Rodriguez-Montequin, V. (2021). Determination of water depth in ports using satellite data based on machine learning algorithms. Energies 14(9), 2486. doi:10.3390/en14092486.

Mayer, L., Jakobsson, M., Allen, G., Dorschel, B., Falconer, R., Ferrini, V., Lamarche, G., Snaith, H., Weatherall, P. (2018). The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030. Geosciences, 8(2), 63. https://doi.org/10.3390/geosciences8020063

Miller, S.A., Horvath, A., Monteiro, P.J.M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. Nature Sustainability 1, 69–76. https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5

Misra, A., Vojinovic, Z., Ramakrishnan, B., Luijendijk, A., Ranasinghe, R. (2018). Shallow water bathymetry mapping using Support Vector Machine (SVM) technique and multispectral imagery. Internatioanl Journal of Remote Sensing, 39, 4431–4450. doi:10.1080/01431161.2017.1421796.

Mudiyanselage, S.D., Wilkinson, B., Abd-Elrahman A. (2024). Automated high-resolution bathymetry from Sentinel-1 SAR images in deeper nearshore coastal waters in Eastern Florida. Remote Sensing, 16(1), 1-21. https://doi:/10.3390/rs16010001

Mumby, P.J., Green, E.P., Edwards, A.J., Clark, C.D. (1999). The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. Journal of Environmental Management, 55(3). https://doi.org/10.1006/jema.1998.0255

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024). History of Hydrographic Surveying. Erişim adresi: https://nauticalcharts.noaa.gov/learn/history-of-hydrographic-surveying.html (Erişim tarihi: 03.04.2025)

Nazeer, M., Nichols, J.E., Yung, Y. (2014). Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. International Journal of Remote Sensing, 35(16), 6271– 6291.

Ogrodnik, K. (2023). Application of MCDM/MCDA methods in city rankings – review and comparative analysis. Economics and Environment, 86(3), 132–15. https://doi:10.34659/eis.2023.86.3.689

Özcan, E., Yılmaz, A., Okur, O., Özsoy, B. (2022). Antarktika Seferlerinde Araştırma Gemilerinin Karbon Emisyonlarının İstatistiksel Yaklaşımla Belirlenmesi. Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi, 4(1), 25-43. https://doi.org/10.54410/denlojad.1079719

Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C. ve Ferreira, O. (2014). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters, Remote Sensing of Environment, 159, 102-116. https://doi:10.1016/j.rse.2014.12.004

Pandey, D., Agrawal, M., Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. Environmental Monitoring and Assessment, 178(1-4), 135-160. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y

Pastoureau, M. (1984). Les Atlas Français, XVIe-XVIIc siecles. Paris, France: Bibliothèque Nationale, Département des Cartes et Plans.

Philpot, W. (1989). Batyhymetric mapping with passive multispectral imagery. Applied Optics, 28(8), 1569-1578. https://doi.org/10.1364/AO.28.001569

Pisyam, A.N.M., Arief, D.A.A. (2021). Mapping estimatıon Of shallow water depth using bathymetric empirical modeling echosounder data and sentinel-2 satellite image data (case study: shallow waters Of Bayur Bay, Padang City). International Remote Sensing Applied Journal, 2(2), 37-44. https://doi.org/10.24036/irsaj.v2i2.24

Polcyn, F.C., Rollin, R.A. (1969). Remote sensing techniques for the Location and Measurement of Shallow Water Features. Willow Run Laboratories Report 8973-10-P. USA: University of Michigan.

Polcyn, F.C., Lyzenga, D.R. (1973). Calculations of water depth from ERTS-MSS data. In Proceedings of the Symposium on Significant Results Obtained from ERTS-1, 5-9 March 1973, New Carrollton, USA.

Poursanidis, D., Traganos, D., Reinartz, P., Chrysoulakis, N. (2019). On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 80, 58-70. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.012.

Pritchard J.S. (1979). Early French hydrographic surveys in the St. Lawrence River. International Hydrographic Review, LVI(l), 125-142.

Purkis, S.J., Pasterkamp, R. (2004). Integrating in situ reef-top reflectance spectra with Landsat TM imagery to aid shallow-tropical benthic habitat mapping. Coral Reefs, 23, 5-20. https://doi.org/10.1007/s00338-003-0351-0

Rashid, M., Akorede, M., Chao, L., Mohammed, M. (2015). A dual axis solar tracking system for maximum power production in PV systems. Nigerian Journal of Technological Development, 12(2), 42 – 47. https://doi.org/10.4314/njtd.v12i2.2

Resmi Gazete (2025). İklim Kanunu No.7552. T.C. Resmi Gazete, Sayı: 32574. Erişim adresi https://www.resmigazete.gov.tr (Erişim tarihi: 10.09.2025)

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. Omega, 64, 126–130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

Ritchie, G.S. (1991). The History of hydrography an enlightened European Era 1660-1800, International Hydrographic Review, 1(1), 6-14. https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/23283 (Erişim tarihi: 28.08.2025)

Ritchie, G.S. (2000). A brief history of 19th centrury deep sea, International Hydrographic Review, LXVIII(1), 7-20. https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/20479/23642 (Erişim tarihi: 28.08.2025)

Robert, K. W., Parris, T. M., Leiserowitz, A. A. (2005). What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 47(3), 8–21. https://doi.org/10.1080/00139157.2005.10524444

Robinson, A.H.W. (1962). Marine cartography in Britain. England: Leicester University Press.

Saeed, R., Abdelrahman, S.M., Negm, A.M. (2021). Satellite-derived bathymetry using landsat-8 imagery for Safaga coastal zone, Egypt. Acta Marisiensis Seria Technologica, 18(1), 8-15. https://doi.org/10.2478/amset-2021-0002

Sagawa, T., Boisnier, E., Komatsu, T., Mustapha, K.B., Hattour, A., Kosaka, N., Miyazaki, S. (2010). Using bottom surface reflectance to map coastal marine areas: a new application method for Lyzenga's model. International Journal of Remote Sensing, 31, 3051-3064. https://doi.org/10.1080/01431160903154341

Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T., Yamanokuchi, T. (2019). Satellite derived bathymetry using machine learning and multi temporal satellite images. Remote Sensing, 11(10), 1155. https://doi.org/10.3390/rs11101155

Said, N.B.M. (2018). Satellite-Derived Bathymetry for Shallow Water Hydrographic Mapping. Faculty of Built Environment and Surveying Universiti Teknologi, Malaysia.

Saaty, T., Vargas, L. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hiearchy Process. Springer, New York.

Seber, G.A.F., Lee, A.J. (2012). Linear Regression Analysis (2nd Ed.), John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

Schmitt, T., Loubrieu, B., Guerin, C., Monpert, C. (2023). Use of the dataset Quality Index to expand services associated to the EMODnet DTM. Version 12-01-2023, 21 pp., Ostend, Belgium. https://doi.org/10.25607/OBP-1935.

Sefercik, U.G., Nazar, M., Aydın, İ., Büyüksalih, G., Gazioğlu, C., Bayırhan, İ. 2024. Comparative analyses for determining shallow water bathymetry potential of multispectral UAVs: case study in Tavşan Island, Sea of Marmara. Front. Mar. Sci, 11, 1388704. https:doi.org/10.3389/fmars.2024.1388704

Setiawan, K.T., Kusuma, F.B., Manessa, M.D.M., Adi, N.S. (2021). Rapid bathymetry detect.on with sentinel application platform (SNAP) using Sentinel imagery 2a. Natural Volatiles and Essential Oils. 8(6), 3831-3841. https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/4155

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD). (1985). Hidrografi Teknikleri ve Ölçüm Aletleri El Kitabı. İstanbul: Seyir ve Hidrografi Dairesi Yayınları.

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD). (2025a). Tarihçe. Erişim Adresi: https://www.shodb.gov.tr/shodb_esas/index.php/tr/genel/tarihce (Erişim tarihi: 05.01.2025)

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD). (2025b). Misyonumuz. Erişim Adresi: https://www.shodb.gov.tr/shodb_esas/index.php/tr/genel/hakkimizda/misyonumuz (Erişim tarihi: 05.01.2025)

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD). (2025c). Gemilerimiz. Erişim Adresi: (Erişim tarihi: 05.01.2025)

Shang, X., Zhao, J., Zhang, H. (2019). Obtaining high-resolution seabed topography and surface details by co-registration of side-scan sonar and multibeam echo sounder images. Remote Sensing, 11(12), 1496. https://doi.org/10.3390/rs11121496

Singh, R., Sarkar, P., Goswami, V., Yadav, R. (2022). Review of low cost micro remotely operated underwater vehicle. Ocean Engineering, 266, 2. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112796

Smith, F.G.F., Hess, M.L. (2017). Optimization of multi-date strategies for calculating bathymetry using multispectral imagery. Imaging and Geospatial Technology Forum, 12-16 March 2017, Baltimore, Maryland, USA.

Steele, J.H., Thorpe, S.A., Turekian, K.K. (2001). Encyclopedia of Ocean Sciences. San Diego: Academic Press.

Stove, G.C. (1985). Use of high resolution satellite imagery in optical and infrared wavebands as an aid to hydrographic and coastal engineering. Proceedings Conference on Electronics in Soil and Gas, 509-530, January 1985, London.

Stumpf, R.P., Holderied, K., Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnology and Oceanography, 48(1), 547-556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Suardana, A.P., Thayyib, A.U., Setiawan, K.T., Prasetio, W., Marpaung, S., Febrianto, S., Kusuma, F.B., Anggraini, N., Sutanto, A., Priyambodo, D.G. (2023). Bathymetry mapping with empirical bathymetry method based on sentinel application platform case study: Bawean island. Central Java. BIO Web of Conferences. 106, 04002. https://doi.org/10.1051/bioconf/202410604002

Tavana, M., Soltanifar, M., Santos Arteaga, F. J. (2021). Analytical Hierarchy Process: Revolution and Evolution. Annals of Operations Research. In Press. https://doi:10.1007/s10479-021-04432-2

TR 131. (2018). Seyir Haritası: Karadeniz, Turkiye Bafra Burnu-Civa Burnu. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD), İstanbul. Baskı Tarihi: Eylül 2018.

TR 221. (2013). Seyir Haritası: Ege Denizi, Turkiye İzmir Körfezi. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD), İstanbul. Baskı Tarihi: Şubat 2013.

TR 334. (2019). Seyir Haritası: Akdeniz, Turkiye İskenderun Körfezi. Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD), İstanbul. Baskı Tarihi: Nisan 2019.

Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., Reinartz, P. (2018). Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the Google Earth engine and Sentinel-2. Remote Sens., 10(6), 859. https://doi.org/10.3390/rs10060859.

Theberge, A. E. (1989). Sounding pole to sea beam. Surveying and Cartography, 5, 334-346.

Tonion, F., Pirotti, F., Faina, G., Paltrinieri, D. (2020). A machine learning approach to multispectral satellite derived bathymetry. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 3, 565–570. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-565-2020

United Kingdom Hydrographic Office-UKHO (2020). A Guide to Bathymetry. United Kingdom: UK Hydrographic Office.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2023).Türkiye's Updated Nationally Determined Contribution (NDC). Bonn: UNFCC Secretariat.

United States Army Corps of Engineers (USACE). (2002). Hydrographic Surveying – Manual No: 1110-2-1003. Washington: Department of the Army.

United States Environmental Protection Agency-EPA. (2024). Greenhouse gas equivalencies calculator. Erişim adresi: https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator (Erişim tarihi: 03.04.2025)

Utrecht University. (2023). The world's very first sea atlas. Erişim adresi: https://www.uu.nl/en/special-collections/the-treasury/maps-and-atlases/spieghel-der-zeevaerdt-by-waghenaer (Erişim tarihi: 17.01.2024)

Ülkekul, C. (2009). Türk Seyir Hidrografi ve Oşinografi Çalışmalarının 1909 Tarihi Öncesi. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Deniz Müzesi.

Quang, N.H, Banno, M., Ha, N. T. (2024). Satellite derived bathymetry using empirical and machine learning approaches: a case study in the highly dynamic coastal water. Coastal Engineering Journal, 1–20. https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2445418

Vagizov, M., Potapov, A., Konzhgoladze, K., Stepanov, S., Martyn, I. (2021). Prepare and Analyze Taxation Data Using the Python Pandas Library. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 876, 012078. https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012078

Vaidya, O.S., Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications, European Journal of Operational Research, 169, 1-29. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028

Vallario, A., Parente, C. (2019). Interpolation of single beam echo sounder data for 3D bathymetric model. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10(10), 6-13. https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101002

Van Hengel, W., Spitzer, D. (1991). Multi-temporal water depth mapping by means of Landsat TM. International Journal of Remote Sensing, 12, 703-712.

Viaña-Borja, S.P., Villanueve, R.G., Alejo, I., Stumpf, R.P., Navarro, G., Caballero, I. 2025. Satellite-derived bathymetry using sentinel-2 in mesotidal coasts. Coastal Engineering, 195, 104644. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104644

Villasante, S., Richter, K., Bailey, J., Blenckner, T., Farrell, E., Mongruel, R., Timmermann, K., Bouma, T., Melaku Canu, D., Chen, M., Lachs, L., Payo, A., Sousa Pinto, I. (2023). Building Coastal Resilience in Europe. Alexander, B., Muñiz Piniella, A., Kellett, P., Rodriguez Perez, A., Van Elslander, J., Bayo Ruiz, F., Heymans, J.J. (Eds.) Position Paper No. 27 of the European Marine Board, Ostend, Belgium. https://doi.org/10.5281/zenodo.8224055

Yang, Z., Liu, H., Le, Y., Chen, Y., Sun, X., Zhu, X., Mu, H. (2026). Shallow water bathymetry based entirely on satellite data: a case study in the South China sea. Marine Geophysical Research, 47, 4. https://doi.org/10.1007/s11001-025-09601-7

Yılmaz, E., Sesli, F.A., Uzun, Ö.F. (2023). Production of bathymetry maps by acoustic sounding and satellite imaging method: The example of Sinop Hurmadibi. The Black Sea Journal of Sciences, 13(3), 764-780. https://doi.org/10.31466/kfbd.1204211

Yoerger, D. R., Jakuba, M., Bradley, M., Bingham, B. (2007). Techniques for Deep Sea Near Bottom Survey Using an Autonomous Underwater Vehicle. The International Journal of Robotics Research, 26(1), 41-54. https://doi.org/10.1177/0278364907073773

Wang Li-hua, W. (2012). A method of resolving hydrographic survey positioning while GPS loses signals in a short time. Proceedings of the Western Dredging Association (WEDA XXXII) and Texas A&M University (TAUM 43) Dredging Seminar, 10-13 June 2012, San Antonio, Texas.

Webb, P. (2023). Introduction to Oceanography, Erişim adresi: https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/ (Erişim tarihi: 07.01.2024)

Westley, K. (2021). Satellite-derived bathymetry for maritime archaeology: Testing its effectiveness at two ancient harbours in the Eastern Mediterranean. Journal of Archaeological Science, 38, 1-19. doi:10.1016/j.jasrep.2021.103030

World Bank Group. (2022). Türkiye Country Climate And Development Report. Erişim adresi: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/01826a0c-059f-5a0c-91b7-2a6b8ec5de2f (Erişim tarihi: 04.04.2025)

Wu, Z., Mao, Z., Shen, W., Yuan, D., Zhang, X., Huang, H. (2022). Satellite-derived bathymetry based on machine learning models and an updated quasi-analytical algorithm approach. Optics Express., 30, 10, https://doi.org/10.1364/OE.456094.

Wu, Z., Yang, F., Tang, Y. (2021). Multi-beam Bathymetric Technology. In: High-resolution Seafloor Survey and Applications. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9750-3_2

Zhou, W., Tang, Y., Jing, W., Li, Y., Yang, J., Deng, Y., Zhang, Y. (2023) A Comparison of Machine Learning and Empirical Approaches for Deriving Bathymetry from Multispectral Imagery. Remote Sens., 15, 393. https://doi.org/10.3390/rs15020393

Zhu, J., Jiao, C., Wang, R., Wen, Y., Wang, Y., Liu, B., Han, Y. (2026) An MLPEL Machine Learning Model for Bathymetry Retrieval Based on Ensemble Learning. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 29(1), 15-27. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2026.01.003

EKLER

EK 1. Samsun bölgesi uydu görüntü metadatası

Samsun Bölgesi Uydu Görüntü Metadatası	
Summary	
Name	S2B_MSIL2A_20230816T082609_N0509_R021_T36TYL_20230816T131702.SAFE
Size	1144 MB
Sensing time	2023-08-16T08:26:09.024Z
Platform short name	Sentinel-2
Satellite platform	B
Instrument short name	MSI
Product	
Absolute orbit number	33652
Beginning date time	2023-08-16T08:26:09.024Z
Cloud over	0.524371
Ending date time	2023-08-16T08:26:09.024Z
Modification date	2023-08-16T16:10:10.119Z
Origin date	2023-08-16T16:03:10.335Z
Processed by	ESA
Processing date	2023-08-16T13:17:02+00:00
Processing level	S2MSI2A
Processor version	05.09
Pruduct group id	G2B_20230816T082609_033652_N05.09
Product type	S2MSI2A
Publication date	2023-08-16T16:09:48.859Z
Relative orbit number	21
S3Path	/eodata/Sentinel-2/MSI/L2A/2023/08/16/S2B_MSIL2A_20230816T082609_N0509_R021_T36TYL_20230816T131702.SAFE
Tile id	36TYL

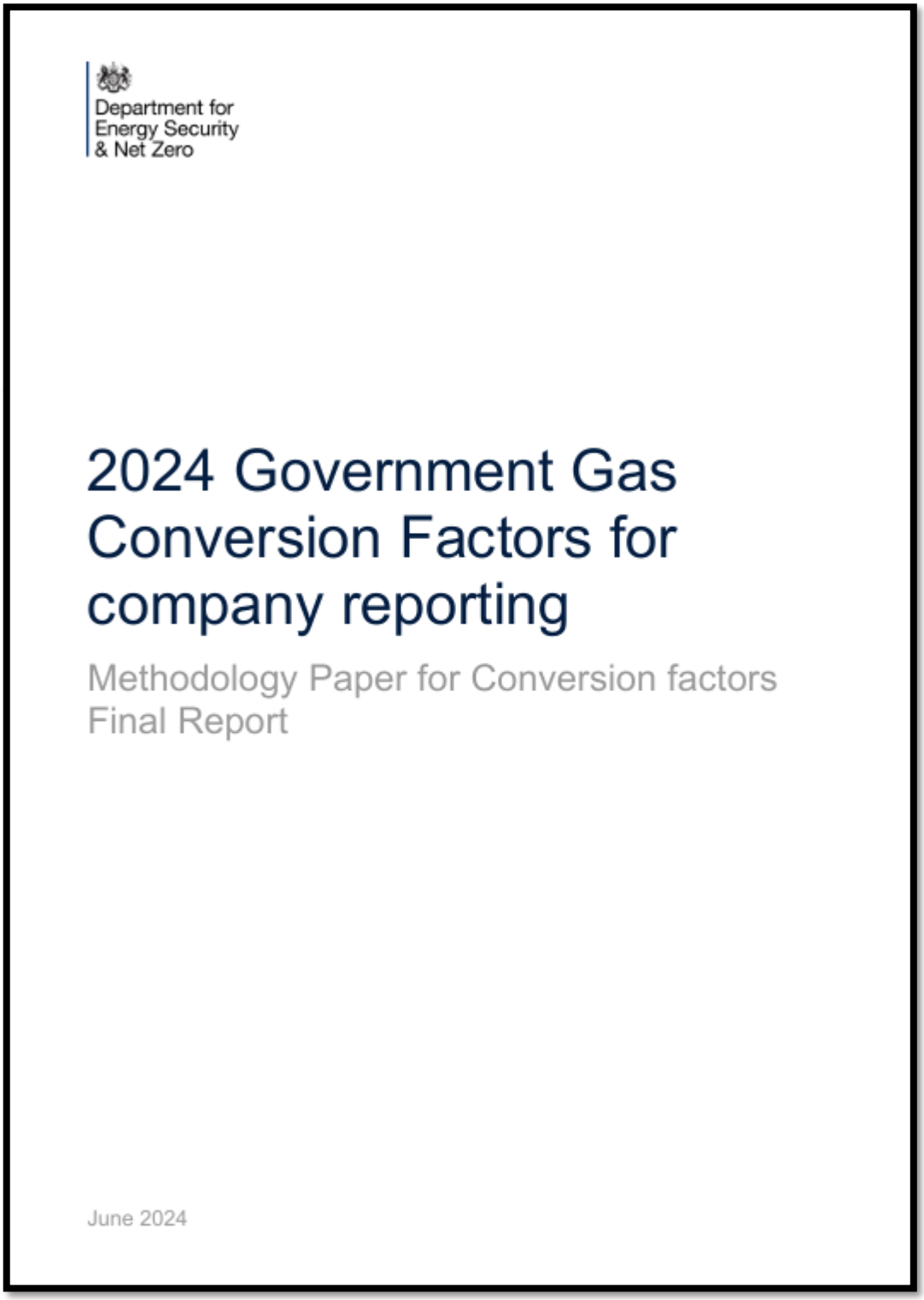
EK 2. İzmir Körfezi uydu görüntü metadatası

İzmir Körfezi Uydu Görüntü Metadatası	
Summary	
Name	S2B_MSIL2A_20230815T085559_N0509_R007_T35SMC_20230815T121643.SAFE
Size	992 MB
Sensing time	2023-08-15T08:55:59.024Z
Platform short name	Sentinel-2
Satellite platform	B
Instrument short name	MSI
Product	
Absolute orbit number	33638
Beginning date time	2023-08-15T08:55:59.024Z
Cloud over	2.867864
Ending date time	2023-08-15T08:55:59.024Z
Modification date	2023-08-15T15:58:12.747Z
Origin date	2023-08-15T15:47:40.628Z
Processed by	ESA
Processing date	2023-08-15T12:16:43+00:00
Processing level	S2MSI2A
Processor version	05.09
Pruduct group id	G2B_20230815T085559_033638_N05.09
Product type	S2MSI2A
Publication date	2023-08-15T15:57:52.85904Z
Relative orbit number	7
S3Path	/eodata/Sentinel-2/MSI/L2A/2023/08/15/S2B_MSIL2A_20230815T085559_N0509_R007_T35SMC_20230815T121643.SAFE
Tile id	35SMC

EK 3. İskenderun Körfezi uydu görüntü metadatası

İskenderun Körfezi Uydu Görüntü Metadatası	
Summary	
Name	S2B_MSIL_20230818T081611_N0509_R121_T37SBA_20230818T125657.SAFE
Size	1128 MB
Sensing time	2023-08-18T08:16:11.024Z
Platform short name	Sentinel-2
Satellite platform	A
Instrument short name	MSI
Product	
Absolute orbit number	42589
Beginning date time	2023-08-18T08:16:11.024Z
Cloud over	8.406697
Ending date time	2023-08-18T08:16:11.024Z
Modification date	2023-08-18T15:30:38.126Z
Origin date	2023-08-18T15:22:51.572Z
Processed by	ESA
Processing date	2023-08-18T12:56:57+00:00
Processing level	S2MSI2A
Processor version	05.09
Pruduct group id	G2A_20230818T081611_042589_N05.09
Product type	S2MSI2A
Publication date	2023-08-18T15:30:21.439Z
Relative orbit number	121
S3Path	/eodata/Sentinel-2/MSI/L2A/2023/08/18/S2A_MSIL2A_20230818T081611_N0509_R121_T37SBA_20230818T125657.SAFE
Tile id	37SBA

EK 4. GHG Conversion Factors for Company Reporting-2024



EK 5. Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu

	TÜRKİYE ELEKTRİK ÜRETİMİ VE ELEKTRİK TÜKETİM NOKTASI EMİSYON FAKTÖRLERİ BİLGİ FORMU	Doküman No	ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.01
		Revizyon / Yayın Tarihi	12.03.2024

Hesaplama Dönemi	Hesaplama Yayım Tarihi	Hesaplama Revizyon No
2022	06.12.2024	00

Amaç:
Yıllık olarak hesaplanan Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörlerinin bilgilendirilmesi.

Kapsam:
Bu bilgi formunda Türkiye Geneli Elektrik Üretimi Emisyon Faktörleri, Elektrik Santralleri için Yakıtlara Göre Elektrik Üretim Emisyon Faktörleri ve Tüketim Noktasına Göre Elektrik Emisyon Faktörlerinin ilgili yıl için hesaplanan değerleri yer almaktadır.

Hesaplama Metodolojisi:
Uluslararası Enerji Ajansı'nın "Emisyon Faktörleri 2021" çalışmasının "Veri Tabanı Dokümantasyonu" nda yer alan metodoloji esas alınmıştır.

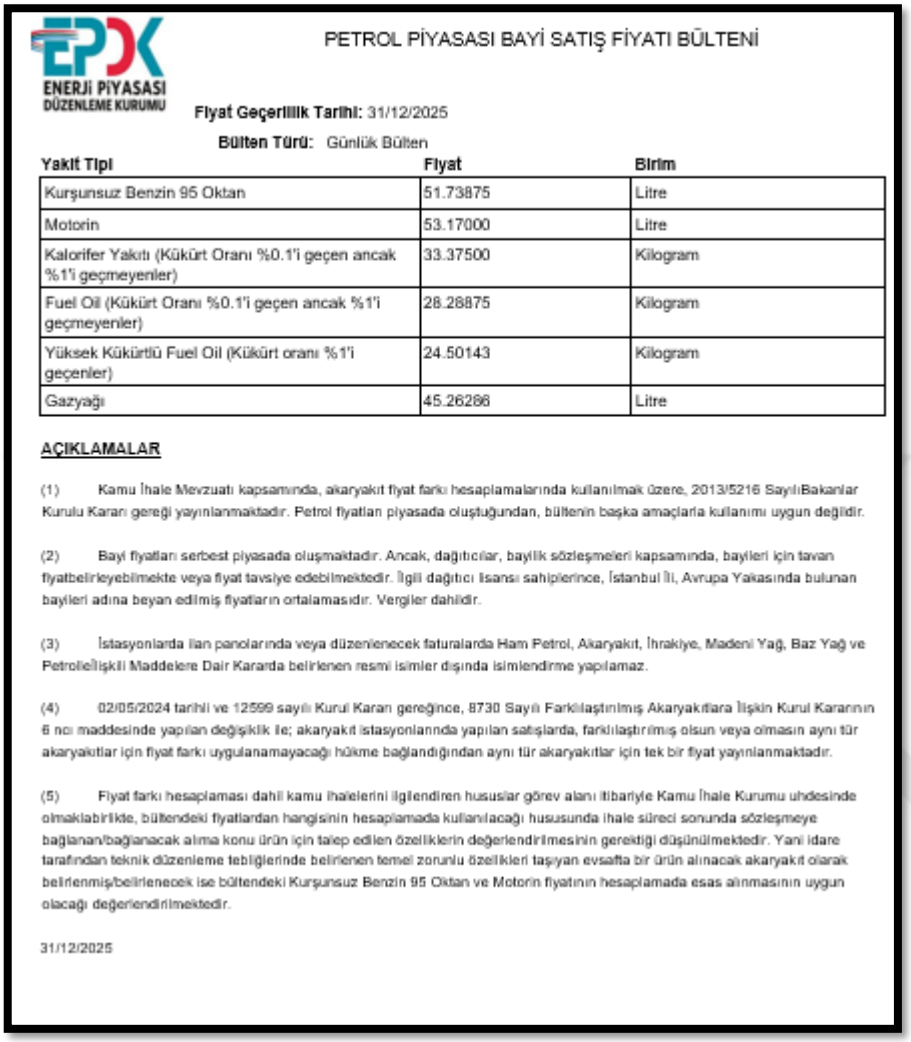
Veri Seti:
1. TEİAŞ Türkiye elektrik üretim-tüketim ve kayıpları istatistikleri,
2. Türkiye'nin Ulusal Sera Gazı Envanter Raporu kapsamında EVÇED tarafından hazırlanan Ortak Raporlama Formatı-Common Reporting Format (CRF) hesap tablolarında yer alan sadece elektrik üretimine ait ve birleşik-ısı güç sistemlerinde elektrik üretimine ait emisyon değerleri ve
3. İthal edilen elektriğin emisyon yoğunluğunu hesaplamak amacıyla, Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından yayımlanan ülkelere ait elektrik üretimi emisyon yoğunluğu değerleri kullanılmıştır.

Elektrik Üretimi Emisyon Faktörü:

Faktör Türü	Yılı	Değeri (tCO_2/MWh)	Değeri (tCO_2-eşd./MWh)
Türkiye Geneli Elektrik Üretimi Emisyon Faktörleri	2022	0,438	0,442

Türkiye Geneli Elektrik Üretimi Emisyon Faktörleri, Türkiye'deki elektrik santrallerinin ortalama olarak birim brüt elektrik üretimi başına salınan sadece CO_2 ve CO_2 eşleniği cinsinden toplam sera gazı emisyonlarının miktarını temsil etmektedir.

EK 6. Petrol piyasası aylık ortalama bayi satış fiyatı bülteni



ENERJİ PİYASASI DÜZENLEME KURUMU

PETROL PİYASASI BAYİ SATIŞ FİYATI BÜLTENİ

Fiyat Geçerlilik Tarihi: 31/12/2025

Bülten Türü: Günlük Bülten

Yakıt Tipi	Fiyat	Birim
Kurşunsuz Benzin 95 Oktan	51.73875	Litre
Motorin	53.17000	Litre
Kalorifer Yakıtı (Kükürt Oranı %0.1'i geçen ancak %1'i geçmeyenler)	33.37500	Kilogram
Fuel Oil (Kükürt Oranı %0.1'i geçen ancak %1'i geçmeyenler)	28.28875	Kilogram
Yüksek Kükürtlü Fuel Oil (Kükürt oranı %1'i geçenler)	24.50143	Kilogram
Gazyağı	45.26286	Litre

AÇIKLAMALAR

(1) Kamu İhale Mevzuatı kapsamında, akaryakıt fiyat farkı hesaplamalarında kullanılmak üzere, 2013/5216 SayılıBakanlar Kurulu Kararı gereği yayınlanmaktadır. Petrol fiyatları piyasada oluştuğundan, bültenin başka amaçlarla kullanımı uygun değildir.

(2) Bayi fiyatları serbest piyasada oluşmaktadır. Ancak, dağıtıcılar, bayilik sözleşmeleri kapsamında, bayileri için tavan fiyatbelirleyebilmekte veya fiyat tavsiye edebilmektedir. İlgili dağıtıcı lisansı sahiplerince, İstanbul İli, Avrupa Yakasında bulunan bayileri adına beyan edilmiş fiyatların ortalamasıdır. Vergiler dahildir.

(3) İstasyonlarda ilan panolarında veya düzenlenecek faturalarda Ham Petrol, Akaryakıt, İhrakiye, Madeni Yağ, Baz Yağ ve PetrolleİlişkİlMaddelere Dair Kararda belirlenen resmi isimler dışında isimlendirme yapılamaz.

(4) 02/05/2024 tarihli ve 12599 sayılı Kurul Kararı gereğince, 8730 Sayılı Farklılaştırılmış Akaryakıtlara İlişkin Kurul Kararının 6 ncı maddesinde yapılan değişiklik ile; akaryakıt istasyonlarında yapılan satışlarda, farklılaştırılmış olsun veya olmasın aynı tür akaryakıtlar için fiyat farkı uygulanamayacağı hükme bağlandığından aynı tür akaryakıtlar için tek bir fiyat yayınlanmaktadır.

(5) Fiyat farkı hesaplaması dahil kamu ihalelerini ilgilendiren hususlar görev alanı itibariyle Kamu İhale Kurumu uhdesinde olmaklabirlikte, bültendeki fiyatlardan hangisinin hesaplamada kullanılacağı hususunda ihale süreci sonunda sözleşmeye bağlanan/bağlanacak alıma konu ürün için talep edilen özelliklerin değerlendirilmesinin gerektiği düşünülmektedir. Yani idare tarafından teknik düzenleme tebliğlerinde belirlenen temel zorunlu özellikleri taşıyan evsafta bir ürün alınacak akaryakıt olarak belirlenmiş/belirlenecek ise bültendeki Kurşunsuz Benzin 95 Oktan ve Motorin fiyatının hesaplamada esas alınmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

31/12/2025

ÖZGEÇMİŞ

Lisans **:** (2011-2015), Anadolu Üniversitesi, İşletme Bölümü

Yüksek Lisans **:** (2017-2019), İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Denizel Çevre Ana Bilim Dalı

Doktora **:** (2020-2026), İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Denizel Çevre Ana Bilim Dalı

Bilimsel etkinlikleri **:** Bora A.G., Usluer H.B., Savun B., Büyüksalih G., Gazioğlu C. (2026). Reducing the carbon footprint of hydrographic surveys using satellite-derived bathymetry and machine learning. Ships and Offshore Structures, 1-23, https:doi.org/10.1080/17445302.2026.2648806

Bora A.G., Usluer H.B., Gazioğlu C. (2025). Satellite batyhmetry detection of Al Khoms Port within the scope of Türkiye-Libya Maritime Policies. International Journal of Environment and Geoinformatics, 12(4), 432-439. https://dx.doi.org/10.26650/ijegeo.1577164

Usluer H.B., Bora A. G., Çakmak E., Arslan A. (2023). A proposed emergency response site selection for preventing pollution and collision effects using neutrosophic evaluation based on distance from average solution method and a numerical application in the Strait of Canakkale (Dardanelles). Ocean Engineering, 286, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115484

Usluer H.B., Bora A.G., Gazioğlu, C. (2022). What if the Independenta or Nassia tanker accidents had happened in the Strait of Canakkale (Dardanelle)?. Ocean Engineering, 260, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111712

Usluer H.B., Gazioğlu C., Bora, A.G. (2020). Simulation of marine pollution from a tanker accident at the Canakkale Strait (Dardanelle). 6th International Conference on Environmental Science and Technology- ICOEST, 21-25 October 2020, Belgrade, Serbia.

Usluer H.B., Bora A.G., Dayan H. (2019). The Atlas of Ali Macar Reis. International Monaco Symposium on Historical Approach for Measuring and Protecting of World Oceans and Waters, 20-21 June 2019, Monaco, France.

Doktora Tezi İle İlgili Yayınlanan Makale

SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES
https://doi.org/10.1080/17445302.2026.2648806

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Check for updates

Reducing the carbon footprint of hydrographic surveys using satellite-derived bathymetry and machine learning

Ali Gökhan Bora [a], Hasan Bora Usluer [b,c], Başak Savun [a], Gürcan Büyüksalih [a] and Cem Gazioğlu [a]

[a]Institute of Marine Science and Management, Istanbul University, Istanbul, Türkiye; [b]Maritime Vocational School, Galatasaray University, Istanbul, Türkiye; [c]Department of Maritime Business Management, Piri Reis University, Istanbul, Türkiye

ABSTRACT

Hydrographic surveys are essential for safe navigation and coastal management; however, conventional vessel-based methods are fuel-intensive and produce significant carbon emissions. This study assesses the carbon footprint of hydrographic surveys in Türkiye and evaluates Satellite-Derived Bathymetry (SDB) combined with machine learning as a low-carbon alternative. Annual emissions from the hydrographic fleet of Istanbul University's Institute of Marine Sciences and Management are estimated at 3850 tCO_2e. Bathymetric data derived from Sentinel-2 imagery were processed using machine learning models including KNN, RF, SVM, and LR. Case studies in Samsun (Black Sea), Izmir Bay (Aegean Sea), and Iskenderun Bay (Mediterranean Sea) showed strong agreement between SDB outputs and in situ measurements ($R^2 \geq 0.98$; RMSE: 0.55–0.89 m). Results confirm compliance with IHO S-44 standards and demonstrate that SDB is cost-effective and significantly less carbon-intensive than traditional methods, supporting sustainable hydrography.

ARTICLE HISTORY
Received 14 October 2025
Accepted 8 March 2026

KEYWORDS
Carbon footprint; sustainability; satellite derived bathymetry; machine learning; coastal management; cost analysis

1. Introduction

Sustainability is now recognized as one of the fundamental pillars of global policy and scientific discourse, encompassing not only the rational use of natural resources but also the preservation of ecosystems and socioeconomic development models that do not jeopardize the needs of future generations (World Commission on Environment and Development 1987; Robert et al. 2005; Sachs et al. 2024). At the heart of this conceptual framework is the carbon footprint, which measures greenhouse gas (GHG) emissions resulting from human activities and serves as a basic reference indicator for monitoring the effects of climate change. The Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) has introduced standardized methodologies for use in national reporting processes through its Guide to National Greenhouse Gas Inventories, while the Greenhouse Gas Protocol (World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development 2004) has developed a comprehensive accounting system at the institutional level that includes direct (Scope 1), indirect (Scope 2), and other indirect (Scope 3) sources. When considered together, these frameworks form the scientific and institutional backbone necessary to combat climate change and play a guiding role in achieving global goals (Intergovernmental Panel on Climate Change 2006; Pandey et al. 2011).

On a global scale, many governments and international organizations have declared net zero targets in line with their commitments under the Paris Agreement (United Nations 2015), which aims to limit the global temperature increase to below 2°C, preferably 1.5°C, compared to pre-industrial levels. The European Union plans to achieve climate neutrality by 2050 thanks to the strategic roadmap supported by the European Green Deal and the 'Fit for 55' package (European Commission 2019). Similarly, the United States has committed to net zero by 2050, China has set this target as 2060, and Japan and South Korea have announced 2050 as their official target. Alongside national strategies, the International Maritime Organization's (IMO) Strategy 2050 aims to reduce carbon intensity by at least 70% compared to 2008 levels, driving a global transformation with direct implications for hydrography and marine sciences. These developments highlight the growing awareness that all sectors, including hydrography, must contribute to the global net-zero emissions vision (International Maritime Organization 2023).

Türkiye, which has a geostrategic location at the intersection of Europe and Asia and is surrounded by the Black Sea, the Aegean Sea and the Mediterranean Sea, has committed to achieving its net zero emissions target by 2053, as outlined in its Long-Term Climate

CONTACT Ali Gökhan Bora aligokhanbora@gmail.com Institute of Marine Sciences and Management, Istanbul University, Istanbul, Türkiye
© 2026 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
DENİZ BİLİMLERİ VE İŞLETMECİLİĞİ ENSTİTÜSÜ

TEZ BENZERLİK RAPORU UYGUNLUK FORMU

ÖĞRENCİNİN ADI SOYADI	**: ALİ GÖKHAN BORA**
ÖĞRENCİ NO	**3002190006**
ÖĞRETİM YILI	**: 2025-2026**
ANABİLİM DALI / BİLİM DALI	**: DENİZEL ÇEVRE**
PROGRAM TÜRÜ	**: YÜKSEK LİSANS ☐ DOKTORA X**
TEZ DANIŞMANI ÜNVANI ADI SOYADI	**: PROF.DR. CEM GAZİOĞLU**
II. TEZ DANIŞMANI ÜNVAN ADI SOYADI	**: DOÇ.DR.HASAN BORA USLUER**
TEZ BAŞLIĞI	**: SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ: SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ**

DENİZ BİLİMLERİ VE İŞLETMECİLİĞİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,

Yukarıda başlığı verilen tez çalışmamın Kapak sayfası, Türkçe ve İngilizce özet, giriş ve amaç, genel bilgiler, materyal-metot, bulgular, tartışma, sonuç ve kaynaklar bölümlerinden oluşan toplam ..135.. sayfalık kısmına ilişkin, **30./04./2026** tarihinde Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsünün kullandığı TURNİTİN programı ile, *Lisansüstü Tezlere ait Benzerlik Raporlarının Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Uygulama Esaslarının* 5inci madde ikinci fıkrasında belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış nihai rapora göre benzerlik oranı % ..9.. 'dir.

Tezimin benzerlik oranı, *06/122017 tarih ve 20 sayılı Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü Yönetim Kurul Kararıyla* Tezin intihal kapsamı dışında değerlendirilmesi için kabul edilmiş olan üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır.

İntihal programı ile raporlanan Tezime ait Benzerlik oranım Üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu beyan ederim.

Gereğini arz ederim.

İmza
Öğrenci Ad-Soyadı
Tarih: …30/.04./.2026….

EK: TURNİTİN Benzerlik Nihai Raporu ilk sayfa çıktısı

Ali Gökhan BORA

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR / UYGUN DEĞİLDİR

PROF.DR. CEM GAZİOĞLU

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM VE ÖĞRETİM YÖNETMELİĞİ (08.09.2016/29825)
(Yüksek Lisans) MADDE 36 – (2) Tezle ilgili benzerlik ön incelemesi, danışmanın bilgisi dahilinde öğrenci ile birlikte Üniversitenin kabul ettiği yazılım programı kullanılarak yapılır. Enstitü, söz konusu teze ilişkin intihal yazılım programı nihaî raporunu alarak danışmana ve jüri üyelerine gönderir. Rapordaki verilerde veya sınav jüri üyesi/üyelerinin somut kanıtlarla belgeledikleri verilere göre gerçek bir intihalin tespiti halinde; tez, gerekçesi ile birlikte, karar verilmek üzere enstitü yönetim kuruluna gönderilir.
(Doktora) MADDE 50 – (4) Öğrenci, doktora tezinin savunmasından önce tezini, düzeltme verilen tezlerde ise düzeltilmiş tezini danışmanına sunar. Tezle ilgili benzerlik ön incelemesi, danışmanın bilgisi dahilinde öğrenci ile birlikte Üniversitenin kabul ettiği yazılım programı kullanılarak yapılır. Enstitü, söz konusu teze ilişkin intihal yazılım programı nihaî raporunu alarak danışmana ve jüri üyelerine gönderir. Rapordaki verilerde veya sınav jüri üyesi/üyelerinin somut kanıtlarla belgeledikleri verilere göre gerçek bir intihalin tespiti halinde; tez, gerekçesi ile birlikte, karar verilmek üzere enstitü yönetim kuruluna gönderilir

SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ

Yazar Ali Gökhan BORA

Gönderim Tarihi: 30-Nis-2026 08:18ÖS (UTC+0300)
Gönderim Numarası: 2920465081
Dosya adı: BAT_METR_RET_M_SI_SULARDA_MAK_NE_RENMES_LE_DO_RULUK_ANAL_Z.docx (8.03M)
Kelime sayısı: 28179
Karakter sayısı: 193225

SÜRDÜRÜLEBİLİR HİDROGRAFİK ÖLÇÜMLER İÇİN UYDU TABANLI BATİMETRİ ÜRETİMİ SIĞ SULARDA MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE DOĞRULUK ANALİZİ

ORİJİNALLİK RAPORU

%9	%7	%4	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%2
2	Submitted to University of Western Ontario Öğrenci Ödevi	%1
3	www.openaccess.hacettepe.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1
4	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	dokumen.tips İnternet Kaynağı	<%1
6	cdn.istanbul.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
7	Submitted to University of the Aegean Öğrenci Ödevi	<%1
8	Submitted to University College London Öğrenci Ödevi	<%1
9	Submitted to Universiti Teknologi Malaysia Öğrenci Ödevi	<%1
10	gcris.ktun.edu.tr	