

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLERE SAHİP UYDU GÖRÜNTÜLERİ
YARDIMIYLA ZARARLI ALG OLUŞUMLARININ TESPİTİ VE
İZLENMESİ

EMİN YAŞAR AFACAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ ve COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. İSMAİL ÇÖLKESEN

TEMMUZ 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLERE SAHİP UYDU
GÖRÜNTÜLERİ YARDIMIYLA ZARARLI ALG
OLUŞUMLARININ TESPİTİ VE İZLENMESİ

EMİN YAŞAR AFACAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ ve COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
PROGRAMI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. İSMAİL ÇÖLKESEN

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DETECTION AND MONITORING OF HARMFUL
ALGAE FORMATIONS USING SATELLITE IMAGES
WITH DIFFERENT RESOLUTIONS**

EMİN YAŞAR AFACAN

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
GEODESY AND GEOGRAPHICAL INFORMATION
TECHNOLOGIES PROGRAM**

ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. İSMAİL ÇÖLKESEN

JULY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/06/2025 tarih ve 2025/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/07/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emin Yaşar AFACAN'ın tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. İsmail ÇÖLKESEN

ÜYE

: Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK

ÜYE

: Doç. Dr. Emrehan Kutluğ ŞAHİN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



Rahmetli

babam

Muddalip AFACAN'a

ÖZET

Su, yaşamın en temel kaynağı olmakla birlikte yeryüzünde de en fazla bulunan maddelerden biridir. Suyun oluşturduğu sulak alanlar ise, biyoçeşitlilik açısından en zengin ekosistemler arasında yer alır. Ancak özellikle son yüzyılda, başta insan etkisi olmak üzere çeşitli doğal ve yapay etkenler, sulak alanlar üzerindeki çevresel baskıyı giderek artırmıştır. Bu nedenle, su kalitesinin izlenmesi hem ekosistemlerin sürdürülebilirliği hem de toplum sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Son yıllarda artan kentleşme, sanayi faaliyetleri, iklim değişikliği ve kıyısız alanların yoğun kullanımı Marmara Denizi gibi çevresel baskıya açık, yarı kapalı deniz sistemlerinde ciddi kirlilik sorunlarına yol açmıştır. 2021 yılında Marmara Denizi'nde gözlenen müsilaj olayı, bu çevresel bozulmaların bölgesel düzeydeki en çarpıcı örneklerinden biri olarak literatüre yansımıştır.

Bu çalışmada, Marmara Denizi'ndeki uzun vadeli su kalitesi değişimi, önemli bir biyolojik gösterge olan klorofil-a konsantrasyonu temel alınarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, uzaktan algılama teknikleri ve bulut tabanlı analiz altyapısı kullanılarak mekânsal ve zamansal değişimlerin ortaya konması amaçlanmıştır.

İzlenen yöntem kapsamında, öncelikle Sentinel-2 L2A uydu görüntüleriyle Marmara Denizi'nin sınırı belirlenmiş; bu sınır temel alınarak körfezler ve kıyı şeritlerini kapsayan 10 alt bölge tanımlanmıştır. Bu ayırım, mekânsal değişimlerin daha detaylı analiz edilebilmesi ve kıyı ile körfez bölgelerinin farklı çevresel baskılara verdikleri tepkileri karşılaştırabilmek amacıyla yapılmıştır. Tanımlanan bu yapıya dayalı olarak, 2003–2022 dönemine ait uydu verileriyle klorofil-a konsantrasyonu ve 11 farklı spektral indeks üzerinden su kalitesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, 1.000 m çözünürlüklü Terra tabanlı MODIS ve 500 m çözünürlüklü Aqua tabanlı MYD09GA.061 koleksiyonları kullanılmış; Nisan–Eylül dönemine ait aylık ve yıllık ortalamalar hesaplanmıştır. Elde edilen çıktılar, Marmara Denizi geneli ve alt bölgeler düzeyinde mekânsal ve zamansal olarak değerlendirilmiş, değişkenler için en yüksek ve en düşük değerlere sahip yılların haritaları oluşturulmuştur. Tüm analiz süreci, yüksek işlem gücü ve çevrimiçi erişilebilirliğiyle öne çıkan Google Earth Engine platformu üzerinden yürütülmüştür. Bulgular, Marmara Denizi'nde klorofil-a ortalamasının 2010'da en yüksek, 2017'de ise en düşük seviyede olduğunu göstermiş; özellikle İzmit, Gemlik, Bandırma ve Erdek Körfezlerinde yıllar içinde belirgin kirlilik dalgalanmaları tespit edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, klorofil-a konsantrasyonu ile spektral indeksler arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. En güçlü ilişki Color Index ile elde edilmiş ve bu indeks için kübik modelde R^2 değeri 0.555 olarak hesaplanmıştır. Diğer indeksler ise bölgelere göre değişmekle birlikte, genellikle zayıf ya da istatistiksel olarak anlamlı olmayan ilişkiler sunmuştur.

Bu tez çalışması, Marmara Denizi'nin çevresel durumunun uzun vadeli ve orta çözünürlüklü uydu verileriyle izlenebileceğini ortaya koyarken; Google Earth Engine platformunun sunduğu bulut tabanlı işlem gücü sayesinde, geliştirilen yöntemin farklı su kütlelerine de kolaylıkla uyarlanabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçların, müsilaj gibi çevresel olayların erken tespiti ve su kalitesi yönetimine yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Su Kalitesi Analizi, Alg, Klorofil-a, Marmara Denizi, Google Earth Engine, Zamansal Değişim

ABSTRACT

Water is not only the most fundamental source of life but also one of the most abundant substances on Earth. Wetlands formed by water are among the most important and biologically diverse ecosystems. Especially over the past century, various natural and anthropogenic factors—primarily human impact—have increasingly exerted environmental pressure on these areas. Therefore, monitoring water quality is critically important for both the sustainability of ecosystems and the protection of public health.

In recent years, increasing urbanization, industrial activities, climate change, and the intensive use of coastal areas have caused severe pollution problems in semi-enclosed marine systems such as the Sea of Marmara. The mucilage event observed in the Sea of Marmara in 2021 has been documented in the literature as one of the most striking examples of such environmental degradation at the regional level.

In this study, long-term water quality changes in the Sea of Marmara were evaluated based on chlorophyll-a concentration. The study aimed to reveal spatial and temporal changes using remote sensing techniques and cloud-based analysis infrastructure.

As part of the applied methodology, the boundary of the Sea of Marmara was first determined using Sentinel-2 L2A satellite imagery. Based on this boundary, 10 sub-regions covering gulfs and coastal zones were defined. The aim of these regions is to obtain a more detailed analysis of spatial changes in the Sea of Marmara and to reveal the different responses of coastal and gulf areas to environmental pressures. A comprehensive dataset was constructed using long-term satellite observations from the period 2003–2022. To estimate chlorophyll-a concentration, the Terra-based MOD09GA.006 collection with 1.000 m spatial resolution and the Aqua-based MYD09GA.061 collection with 500 m spatial resolution was utilized. Thus, 11 different spectral indices related to water quality are calculated. Monthly and annual average values were calculated for the April–September period within the specified study timeframe. The outputs were analyzed for spatial and temporal trends. Also, thematic maps created showing min-max values of each variable. Analyses were conducted using the Google Earth Engine platform. The findings revealed that the highest average chlorophyll-a concentration occurred in 2010, while the lowest was observed in 2017. Moreover, significant pollution fluctuations over the years were identified in regions such as the Gulfs of İzmit, Gemlik, Bandırma, and Erdek. In the final stage of the study, statistical evaluations were conducted to examine the relationships between estimated chlorophyll-a concentration and the calculated spectral indices. Among all indices, the strongest relationship with chlorophyll-a was found for the Color Index, with the highest R^2 value of 0.555 obtained in the cubic model. The other indices revealed generally weak or statistically insignificant relationships at varying levels depending on the region.

This thesis demonstrates that the environmental status of the Marmara Sea can be monitored in the long-term using medium resolution satellite data. It also highlights that the developed methodology can be easily adapted to other water bodies thanks to the Google Earth Engine platform. The results of this study will contribute to the early detection of environmental phenomena such as mucilage and the development of decision support systems for water quality management.

Keywords: Water Quality Analysis, Algae, Chlorophyll-a, Sea of Marmara, Google Earth Engine, Temporal Change

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yol gösterici olan, akademik gelişimime büyük katkı sağlayan ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. İsmail ÇÖLKESEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her daim yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle beni bugünlere getiren babam Muddalip AFACAN ve annem Şadiye AFACAN'a minnettarım. Onların sabrı, sevgisi ve fedakârlığı olmasaydı bu noktaya gelmem mümkün olamazdı.

Bu süreçte gösterdiği anlayış, sabır ve desteğiyle bana güç veren, her an yanımda olduğunu hissettiren sevgili eşim Nurbanu AFACAN'a gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmaya zaman ayırabilmem için her türlü kolaylığı sağlayan, destek ve anlayışlarıyla yanımda olan kayınvalidem Nuray ÇOLAK ve kayınpederim Prof. Dr. Rifat ÇOLAK'a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	4
1.2. Metodoloji	5
1.3. Literatür Çalışması	7
1.3.1. Klorofil-a Tespiti ile İlgili Çalışmalar	8
1.3.2. İndeksler ile İlgili Çalışmalar	11
2. UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİNİN SU KALİTESİ TAKİBİNDE KULLANIMI	15
2.1. Su Kalitesinin Önemi ve İzlenmesi	15
2.2. Uzaktan Algılama Verilerinin Su Kalitesi Analizinde Kullanımı	18
2.3. Klorofil-a Tahmininde Kullanılan Yöntemler	25
2.4. Su Kalitesi Analizinde Kullanılan Spektral İndeksler	28
2.5. GEE Platformu ve Değişim Analizlerinde Kullanımı	33
3. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ	38
3.1. Çalışma Alanı	38
3.2. Veri Seti	40
4. UYGULAMA	43
4.1. Marmara Denizi'nin Yüzey Alanının Çıkarılması	43
4.2. Marmara Denizi'nde Klorofil-a Değişimlerinin Zamansal Olarak İzlenmesi	46
4.3. Marmara Denizi'nin Spektral İndeksler Yardımıyla Zamansal Olarak İzlenmesi	70
4.4. Klorofil-a ile İndeks Değerleri Arasındaki İlişkilerin Analizi	86
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	100
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	101
EKLER	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

λ	: Spektral Bandın Merkez Dalga Boyu
AFAI	: Adjusted Floating Algae Index
AMEI	: Automated Mucilage Extraction Index
AWEI	: Automated Water Extraction Index
BNDBI	: The Baseline Normalized Difference Bloom Index
CI	: Color Index
DN	: Digital Number
EOS	: Earth Observing System
EVI	: Enhanced Vegetation Index
FAI	: Floating Algae Index
GEE	: Google Earth Engine
IDE	: Integrated Development Environment
km ³	: kilometreküp
m	: Metre
m ³	: Metreküp
mg	: Miligram
MI	: Mucilage Index
MNDWI	: Modified Normalized Difference Water Index
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	: MultiSpectral Instrument
NDAVI	: Normalized Difference Aquatic Vegetation Index
NDCI	: Normalized Difference Chlorophyll Index
NDTI	: Normalized Difference Turbidity Index
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NDWI _{Gao}	: Normalized Difference Water Index (Gao)
NDWI _{McFeeters}	: Normalized Difference Water Index (McFeeters)
NIR	: Yakın Kızılötesi
nm	: Nanometre
OC3M	: Ocean Color 3-bands MODIS
R ²	: Determinasyon Katsayısı
R _{rs}	: Remote Sensing Reflectance
RF	: Random Forest
RVF	: Rift Valley Fever
SABI	: Surface Algal Bloom Index
SWIR	: Kısa Dalga Kızılötesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1: Tez çalışması kapsamında yürütülen işlemler ve iş akış şeması.	7
Şekil 2.1: Uzaktan algılama sisteminin bileşenleri.	19
Şekil 2.2: Elektromanyetik dalga.	19
Şekil 2.3: Elektromanyetik spektrum.	20
Şekil 2.4: Bitki, toprak ve suyun spektral yansıtım eğrileri.	20
Şekil 2.5: Suyun spektral yansıtım eğrisi.	22
Şekil 2.6: Su kütlelerinde yansıma çeşitleri.	23
Şekil 2.7: Klorofilin absorpsiyon spektrumu.	25
Şekil 2.8: GEE kod editörü ara yüzü.	34
Şekil 3.1: Marmara Denizi ve çevresindeki yerleşim alanlarını gösteren genel konum haritası.	38
Şekil 4.1: Su sınırı belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması.	44
Şekil 4.2: Analizlerde kullanılan Marmara Denizi yüzey sınırı.	45
Şekil 4.3: Marmara Denizi için oluşturulan 10 alt bölge ve genel sınır haritası.	45
Şekil 4.4: Kalite ve bulut filtreleme öncesi (a) ve sonrası (b).	48
Şekil 4.5: Marmara Denizi geneli için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	56
Şekil 4.6: İstanbul kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	57
Şekil 4.7: İzmit Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2003 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	58
Şekil 4.8: Yalova kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	59
Şekil 4.9: Gemlik Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	60
Şekil 4.10: Bursa kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	61
Şekil 4.11: Bandırma Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	62
Şekil 4.12: Erdek Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	63
Şekil 4.13: Çanakkale Boğazı ve kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	64

Şekil 4.14: Tekirdağ kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	65
Şekil 4.15: Marmara Denizi ortası için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	66
Şekil 4.16: Marmara Denizi geneli ve 10 alt bölge için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).	67
Şekil 4.17: Körfez bölgeleri için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).	68
Şekil 4.18: Kıyı şeritleri için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).	68
Şekil 4.19: Marmara Denizi geneli ve ortası için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).	69
Şekil 4.20: Marmara Denizi geneli için, AFAI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	73
Şekil 4.21: Marmara Denizi geneli için, AMEI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2022 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	74
Şekil 4.22: Marmara Denizi geneli için, CI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2020 (a:en düşük) ve 2010 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	75
Şekil 4.23: Marmara Denizi geneli için, FAI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	76
Şekil 4.24: Marmara Denizi geneli için, MI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2009 (a:en düşük) ve 2013 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	77
Şekil 4.25: Marmara Denizi geneli için, NDAVI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2009 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	78
Şekil 4.26: Marmara Denizi geneli için, NDTI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2003 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	79
Şekil 4.27: Marmara Denizi geneli için, NDVI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	80
Şekil 4.28: Marmara Denizi geneli için, NDWI _{Gao} zaman serisi grafiği (üstte) ile 2006 (a:en düşük) ve 2010 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	81
Şekil 4.29: Marmara Denizi geneli için, NDWI _{McFeeters} zaman serisi grafiği (üstte) ile 2020 (a:en düşük) ve 2003 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	82
Şekil 4.30: Marmara Denizi geneli için, SABI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.	83

Şekil 4.31: Spektral indeksler arasındaki R^2 korelasyon matrisi.	85
Şekil 4.32: Spektral indeksler ile Klorofil-a arasındaki R^2 korelasyon matrisi.	88
Şekil 4.33: CI ve klorofil-a'nın aylık değerlerine ait zaman serisi grafikleri.	89
Şekil 4.34: CI ve klorofil-a'nın yıllık değerlerine ait zaman serisi grafikleri.	90



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Küresel su dağılım tablosu.	1
Tablo 2.1: Marmara kıyı suları ötrofikasyon kriterleri.	17
Tablo 2.2: Çalışmada kullanılan spektral indeksler, formülleri ve kaynakları.	33
Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan verilerin özellikleri ve tezdeki kullanım amaçları.	42
Tablo 4.1: Bit dizileri ve kalite kodları.	47
Tablo 4.2: Klorofil-a hesabında kullanılan algoritmalar.	49
Tablo 4.3: CI algoritmasında kullanılan dalga boyu merkezlerinin karşılaştırılması.	50
Tablo 4.4: s_w , a_1 , b_1 , a_2 ve b_2 parametrelerine ait spektral bantlara özgü katsayılar.	51
Tablo 4.5: OC3M algoritmasında kullanılan dalga boyu merkezlerinin karşılaştırılması.	52
Tablo 4.6: Kalite ve bulut maskesinde kullanılan bit tanımları.	71

1. GİRİŞ

Dünya üzerindeki yaşamın devamı ve çevresel dengenin korunması büyük ölçüde suyun varlığına bağlıdır. Bu temel bileşen; yalnızca biyolojik, hidrolojik ve iklimsel süreçleri değil, gezegenin fiziksel görünümünü de etkiler. Uzaydan bakıldığında, Dünya yüzeyinin yaklaşık %75'inin sıvı ve donmuş formlardaki su kütleleriyle kaplı olduğu görülmektedir. Bu yönüyle su, Dünya'yı Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenlerden ayıran ayırt edici bir bileşendir.

Dünya üzerindeki toplam su hacmi yaklaşık 1,39 milyar kilometreküp olup, bunun yaklaşık %96,5'i küresel okyanuslarda yer almaktadır. Geriye kalan kısmın yaklaşık %1,7'si, kutup buzulları, dağ buzulları ve kalıcı kar örtüsü gibi donmuş rezervuarlarda depolanmıştır. Benzer şekilde, yaklaşık %1,7'lik bir başka kısmı da yer altı suları, göller, akarsular ve toprak nemi şeklinde bulunmaktadır. Toplam suyun yalnızca on binde biri (%0,001) atmosferde su buharı hâlinde yer almakta olup, miktar olarak oldukça düşük olmasına rağmen iklim sistemleri ve hava olayları üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Su buharı, güçlü bir sera gazı olarak atmosferde taşınırken, gizli ısı (latent heat) transferi yoluyla iklim dinamiklerini doğrudan etkilemektedir [Web 1]. Dünya'daki toplam suyun hangi kaynaklarda ve ne oranla bulunduğuyla ilişkin detaylar **Tablo 1.1**'de sunulmuştur.

Tablo 1.1: Küresel su dağılım tablosu [Gleick, 1996].

Tahmini Küresel Su Dağılımı	Hacim (1000 km ³)	Toplam Suyun Yüzdesi (%)	Tatlı Su (%)
Okyanuslar, Denizler ve Körfezler	1,338,000	96.5	-
Buz örtüleri, Buzullar ve Kalıcı Kar	24,064	1.74	68.7
Yeraltı Suyu	23,400	1.7	-
Tatlı	(10,530)	(0.76)	30.1
Tuzlu	(12,870)	(0.94)	-
Toprak Nemi	16.5	0.001	0.05
Zemin Buzu, Sürekli Don Olan Toprak	300	0.022	0.86
Göller	176.4	0.013	-
Tatlı	(91.0)	(0.007)	0.26
Tuzlu	(85.4)	(0.006)	-
Atmosfer	12.9	0.001	0.04
Bataklı Suyu	11.47	0.0008	0.03
Nehirler	2.12	0.0002	0.006
Biyolojik Su	1.12	0.0001	0.003
Toplam	1,385,984	100.0	100.0

Suyun oluşturduğu sulak alanlar, en önemli ve biyolojik açıdan en çok çeşitliliğe sahip ekosistemlerin başında gelir [Xie vd., 2018]. Bu alanlar; yılın belirli dönemlerinde ya da sürekli olarak suyla kaplı olan, yüksek biyolojik çeşitliliğe sahip ekosistemler olup birçok bitki ve hayvan türü için yaşam alanı sağlarlar. Sulak alanlar, bu özellikleriyle sadece ekolojik değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal açıdan da büyük öneme sahiptirler. Balıkçılık, tarım, turizm ve içme suyu temini gibi faaliyetlerle yerel ekonomilere katkı sağlarken; suyun doğal yollarla filtrelenmesi yoluyla su kalitesini artırarak halk sağlığının korunmasına da hizmet ederler. Bu nedenlerle, sulak alanların korunması ve sürdürülebilir yönetimi, hem çevresel hem de insan refahı açısından kritik bir öneme sahiptir. Özetle, yaşamın gelişimi ve sürekliliği açısından suyun vazgeçilmez bir bileşen olduğu, bilimsel verilerle de desteklenen bir gerçekliktir.

Ancak özellikle son yüzyılda, başta insan faaliyetleri olmak üzere çeşitli doğal ve antropojenik etmenler, sulak alanlar üzerinde artan düzeyde baskı oluşturmakta ve bu durum, insan topluluklarını çevresel, ekonomik ve sağlık açısından ciddi sorunlarla karşı karşıya bırakmaktadır. Küresel Risk Raporu 2020'ye göre; su kirliliği ve buna bağlı diğer su sorunlarını kapsayan su krizleri, etkileri açısından dünya genelindeki en kritik ilk on risk arasında yer almaktadır. İklim değişikliği ve buna bağlı olarak gelişen küresel ısınma; atmosferik koşullarda, kara ve su ekosistemlerinde hızlı ve zaman zaman geri döndürülemez nitelikteki değişimlere yol açabilmektedir. Bu değişimlerin sulak alanlardaki yansımalarından biri de, özellikle kıyısal alanlarda sıklığı ve şiddeti giderek artan zararlı alg patlamaları (Harmful Algal Blooms: HABs) ile devamında oluşabilecek olan müsilaj olaylarıdır. Özellikle ötrofikasyon döneminden sonra ortaya çıkan ve stres altındaki fitoplankton topluluklarının neden olduğu, “deniz sümüşü” olarak da adlandırılan deniz müsilajı, küresel ısınmanın su ekosistemleri üzerindeki olumsuz yansımalarından biridir. Müsilaj ve zararlı alg patlamaları, bakteri ve virüsler için uygun bir yaşam ortamı sunmasının yanı sıra, çiçeklenme dönemlerinde sudaki çözülmüş oksijen (Dissolved Oxygen: DO) seviyelerini düşürerek, özellikle dip sularında yaşayan organizmalar üzerinde yıkıcı etkiler oluşturmakta; balıkların yumurta ve larva gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir. Ek olarak, bu olaylar yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli kayıplara yol açmakta; rekreasyon, balıkçılık ve kıyı turizmi gibi sektörlerde gelir azalmasına neden olmaktadır [Yağcı vd., 2022], [Kavzoğlu ve Göral, 2022], [Savun-Hekimoğlu ve Gazioğlu, 2021].

Nitekim 2021 yılında Marmara Denizi'nde gözlenen yaygın müsilaj oluşumu, bu sürecin bölgesel bir örneğini teşkil etmektedir. Marmara Denizi, son 20 yılda artan ve başta yoğun kentleşme, endüstriyel deşarjlar gibi antropojenik baskılar nedeniyle ciddi çevresel stres faktörlerine maruz kalmış; bu durum su kalitesinde bozulmalara ve ekolojik dengenin ciddi ölçüde zarar görmesine neden olmuştur.

Bu bağlamda; sulak alanların izlenmesi ve korunması, mekânsal dağılımlarının doğrulukla haritalanması ve su kalitesine yönelik yönetim sistemlerinin oluşturulması çevresel planlama açısından büyük önem arz etmektedir [Özdoğan vd., 2021]. Uzaktan algılama teknolojileri; su kalitesi parametrelerinin belirlenmesinde, su kirliliğinin tespitinde ve uzun vadeli izlenmesinde en etkili yöntemlerin başında gelmektedir. 1960'lı yıllardan itibaren hızla gelişen uzaktan algılama sistemleri ve bu sistemlerin temel veri ürünleri olan uydu görüntüleri, yeryüzü ve yeryüzündeki nesneler hakkında fiziksel temas gerektirmeksizin bilgi edinmeyi mümkün kılan vazgeçilmez birer araç hâline gelmişlerdir. Bu teknolojilerin başlıca uygulama alanlarından biri de sulak alan ekosistemlerinin izlenmesi ve analizidir. Uzaktan algılama tekniklerinin sulak alanlara yönelik araştırmalarda kullanılması, hem zamansal hem de konumsal değişimlerin yüksek doğrulukla analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle, başta okyanuslar ve denizler olmak üzere sulak alanlarda meydana gelen kirlilik türlerinin tespiti ve izlenmesi bu analizlerin temel hedeflerindendir. Bu tür çalışmaların amacı; seçilen bir çalışma sahasında, belirli bir zaman aralığında ya da düzenli periyotlarla (örneğin yıllık, mevsimsel veya aylık) su yüzeyindeki değişimlerin belirlenerek bu değişimlerin muhtemel nedenlerinin ve çevresel sonuçlarının ortaya konulmasıdır.

Tez kapsamında, uzaktan algılama teknolojileri kullanılarak Marmara Denizi'ne ait su kalitesi zamansal olarak izlenmiş, elde edilen veriler ışığında klorofil-a konsantrasyonundaki değişimler değerlendirilmiş ve çalışmanın sonunda bölgenin su kalitesine ilişkin mekânsal analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hesaplanan klorofil-a değerleri ile çeşitli su kalite indeksleri karşılaştırılarak aralarındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiştir.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın genel amacı, Marmara Denizi'nin uzun dönemli su kalitesi değerlendirmesini, önemli bir biyolojik gösterge olarak kabul edilen klorofil-a konsantrasyonu temelinde analiz etmektir. Marmara Denizi genelinin analizine ek olarak, özellikle kirlilik düzeyinin en yoğun olduğu İzmit ve Gemlik Körfezleri başta olmak üzere, bazı körfezler ile denize kıyısı olan illerin kıyı şeritlerindeki değişimler bölgesel düzeyde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu genel amaca yönelik olarak çalışmanın ana hedefleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Marmara Denizi'nde 2003–2022 yılları arasındaki dönemi kapsayacak şekilde klorofil-a konsantrasyonu verileri üzerinden alg artışlarını analiz ederek, genel su kalitesini değerlendirmek,
- Farklı coğrafi alt birimlerin (körfezler ve kıyı şeritleri) ayrı ayrı analizini gerçekleştirerek, zamansal bazda en fazla ve en az kirlenen bölgelerin tespit edilmesini sağlamak,
- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensöründen günlük olarak sağlanan verilerin bu tür su kalitesi analizlerinde kullanım uygunluğunu değerlendirmek ve uzun vadeli değişimlerin izlenebilirliği açısından performansını incelemek,
- Google Earth Engine (GEE) bulut tabanlı platformunun, uzun ölçekli zamansal analizlerde etkinliğini ve işlevselliğini test ederek çevresel izleme açısından potansiyelini ortaya koymak,
- Hesaplanan klorofil-a konsantrasyonu ile çeşitli su indeksleri arasındaki ilişkileri karşılaştırmalı olarak analiz etmek ve bu indekslerin klorofil-a tahmini üzerindeki açıklayıcılığını değerlendirmek,
- Elde edilen bulgular doğrultusunda, Marmara Denizi'nde çevresel bozulmaların izlenmesi ve ileriye dönük izleme sistemlerinin planlanmasına katkı sunabilecek bilimsel bir temel oluşturmak.

Yukarıda belirtilen hedefler doğrultusunda, uzaktan algılama tekniklerinin bölgesel ölçekte su kalitesinin izlenmesi ve değerlendirilmesi süreçlerinde ne derece etkili bir araç olduğu ortaya konulmaya çalışılacaktır. Elde edilen bulguların, çevresel karar alma süreçlerinde bilimsel temelli değerlendirmelere katkı sağlaması beklenmektedir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında geliştirilen analiz yapısının yalnızca Marmara Denizi

ile sınırlı kalmayıp, benzer çevresel koşullara sahip farklı deniz ve iç su ekosistemlerine de uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir model sunması beklenmektedir. Bu yönüyle çalışma, uzaktan algılama ve bulut tabanlı veri işleme teknolojilerinin çevresel yönetim süreçlerinde daha etkin ve yaygın kullanımı için önemli bir referans niteliği taşıyacaktır.

1.2. Metodoloji

Tez kapsamında, Marmara Denizi'nin uzun dönemli su kalitesinin, kilit bir biyolojik gösterge olan klorofil-a konsantrasyonu esas alınarak uzaktan algılama tabanlı zaman serisi analizleriyle değerlendirilmesi ve bölgedeki değişim desenlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Öngörülen araştırma hedeflerine ulaşmak için izlenen işlem adımları **Şekil 1.1**'de akış şeması biçiminde sunulmuştur.

Süreç, verinin edinilmesinden istatistiksel değerlendirmeye dek altı temel aşamada ilerlemiştir:

- **Veri Setlerinin Araştırılması, Seçimi ve Temini:** Günlük zaman çözünürlüğü gereksinimi nedeniyle sensör düzeyinde MODIS tercih edilmiştir. Çeşitli MODIS koleksiyonları; öncelikle klorofil-a kestirimi ile spektral indeks hesaplamalarında gerekli bantların mevcudiyeti, ardından mekânsal çözünürlük ile ideal kalitedeki piksellerin ve bulutsuz görüntülerin seçilebilmesine olanak tanıyacak şekilde karşılaştırılmış; sonuçta MODIS/Terra Ocean Reflectance Daily Global 1km MODOCGA v006 (MODOCGA.006) ile MODIS/Aqua Surface Reflectance Daily Global 1km ve 500m MYD09GA v061 (MYD09GA.061) koleksiyonları seçilmiştir. Marmara Denizi sınırının daha yüksek ayrıntıyla belirlenebilmesi için de ek olarak Sentinel-2 L2A verileri tercih edilmiştir.
- **Çalışma Alanı Sınırının Belirlenmesi ve Bölgesel Alt Birimlerin Oluşturulması:** 2021 yaz dönemine ait Marmara Denizi'ni kapsayan bulutsuz Sentinel-2 L2A görüntülerine Normalized Difference Water Index (NDWI) uygulanarak güncel deniz sınırı çıkarılmıştır. Elde edilen kıyı çizgisi, QGIS ortamında on alt bölgeye bölünmüş ve böylece körfez/kıyı ölçeğindeki analizler için alt birimler tanımlanmıştır.
- **Ön İşlemler:** Seçilen MODOCGA.006 ve MYD09GA.061 görüntülerine filtreler uygulanarak bulutsuz ve ideal kalitedeki pikseller seçilmiş, yansıma değerleri ürün

kılavuzundaki 0,0001 ölçek faktörüyle çarpılarak gerçek yansıma değerine dönüştürülmüştür. 2003-2022 dönemi için, günlük görüntülerden aylık ortalama görüntüler elde edilmiş ve bu aylık görüntüler çalışma alanına ait poligon kullanılarak kırpılmıştır.

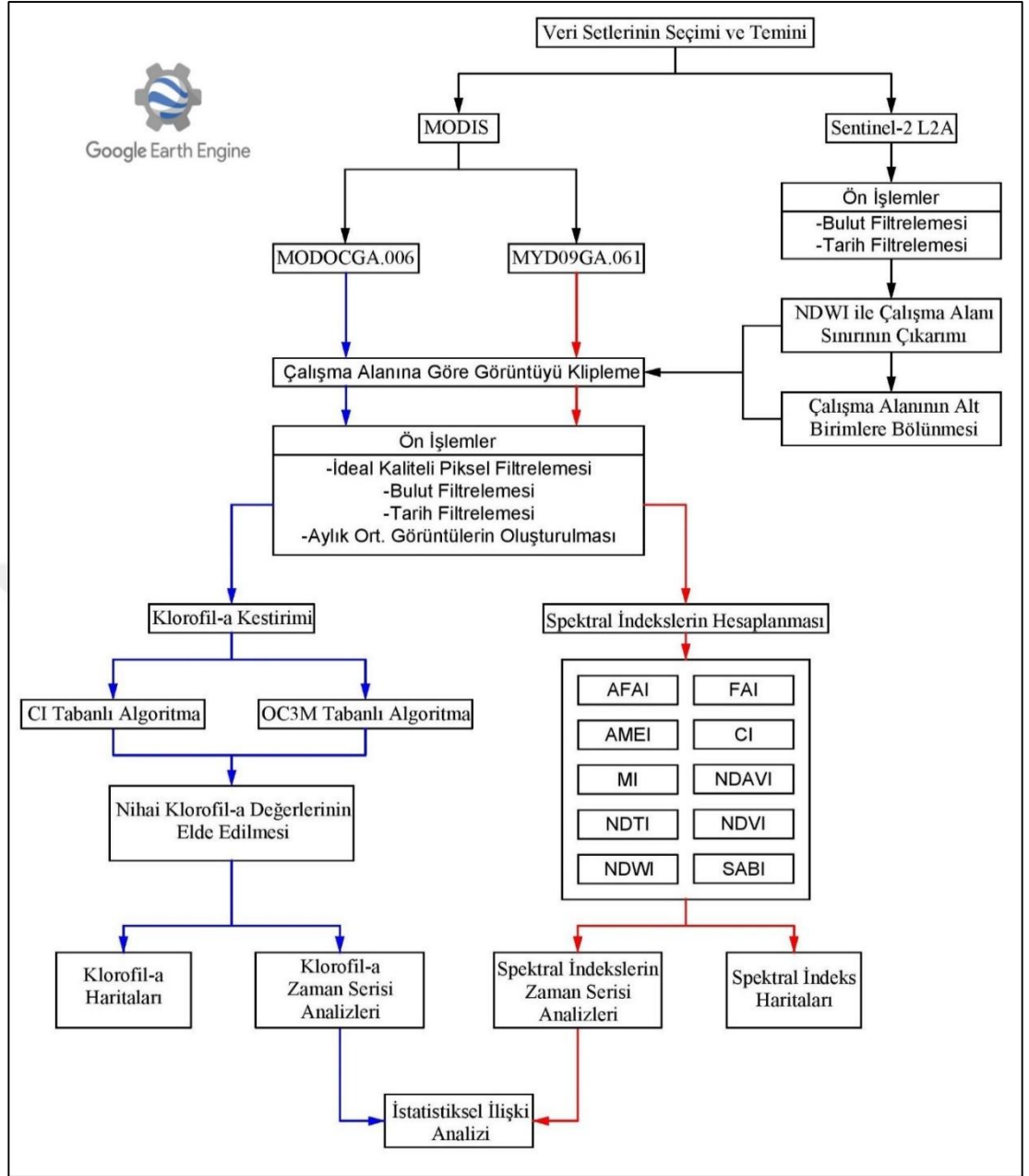
• **Klorofil-a Kestirimi:** Önişlem görmüş MODOCGA.006 koleksiyonuna ait aylık ortalama görüntülere, Color Index (CI) ve Ocean Color 3-bands MODIS (OC3M) algoritmaları uygulanarak klorofil-a değerleri elde edilmiş ve haritaları üretilmiştir.

• **Spektral İndeks Hesaplamaları:** Aynı dönemlere ait önişlem görmüş MYD09GA.061 aylık ortalama görüntülerinden;

- Adjusted Floating Algae Index (AFAI),
- Automated Mucilage Extraction Index (AMEI),
- Color Index (CI),
- Floating Algae Index (FAI),
- Mucilage Index (MI),
- Normalized Difference Aquatic Vegetation Index (NDAVI),
- Normalized Difference Turbidity Index (NDTI),
- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI),
- Normalized Difference Water Index (Gao) ($NDWI_{Gao}$),
- Normalized Difference Water Index (McFeeters) ($NDWI_{McFeeters}$),
- Surface Algal Bloom Index (SABI)

olmak üzere su kalitesi ile ilişkili 11 indeks değeri elde edilmiş ve zaman serisi grafikleri ile haritaları üretilmiştir.

• **İstatistiksel İlişki Analizi:** Farklı koleksiyonlardan üretilen aynı dönemlere ait klorofil-a değerleri ile spektral indeks değerleri arasındaki ilişkiler, SPSS yazılımı kullanılarak istatistiksel anlamlılık düzeyleri incelenmiştir.



Şekil 1.1: Tez çalışması kapsamında yürütülen işlemler ve iş akış şeması.

1.3. Literatür Çalışması

Bu çalışmada Marmara Denizi özelinde, klorofil-a konsantrasyonunun belirlenmesi ve zaman içindeki değişimlerinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, uzaktan algılama temelli yaklaşımların sunduğu avantajlardan yararlanılmış ve hem doğrudan klorofil-a tahminine odaklanan algoritmalar hem de dolaylı olarak su kalitesini temsil eden spektral indeksler değerlendirilmiştir.

Literatürde bu kapsamda geliştirilen çok sayıda yöntem, farklı optik özelliklere sahip denizel ve karasal ortamlarda test edilmiş ve çeşitli parametreler için farklı duyarlılıklar göstermiştir.

Bu çerçevede, literatür taraması iki temel alt başlık altında ele alınmıştır. İlk bölümde, doğrudan klorofil-a kestirimine yönelik geliştirilen algoritmalar ve bu algoritmaların farklı hidrolojik koşullarda gösterdiği performanslar incelenmiştir. İkinci bölümde ise, klorofil-a gibi biyolojik değişkenlerle doğrudan ya da dolaylı ilişkili olan spektral indeksler değerlendirilmektedir. Bu iki başlık, Marmara Denizi gibi yarı kapalı ve karmaşık optik özelliklere sahip sistemlerde hangi yöntemlerin daha uygun olabileceğini belirlemek açısından temel bir referans sunmaktadır.

1.3.1. Klorofil-a Tespiti ile İlgili Çalışmalar

Uzaktan algılama teknolojilerinin su kalitesi izleme süreçlerindeki kullanımını ele alan **Jerry vd. [2003]** çalışmasında; askıda katı madde, klorofil-a, su sıcaklığı, su bitkileri ve yerinde ölçüm cihazları gibi çeşitli parametreler üzerinden değerlendirmeler yapmıştır. Bu parametrelerden biri olan klorofil-a, özellikle alg yoğunluğu ve fitoplankton dağılımı açısından önem taşımaktadır. Çalışma, uzaktan algılama ile birlikte coğrafi bilgi sistemleri ve küresel konumlama sistemlerinin entegre kullanımı sayesinde, su kalitesinin mekânsal ve zamansal olarak izlenmesinde sağlanan olanaklara dikkat çekmektedir. Bu kapsamda, klorofil-a tespitiye yönelik literatürde yer alan diğer yöntemlerin anlaşılabilmesi için genel bir çerçeve sunmaktadır.

Bu bağlamdan hareketle, özellikle ötrofik ve bulanık iç sularda, klorofil-a tahmini için geliştirilen alternatif yaklaşımlar literatürde yer almaktadır. Örneğin; **Zhang vd. [2016]** tarafından önerilen The Baseline Normalized Difference Bloom Index (BNDBI), MODIS sensörünün kara ve atmosferik çalışmalar için tasarlanmış bantlarını kullanarak, geleneksel okyanus renk algoritmalarının doygunluk sorunlarını aşmayı hedefler. İndeksin algoritması, klorofil-a'yı tahmin ederken bir yandan da tasarımı gereği atmosferik etkileri azaltmaya çalışır. Farklı göllerde de test edilen indeks, yüksek bulanıklık koşullarında bile güvenilir sonuçlar sunarak literatürdeki klasik algoritmalara alternatif sağlamaktadır.

Mishra ve Mishra [2012], 665 nm ve 708 nm bantlarını kullanan Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) algoritmasını geliştirerek, bulanık ve besin

olarak zengin sularda klorofil-a tahmininde yeni bir yaklaşım sunmuştur. NDCI, hem uydu hem de saha verileriyle test edilmiş, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve istikrar sergilemiştir.

Bu tür algoritmalara ek olarak, yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin iç su sistemlerinde kullanımı üzerine yapılan çalışmalar da dikkat çekmektedir. Örneğin **Tarı ve Kıyak [2024]**, Van Gölü'nde gerçekleştirilen 1983–84, 2002 ve 2014 yıllarına ait saha ölçümlerini kullanarak, Landsat-8 OLI uydu görüntüleri ile coğrafi bilgi sistemi tabanlı ters mesafe ağırlıklandırma yönteminden elde edilen mekânsal dağılımları karşılaştırmıştır. Özellikle 2014 yılına ait saha verileri ile Landsat-8'den türetilen klorofil-a konsantrasyon değerleri karşılaştırıldığında, mavi ve yeşil bantların oranı üzerinden geliştirilen modellerin ölçüm hataları içinde kaldığı ve Van Gölü'nde klorofil-a tahmini açısından yeterli doğruluk sunduğu belirlenmiştir. Öte yandan, ters mesafe ağırlıklandırma yöntemi ile yapılan tahminlerin düşük veri yoğunluğu nedeniyle sınırlı temsil kabiliyetine sahip olduğu, buna karşın uydu verilerinin göl genelindeki dağılımı daha yüksek mekânsal çözünürlükte ve temsiliyette sunduğu ifade edilmiştir. Bu sonuçlar, Landsat-8 gibi yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin, uygun kalibrasyon ile iç sulardaki klorofil-a dinamiklerinin izlenmesinde değerli bir araç olabileceğini göstermektedir.

Kıyı bölgelerinde klorofil-a konsantrasyonunun güvenilir şekilde tahmin edilmesi, gerek uzaktan algılama gerekse modelleme yöntemlerinin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda **Bengil vd. [2024]**, İskenderun Körfezi örneğinde; yerinde yapılan ölçümler, MODIS-Aqua uydu görüntüleri ve Copernicus MyOcean model çıktılarıyla, klorofil-a ve su yüzeyi sıcaklığı değişkenlerinin temsil yeteneğini değerlendirmiştir. Çalışmada, yerinde yapılan ölçümler ile uydu ve model verileri istatistiksel olarak karşılaştırılmış; su yüzeyi sıcaklığı değişkeni için hem uydu hem de model verileri güçlü korelasyonlar sunarken, klorofil-a tahminlerinde daha zayıf ilişkiler ve yüksek belirsizlik oranları gözlenmiştir. Özellikle, model verilerinin klorofil-a konsantrasyonunu düşük düzeyde tahmin ettiği, uydu verilerinin ise bazı durumlarda daha temsili sonuçlar sunduğu belirlenmiştir. Her iki veri setinin de klorofil-a tahmini açısından geliştirilmeye ihtiyaç duyduğu vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, kıyı sularının optik karmaşıklığı nedeniyle klorofil-a tespitinde yaygın olarak kullanılan uydu ve model veri setlerinin performansının bölgesel düzeyde

sorgulanması gerektiğini ortaya koymakta ve yerel kalibrasyon ihtiyacına işaret etmektedir.

Benzer şekilde, **Abbas vd. [2019]** tarafından yapılan çalışmada, MODIS-Aqua uydu verileri kullanılarak sığ kıyı sularında klorofil-a tahmininin doğruluğu değerlendirilmiştir. Mevcut algoritmaların, özellikle bulanık ve karmaşık kıyı ortamlarında sınırlı performans sergilediği vurgulanmıştır. Bu sorunu aşmak amacıyla, yeşil ve kırmızı bantlara dayalı yeni bir bant oranı algoritması (Green-Red Ocean Color 4: GROC4) geliştirilmiştir. GROC4 algoritması, sahadan elde edilen ölçümlerle test edilmiş ve kıyı sularında klorofil-a tahmini konusunda önceki yöntemlere göre anlamlı bir iyileşme sağlamıştır. Çalışma, MODIS verilerinin daha etkin kullanılabilmesi için yeni algoritmaların geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Klorofil-a tahminine yönelik yapılan çalışmalarda, yalnızca bulanık iç sular için geliştirilen algoritmalar değil, aynı zamanda açık deniz koşullarında yaygın olarak kullanılan operasyonel yöntemler de önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle küresel ölçekte uydu verilerinin değerlendirilmesine olanak tanıyan bu modeller, farklı ekosistemler için esnek bir uygulama alanı sunmaktadır.

Bu kapsamda; bazı erken dönem çalışmalar, uydu verilerinin açık denizlerdeki fitoplankton artışını izleme konusunda, önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin **Joint ve Groom [2000]**, SeaWiFS verilerini kullanarak Celtic Denizi'nde klorofil-a temelli birincil üretim tahminleri gerçekleştirmiş ve farklı algoritmaların doğruluklarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma, gemi tabanlı yöntemlerle elde edilen ölçümlerle karşılaştırıldığında, uydu verilerinin hem üretim düzeylerini başarıyla tahmin edebildiğini hem de kısa süreli alg patlamalarını tespit etme açısından önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, özellikle açık deniz koşullarında uydu tabanlı klorofil-a tahminlerinin güvenilirliğini desteklemekte ve bölgesel algoritmaların geliştirilmesine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Hu vd. [2012; 2019] ile **O'Reilly vd. [1998; 2019]** tarafından geliştirilen ve NASA'nın operasyonel ürünlerinde yer alan CI ve OC3M tabanlı klorofil-a algoritmaları, yine açık sular için dikkat çeken yöntemler arasında yer almaktadır. CI yöntemi, özellikle düşük klorofil-a konsantrasyonlarının tespiti için daha hassas sonuçlar sunarken, OC3M algoritması, daha yüksek değerlerin belirlenmesinde etkili

olmaktadır. Bu iki model, farklı optik koşullarda birbirini tamamlayıcı şekilde çalışmakta ve MODIS verileri aracılığıyla geniş alanlarda güvenilir tahminler yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu algoritmaların, uzun dönemli izleme çalışmalarında istikrarlı sonuçlar üretmesi ve küresel ölçekli uygulamalara entegre edilebilmesi, literatürde yaygın şekilde tercih edilmelerine neden olmuştur. Ayrıca, bu iki yöntemin farklı optik koşullarda öne çıkan avantajları, araştırmacıların çalışma alanının karakterine göre en uygun algoritmayı seçebilmesine olanak sağlamaktadır.

Marmara Denizi, klasik açık deniz koşullarına ya da tipik bulanık iç su özelliklerine tam olarak uymayan, yarı kapalı yapısı nedeniyle geçiş özellikleri gösteren bir sistemdir. Dolayısıyla, bu tür karmaşık ortamlarda klorofil-a kestirimi yaparken, farklı yaklaşımların bir arada değerlendirilmesi önemli avantajlar sağlayabilir. Bu duruma; Marmara Denizi'ni ele alan, **Gazioğlu vd. [2022]** tarafından gerçekleştirilen çalışma örnek olarak gösterilebilir. Söz konusu çalışmada Marmara Denizi, kuzey ve güney olmak üzere iki ana bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerde yer alan toplam 12 alt birim için, 2003–2021 yılları arasındaki klorofil-a değişimleri analiz edilmiştir. MODIS-Aqua verileri, GEE platformu üzerinden işlenmiş, aylık ve yıllık ölçeklerde mekânsal dağılımlar çıkarılmıştır. Bulgular, özellikle ilkbahar aylarında fitoplankton yoğunluğunun arttığını ve körfez bölgelerinde daha yüksek konsantrasyonlar gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Marmara Denizi'nin oşinografik dinamiklerinin klorofil-a dağılımında belirleyici olduğu ve GEE gibi yüksek işlem gücüne sahip platformlar sayesinde, bu dinamikleri dikkate alan uzun dönemli bölgesel izleme çalışmalarının gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir.

1.3.2. İndeksler ile İlgili Çalışmalar

Zararlı alg patlamalarının izlenmesine yönelik geliştirilen spektral indekslerden biri olan AFAl, özellikle MODIS ve Landsat verilerini kullanarak iç sucul ortamlarda alg yoğunluğunun tespitinde etkin sonuçlar sunmaktadır. **Fang vd. [2018]**, Kuzeydoğu Çin'deki Hulun Gölü örneğinde AFAl yöntemini uygulayarak, yaz aylarında yoğun şekilde görülen alg patlamalarının hem zamansal hem de mekânsal değişimlerini haritalamıştır. Bu çalışma, özellikle don dönemi uzun olan bölgelerde AFAl'nin uygulanabilirliğini göstermesi açısından önemlidir.

Müsilaj oluşumlarının izlenmesi amacıyla geliştirilen AMEI, Sentinel-2 uydu verilerini kullanarak yüzeydeki müsilaj birikimlerini otomatik olarak belirlemeyi hedefleyen yeni bir spektral indekstir. **Çölkesen vd. [2023]** tarafından önerilen bu indeks, Marmara Denizi'nde 2021 yılında gözlenen yaygın müsilaj olayları bağlamında geliştirilmiş ve literatürdeki diğer su indeksleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. AMEI'nin, hafif bulut koşullarında dahi sarı ve beyaz renkli farklı müsilaj türlerini ayırt edebilmesi, bu çalışmanın öne çıkan katkılarından biridir.

Zhang vd. [2016] tarafından önerilen BNDBI, ötrofik ve bulanık göllerde klorofil-a konsantrasyonunun tahmini amacıyla geliştirilmiş bir algoritmadır. Özellikle MODIS sensörünün kara ve atmosferik çalışmalar için tasarlanmış bantlarını kullanarak, geleneksel okyanus renk algoritmalarının doygunluk sorunlarını aşmayı hedefler. Farklı göllerde test edilen BNDBI, yüksek bulanıklık koşullarında bile güvenilir sonuçlar sunarak literatürdeki klasik algoritmalara alternatif sağlamaktadır.

Literatürde su kalitesi değerlendirmelerinde kullanılan bir diğer indeks CI'dır. CI Özellikle açık deniz koşullarında öne çıkan önemli bir göstergedir. **Hu vd. [2012]** tarafından önerilen bu indeks, yüzey suyu yansıma değerleri arasında tanımlanan spektral farklara dayanmakta olup, suda askıda bulunan maddelerin, çözünmüş organik materyallerin ve fitoplankton varlığının dolaylı yansımalarını spektral olarak tanımlamayı amaçlamaktadır. CI, özellikle düşük pigment yoğunluklarının bulunduğu bölgelerde daha hassas sonuçlar verebildiği için, çok sayıda uzaktan algılama temelli su kalitesi çalışmasında değerlendirilmiştir.

Uydu verileriyle yüzen alglerin izlenmesine yönelik önemli adımlardan biri, **Hu [2009]** tarafından önerilen FAI algoritmasıyla atılmıştır. Bu yöntem, özellikle MODIS verileri üzerinden, yüzeydeki alg oluşumlarının atmosferik gürültülerden etkilenmeden tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Geliştirildiği dönemde, NDVI ve Enhanced Vegetation Index (EVI) gibi klasik indekslerin sınırlılıklarını aşarak, yüzen alglerin zamansal ve mekânsal dağılımının daha doğru bir şekilde izlenmesini mümkün kılmıştır.

Uzaktan algılama temelli su bitkisi izleme çalışmalarında, çeşitli indeksler geliştirilmiş; özellikle sazlık gibi sucul türlerin korunma durumunu izlemek üzere NDAVI algoritması önerilmiştir **[Villa vd., 2013]**. NDAVI, kara bitkileri için sıkça kullanılan geleneksel vejetasyon indekslerinin (NDVI, EVI vb.) su yüzeyi etkileri

nedeniyle sınırlı kaldığı durumlarda, sucul bitki örtüsünün mekânsal ve zamansal değişimlerini daha doğru yansıtmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda, NDAVI özellikle düşük ve orta yoğunluktaki sazlık alanların sağlığını değerlendirmek için tercih edilen duyarlı bir spektral göstergedir.

Uydu görüntülerinden yararlanarak küçük ve geçici göletlerin bulanıklık durumunu belirlemek amacıyla geliştirilen NDTI algoritması, ilk kez **Lacaux vd. [2007]** tarafından önerilmiştir. Çalışmada, Batı Afrika'nın Ferlo bölgesinde bazı hastalıkların yayılımına neden olabilecek sivrisinek popülasyonlarının yerleşim alanları araştırılmıştır. Bu amaçla, SPOT-5 uydu görüntüleri kullanılarak yüzeysel su alanlarının zamansal değişimi ve bulanıklık derecesi detaylı biçimde sınıflandırılmıştır. NDTI, özellikle gölet içindeki askıda kalan katı madde miktarının fazla olduğu yani bulanık koşullarda, su kalitesinin uzaktan algılama ile izlenmesi açısından önemli bir indeks olarak literatürde yerini almıştır.

Bitki örtüsünün zamansal değişimini geniş alanlarda izlemek amacıyla geliştirilen ilk uydu temelli spektral indekslerden biri NDVI'dır. **Rouse vd. [1973]** tarafından önerilen bu yaklaşım, özellikle karasal bitki biyokütlesinin zamansal ve bölgesel takibi için temel bir araç olarak kabul edilmiştir. ERTS-1 uydusunun multispektral verileri kullanılarak oluşturulan indeks, yeşil biyokütle ile güçlü korelasyon göstermiştir ve zamanla dünya çapında birçok ekolojik ve tarımsal uygulamada standart hale gelmiştir.

Bitki örtüsündeki sıvı su miktarını uzaktan algılama yoluyla belirlemek amacıyla geliştirilen NDWI_{Gao}, **Gao [1996]** tarafından literatüre kazandırılmış önemli bir indekstir. Bitkilerin su içeriklerine duyarlı dalga boyları arasındaki yansıma farklarını normalize ederek hesaplanan bu indeks, özellikle su stresi tespiti ve bitkisel fizyolojinin izlenmesinde etkin sonuçlar sunmuştur. Klasik pigment tabanlı indekslerin ötesine geçerek, suya bağlı optik değişimleri analiz edebilmesi sayesinde kuraklık izleme, tarımsal uygulamalar ve afet değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yönüyle NDWI_{Gao}, uzaktan algılama ile yalnızca yeşil örtünün değil, bitkisel su içeriğinin değerlendirilebileceğini ortaya koyan çalışmalardan biri olmuştur.

Açık su yüzeylerinin uzaktan algılama yoluyla belirlenmesine yönelik önemli çalışmalardan biri, **McFeeters [1996]** tarafından önerilen NDWI_{McFeeters}

algoritmasıdır. Bu çalışma, özellikle yeşil ve yakın kızılötesi (NIR) bantlarından elde edilen yansıma değerlerinin normalize edilmiş oranına dayanarak, su kütlelerinin diğer kara örtülerinden etkin biçimde ayrıştırılabileceğini göstermiştir. $NDWI_{McFeeters}$, özellikle şehirleşme, tarım ve sulak alan izleme gibi uygulamalarda, su sınırlarının daha hassas biçimde haritalanmasını sağlamayı amaçlamıştır. Özellikle küçük göller, bataklık alanlar ve yapay su kütleleri gibi detaylı ayrımın önemli olduğu bölgelerde $NDWI_{McFeeters}$ 'ın sunduğu spektral avantajlar, çalışmanın temel katkılarından biridir.

Su yüzeyindeki alg patlamalarının uzaktan algılama yoluyla tespiti amacıyla geliştirilen SABI, **Alawadi [2010]** tarafından önerilmiştir. Bu çalışma, özellikle geniş alanlara yayılan alg birikimlerinin spektral yansımalarını analiz etmeye çalışmıştır. Farklı bantlar arasındaki yansıma ilişkilerini kullanan SABI, hem su kütleleri üzerindeki alglerin varlığını hem de bu birikimlerin yoğunluğunu belirleme konusunda etkili sonuçlar ortaya koymuştur. Literatürdeki diğer yaklaşımların aksine, SABI suyun içeriğini etkileyen biyotik unsurları hedef alarak, daha doğrudan ve hassas bir değerlendirme mekanizması geliştirmeyi amaçlamıştır.

2. UZAKTAN ALGILAMA TEKNOLOJİLERİNİN SU KALİTESİ TAKİBİNDE KULLANIMI

2.1. Su Kalitesinin Önemi ve İzlenmesi

Su kalitesi, bir su kütlesinin kimyasal, biyolojik ve fiziksel özelliklerinin bütüncül bir göstergesi olarak tanımlanmakta ve söz konusu suyun ekosistem işlevselliği ile insan kullanımı açısından uygunluğunu yansıtmaktadır. Su kalitesinin değerlendirilmesinde, suyun kullanım amacı (tarımsal sulama, içme, enerji üretimi, sanayi) ile su kütlesinin tipi (akarsular, göller, kıyı ve geçiş suları, yer altı suları) temel alınmaktadır. Buna bağlı olarak, tüm su kaynaklarının iyi bir ekolojik duruma ulaşabilmesi amacıyla genel kalite standartları belirlenmekte ve yönetim planları geliştirilmektedir **[Demir, 2022]**.

Etkin bir su kalitesi yönetimi için risk değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Bu değerlendirme, kirleticilerin insan sağlığına ve ekosisteme olan etkilerini analiz ederek olası risklere karşı önlem alınmasını sağlar. Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi doğrultusunda ülkemizde de su kalitesi yönetiminde risk temelli yaklaşımlar benimsenmiştir. Özellikle Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği ile kirleticilerin tespiti ve kontrolüne yönelik süreçler kurumsallaştırılmıştır. Bu kapsamda, su kütlelerinde kirletici unsurların sınıflandırılması, izlenmesi ve azaltılması hedeflenmekte; böylece hem çevresel hem de halk sağlığına yönelik olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır **[Web 2]**.

Öte yandan, su kaynakları, yalnızca ekolojik işleviyle değil; aynı zamanda içme suyu temini, tarımsal üretim, balıkçılık ve rekreasyonel faaliyetler gibi pek çok sektöre doğrudan hizmet sunması nedeniyle de hayati öneme sahiptir. Ancak son yıllarda artan kentleşme, kontrolsüz sanayi faaliyetleri, tarımsal kaynaklı kirlilik, evsel atık su deşarjları ve iklim değişikliğine bağlı olarak su kaynaklarının kalite düzeyi ciddi şekilde bozulma eğilimine girmiştir.

Söz konusu kirleticiler yalnızca suyun kimyasal yapısını değil, aynı zamanda biyolojik dengeyi de tehdit ederek ekosistem fonksiyonlarında ciddi bozulmalara yol açabilmektedir. Nitekim bu etkilerden biri, özellikle iç sularda ve kıyısal bölgelerde trofik dengenin değişmesine neden olan azot ve fosfor birikimleridir. Azot ve fosfor

gibi besin tuzlarıyla zenginleşen sularda fitoplankton gelişiminin yoğunlaşması, klorofil-a konsantrasyonlarının artmasına ve buna bağlı olarak su kütlesinin trofik statüsünde değişimlere neden olmaktadır [Dodds ve Whiles, 2010]. Su kütlelerinin trofik durumu; suyun taşıdığı besin miktarı, alg yoğunluğu ve birincil üretim kapasitesi temel alınarak değerlendirilmektedir. Buna göre sistemler;

- oligotrofik,
- mezotrofik,
- ötrofik ya da
- hipertrofik biçiminde sınıflandırılmaktadır.

Oligotrofik sistemler, düşük besin ve alg düzeylerinin yanı sıra yüksek çözünmüş oksijen oranı ve berrak su kolonuyla tanımlanırken; mezotrofik sistemler orta düzeyde üretkenlik göstermektedir. Ötrofik sularda ise, artan klorofil-a seviyeleriyle birlikte ışık geçirgenliği azalmakta ve oksijen tüketimi artmaktadır. Hipertrofik durum ise, aşırı besin zenginleşmesi sonucu oksijensiz koşullara, kalıcı alg birikimlerine ve hatta müsilaç oluşumlarına zemin hazırlayan ciddi bir bozulma halini ifade etmektedir [Carlson, 1977].

Trofik düzeydeki bu değişimlerin ileri aşamalarında ise, ekosistemlerin taşıma kapasitesini aşan alg ve alg benzeri organizmaların kontrolsüz çoğalması sonucu zararlı alg patlamaları meydana gelmektedir. Bu olaylar, suyun fiziksel yapısını bozmakta, besin döngüleri ile biyolojik çeşitliliği olumsuz yönde etkilemekte ve özellikle balıklar ile diğer sucul canlılar için yaşamsal öneme sahip çözünmüş oksijen seviyelerini düşürmektedir. Bazı durumlarda bu patlamalar, görünüm itibarıyla algleri andıran ancak aslında siyanobakteri grubuna ait olan organizmaların aşırı çoğalmasıyla da ilişkilidir. Bu mikroorganizmalar, bulundukları ortama toksin salgılayarak, kirli suyla doğrudan temas, içme suyu yoluyla veya kontamine olmuş su ürünlerinin tüketimi aracılığıyla insan ve hayvan sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturabilmektedir [Web 3].

Su kütlelerinin trofik statüsüne ilişkin bu genel çerçeve, Marmara Denizi özelinde değerlendirildiğinde belirgin bir dönüşüm süreci gözlenmektedir. Tarihsel olarak mezotrofik nitelikte değerlendirilen ve yarı kapalı bir sistem olan Marmara Denizi, 2022 yılında yayınlanan Marmara Deniz Havzası Çevresel Göstergeler raporunda belirtildiği üzere, günümüzde ciddi çevresel değişimlerle karşı karşıyadır [Web 4].

Artan evsel ve endüstriyel atık su girdileri, Karadeniz kaynaklı besin tuzu taşınımı ve iklim değişikliğine bağlı etkiler; özellikle kıyı kesimleri ile körfez içi alanlarda belirgin düzeyde besin birikimine ve su kalitesinde bozulmalara yol açmaktadır. Bu etkenlerin bir sonucu olarak, Marmara Denizi zamanla artan ötrofikasyon belirtileri göstermiş; 2007, 2008 ve 2021 yıllarında meydana gelen müsilağ olayları ise bu bozulmanın belirli dönemlerde daha da şiddetlenerek hipertrofik koşullara ulaşabildiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, Marmara Denizi'nin ekosistem sağlığı açısından kırılgan bir yapıya sahip olduğu anlaşılmakta; su kalitesinin düzenli, çok ölçekli ve uzun dönemli olarak izlenmesi gereklilik arz etmektedir.

Marmara Denizi için trofik durum değerlendirmesinde kullanılan temel ölçütler ve sınıflandırma eşikleri **Tablo 2.1**'de sunulmuştur.

Tablo 2.1: Marmara kıyı suları ötrofikasyon kriterleri [YSKY, Web 2].

Su Kalitesi Sınıfı	TP (µg/L)	NO _x (µg/L)	Klorofil-a (µg/L) (ilkbahar)	Klorofil-a (µg/L) (sonbahar)	Secchi Disk Derinliği (m)
Oligotrofik	< 14	< 14	< 3	< 1	> 6
Mezotrofik	21	20	4,3	2	4,5
Ötrofik	30	34	6	4	3
Hipertrofik	> 30	> 34	> 6	> 4	< 3

Tablo 2.1, Marmara Denizi'nin trofik durumunu değerlendirmede kullanılan temel sınıflandırma ölçütlerini göstermektedir. Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'nin Ek-6 bölümünde yer alan bu tabloya göre, Marmara Denizi; toplam fosfor (TP) düzeyi, oksitlenmiş azotlu bileşikler (NO_x), klorofil-a konsantrasyonu ve Secchi diski derinliği gibi temel parametreler üzerinden oligotrofik, mezotrofik, ötrofik ve hipertrofik olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu parametreler, özellikle ötrofikasyonun izlendiği yarı kapalı denizel sistemlerde üretkenliğin artışı ve buna bağlı çevresel değişimleri izlemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablodaki göstergelerin anlamları şu şekildedir:

- **Klorofil-a (µg/L):** Fitoplankton yoğunluğunu ve biyolojik üretkenliği gösteren temel pigment.

- **TP ($\mu\text{g/L}$):** Tüm fosfor formlarını içeren ve besin yükünü yansıtan kimyasal gösterge.
- **NO_x ($\mu\text{g/L}$):** Nitrat (NO_3^-) ve nitrit (NO_2^-) bileşiklerinin toplamını ifade eder; su kütlesindeki inorganik azot miktarını gösterir.
- **Secchi Derinliği (m):** Suyun berraklığını belirleyen görsel ölçüm değeri; düşmesi bulanıklık ve biyokütle artışına işaret eder.

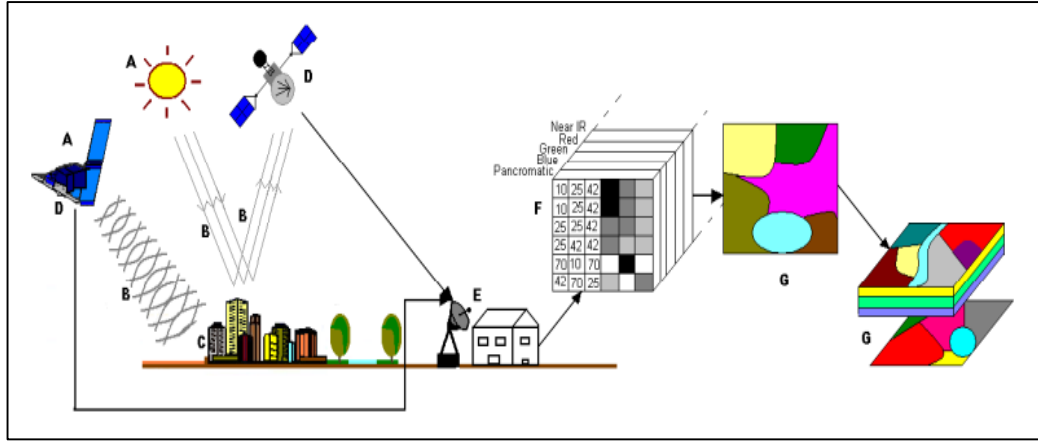
Özetle, su kalitesinin korunması ve sürdürülebilir biçimde yönetilebilmesi için trofik durumun doğru tanımlanması ve klorofil-a gibi göstergelere dayalı olarak dinamik bir izleme sisteminin kurulması gerekmektedir. Özellikle Marmara Denizi gibi hassas sistemlerde, ekosistem bütünlüğünün korunması ve müsilaj gibi krizlerin önlenmesi için trofik durumun hassasiyetle izlenmesi hayati önem taşımaktadır

2.2. Uzaktan Algılama Verilerinin Su Kalitesi Analizinde Kullanımı

Uzaktan algılama en bilinen tanımıyla; arada fiziksel bir temas olmaksızın bir cisimden yayılan veya yansıyan elektromanyetik ışınının nitelik ve nicelik yönünden değerlendirilmesi ile cisim hakkında bilgi edinilmesi, ölçülmesi bilimi ve sanatıdır [Sunar vd., 2016]. Bu teknoloji, gerek nicel ölçümler gerekse nitel yorumlamalar açısından, çevresel değişimlerin izlenmesi, kaynakların yönetimi ve afet analizleri gibi pek çok alanda kritik öneme sahiptir.

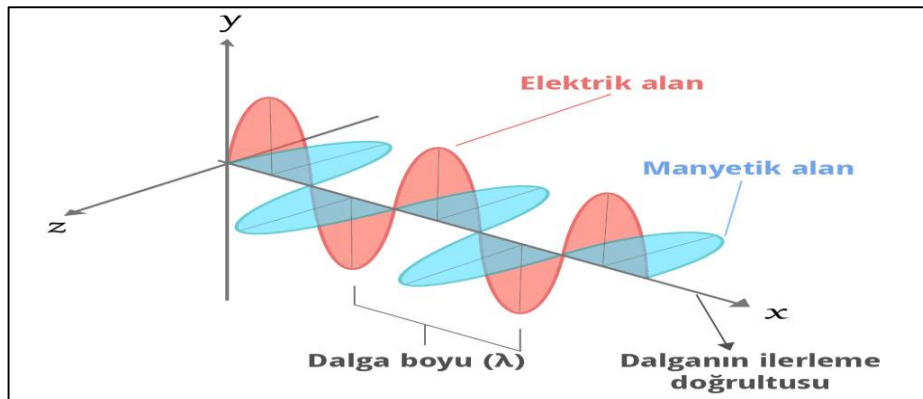
Uzaktan algılama sistemleri genel olarak yedi temel bileşenden oluşur (**Şekil 2.1**). Bunlar sırasıyla; A: Elektromanyetik enerji kaynağı, B: Atmosfer içinden geçen ve hedefle etkileşime giren ışınım, C: Hedef nesnelerle gerçekleşen enerji etkileşimi, D: Bu enerjinin algılayıcı tarafından kaydedilmesi, E: Verinin yer istasyonuna iletimi ve işlenmesi, F: Görüntülerin analiz edilerek yorumlanması ve G: Elde edilen sonuçların belirli uygulamalara dönüştürülmesidir.

Bu bileşenler arasında özellikle enerji kaynağı ve algılayıcı sistemler, uzaktan algılamanın aktif ya da pasif sınıflandırılmasını belirleyen temel unsurlardır. Pasif sistemler doğal kaynaklı (örneğin güneş ışığı), aktif sistemler ise kendi enerji kaynağına (örneğin radar) sahip sistemlerdir.



Şekil 2.1: Uzaktan algılama sisteminin bileşenleri [Web 5].

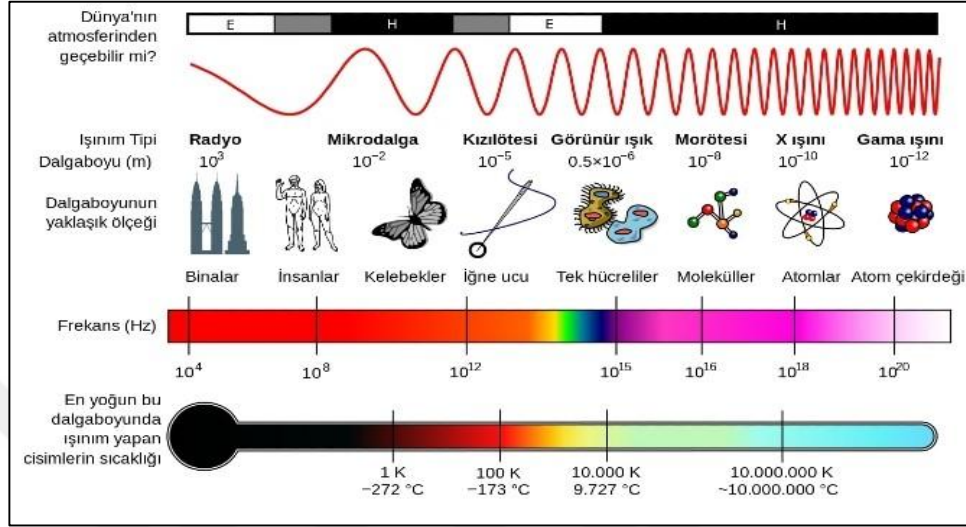
Uzaktan algılamada kullanılan elektromanyetik enerji, elektriksel ve manyetik alanların birbirine dik düzlemlerde salındığı dalga yapısında iletilir. Elektromanyetik dalganın genel yapısı **Şekil 2.2**'te gösterilmektedir. Dalga boyu, bu dalgaların temel karakteristiklerinden biridir ve cismin fiziksel özellikleriyle birlikte enerji-yüzey etkileşimini belirler. Yeryüzüne ulaşan elektromanyetik dalga; yüzey tarafından yansıtılabilir, soğurulabilir veya geçirilebilir. Bu üçlü etkileşim, her nesne için karakteristik bir biçimde gerçekleştiğinden, yüzeylerin tanımlanmasını mümkün kılar.



Şekil 2.2: Elektromanyetik dalga [Web 6].

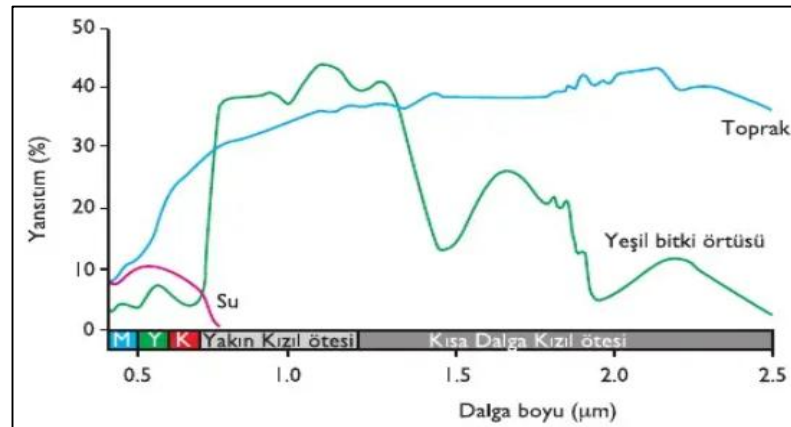
Bu bağlamda, elektromanyetik spektrum, farklı dalga boylarının bir arada bulunduğu kesintisiz bir enerji dizisi olarak tanımlanabilir. Spektrumun kısa dalga boylu ve yüksek enerjili kısmında gama ve X-ışınları, uzun dalga boylu kısmında ise mikrodalga ve radyo dalgaları yer alır (**Şekil 2.3**). Uzaktan algılama uygulamaları

genellikle görünür (0.4–0.7 μm), yansıtıcı kızılötesi (0.7–3.0 μm), ısı kızıllötesi (3.0–14.0 μm) ve mikrodalga (1 mm – 1 m) bölgelerinde yoğunlaşır. Bu spektral bantlar sayesinde, farklı yüzeylerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ayırt edilebilir.



Şekil 2.3: Elektromanyetik spektrum [Web 7].

Farklı yüzey türleri, elektromanyetik spektrumun belirli dalga boylarında farklı yansıtma özelliklerine sahiptir. Bu yansıma karakteristikleri, spektral imza olarak adlandırılır. Spektral imzalar, farklı nesnelerin tanımlanmasında kullanılır ve çoğu uzaktan algılama algoritmasının temelini oluşturur. Örneğin, bitki örtüsü özellikle NIR bantta yüksek yansıma gösterirken, su yüzeyleri aynı bantta düşük yansıtıcılığa sahiptir. Toprak ise içeriğine bağlı olarak orta düzeyde yansıma sergiler (Şekil 2.4).



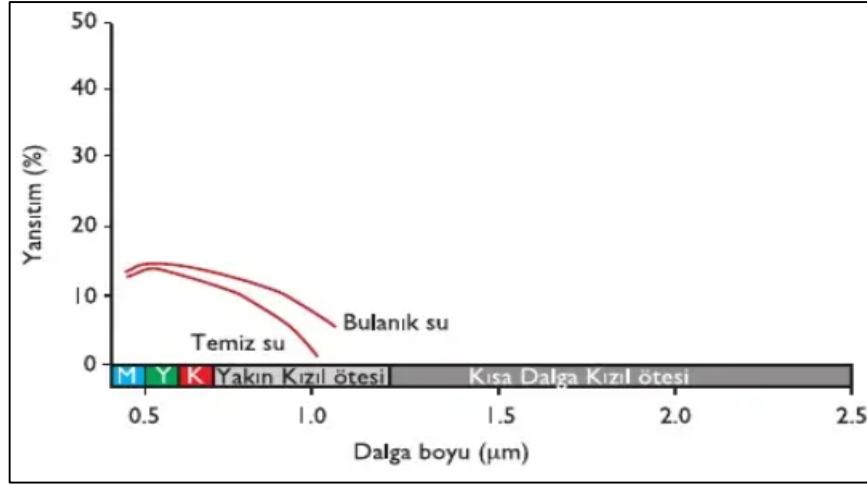
Şekil 2.4: Bitki, toprak ve suyun spektral yansıtım eğrileri [Sunar vd., 2016].

Uzaktan algılama teknolojileri, günümüzde pek çok bilimsel çalışma ve karar destek sistemi için vazgeçilmez bir unsurdur. Öncelikle, geniş alanları kapsama ve sinoptik görüş açısı sunma yeteneği, yer gözlemine kıyasla büyük ölçekli analizleri mümkün kılmaktadır. Ayrıca, insan gözüyle algılanamayan bitki sağlığı, yüzey sıcaklığı, nem içeriği gibi fiziksel özelliklerin ve detaylı çevresel değerlendirmelerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Uydu ve hava platformları aracılığıyla tehlikeli, erişilmesi güç ya da tamamen mümkün olmayan alanlar da güvenli bir şekilde gözlem yapılmasını sağlar. Bunun yanı sıra, sistemlerin periyodik gözlem kabiliyeti sayesinde zaman içindeki değişimlerin izlenmesi ve zamansal analizlerin yapılması mümkün hâle gelmektedir. Bu durum, doğal kaynak yönetimi ve çevresel izleme çalışmalarında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Verilerin dijital ortamda kayıt edilmesi, sayısal analiz, sınıflandırma ve otomasyon gibi ileri düzey tekniklerin uygulanmasına da olanak tanımaktadır [Lillesand vd., 2015].

Sonuç olarak, uzaktan algılama teknolojileri; geniş kapsama alanı, çok bantlı veri elde etme kapasitesi, düşük maliyet ve zaman tasarrufu gibi avantajlarıyla çevresel ve kentsel birçok disiplinde etkin biçimde kullanılmaktadır.

Bu avantajlar, özellikle sucul ekosistemlerin zamansal ve mekânsal izlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Göller, nehirler, denizler ve sulak alanlar gibi yüzey sularına ait değişimler, uydu verileriyle yüksek doğrulukta analiz edilebilmektedir. Ancak bu tür analizlerin sağlıklı biçimde yürütülebilmesi, suyun farklı dalga boylarındaki yansıtma özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirir. Bu bağlamda, suyun spektral tepkileri ile bu tepkileri etkileyen çevresel faktörlerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi büyük önem taşır.

Sulak alanlarda meydana gelen değişimlerin uzaktan algılama ile belirlenebilmesi için öncelikle suyun spektral yansıtım özelliğinin bilinmesi gerekir. **Şekil 2.5**'te su yüzeyinin spektral yansıtım eğrisi verilmiştir. Bitki örtüsü ve toprakla karşılaştırıldığında su, genel olarak oldukça düşük yansıtım değerlerine sahiptir. Gelen elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmı su tarafından soğurulmakta veya geçirilmektedir. Özellikle temiz su yüzeylerinde ortalama yansıtım oranı genellikle %5'in altındadır. **Şekil 2.5**'e göre, su görünür spektrumun mavi bantlarında nispeten yüksek yansıma gösterirken; NIR ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarında ise güçlü bir şekilde enerjiyi soğurur. Bu özellik, suyun en belirgin spektral karakteristiklerinden biri olarak kabul edilir [Sunar vd., 2016].



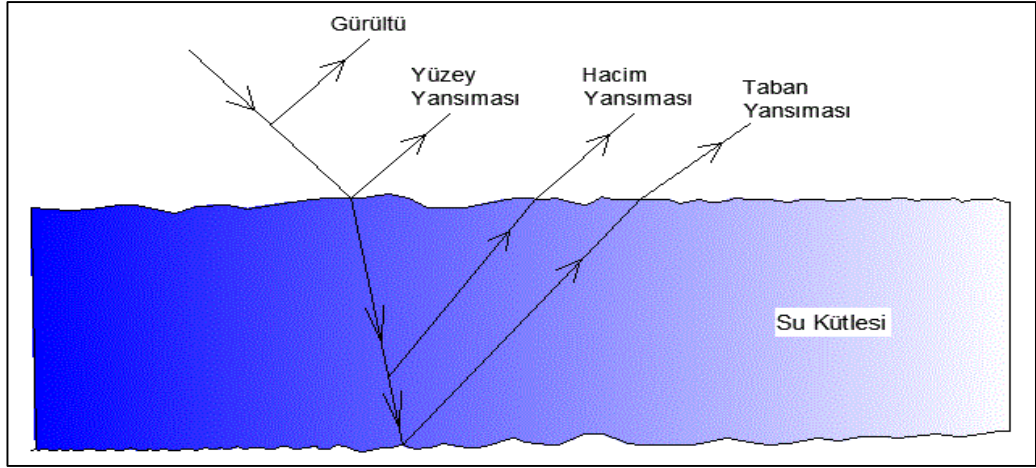
Şekil 2.5: Suyun spektral yansıtım eğrisi [Sunar vd., 2016].

Bir su kütlesinin spektral yansıtım karakteristiği çeşitli çevresel ve fiziksel faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler şu şekilde özetlenebilir:

- **Su Derinliği:** Sığ alanlarda yansıtım, büyük oranda su tabanından gelen yansımalarla etkilenmektedir. Yaklaşık 5 ila 15 metre derinlikte, su tabanının yansıtma katkısı belirgin hâle gelir.
- **Suda Bulunan Materyaller:** Askıdaki partiküller, özellikle sedimentler ve klorofil gibi maddeler, yansıtımı doğrudan etkiler. Bu materyallerin sudaki dağılım biçimi (homojen/heterojen, yatay/düşey) yansıma karakterini değiştirebilir. Klorofil içeren bitki materyalinin yoğun olduğu sularda, yeşil bant çevresinde yansıtım artarken; mavi ve kırmızı bantlarda azalma gözlenir.
- **Yüzey Pürüzlülüğü (Dalgalılık):** Su yüzeyinin sakin ya da dalgalı olması da yansıtım davranışını belirleyen önemli bir etkidir. Durgun yüzeylerde yansıma, daha çok ayna benzeri bir özellik gösterirken; dalgalı yüzeylerde saçılma artar ve dolayısıyla toplam yansıtım değeri yükselir. Bu durum, özellikle okyanus rüzgârlarının uzaktan algılama ile tespitinde kritik rol oynar.

Su kütlelerinin yansıtımı, üç temel bileşenden oluşur (**Şekil 2.6**):

- **Yüzey Yansıması:** Elektromanyetik enerjinin doğrudan su yüzeyinden yansımasıdır.
- **Taban Yansıması:** Sığ sularda dibe çarpıp geri yansıyan enerjidir.
- **Hacim Yansıması:** Suyun içinde askıda bulunan parçacıklar tarafından saçılan enerjinin toplam yansımasıdır.



Şekil 2.6: Su kütlelerinde yansıma çeşitleri.

Şekil 2.6'ya göre kaynaktan gelen enerjinin bir kısmı atmosfer tarafından suya hiç değmeden geri yansıtılır ki bu durumda gürültü meydana gelir. Atmosferden geçen enerji su ile karşılaştığında, bir kısmı yüzeyden tekrar yansır. Buna yüzey yansıması denir. Yüzeyden yansımaya su içine geçirilen enerjinin bir kısmı tabana ulaşmadan geri yansır. Bu durumda hacim yansıması oluşur. Sadece hacim yansıması su kalitesi ile ilgili bilgi verir. Hacim yansımasında suyun içine nüfuz eden enerji, dalga boyuna bağlı olarak özellikle çözölmüş materyallerce yutulmakta, çözölmemiş askıda kalan cisimler tarafından yansıtılmaktadır. Özellikle sığ sularda ise tabana kadar ulaşan enerji taban tarafından yansıtılarak taban yansımasının oluşmasına sebep olur.

Bu spektral özelliklerin detaylı biçimde çözömlenmesi, yalnızca su yüzeyinin varlığını belirlemekle kalmayıp; aynı zamanda su kalitesiyle ilişkili çeşitli parametrelerin uzaktan algılama yoluyla tahmin edilmesini de mümkün kılmaktadır. Özellikle klorofil-a, askıda katı madde (TSM) ve çözölmüş organik maddeler gibi optik olarak aktif bileşenlerin varlığı, elektromanyetik spektrumun belirli bantlarında karakteristik tepkiler oluşturur. Bu durum, uydu verilerine dayalı su kalitesi izleme çalışmalarında spektral yansıma verilerinin güçlü birer belirteç olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Günümüzde su kalitesinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan temel parametreler arasında klorofil-a konsantrasyonu, TSM, çözölmüş oksijen düzeyi, besin elementleri (özellikle azot ve fosfor bileşikleri) ve su sıcaklığı gibi göstergeler yer almaktadır. Bu parametreler, hem ekosistem sağlığının değerlendirilmesinde hem de kirlilik düzeyinin izlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bunlar arasında özellikle klorofil-a, fitoplankton

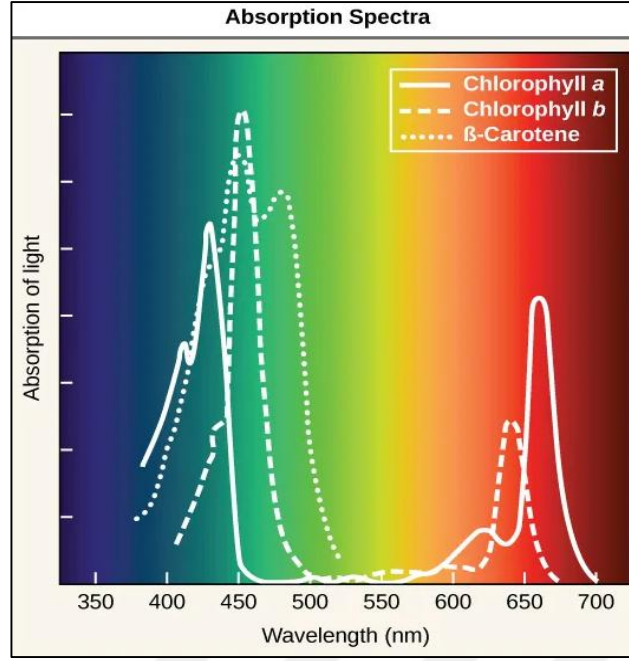
biyokütlesiyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle birincil üretim ve ötrofikasyon seviyesinin belirlenmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Klorofil pigmentleri, fotosentez sürecinin temel bileşenlerinden biridir ve özellikle sucul ortamlarda alglerin varlığıyla doğrudan ilişkilidir. İlk olarak Allen tarafından 1966 yılında sınıflandırılan sekiz farklı klorofil türü arasından, alglerin fotosentetik etkinliğini sağlayan ve en yaygın biçimde rastlanan pigment klorofil-a'dır **[Web 8]**. Bu pigment, yalnızca ışık enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlayan biyolojik bir unsur olmakla kalmaz; aynı zamanda sucul ekosistemlerin ekolojik durumunun izlenmesinde de önemli bir biyolojik gösterge olarak kullanılır. Klorofil-a yoğunluğu, alg popülasyonlarıyla birlikte ortamda bulunan besin maddeleri ve potansiyel kirlilik düzeyi hakkında bilgi sunar. Öte yandan, klorofil-b pigmenti ise emdiği ışık enerjisini klorofil-a'ya aktararak bu sürece dolaylı katkı sağlar.

Uzaktan algılama teknolojileri, klorofil-a'nın optik özelliklerinden yararlanarak sucul ortamlarda alg biyokütlesinin dağılımını belirleme imkânı sunar. Bu pigmentin özellikle mavi ve kırmızı dalga boylarında yüksek soğurma göstermesi, onun uydu verileriyle algılanmasını mümkün kılar. Bu nedenle klorofil-a konsantrasyonu, hem alg patlamalarının tespiti hem de genel su kalitesi izleme çalışmaları için güçlü bir gösterge olarak kabul edilmektedir **[Çetin, 2014]**.

Bu amaçla geliştirilen sayısal algoritmalar, çoğunlukla görünür ve NIR bantlarını kullanarak su yüzeyindeki yansıma değerleriyle klorofil konsantrasyonu arasında istatistiksel ilişkileri kurar. SPOT, Landsat 5–6, MODIS gibi uzaktan algılama platformları, farklı bant kombinasyonlarıyla geniş su kütlelerinde klorofil-a dağılımını belirlemede etkin biçimde kullanılmaktadır **[Zhou vd., 2021]**.

Şekil 2.7'de görüldüğü üzere, klorofil-a pigmenti özellikle mavi ve kırmızı ışığı soğurarak yeşil bölgeyi yansıttığı için, alg yoğunluğu arttıkça uydu görüntülerinde su yüzeyi yeşile yakın tonlarda gözlenir. Bu özellik, özellikle alg büyümesinin uzaktan izlenmesi açısından kritik bir avantaj sağlar **[Conopio vd., 2019]**.



Şekil 2.7: Klorofilin absorpsiyon spektrumu [Web 9].

2.3. Klorofil-a Tahmininde Kullanılan Yöntemler

Klorofil-a, sucul ekosistemlerdeki fitoplankton yoğunluğunu belirlemede temel bir biyolojik parametre olarak kullanılmaktadır. Bu pigmentin yoğunluğu ve dağılımı, su kalitesinin izlenmesi ve ekosistem sağlığının değerlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Uydu tabanlı uzaktan algılama teknikleri, geleneksel saha ölçümlerine kıyasla hem geniş coğrafi alanların hem de uzun zaman dilimlerinin izlenmesinde daha hızlı, daha tutarlı ve daha ucuz çözümler sunmaktadır. Ancak; klorofil-a gibi tahmine dayanan çalışmalarda, saha ölçümleri hâlen büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu ölçümler, uydu temelli tahminlerin kalibrasyonunda ve doğrulanmasında referans veri olarak kullanılmaktadır.

Klorofil-a tahminine yönelik geliştirilen algoritmalar genel olarak, su yüzeyinden farklı dalga boylarında yayılan yansıma değerlerinin analizine dayanmaktadır. Uydu sensörlerinden elde edilen çok bantlı görüntüler aracılığıyla, su kütlelerinde bulunan pigmentlerin ışıkla etkileşimine bağlı olarak ortaya çıkan spektral özellikler değerlendirilmekte ve bu sayede klorofil-a konsantrasyonuna dair kestirimlerde bulunmaktadır.

Bu kapsamda, literatürde klorofil-a tahminine yönelik geliştirilen çeşitli algoritmalar bulunmaktadır. Klorofil-a kestirimine yönelik geliştirilen algoritmalar arasında, **Mishra ve Mishra [2012]** tarafından önerilen NDCI dikkat çekmektedir. Bu yöntem, özellikle bulanık ve besince zengin (ötrofik) su kütlelerinde klorofil-a konsantrasyonunu daha doğru şekilde kestirmek amacıyla geliştirilmiştir. NDCI algoritması, uydu sensörlerinde yer alan kırmızı (yaklaşık 665 nm) ve kırmızı kenar (yaklaşık 708 nm) bantları arasında normalize edilmiş bir fark oranı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu bantlar, klorofil-a pigmentinin spektral yansıma özelliklerine duyarlıdır. Özellikle kırmızı kenar bölgesi, klorofil-a soğurmasının maksimum olduğu bölgelerden biridir. Gerçekleştirilen saha ölçümleri ve uydu görüntü analizleri, bu algoritmanın özellikle geleneksel mavi/yeşil oranlarına dayalı modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Hem doğrusal hem de logaritmik regresyon analizlerinde elde edilen yüksek korelasyon katsayıları, NDCI'nin iç sular ve kıyısal alanlardaki klorofil-a izleme çalışmalarında güvenilir bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bulanık ve ötrofik iç sular için geliştirilen bir diğer alternatif algoritma; **Zhang vd. [2016]** tarafından önerilen BNDBI algoritmasıdır. Bu yöntem, MODIS sensörüne ait 555 nm ve 645 nm bantlarını kullanarak, klorofil-a konsantrasyonunu tahmin etmektedir. Algoritma, atmosferik etkileri azaltmak amacıyla 469 nm ve 859 nm bantlarıyla taban düzeltmesi uygulamakta ve klorofil-a'nın spektral soğurma özelliklerinden faydalanmaktadır. Çin'deki Chaohu Gölü'nde yürütülen saha çalışmaları ve uydu verileriyle yapılan karşılaştırmalar, BNDBI algoritmasının yüksek bulanıklık seviyelerinde dahi dayanıklı ve tutarlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca algoritma, diğer göllerde de benzer başarıyla uygulanmış ve ciddi alg patlamalarını ayırt edebilecek eşik değerler tanımlanmıştır. Bu yönüyle BNDBI, MODIS verilerinin tam atmosferik düzeltmeye ihtiyaç duyulmadan kullanılabilmesine olanak sağlayarak, klorofil-a izlemelerine önemli bir katkı sunmaktadır.

Klorofil-a tahminine yönelik geliştirilen algoritmalar arasında, NASA tarafından operasyonel olarak kullanılan CI ve OC3M tabanlı klorofil-a algoritmaları önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemler, özellikle geniş alanlarda ve farklı optik özelliklere sahip sularda güvenilir klorofil-a kestirimleri sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Marmara Denizi gibi ne açık okyanus ne de tipik bulanık iç su özelliği taşıyan, yarı kapalı ve geçiş karakteristiği gösteren ortamlarda, bu iki algoritmanın bir arada

değerlendirilmesi tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu CI ve OC3M algoritmalarının birlikte kullanılması tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni, Marmara Denizi gibi karmaşık sistemlerde tek bir modelin yetersiz kalabileceği göz önüne alındığında, CI ve OC3M gibi birbirini tamamlayıcı algoritmaların birlikte değerlendirilmesinin klorofil-a kestirimlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmasıdır.

CI tabanlı algoritma, özellikle düşük klorofil-a konsantrasyonlarının bulunduğu temiz sularda daha hassas sonuçlar vermektedir [Hu vd., 2019]. Bu yöntem, mavi (443 nm), yeşil (555 nm) ve kırmızı (670 nm) bantlar kullanılarak, spektral eğriliği hesaplayan bant farkına dayalı bir algoritmadır. Yani; oran değil, bant farkı esas alınmaktadır. CI değeri, yeşil bant ile mavi ve kırmızı bantlar arasındaki spektral eğriliğin büyüklüğüne göre belirlenir. Özellikle CI değeri negatif olduğunda, bu durum düşük klorofil-a seviyelerine karşılık gelmektedir ve CI algoritması bu aralıkta daha doğru tahminler sunmaktadır.

OC3M tabanlı algoritma ise, mavi (443 nm, 488 nm) ve yeşil (555 nm) bantların oranına dayalı olarak çalışan bir modeldir [O'Reilly vd., 2019]. Bu oran, klorofil-a'nın yüksek konsantrasyonlarda spektral yansıma üzerindeki etkisini ortaya koyar ve yüksek klorofil-a seviyelerinin tespitinde daha güvenilir sonuçlar sağlar. OC3M algoritması, genellikle açık okyanus gibi daha yüksek pigment seviyelerinin bulunduğu ortamlar için optimize edilmiştir.

Bu iki algoritma, hedefledikleri konsantrasyon aralıkları açısından da birbirini tamamlamaktadır. CI algoritması genellikle 0.25 mg/m^3 altındaki klorofil-a seviyeleri için, OC3M ise 0.4 mg/m^3 üzerindeki değerler için daha iyi performans göstermektedir [Hu vd., 2019]. Bu iki eşik değeri arasında kalan ($0.25\text{--}0.4 \text{ mg/m}^3$) klorofil-a konsantrasyonları için ise ağırlıklı ortalama alınarak harmanlanmış bir model kullanılmaktadır.

Söz konusu yöntemler MODIS sensörü verileriyle uyumlu olup, NASA'nın standart işlem zincirinde yer almaktadır. Bu çalışmada; CI algoritması düşük konsantrasyonları, OC3M algoritması ise yüksek konsantrasyonları belirlemek amacıyla birlikte kullanılmıştır.

Bu algoritmaların matematiksel yapıları, eşik değerleri ve birleşim stratejileriyle ilgili detaylı açıklamalar uygulama bölümünde ayrıca sunulmuştur.

2.4. Su Kalitesi Analizinde Kullanılan Spektral İndeksler

Uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanlarda su kalitesi parametrelerinin izlenmesi ve zaman içindeki değişimlerinin değerlendirilmesi açısından etkin çözümler sunmaktadır. Bu kapsamda en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri, spektral indeksler aracılığıyla su kütlelerinin optik özelliklerinin analiz edilmesidir. Bu tür indeksler, farklı dalga boylarındaki yansıma değerlerinin matematiksel olarak birleştirilmesiyle elde edilir ve genellikle bant oranlama ya da bant farkı alma esasına dayanır.

Spektral indeksler, görüntüleri zenginleştirerek hem görsel analizde algılanabilirliği artırmakta hem de çeşitli görüntü işleme teknikleri için daha anlamlı veriler üretmektedir. Bant oranlama ya da fark alma gibi hesaplamalara dayalı bu yaklaşımlar, spektral yansıtım eğrisindeki değişkenlikleri vurgular. Böylece, tekil bantlar kullanılarak doğrudan fark edilemeyen ayrıntılar daha net şekilde ortaya konulabilir [Sunar vd., 2016].

Bu işlemlerin etkili sonuçlar verebilmesi için, kullanılan indekslerin hedeflenen yüzeyin ya da nesnenin spektral yansıma ve soğurma özelliklerine uygun olarak tasarlanması gerekir. Bu doğrultuda, hedef obje ile ilgili olarak genellikle bir bantta yüksek yansıma, diğerinde ise düşük yansıma veya yüksek soğurma özelliği aranır [Bhardwaj vd., 2015].

Su kalitesine ilişkin parametrelerin değerlendirilmesinde kullanılan spektral indeksler; alg çoğalması, bulanıklık, çözünmüş organik madde varlığı, yüzey yansıtımı ve su bitki örtüsü gibi değişkenleri dolaylı olarak temsil edebilir. Literatürde sık karşılaşılan başlıca spektral su indeksleri arasında; MI, FAI, AFAI, NDTI, NDWI, AMEI, CI, ABDI gibi birçok spektral indeks yer almaktadır. Bu indekslerden bazıları özellikle alg çoğalmasına (örneğin; FAI, AFAI, ABDI), bazıları ise suyun bulanıklığı, yüzey yansıtımı veya optik özellikleri (örneğin; NDWI, NDTI) gibi parametrelere odaklanmaktadır.

Bu çalışmada, literatür taraması sonucu en çok karşılaşılan, Marmara Denizi'nin farklı optik ve biyolojik özelliklerine duyarlı olabileceği düşünülen 11 spektral indeks ele alınmıştır. Bu indekslerin isimleri, formülleri ve kaynakları **Tablo 2.2'**de sunulmuştur.

Aşağıda, çalışmada kullanılan her bir spektral indeksin temel özelliklerine kısaca yer verilmiştir. İlk olarak, zararlı alg patlamalarının izlenmesinde öne çıkan AFAI ele alınmıştır. AFAI, FAI algoritmasının modifiye edilmiş bir versiyonudur ve zararlı alg patlamalarının uydu görüntüleri üzerinden daha güvenilir şekilde izlenmesini hedeflemektedir. Bu yöntem, özellikle Hulan Gölü gibi iç sular için MODIS ve Landsat görüntülerinde farklı eşik değer aralıkları (MODIS: 0.05~0.12, Landsat: 0.01~0.02) tanımlayarak, sabit eşiklerin sınırlamalarını aşmayı amaçlamaktadır. Bu durum, farklı çözünürlük ve spektral özelliklere sahip uydu verileri arasında karşılaştırmalı analiz yapmayı mümkün kılar. AFAI hesaplamasında, kırmızı bant ile kırmızıötesi bantlar arasında tanımlanan spektral farklar kullanılarak alg varlığına duyarlı bir indeks oluşturulur.

Son yıllarda Marmara Denizi'nde meydana gelen yoğun müsilaj olayları, bu olguların uzaktan algılama yoluyla izlenmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda geliştirilen AMEI, Sentinel-2 uydusunun yeşil (B3), kırmızı (B4), NIR (B8) ve SWIR (B12) bantlarına dayalı olarak müsilaj oluşumlarını hassas biçimde tespit etmeyi amaçlayan bir indekstir. Bu indeks, özellikle Marmara Denizi'nde 2021 yılında meydana gelen müsilaj olaylarında yoğun şekilde test edilmiştir. Jenks doğal kırılma (natural breaks) algoritması ile otomatik eşik belirleme süreci, AMEI'nin yalnızca görsel olarak değil, aynı zamanda istatistiksel olarak da güvenilir sınıflandırma sağlamasını mümkün kılmıştır. Literatürde yaygın şekilde kullanılan 21 su indeksiyle yapılan karşılaştırmalarda, AMEI; Bhattacharyya Mesafesi, Jeffries–Matusita Mesafesi ve M-İstatistiği gibi ayırt edicilik ölçütlerinde üstün başarı göstermiştir. Ayrıca AMEI'nin, sarı ve beyaz gibi farklı müsilaj türlerini ayırt edebilme potansiyeli de vurgulanmıştır. Bu yönüyle AMEI, bulutlu görüntülerde dahi yüksek doğrulukla çalışabilmesi sayesinde, zaman serisi analizleri ve geniş alan izleme çalışmaları için etkili bir araç niteliğindedir.

Oligotrofik koşullarda, klorofil-a seviyelerinin uzaktan algılanmasında etkin olan bir diğer önemli indeks CI'dır. CI, suyun optik özelliklerine dayalı olarak su kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir spektral indekstir. Bu indeks, özellikle oligotrofik sular gibi düşük pigment yoğunluğuna sahip açık deniz ortamlarında optik değişimlerin daha hassas şekilde algılanmasına olanak tanır. CI; 443 nm (mavi), 555 nm (yeşil) ve 670 nm (kırmızı) dalga boylarına karşılık gelen yansıma bantları arasındaki farklara dayalı olarak hesaplanır.

Su kalitesi çalışmalarında CI değeri;

- Negatif çıktığında, optik olarak temiz, düşük klorofil-a ve düşük znm organik madde içeren sulara işaret eder.
- Pozitif veya sıfıra yakın çıktığında, fitoplankton yoğunluğu, askıdaki katı maddeler ya da znm organik içerik miktarındaki artışa bağlı olarak optik özelliklerin değiştiği sular söz konusudur.

Bu nedenle CI; açık deniz, kıyı şeridi ve görece büyük gl çalışmaları başta olmak üzere çeşitli ortamlarda su kalitesinin uzaktan algılamayla izlenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada değerlendirilen indekslerden biri de FAI'dir. Özellikle yüzen alglerin mekânsal olarak belirlenmesinde kullanılan bu indeks, kırmızı (645 nm), NIR (859 nm) ve SWIR (1240 nm) bantları arasındaki yansıma farklarına dayalı olarak hesaplanır. Kırmızı ve SWIR bantları arasında oluşturulan referans tabana göre NIR bandı ile olan fark alınarak elde edilen FAI değeri, su yüzeyinde bulunan alglerin spektral imzasını vurgular. Bu yöntem, atmosferik etkileri büyük ölçüde azaltarak, ince bulutlar veya güneş parlaması gibi optik gürültülere karşı dayanıklılık sağlar. MODIS ve Landsat gibi orta ve yüksek çözünürlüklü uydu verileriyle uyumlu çalışması sayesinde, özellikle kıyı bölgelerinde geniş alanlara yayılmış alg patlamalarının izlenmesinde etkili sonuçlar sunar. Bu çalışmada da FAI, Marmara Denizi'nde yüzen biyokütle değişimlerinin zaman serisi analizinde kullanılmıştır.

Sazlık ekosistemlerin korunma durumunu değerlendirmek amacıyla geliştirilen NDAVI, sucul bitkilerin spektral özelliklerine daha yüksek duyarlılık gösteren bir indekstir ve klasik kara bitkisi indekslerinin (rneğin NDVI veya EVI) su yüzeyinden kaynaklanan yansıma etkileri karşısında yetersiz kaldığı durumlarda daha güvenilir çıktılar sunmaktadır. Bitki örtüsünün seyrek veya orta yoğunlukta olduğu alanlarda dahi sucul vejetasyon seviyelerini hassas şekilde temsil edebilen NDAVI, Garda Gölü çevresindeki testlerde %90'ın üzerinde doğrulukla sazlık alanları sınıflandırmıştır.

Su kaynaklarındaki bulanıklık düzeyinin izlenmesine yönelik geliştirilen NDTI, özellikle küçük ve geçici göletlerin fiziksel özelliklerini yüksek uzaysal çözünürlüklü uydu görüntüleriyle haritalamak amacıyla önerilmiştir. Bu indeks, kırmızı ve yeşil bantlardan elde edilen yansıma değerlerinin normalize edilmiş fark oranına dayanarak, suyun bulanıklık derecesini yansıtan bir değer üretir. NDTI, özellikle yoğun tortu, alg

ve hayvansal kullanım sonucu oluşan bulanıklık gibi fiziksel özelliklerin mekânsal değişimini izlemeye olanak tanır. Senegal'in Ferlo bölgesinde yürütülen çalışmalarda, NDTI kullanılarak göletlerin içindeki bulanık ve temiz su alanları başarıyla ayrıştırılmıştır. Bu ayırım, Rift Valley Fever (RVF) gibi hastalıkların yayılımında rol oynayan ekolojik koşulların belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. NDTI'nin, klasik NDVI gibi vejetasyon indekslerinin yeterli hassasiyeti sağlayamadığı durumlarda, özellikle gölet içi yansılarda daha güvenilir sonuçlar sunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, su kalitesinin yanı sıra halk sağlığı çalışmalarında da potansiyel bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Bitki örtüsünün gelişim durumu ve yoğunluğunu izlemek amacıyla geliştirilen NDVI, çevresel izleme çalışmalarında en yaygın kullanılan spektral indekslerden biridir. Kırmızı ve NIR bantlardaki yansıma farklarını esas alarak, fotosentetik aktivite düzeyini dolaylı olarak yansıtır. Başlangıçta karasal bitki örtüsünün mevsimsel değişimlerini ve biyokütle dağılımını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş olsa da, zamanla farklı ekosistem türlerine uyarlanarak daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu çalışmada NDVI, Marmara Denizi genelinde diğer spektral indekslerle birlikte değerlendirilmiş ve sudaki biyotik faaliyetlerin uzaktan algılama yoluyla izlenmesinde klorofil-a konsantrasyonunun tahmini açısından etkinliği araştırılmıştır.

Bitki örtüsünün bünyesindeki sıvı su içeriğini uzaktan algılama yoluyla izlemek amacıyla geliştirilen NDWI_{Gao}, özellikle bitki dokularındaki su miktarına karşı duyarlılığı artırılmış bir spektral indekstir. İndeksin temeli, NIR ve SWIR bantları arasındaki normalize edilmiş fark oranına dayanır. Bu iki bandın seçimi, NIR yansımalarının bitki hücre yapısındaki değişimlere, SWIR yansımalarının ise su emilimine duyarlılığına dayanarak; yapraklardaki su içeriği farklılıklarının uzaktan algılanmasını mümkün kılar.

NDWI_{Gao}'nun en önemli özelliği, geleneksel bitki indekslerinin su stresini belirleme konusundaki sınırlılıklarını aşmasıdır. Çünkü, örneğin NDVI esas olarak klorofil düzeyine duyarlıyken, NDWI_{Gao} doğrudan yapraktaki serbest sıvı su miktarına tepki verir. Bu yönüyle indeks, fotosentetik kapasite yerine fizyolojik stres göstergelerinin analizi için daha uygun bir araç sunar.

Bu çalışmada NDWI_{Gao}, Marmara Denizi'ndeki sudan yansıyan spektral imzaların analizi bağlamında değerlendirilmiştir. Özellikle yüzey sularındaki biyotik

faaliyetlerin izlenmesinde, $NDWI_{Gao}$ 'nın suya bağılı yansıma özelliklerine karşı duyarlılığı sayesinde klorofil-a konsantrasyonu ile olan potansiyel ilişkisi incelenmiştir.

$NDWI_{McFeeters}$ açık su yüzeylerinin uzaktan algılama görüntülerinde belirgin hale getirilmesi ve karasal öğelerin (bitki örtüsü ve toprak gibi) baskılanması amacıyla geliştirilmiş spektral bir indekstir. Bu yöntem, yeşil ışık yansımalarının su yüzeyleri tarafından nispeten yüksek oranda yansıtılması ve NIR yansımalarının ise su tarafından güçlü şekilde soğurulması prensibine dayanmaktadır. Böylece, yeşil ve NIR bantları arasındaki yansıma farkı, açık su kütlelerinin diğer karasal unsurlardan ayrıştırılmasında etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu indeksin en önemli avantajı, bitki örtüsü ve toprak gibi NIR yansıması yüksek olan yüzeyleri negatif değerlere indirerek görüntüden dışlaması ve sadece su yüzeylerini pozitif değerlerle vurgulamasıdır. $NDWI_{McFeeters}$ bu özelliğiyle yalnızca yüzey suyu varlığını belirlemekle kalmaz, aynı zamanda bulanıklık gibi bazı su kalitesi parametrelerine ilişkin çıkarımlar yapılmasına da olanak tanır. Geniş bantlı verilerle çalışması, indeksin askıda katı madde ya da klorofil-a gibi parametreleri ayırt edebilme kapasitesini sınırlandırırsa da, genel bulanıklık seviyesini uzaktan algılama yoluyla saptamak için pratik bir araç olarak değerlendirilebilir. $NDWI_{McFeeters}$, klorofil-a konsantrasyonunun tahminine yönelik analizlerde diğer indekslerle birlikte kullanılmış ve aralarındaki ilişkiler karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır..

Son olarak, bu çalışmada değerlendirilen spektral indekslerden biri de SABI'dır. SABI, su yüzeyindeki alg birikimlerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş, özgün yapısıyla klasik su indekslerinden ayrılan bir algoritmadır. Bu indeksin temel mantığı, alglerin yüzeyde oluşturduğu yansıtıcı etkiyi spektral olarak ayırt etmek üzerine kuruludur. Bunun için; kırmızı, NIR, yeşil ve mavi bantları arasındaki yansıma ilişkilerini esas alarak, alg yoğunluğunun farklı ortam koşullarında bile belirlenmesini hedefler. Alg varlığı durumunda NIR bandında artan ve mavi bantta azalan yansıtım, SABI değerini pozitif yönde etkilerken; algsiz temiz sularda ise bunun tersi bir durum söz konusudur. Alawadi, bu algoritmayı MODIS sensöründen elde edilen verilerle test etmiş ve hem yüksek hem de düşük alg yoğunluklarına sahip örnekleme alanlarında indeksin istatistiksel güvenilirliğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada SABI, Marmara Denizi genelinde diğer spektral indekslerle birlikte analiz edilmiş, klorofil-a konsantrasyonu ile olan ilişkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2.2: Çalışmada kullanılan spektral indeksler, formülleri ve kaynakları.

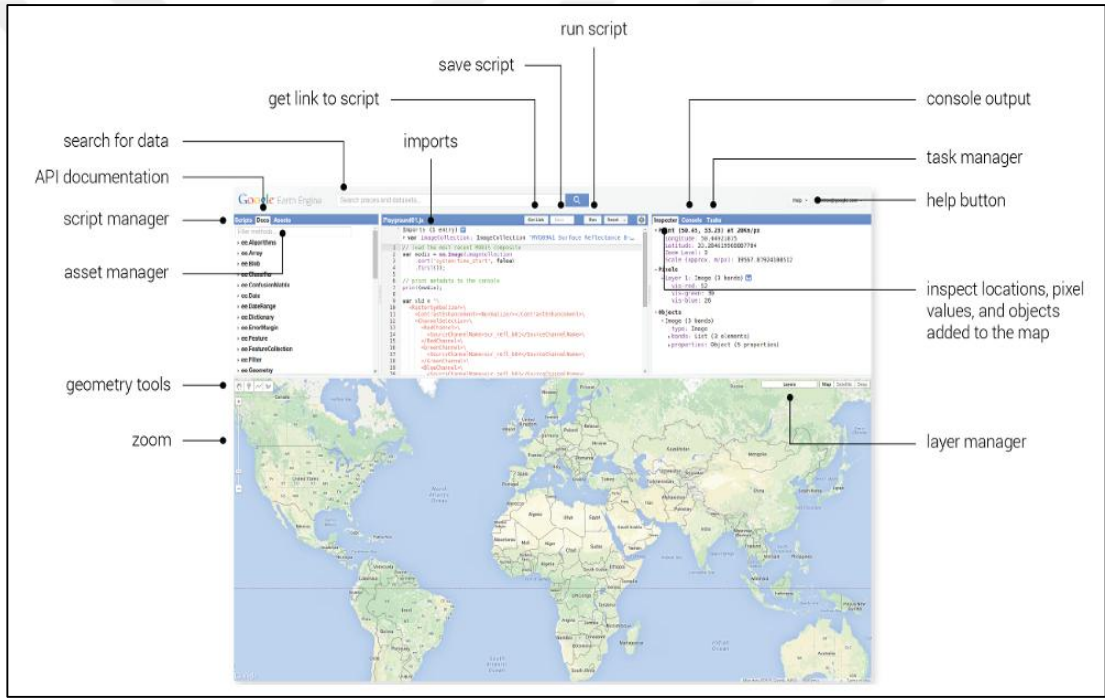
İndeks	Formül	Kaynak
AFAI	$AFAI = R_{rs,NIR} - R_{rs,RED} + (R_{rs,SWIR} - R_{rs,RED}) \times 0.5$	Fang vd. [2018]
AMEI	$AMEI = \frac{(2 \times R_{rs,RED}) + R_{rs,NIR} - (2 \times R_{rs,SWIR})}{R_{rs,GREEN} + (0.25 \times R_{rs,SWIR})}$	Çölkesen vd. [2023]
CI	$CI = R_{rs,555} - [R_{rs,443} + (555-443)/(670-443) \times (R_{rs,670} - R_{rs,443})]$	Hu vd. [2012]
FAI	$FAI = R_{rs,NIR} - (R_{rs,RED} + (R_{rs,SWIR} - R_{rs,RED}) \times (\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}) / (\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED}))$ $\lambda_{RED}=645 \text{ nm}, \lambda_{NIR}=859 \text{ nm}, \lambda_{SWIR}=1240 \text{ nm}$	Hu [2009]
MI	$MI = (((R_{rs,NIR} + R_{rs,GREEN}) / 2) - R_{rs,BLUE}) / R_{rs,SWIR}$	Vescovi vd. [2003]
NDAVI	$NDAVI = (R_{rs,NIR} - R_{rs,BLUE}) / (R_{rs,NIR} + R_{rs,BLUE})$	Villa vd. [2013]
NDTI	$NDTI = (R_{rs,RED} - R_{rs,GREEN}) / (R_{rs,RED} + R_{rs,GREEN})$	Lacaux vd. [2007]
NDVI	$NDVI = (R_{rs,NIR} - R_{rs,RED}) / (R_{rs,NIR} + R_{rs,RED})$	Rouse vd. [1973]
NDWI _{Gao}	$NDWI_{Gao} = (R_{rs,NIR} - R_{rs,SWIR}) / (R_{rs,NIR} + R_{rs,SWIR})$	Gao [1996]
NDWI _{Mc}	$NDWI_{McFeeters} = (R_{rs,GREEN} - R_{rs,NIR}) / (R_{rs,GREEN} + R_{rs,NIR})$	McFeeters [1996]
SABI	$SABI = (R_{rs,NIR} - R_{rs,RED}) / (R_{rs,BLUE} + R_{rs,GREEN})$	Alawadi [2010]

2.5. GEE Platformu ve Değişim Analizlerinde Kullanımı

Bu çalışmada kullanılan analiz altyapısı ve veri setleri, uzaktan algılama ve bulut bilişim teknolojilerinin entegre kullanımıyla oluşturulmuştur. Analizler, GEE platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. GEE, Google tarafından geliştirilen, kullanıcıların büyük hacimli coğrafi verileri çevrimiçi olarak erişip işleyebildiği web tabanlı bir bulut bilişim ortamıdır. 2010 yılının sonlarında kullanıma sunulan bu platform, MODIS, Landsat, Sentinel gibi çok sayıda uydu görevinden elde edilen petabayt büyüklüğündeki görüntü arşivini kullanıcıların hizmetine sunmaktadır. GEE'nin sağladığı bu çevrimiçi işlem altyapısı sayesinde, büyük ölçekli uzaktan algılama verileri kişisel bilgisayarlara indirilmeden analiz edilebilmekte, bu da araştırmacılara hem zaman hem işlem gücü açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

[Dereli, 2018]. Platform üzerinde geliştirilen komut dosyaları, JavaScript ya da Python programlama dilleri kullanılarak yazılmakta ve Entegre Geliştirme Ortamı (Integrated Development Environment: IDE) adı verilen bir ara yüz ile çalıştırılmaktadır [Web 10].

Şekil 2.8’de görülen GEE kod editörü sayesinde araştırmacılar, veriye erişimden görsel çıktılarına kadar tüm süreci tek bir platform üzerinde yönetebilmektedir. Ara yüzde veri arama, komut dosyası yazımı, harita görüntüleme, konsol çıktısı ve görev yönetimi gibi bileşenler yer almaktadır. Bu yapılar, kullanıcının hem görsel hem de analitik işlemleri aynı platform üzerinde gerçekleştirmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 2.8: GEE kod editörü ara yüzü [Web 11].

GEE’nin kod düzenleyicisi, otomatik tamamlama ve gerçek zamanlı hata uyarıları aracılığıyla kullanıcıyı olası sözdizimi hatalarına karşı yönlendirir. Platform, yerleşik yardımcı komut dizinleri sayesinde uydu görüntülerini çevrimiçi olarak işleyerek; bölgesel haritalama, doğal afet izlemesi, tarımsal uygulamalar, bitki örtüsü değerlendirmesi, orman ve su kaynakları yönetimi gibi çok çeşitli araştırma alanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. GEE’nin geniş veri arşivi arazi örtüsü ve arazi kullanımındaki değişimleri uzun dönemli olarak izlemeye olanak tanır. Görüntü

işleme, sınıflandırma, istatistik çıkarımı, değişim analizi ve zaman serisi incelemeleri gibi karmaşık işlemleri bulut üzerinde, kullanıcıya kod seviyesinde kolaylaştırılmış araçlarla sunar. Elde edilen sonuçlar harita, çizgi grafiği, tablo veya diğer etkileşimli görselleştirmeler şeklinde paylaşılabildiğinden, çalışma özellikle sulak alanların bölgesel ölçekte izlenmesi ve sürdürülebilir yönetimi açısından önemli bir analitik zemin oluşturur [Güneş, 2024].

Tez kapsamında, GEE platformu yalnızca veri erişimi ve işleme aracı olarak değil, aynı zamanda zamansal ve mekânsal analizlerin bütünleşik bir şekilde yürütülebildiği bir modelleme ortamı olarak kullanılmıştır. Çalışmada MODIS Aqua uydusuna ait iki farklı veri seti temel alınmıştır: MYD09GA.061 koleksiyonu üzerinden CI, AFAI, FAI, NDWI_{Gao} ve AMEI gibi çeşitli spektral indeksler hesaplanmış; MOD09GA.006 koleksiyonundan ise CI ve OC3M algoritmaları kullanılarak klorofil-a konsantrasyonları elde edilmiştir. GEE'nin sunduğu bulut tabanlı işlem altyapısı sayesinde, yalnızca ideal kaliteye ve bulutsuz koşullara sahip pikseller seçilerek, aylık ve yıllık düzeyde ortalama yansıma değerleri hesaplanmıştır. Bu ortalamalar doğrultusunda, yıllık zamansal eğilimleri gösteren grafikler ve mekânsal dağılımı temsil eden haritalar üretilmiştir. Üretilen haritalar GeoTIFF formatında dışa aktarılmış; böylece görsel analizler ve sunumlar için yeniden kullanılabilir çıktılar oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde, hem uzun dönemli su kalitesi takibi hem de farklı indekslerin klorofil-a ile ilişkisini test etmeye yönelik istatistiksel analizler güvenilir bir altyapı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

GEE platformunun en önemli avantajlarından biri de, geliştirilen kodların yeniden kullanılabilir ve paylaşılabılır bir yapıya sahip olmasıdır. Bu çalışmada oluşturulan JavaScript tabanlı komut dosyaları, farklı tarih aralıkları, indeks türleri veya çalışma alanları için yalnızca birkaç parametre değiştirilerek yeniden çalıştırılabilecek esnek bir yapıda tasarlanmıştır. Bu modüler yapı sayesinde, farklı kullanıcılar aynı analiz mantığını kendi coğrafi bölgelerine veya veri setlerine kolayca uyarlayabilmektedir. Ayrıca GEE'nin sağladığı çevrimiçi paylaşım altyapısı ile yazılan kodlar bağlantı (URL) üzerinden diğer araştırmacılarla paylaşılabilmekte ve ortak projelerde birlikte düzenlenebilmektedir. Böylece, uzaktan algılama ve su kalitesi analizlerine yönelik tekrarlanabilirlik, şeffaflık ve iş birliği olanakları önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle açık bilim ve veri şeffaflığı ilkelerine uygun olarak, bu tür kod temelli yaklaşımın gelecekteki benzer çalışmalarda da referans alınması mümkün hale gelmektedir.

GEE son yıllarda akademik çalışmalarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, **Acar vd. [2021]** tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2021 yılında Marmara Denizi'nde gözlenen müsilaj oluşumunun uzaktan algılama teknikleri ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 2021 Mart-Haziran tarihleri arasında edinilen Sentinel-2 görüntüleri, NDVI, NDWI, Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) ve Automated Water Extraction Index (AWEI) indeksleri ile zenginleştirilmiş ve Random Forest (RF) algoritmasıyla sınıflandırılmıştır. GEE platformunun sunduğu bulut tabanlı hesaplama gücü ve JavaScript programlama altyapısı sayesinde, toplamda 94 uydu görüntüsü işlenerek Marmara Denizi genelinde beş ayrı tarih aralığı için müsilaj yayılım haritaları oluşturulmuştur. GEE üzerinden geliştirilen kod ile görüntüler bulut oranı $\leq \%5$ olacak şekilde filtrelenmiş, median mozaiklerle tekil görüntüler oluşturulmuş ve tüm sınıflandırma işlemleri platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Müsilajın mekansal yayılımı ile kapladığı alan miktarı hassas biçimde hesaplanmış, en yüksek kapladığı alanın 12.741,94 hektar olduğu belirlenmiştir. Sınıflandırma doğruluğu ise $\%98-99$ arasında değişmiştir. Bu çalışma, GEE'nin denizel ortamlarda biyolojik olayların mekânsal olarak izlenmesi için yüksek doğruluk, hız ve donanımsal bağımsızlık sağladığını somut şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca geliştirilen yöntem, benzer analizlerin başka bölgelerde de hızlıca uygulanabilir olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

GEE, son yıllarda tatlı su ekosistemlerinde alg patlamalarının izlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda da etkin biçimde kullanılmaktadır. Örneğin, **Çölkesen vd. [2023]** tarafından Burdur Gölü'nde yürütülen araştırmada, Sentinel-2 uydu verileri kullanılarak yüzen alglerin mekânsal dağılımı analiz edilmiştir. Çalışmada, FAI, AFAI, SABI ve ABDI gibi dört spektral indeksin yanı sıra piksel ve nesne tabanlı sınıflandırma algoritmaları da karşılaştırılmıştır. GEE, zaman serisi analiziyle uygun tarihlerdeki görüntülerin seçilmesi, indeks hesaplamaları ve tematik haritaların oluşturulması süreçlerinde kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, FAI indeksinin uygun eşik değerleriyle yüksek doğruluk sağladığını, piksel tabanlı sınıflamanın ise düşük yoğunluklu alglerin tespitinde daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde, Çin'in Taihu Gölü'nde yürütülen uzun dönemli bir çalışmada da GEE platformunun sunduğu işlem gücünden faydalanılmıştır **[Jia vd., 2021]**. Bu araştırmada, MODIS uydu görüntüleri kullanılarak 2000–2018 yılları arasındaki siyanobakteri patlamalarının zamansal ve mekânsal dinamikleri analiz edilmiştir.

Geliştirilen otomatik iş akışı ile yaklaşık 7000 uydu görüntüsü işlenmiş; GEE üzerinden yıllık ortalamalar hesaplanarak FAI indeksine dayalı haritalar oluşturulmuştur. Sıcaklık, rüzgâr ve besin yükü gibi çevresel faktörlerin siyanobakteri dağılımına etkisi değerlendirilmiş; en yoğun patlamaların 2007 ve 2017 yıllarında yaşandığı belirlenmiştir. FAI indeksinin eşik değeriyle yapılan sınıflamaların sınırlılıklarına rağmen, genel doğruluk açısından yeterli performans sunduğu vurgulanmıştır. Çalışma, GEE'nin yalnızca veri işleme değil, aynı zamanda çevresel politika geliştirmede karar destek aracı olarak da potansiyel taşıdığını göstermesi açısından dikkat çekicidir.

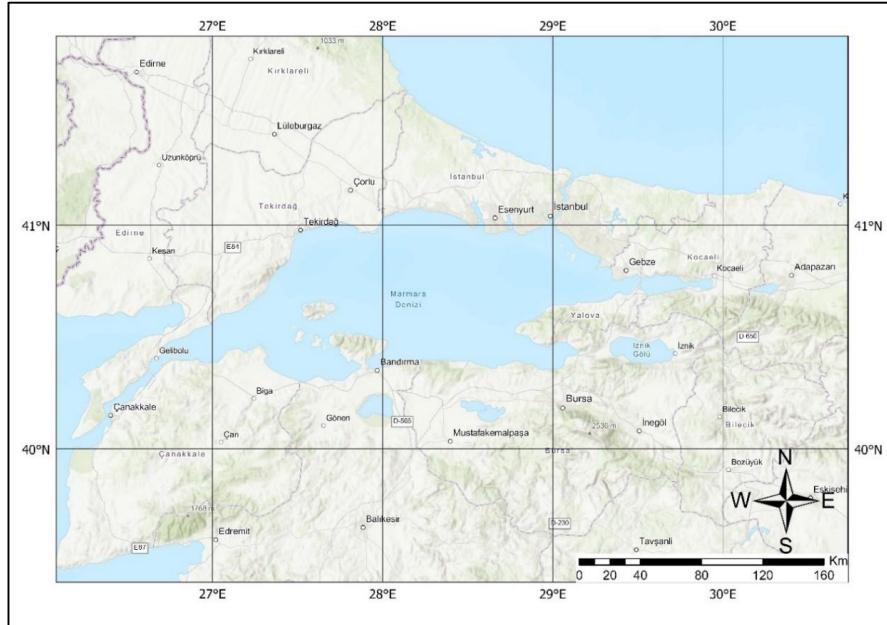
Yukarıda bahsedilenler doğrultusunda, GEE platformunun tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek hacimli uydu verilerine hızlı ve çevrimiçi erişim sağlaması, farklı veri setleriyle entegre analiz yapılabilmesi ve kullanıcı dostu bir kodlama ortamı sunmasıdır. Özellikle 20 yılı aşkın MODIS verisinin pikseller düzeyinde hızlı bir şekilde işlenmesi, bulut maskesi ve kalite kontrolü uygulanması, zaman serisi grafiklerinin ve mekânsal haritaların üretimi gibi işlemlerin herhangi bir yerel donanıma ihtiyaç duymadan yapılabilmesi, bu platformu diğer geleneksel yöntemlere göre oldukça avantajlı kılmıştır. Ayrıca açık kaynak yapısı, kod paylaşım kolaylığı ve sürdürülebilir araştırmalar için sunduğu esneklik de, GEE'nin bu tür çevresel izleme çalışmalarında yaygın biçimde tercih edilmesini sağlamaktadır.

3. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

3.1. Çalışma Alanı

Marmara Denizi, tamamıyla tek bir ülke sınırları içerisinde yer alması nedeniyle dünyada nadir görülen iç denizlerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Yarı kapalı bir havza niteliğindeki bu deniz, İstanbul ve Çanakkale Boğazları aracılığıyla Karadeniz ile Ege Denizi arasında doğal bir geçiş sahası oluşturarak iki denizi birbirine bağlamaktadır. Sahip olduğu bu jeostratejik konum sayesinde Marmara Denizi, yalnızca önemli bir hidrolojik geçiş bölgesi değil, aynı zamanda Avrupa ile Asya kıtaları arasında doğal bir köprü; ekonomik ve lojistik açıdan da kritik bir merkez olarak öne çıkmaktadır [Gazioğlu vd., 2002].

Şekil 3.1’de Marmara Denizi’nin coğrafi konumu, çevresindeki illerle birlikte sunulmuştur. Harita, çalışmanın yürütüldüğü alanın mekânsal bağlamını görsel olarak ortaya koymakta; denizle etkileşim hâlindeki karasal birimleri açıkça göstermektedir.



Şekil 3.1: Marmara Denizi ve çevresindeki yerleşim alanlarını gösteren genel konum haritası [Acar vd., 2021].

Yaklaşık 11.500 km² yüzölçümüne sahip olan Marmara Denizi, ortalama 240 km uzunluğunda ve 70 km genişliğindedir **[Gazioğlu vd., 2002]**. Deniz, iki tabakalı bir su kütlesi yapısıyla karakterize edilmektedir. Üst tabakada, Karadeniz kökenli ve düşük tuzluluğa sahip sular bulunurken; alt tabakada ise Ege ve Akdeniz kökenli, daha tuzlu ve yoğun sular yer almaktadır. Yüzeydeki düşük tuzlu tabaka yaklaşık 25 metre derinliğe kadar uzanmakta; bunun altında ise yoğun ve tuzlu su kütlesi sirkülasyon göstermektedir **[Beşiktepe vd., 1994]**. Bu çift tabakalı yapı, Marmara Denizi'ni fiziksel ve kimyasal açıdan oldukça dinamik ve özgün bir sistem hâline getirmektedir.

Marmara Denizi; İstanbul, Kocaeli, Bursa, Tekirdağ, Yalova, Balıkesir ve Çanakkale gibi yüksek nüfuslu ve sanayileşmiş kentlerle çevrilidir. Bu illerdeki sanayi tesisleri, tersaneler, rafineriler ve yoğun yerleşim alanları, uzun yıllardır evsel ve endüstriyel atıkların denize doğrudan veya dolaylı yollarla deşarj edilmesine neden olmuştur. Bu durum, deniz üzerinde yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda kimyasal açıdan da artan bir çevresel baskı oluşturmuştur **[Doğan ve Burak, 2007]**. Her ne kadar kamuoyu baskısı sonucu çeşitli çevre koruma tedbirleri devreye alınmış olsa da, ekosistem kalitesi zamanla gerilemiş ve bazı eşiklerin aşılmasıyla birlikte ekolojik krizler yaşanmıştır. Özellikle İzmit ve Gemlik Körfezleri, bu kirlilik baskısının en yoğun hissedildiği bölgeler olup; genel sirkülasyon sistemine kıyasla daha sınırlı su dolaşımına sahip olmaları nedeniyle de bu baskılardan daha fazla etkilenmektedir.

Marmara Denizi'nde yaşanan çevresel bozulmaların en çarpıcı yansımalarından biri, 2007 ve 2008 yıllarında gözlenen müsilaj olaylarıdır. Deniz yüzeyinde geniş alanları kaplayan bu jelimsi yapı, fitoplanktonların aşırı çoğalması sonucu salınan dışsal organik maddelerin birikimiyle oluşmuştur **[Okyar vd., 2015]**, **[Tüfekçi vd., 2010]**. 2021 yılında yaşanan müsilaj krizi ise, kapsamı ve süresi bakımından tarihsel olarak en ciddi örneklerden biri olarak kaydedilmiştir. Özellikle İzmit ve Gemlik Körfezleri'nde yoğun şekilde görülen bu olay, sudaki çözünmüş oksijen seviyesinin düşmesine, deniz tabanında yaşayan canlıların kitlesel ölümlerine ve balıkçılık faaliyetlerinin ciddi biçimde sekteye uğramasına yol açmıştır **[Kavzoğlu vd., 2021]**.

Tüm bu veriler, Marmara Denizi'nin hem doğal özellikleri hem de insan kaynaklı baskılar nedeniyle çevresel açıdan son derece kırılgan bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, bölgenin sürdürülebilir biçimde izlenmesi ve yönetilmesi yalnızca ekosistem sağlığı açısından değil, aynı zamanda sosyoekonomik ve jeostratejik bakımdan da kritik bir önem taşımaktadır.

3.2. Veri Seti

Bu çalışmada su kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan uydu verileri, GEE arşivinde bulunan MODIS ve Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) sensörlerinden temin edilmiştir.

MODIS, NASA tarafından geliştirilen ve hem Terra hem de Aqua uydularında yer alan çok amaçlı bir uzaktan algılama sensörüdür. MODIS'in temel tasarım amacı; kara, okyanus ve atmosfer sistemlerinin küresel ölçekte izlenebilmesini sağlamak üzere yüksek spektral çeşitlilikte ve geniş görüş alanına sahip sürekli bir veri akışı sağlamaktır.

MODIS sensörü, 0.4–14.4 μm dalga boyu aralığını kapsayan 36 ayrı spektral banttan oluşur. Bu bantlar, elektromanyetik spektrumun görünür, NIR, SWIR, orta kızılötesi ve termal bölgelerinden veri toplar. Her bant, farklı çevresel değişkenlerin izlenmesine olanak tanır. Örneğin; görünür bantlar bitki örtüsü ve su yüzeyi gözlemleri için kullanılırken, termal bantlar yüzey sıcaklığı ve bulut analizleri için kritik bilgiler sağlar.

Uzamsal çözünürlük bakımından, MODIS'in bantları 250 m (Bant 1–2), 500 m (Bant 3–7) ve 1000 m (Bant 8–36) olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Bu yapı, hem ayrıntılı hem de geniş alanlı gözlemler için çok yönlü bir kullanım sunar. Sensörün 2330 km'lik geniş tarama alanı, Dünya'nın tüm yüzeyini yaklaşık her 1-2 günde bir kapsamasını mümkün kılar. Bu yüksek zamansal çözünürlük, MODIS'i dinamik çevresel olayların (örneğin alg patlamaları, yangınlar, kar erimesi, sıcaklık dalgaları vb.) gözlenmesi açısından eşsiz kılar.

MODIS verileri, NASA tarafından geliştirilen Earth Observing System (EOS) kapsamında ücretsiz olarak sunulmakta ve GEE gibi bulut tabanlı platformlar üzerinden de erişilebilmektedir. Bu veriler, yüzey yansımaları, kara yüzeyi sıcaklığı, bulut örtüsü, atmosferik profil ve okyanus renk parametreleri gibi çok sayıda çevresel değişkenin nicel olarak analiz edilmesini mümkün kılar.

MODIS sensörü, özellikle su kalitesi izleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek spektral çözünürlüğü sayesinde klorofil-a, toplam süspansiyon katı, renkli çözünmüş organik madde (CDOM) ve yüzey alg patlamalarının tespiti gibi analizlerde etkili sonuçlar üretir. Geniş tarama kapasitesi ve

günlük veri üretimi ile geniş alanlı iç sular ve kıyı bölgelerinde zamansal değişimlerin takip edilmesine olanak tanır.

Özellikle MYD09GA.061 ve MOD09GA.006 gibi ürünler, yüzey yansımaya değerlerini sağlayan kalibrasyonlu görüntüler sunarak, hem spektral indeks hesaplamaları hem de klorofil-a kestiriminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu ürünlerde bulunan bantlar, 405–2155 nm aralığında değişen yansımaya özelliklerine sahip olup, NDVI, NDWI, CI, AFAI gibi birçok uzaktan algılama indeksinin hesaplanmasına imkân tanır.

MODIS'in başarısı yalnızca teknik özelliklerinden değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve tutarlı veri sağlayabilme kapasitesinden de kaynaklanmaktadır. 2000 yılından bu yana kesintisiz çalışan bu sistem, araştırmacılara 20 yılı aşkın süredir karşılaştırmalı analiz imkânı sunmakta ve iklim değişikliği, su kalitesi bozulması ve biyolojik süreçlerdeki eğilimlerin belirlenmesinde temel bir kaynak görevi görmektedir **[Web 12], [Web 13], [Web 14]**.

Sentinel-2 verileri ise bu çalışmada yalnızca Marmara Denizi'nin yüzey alanının yüksek mekânsal çözünürlükle belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından Copernicus programı kapsamında geliştirilen Sentinel-2 görevleri, 10 ila 60 metre arasında değişen mekânsal çözünürlüğe ve 13 spektral banda sahip geniş alan taramalı optik görüntüler sağlamaktadır. GEE platformunda yer alan COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED koleksiyonu üzerinden erişilen bu veriler, atmosferik olarak düzeltilmiş yansımaya değerlerini içermektedir. Ayrıca, Sentinel-2 ürünlerine ait QA60 bulut maskesi bantları, analizlerde güvenilir yüzey alanı tespiti açısından önemli bir kalite kontrol bileşeni sunmaktadır **[Web 15]**. Bu yönüyle Sentinel-2, MODIS'e kıyasla daha yüksek mekânsal ayrıntı gerektiren sınırlama işlemleri için ideal bir yardımcı kaynak olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan uydu verilerinin genel amaçları şu şekildedir;

- MODIS görüntüleri (Terra/Aqua platformları) klorofil-a kestirimi ve ilgili spektral indekslerin (FAI, AFAI, AMEI, MI vb.) hesaplanması dâhil olmak üzere tüm temel analizlerde ana veri kaynağı olarak kullanılmıştır.
- Sentinel-2 verileri ise Marmara Denizi'nin yüzey alanını yüksek mekânsal çözünürlükle belirlemek amacıyla değerlendirilmiş; klorofil-a ya da diğer indeks hesaplamalarına dâhil edilmemiştir.

Analizlerde; GEE platformu üzerinden erişilebilen ve NASA tarafından sağlanan, 500 metre mekânsal çözünürlüğe sahip MYD09GA.061 ürünü ile 1000 metre mekânsal çözünürlüğe sahip MODOCGA.006 ürünü kullanılmıştır. Günlük yüzey yansımaları sunan bu ürünlerden MYD09GA.061 koleksiyonu ile su kalitesi analizlerinde kullanılan çeşitli spektral indeksler (AFAI, FAI, CI, MI, NDVI, NDWI vs.) hesaplanmış, beraberinde de MODOCGA.006 koleksiyonundaki yansımalar değerleri temel alınarak klorofil-a konsantrasyonu uzaktan algılama algoritmaları ile tahmin edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan MODIS ve Sentinel koleksiyonlarının bilgileri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan verilerin özellikleri ve tezdeki kullanım amaçları.

Ürün Kodu	Bant İsmi	Dalga Boyu (nm)	Çözünürlük	Tezdeki Kullanım Amacı
MYD09GA.061	sur_refl_b01 sur_refl_b02 sur_refl_b03 sur_refl_b04 sur_refl_b05 sur_refl_b06 sur_refl_b07	620-670 841-876 459-479 545-565 1230-1250 1628-1652 2105-2155	500 m, Günlük	Spektral indeks hesaplama
MODOCGA.006	sur_refl_b08 sur_refl_b09 sur_refl_b10 sur_refl_b11 sur_refl_b12 sur_refl_b13 sur_refl_b14 sur_refl_b15 sur_refl_b16	405-420 438-448 483-493 526-536 546-556 662-672 673-683 743-753 862-877	1000 m, Günlük	Klorofil-a kestirimi
COPERNICUS S2/SR HARMONIZED	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B8A B9 B11 B12	443.9 (S2A)/442.3 (S2B) 496.6 (S2A)/492.1 (S2B) 560 (S2A)/559 (S2B) 664.5 (S2A)/665 (S2B) 703.9 (S2A)/703.8 (S2B) 740.2 (S2A)/739.1 (S2B) 782.5 (S2A)/779.7 (S2B) 835.1 (S2A)/833 (S2B) 864.8 (S2A)/864 (S2B) 945 (S2A)/943.2 (S2B) 1613.7 (S2A)/1610.4 (S2B) 2202.4 (S2A)/2185.7 (S2B)	60 m, 5 Gün 10 m, , 5 Gün 10 m, 5 Gün 10 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün 10 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün 60 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün 20 m, 5 Gün	Marmara Denizi'nin yüzey alanının çıkarılması

4. UYGULAMA

4.1. Marmara Denizi'nin Yüzey Alanının Çıkarılması

Çalışmanın ilk aşamasında, Marmara Denizi'ne ait su yüzeyi sınırının hassas bir şekilde belirlenebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, yüksek mekânsal çözünürlük sunan Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Görüntüler, GEE platformu kullanılarak “COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED” koleksiyonundan temin edilmiştir. Atmosferik olarak düzeltilmiş ve 10–20–60 m çözünürlükte sunulan bu koleksiyon, yüzey ayrımı açısından MODIS verilerine kıyasla daha avantajlıdır.

2021 yılı yaz dönemine ait ve bulut oranı %20'nin altında olan görüntüler seçilerek GEE ortamında işlenmiştir. Bunun için öncelikle görüntülere bulut maskesi uygulanmış, yalnızca açık ve temiz pikseller değerlendirmeye alınmıştır. Tarih filtrelemesi sonucunda da, elde edilen görüntü koleksiyonunun medyanı alınmıştır. Oluşan bileşik görüntü, elle belirlenen ve Marmara Denizi'nin yaklaşık sınırlarını içeren bir alan üzerinden kırılarak su yüzeyi tespitine hazır hale getirilmiştir.

Su yüzeyini tespit edebilmek amacıyla üç farklı yöntem uygulanmıştır. Bunlar;

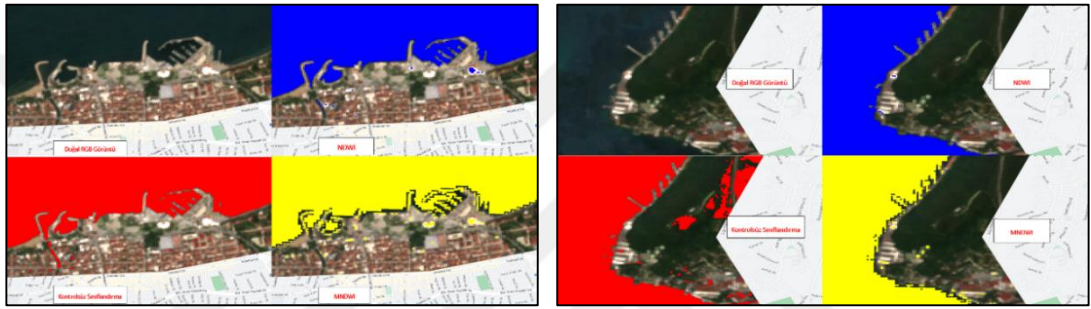
- $NDWI_{McFeeters}$,
- Modified NDWI (MNDWI) ve
- Kontrolsüz Sınıflandırma

$NDWI_{McFeeters}$ ve MNDWI indeksleri, yeşil, NIR ve SWIR bantları kullanılarak normalize fark mantığında hesaplanmıştır. Elde edilen indeks görüntülerine sabit eşik değerleri uygulanmış ve bu eşiklere göre su/kara ayrımı yapılmıştır. Kontrolsüz sınıflandırma yöntemi ise, görüntüdeki pikselleri benzerliklerine göre 2 sınıfa ayıran K-means algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir. Her üç yöntemde de oluşturulan su maskeleri raster formatta alan hesabına tabi tutulmuş, ardından vektör formata dönüştürülerek daha sonraki işlemler için uygun hale getirilmiştir.

Görsel yorumlama sürecinde, Marmara Denizi'nin farklı kıyı kesimlerinden alınan yakınlştırılmış görüntüler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. **Şekil 4.1**'de, örnek olarak sunulan farklı kıyı alanları için; doğal renkli Sentinel-2 görüntüsü ile

NDWI_{McFeeters}, MNDWI ve kontrolsüz sınıflandırma yöntemleriyle tespit edilen su alanları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4.1'den de görüleceği üzere; NDWI_{McFeeters} yöntemi, su/kara ayırımında diğer yöntemlere kıyasla daha kararlı ve tutarlı sonuçlar üretmiştir. MNDWI yöntemi özellikle kentsel alanlarda yanlış ayrımlara neden olurken, kontrolsüz sınıflandırma yöntemi bazı gölgeli alanları yanlışlıkla su olarak değerlendirmiştir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen aşamalarında NDWI_{McFeeters} yöntemi ile elde edilen su sınırı referans olarak kabul edilmiştir.



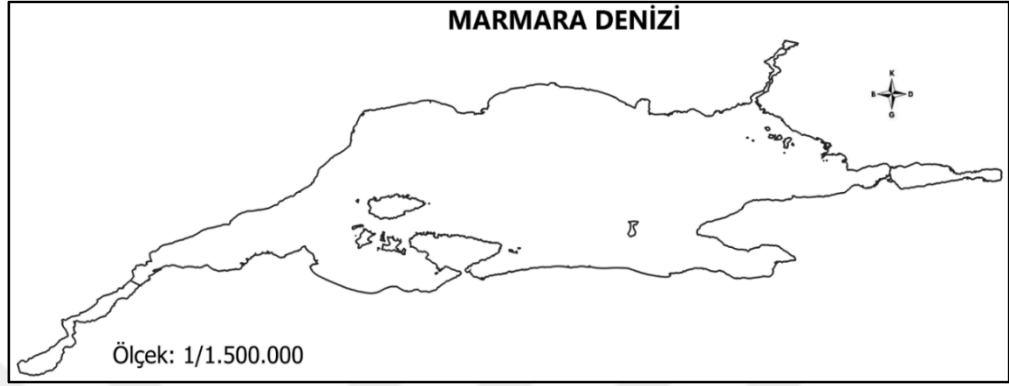
Şekil 4.1: Su sınırı belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması.

Bir önceki aşamada GEE platformundan NDWI_{McFeeters} yöntemiyle belirlenen su yüzeyi sınırı, analizlerin hassas yürütülebilmesi amacıyla vektör formatında dışarı aktarılmıştır. Bu veri, QGIS ortamında açılarak bir dizi mekânsal düzenleme işlemine tabi tutulmuştur. Öncelikle vektör veri içerisinde oluşan boşluklar, dışarıya taşan hatalı alanlar ve geometrik bozulmalar manuel olarak temizlenmiştir. Bu adım, sınır çizgisinin gerçekçi ve analizlere uygun bir yapıya kavuşturulması açısından önemlidir.

Düzenlenen sınır verisine, su kalitesi analizlerini karasal etkilerden arındırmak amacıyla -1000 metrelik tampon uygulanmıştır. Tampon mesafesinin 1000 metre seçilmesinin temel nedeni, su kalitesi analizlerinde kullanılacak uydu görüntülerinin mekânsal çözünürlüğünün de 1000 metre olmasıdır. Bu işlem sonucunda, deniz yüzeyi sınırı içeri yöne doğru 1000 metre ötelenmiş ve böylece karasal etkilerden arındırılmış daha güvenilir bir analiz alanı tanımlanmıştır. **Şekil 4.2**'de, tüm düzenlemeler sonrası elde edilen nihai Marmara Denizi sınırı görsel olarak sunulmaktadır.

Nihai sınır verisi üzerinden, bölgesel düzeyde analizler yapabilmek amacıyla Marmara Denizi alt bölgelere ayrılmıştır. Bu kapsamda, kıyı çizgisinden itibaren yaklaşık 12–

15 kilometre aralıklarla değişen ikinci bir negatif tampon uygulanarak kıyı şeritleri tanımlanmıştır. Alt b6lgeler, Marmara Denizi'ne kıyısı olan illerin yaklaşık idari sınırları ile deniz morfolojisi dikkate alınarak oluşturulmuştur.



şekil 4.2: Analizlerde kullanılan Marmara Denizi yzey sınırı.

Alt b6lge tanımlamaları yapılırken kıyı ve k6rfez ayırımı temel alınmış; bu doğrultuda Marmara Denizi, 10 alt b6lgeye ayrılmıştır. şekil 4.3'te, Marmara Denizi'nin alt b6lgelere ayrılmış son hali g6rsel olarak sunulmuştur. şekle g6re s6z konusu b6lgeler; İstanbul, Yalova, Bursa, çanakkale ve Tekirdağ kıyı şeritleri ile İzmit, Gemlik, Bandırma ve Erdek k6rfezleri şeklinde belirlenmiştir. Buna ek olarak, denizin açık ve derin kısmını temsil edecek şekilde "Marmara Denizi Ortası" adlı bir b6lge daha tanımlanmıştır. Bu b6lge, 6zellikle kıyısal baskılardan uzak olduğu varsayılan alanları temsil etmekte ve karşılaştırmalı analizlerde referans g6revi 6stlenmektedir.



şekil 4.3: Marmara Denizi için oluşturulan 10 alt b6lge ve genel sınır haritası.

Alt bölgelerin tanımlanmasındaki temel amaç, su kalitesi değişimlerinin mekânsal dağılımını incelemek ve özellikle kıyı ile körfez alanları arasındaki farkları ortaya koymaktır. Böylece kirletici baskıların yoğunlaştığı ve su kalitesinin daha stabil olduğu bölgeler belirlenebilmiştir. İlave olarak, Marmara Denizi'nin tamamı da ayrı bir analiz bölgesi olarak değerlendirilmiş, toplamda 11 bölge için aylık ve yıllık klorofil-a ile spektral indeks hesaplamaları yapılmıştır.

4.2. Marmara Denizi'nde Klorofil-a Değişimlerinin Zamansal Olarak İzlenmesi

Bu çalışmada, Marmara Denizi'ndeki su kalitesinin uzun dönemli değişimi, klorofil-a konsantrasyonunu temel alan spektral göstergeler aracılığıyla ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Günlük zaman çözünürlüklü klorofil-a kestirimi, MODIS/Terra Ocean Color ürün serisinin alt kümesi olan MODOCGA.006 koleksiyonu kullanılarak yürütülmüştür. Koleksiyon; 1 km mekânsal çözünürlükle, görünür bölge ile NIR aralığını kapsayan dokuz bant için yüzey yansıma değerleri ve ayrıntılı kalite bayrakları olan QC_b8_15_1km bandını içerir. Analizlerde, kullanılan veri koleksiyonunun erişilebilir olduğu tüm zaman aralığı değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda, çalışma dönemi 2003–2022 yılları arası olarak belirlenmiştir.

MODOCGA.006 görüntüleri ilk olarak, Sentinel-2 L2A verisiyle türetilen güncel Marmara Denizi poligonu referans alınarak coğrafi olarak kırpılmış, böylece işlem yükü yalnızca çalışma alanıyla sınırlandırılmıştır.

Görüntüler, klorofil-a kestirimine dâhil edilmeden önce bazı ön işlemlerden geçirilmiştir. Bu işlemler aşağıda sıralanmıştır:

- Klorofil-a kestiriminde kullanılan algoritmalar (CI ve OC3M) yalnızca dört MODIS yansıma bandına gereksinim duyar. Bu bantlar şunlardır:
 - 443 nm / sur_refl_b09 (mavi 1),
 - 488 nm / sur_refl_b10 (mavi 2),
 - 551 nm / sur_refl_b12 (yeşil),
 - 667 nm / sur_refl_b13 (kırmızı).

Bu nedenle koleksiyondaki diğer bantlar bu aşamada sürece dâhil edilmemiştir. Seçilen bantların her pikselde güvenilir olduğundan emin olmak için, ilgili kalite katmanı olan QC_b8_15_1km bandı kullanılarak ideal pikseller ayrıştırılmıştır. Bu

bandın 4–23. bitleri sırasıyla yukarıdaki dört banda ait dört bitlik kalite kodlarını içerir (**Tablo 4.1**). Bit değerinin 0 olması, NASA tanımıyla yüksek güvenli düzeltme yapılmış, bulut ve atmosferik etkiler içermeyen durumu temsil eder. GEE’deki kod içerisinde yazılan fonksiyonla, kullanılan bit kaydırma ve mantıksal maskeleme adımları sayesinde bulut, ışık ve aerosol kaynaklı bozuk pikseller analiz kapsamından çıkarılmıştır.

Tablo 4.1: Bit dizileri ve kalite kodları [Vermote vd., 2015].

Bit Dizisi (QC Konumu)	Kalite Kodu Açıklaması
Bits 4-7: 9. Bandın Veri Kalitesi	0: En yüksek kalite (ideal)
Bits 8-11: 10. Bandın Veri Kalitesi	1-6: Kullanılmıyor
Bits 16-19: 12. Bandın Veri Kalitesi	7: Dedektör gürültülü
Bits 20-23: 13. Bandın Veri Kalitesi	8: Dedektör arızalı; veri enterpole edildi
	9: Güneş zeniti $\geq 86^\circ$
	10: Güneş zeniti $\geq 85^\circ$ ve $< 86^\circ$
	11: Girdi eksik
	12: En az bir atmosferik sabit için klimatolojik veriler yerine dahili (yerleşik) sabit değer kullanıldı
	13: Düzeltme sınırları dışında kalan piksel, izin verilen uç değere sınırlandırıldı
	14: L1B veri hatalı
	15: Bulut veya derin okyanus nedeniyle işlenmedi

Şekil 4.4’te, örnek olarak seçilen bir tarih (17.07.2021) için kalite ve bulut filtrelemesinden önce (a) ve sonra (b) elde edilen görüntüler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. (a) görselinde, Marmara Denizi her ne kadar, neredeyse bütünüyle piksellerle kaplı görünse de, bu piksellerin büyük bölümü bulut, atmosferik saçılma ve benzeri etkilerden kaynaklanan, düzeltme sonrasında dahi düşük güvenilirliğe sahip yansıma değerleri içerir. Dolayısıyla söz konusu tarihte, denizin geniş kesimleri ideal

kalitede olmayan pikseller içermektedir. (b) görselinde ise kalite filtreleme uygulaması sonrasında, kalitesiz pikseller elenerek yalnızca güvenilir su yansıma değerleri elde edilmiştir. Bu işlem, analizde kullanılabilir piksel oranını belirgin biçimde azaltmış olsa da klorofil-a kestiriminde oluşabilecek hataları en aza indiren temiz bir veri kümesi sağlamıştır.



Şekil 4.4: Kalite ve bulut filtreleme öncesi (a) ve sonrası (b).

- Çalışma alanına göre kırılan ve yalnızca kaliteli/bulutsuz pikselleri içeren görüntülere tarih filtresi uygulanarak, 2003–2022 yılları arasındaki her yılın nisan-eylül dönemine ait aylık ortalama yansıma verileri elde edilmiştir. Bu sayede özellikle bulut etkisinin en az tesir ettiği ve aynı zamanda alg oluşumu açısından en yüksek değerlerin yaşandığı tarih aralıkları tercih edilmiştir.
- Ürün dokümantasyonuna göre her bir dijital sayı (DN) değeri, gerçek yüzey yansımasına dönüştürülmek için **Denklem 4.1**'de görüldüğü gibi 0.0001 katsayısı ile çarpılmıştır:

$$R_{rs}(\lambda) = DN(\lambda) \times 0.0001 \quad (sr^{-1}) \quad (4.1)$$

Bir sonraki adımda, klorofil-a kestiriminde kullanılacak olan algoritmalar hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar suyun güneş ışığı alan katmanında yaşayan fitoplanktonların başlıca fotosentetik pigmenti olan klorofil-a miktarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Kullanılan algoritmalar, sudan ayrılan ışığın farklı dalga boylarındaki uydu ölçümlerine dayanmaktadır. Klorofil-a, mavi, yeşil ve kırmızı ışığı yoğunluğuna bağlı olarak farklı oranlarda soğurur. Bu durum, sudan çıkan ışığın şiddetini ve dolayısıyla suyun algılanan rengini değiştirir. Işık sinyaliyle klorofil-a yoğunluğu arasındaki bu ilişki, pigment konsantrasyonunun hesaba katılmasını sağlar ve fitoplankton biyokütlesini dolaylı olarak temsil eden bir gösterge görevi görür.

Klorofil-a kestirimi için, iki yaygın okyanus renk algoritması (CI, OC3M) ile bu iki algoritmanın harmanlanmış (hibrit) hali uygulanmıştır. Bunlar;

- CI Tabanlı Algoritma,
- OC3M Tabanlı Algoritma,
- Hibrit Algoritma.

Bu algoritmalar ile algoritmaların hedef konsantrasyon aralıkları ve kullanılan bantlar **Tablo 4.2**'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Klorofil-a hesabında kullanılan algoritmalar.

Algoritma	Hedef Konsantrasyon Aralığı (mg/m ³)	Girdi Bantlar (nm)	Kaynak
CI (Bant Farkı)	Klorofil-a≤0.25	443 555 670	Hu vd. [2019]
OC3M (Bant Oranı)	Klorofil-a>0.40	mak.(443-488) 555	O'Reilly ve Werdell [2019]
Hibrit (CI ve OC3M)	0.25<Klorofil-a≤0.40	-	Hu vd. [2019]

CI Tabanlı Algoritma: Klorofil-a konsantrasyonunun kestirimi için uygulanan ilk algoritma, **Hu vd. [2012, 2019]** tarafından geliştirilen ve NASA tarafından uygulanan CI algoritmasıdır. Bu yöntem, düşük konsantrasyon aralıklarında (<0.25 mg/m⁻³) daha doğru sonuçlar vermesi nedeniyle oligotrofik sularda sıklıkla tercih edilmektedir. CI algoritması, sudan yansıyan ışığın üç farklı dalga boyundaki (mavi, yeşil ve kırmızı) yansıma farklarını kullanarak klorofil-a miktarını dolaylı olarak tahmin eder. Bu algoritmanın temel mantığı; yeşil dalga boyundaki yansımanın, mavi ve kırmızı dalga boyları arasında çizilen doğrusal bir referans çizgisinden olan farkını ölçmektir. CI değeri **Denklem 4.2**'de görüldüğü gibi hesaplanır:

$$CI = R_{rs}(\lambda_{green}) - [R_{rs}(\lambda_{blue}) + \frac{\lambda_{green}-\lambda_{blue}}{\lambda_{red}-\lambda_{blue}} \times (R_{rs}(\lambda_{red}) - R_{rs}(\lambda_{blue}))] \quad (4.2)$$

Burada;

- R_{rs} ; yüzeyden ayrılan spektral yansıma değerlerini,
- λ_{blue} , λ_{green} ve λ_{red} ; sırasıyla mavi, yeşil ve kırmızı bantların merkez dalga boylarını ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan MODOCGA.006 koleksiyonu, CI algoritmasında kullanılan dalga boylarına en yakın merkez bantlara sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. CI algoritmasının hesaplanmasında, literatürde belirtilen dalga boyu merkezleri ile bu tez kapsamında kullanılan koleksiyonun bant merkezleri, **Tablo 4.3**'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.3: CI algoritmasında kullanılan dalga boyu merkezlerinin karşılaştırılması.

Renkler	Literatürde Belirtilen Bant Merkezleri (nm)	MODOCGA.006 Bant Merkezleri (nm)
Mavi	443	443
Yeşil	555	551
Kırmızı	670	667

CI algoritmasında yeşil bant olarak 555 nm merkezli bir dalga boyu önerilmektedir. Bu nedenle tezde kullanılan MODOCGA.006 koleksiyonunun 551 nm'lik yeşil bandı, NASA'nın önerdiği şekilde 555 nm'ye normalize edilmelidir. Bu düzeltme işlemi, CI algoritmasının doğruluğunu artırmakta ve sensörler arası karşılaştırmalı analizlerin uyumlu şekilde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Yeşil bant düzeltmesi için NASA tarafından önerilen yöntem, yeşil bandın merkez dalga boyunun 543–567 nm aralığında olduğu durumlar için geçerlidir. Düzeltme formülleri **4.3**, **4.4** ve **4.5** denklemlerinde verilmiştir [**Web 16**]:

$$R_{rs}(\lambda_0) = 555 \pm 2nm \text{ ise; } R_{rs}(555) = R_{rs}(\lambda_0) \quad (4.3)$$

$$R_{rs}(\lambda_0) < s_w \text{ ise; } R_{rs}(555) = 10^{(a_1 \times \log_{10}(R_{rs}(\lambda_0)) - b_1)} \quad (4.4)$$

$$R_{rs}(\lambda_0) \geq s_w \text{ ise; } R_{rs}(555) = a_2 \times R_{rs}(\lambda_0) - b_2 \quad (4.5)$$

Burada:

- λ_0 ; kullanılan sensörün yeşil bandının merkez dalga boyunu,
- s_w, a_1, b_1, a_2, b_2 ; normalize edilmiş düzeltme katsayılarını ifade etmektedir (**Tablo 4.4**).

Tablo 4.4: s_w, a_1, b_1, a_2 ve b_2 parametrelerine ait spektral bantlara özgü katsayılar.

Spektral Aralıklar (λ_0 , nm)	s_w	a_1, b_1	a_2, b_2
543 - 547	0.001723	0.986, 0.081495	1.031, 0.000216
548 - 552	0.001597	0.988, 0.062195	1.014, 0.000128
558 - 562	0.001148	1.023, -0.103624	0.979, -0.000121
563 - 567	0.000891	1.039, -0.183044	0.971, -0.000170

Bant düzeltmesi uygulandıktan sonra elde edilen normalize edilmiş yeşil yansıma değeri kullanılarak **Denklem 4.2**'de tanımlanan CI değeri, her piksel için hesaplanmıştır. Hesaplanan CI değeri, **Hu vd. [2019]** tarafından geliştirilen regresyon modeli yardımıyla klorofil-a konsantrasyonuna dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, aşağıda verilen **Denklem 4.6** ile gerçekleştirilmiştir:

$$chlor_a_{(CI)} = 10^{(a_{CI} + b_{CI} \times CI)} \quad (4.6)$$

Burada:

- $chlor_a_{(CI)}$; CI algoritmasına göre tahmin edilen klorofil-a konsantrasyonunu (mg/m^3),
- $a_{CI} = -0.4287$ ve $b_{CI} = 230.47$; **Hu vd. [2019]** tarafından belirlenen algoritma katsayılarını,
- CI; daha önce hesaplanmış olan renk farkı indeksini ifade etmektedir.

CI algoritmasına dayalı kestirim, özellikle klorofil-a konsantrasyonu $0.25 mg/m^3$ 'ün altında olan sulak alanlarda daha hassas sonuçlar vermektedir. CI algoritmasının bu özelliği, atmosferik saçılma ve düşük pigment yoğunluğu gibi faktörlerin etkili olduğu alanlarda klorofil-a kestiriminde yüksek doğruluk sağlamaktadır.

OC3M Tabanlı Algoritma: CI algoritmasına ek olarak, klorofil-a kestiriminde kullanılan ikinci yöntem, OC3M algoritmasıdır. OC3M, **O'Reilly vd. [1998]** tarafından geliştirilen ve daha sonra **O'Reilly ve Werdell [2019]** tarafından

güncellenen OCx algoritmaları serisinin MODIS sensörüne uyarlanmış versiyonudur. Bu algoritma, mavi/yeşil bant oranına dayalı bir polinom model kullanarak klorofil-a konsantrasyonunu tahmin eder.

OC3M tabanlı klorofil-a kestirimi **Denklem 4.7**'de gösterildiği gibidir;

$$\log_{10}(\text{chlor_a}_{(OC3M)}) = a_0 + a_1R + a_2R^2 + a_3R^3 + a_4R^4 \quad (4.7)$$

Burada:

- $\text{chlor_a}_{(OC3M)}$; OC3M algoritmasına göre tahmin edilen klorofil-a konsantrasyonunu (mg/m^3),
- $R = \log_{10}\left(\frac{R_{rs}(\lambda_{blue\ max})}{R_{rs}(\lambda_{green})}\right)$; maksimum mavi bant yansımalarının yeşil bant yansımalarına oranının logaritmasını,
- a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ; MODIS için geçerli katsayıları ifade etmektedir.

OC3M algoritmasının hesaplanmasında kullanılan dalga boyu merkezleri, **O'Reilly ve Werdell [2019]** tarafından önerilen değerlere dayanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan MODOCGA.006 koleksiyonuna karşılık gelen bant merkezleri ile literatürde belirtilen değerler, **Tablo 4.5**'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.5: OC3M algoritmasında kullanılan dalga boyu merkezlerinin karşılaştırılması.

Renkler	Literatürde Belirtilen Bant Merkezleri (nm)	MODOCGA.006 Bant Merkezleri (nm)
Mavi 1	442	443
Mavi 2	488	488
Yeşil	554	551

Tablo 4.5'te görüldüğü gibi, R değeri; yansıma değeri daha yüksek olan mavi bandın, yeşil banda oranlanması ve ardından da bu oranın logaritmasının alınmasıyla elde edilir. Bu logaritmik oran daha sonra **Denklem 4.7**'deki polinom modele uygulanarak klorofil-a değeri bulunur.

Hu vd. [2019] ile **O'Reilly ve Werdell [2019]** tarafından önerilen ve NASA'nın güncel veri işleme protokolü olan R2022'de kullanılan MODIS için OC3M katsayıları aşağıdaki gibidir:

$$a_0 = 0.26294, a_1 = -2.64669, a_2 = 1.28364, a_3 = 1.08209, a_4 = -1.76828$$

OC3M algoritmasına dayalı kestirim, genellikle klorofil-a konsantrasyonu 0.40 mg/m³'ün üzerinde olan sulak alanlarda daha iyi performans göstermektedir. Bu nedenle, yüksek pigment konsantrasyonlu sularda CI algoritmasına göre daha etkili sonuçlar verir.

Hibrit Algoritma: CI ve OC3M algoritmaları, klorofil-a konsantrasyonunun farklı aralıklarında daha güvenilir sonuçlar vermektedir. CI, düşük klorofil-a değerleri için geliştirilmiş olsa da, bu aralığın üzerindeki değerlerde doğrudan OC3M'ye geçilmesi ani değişimlere ve uyumsuzluklara yol açabilir. Bu nedenle, **Hu vd. [2019]** tarafından önerilen yöntem doğrultusunda, 0.25–0.40 mg/m³ aralığında iki algoritmanın ağırlıklı ortalaması alınarak hibrit bir yaklaşım kullanılmaktadır.

Bu harmanlama süreci, geçiş bölgesinde CI ve OC3M algoritmaları arasında doğrusal bir geçiş sağlayacak şekilde modellenmiştir. Böylece, her iki algoritmanın avantajlı olduğu aralıklar korunurken aynı zamanda görsel ve sayısal süreklilik de sağlanmış olur.

Hibrit algoritma, geçiş bölgesinde **Denklem 4.8**'de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$chlor_a_{(Hibrit)} = \frac{chlor_a_{(CI)}(t_2 - chlor_a_{(CI)}) + chlor_a_{(OC3M)}(chlor_a_{(CI)} - t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.8)$$

Burada:

- $chlor_a_{(CI)}$ ve $chlor_a_{(OC3M)}$; sırasıyla CI ve OC3M algoritmalarından hesaplanan klorofil-a değerlerini,
- $t_1=0.25$ ve $t_2=0.40$; geçiş bölgesinin alt ve üst sınırlarını ifade etmektedir.

Klorofil-a kestiriminin en son adımında, nihai klorofil-a konsantrasyon değerinin seçimi işlemi gerçekleştirilmiştir. Yukarıda açıklanan üç algoritmaya göre (CI, OC3M ve hibrit), nihai klorofil-a değeri aşağıdaki koşullara göre belirlenmiştir:

- Eğer CI tabanlı klorofil-a ($chlor_a_{(CI)} \leq 0.25$ mg/m³ ise, CI algoritması sonucu kullanılır.

- Eğer CI tabanlı klorofil-a ($\text{chlor}_{a(\text{CI})}$) $> 0.40 \text{ mg/m}^3$ ise, OC3M algoritması sonucu kullanılır.
- Eğer CI tabanlı klorofil-a $0.25 < \text{chlor}_{a(\text{CI})} \leq 0.40 \text{ mg/m}^3$ aralığında ise, hibrit algoritma sonucu kullanılır.

Bu yapı sayesinde, klorofil-a haritalarında algoritma geçişlerinden kaynaklanabilecek görsel kırılmalar ve ani sıçramalar en aza indirilmiştir. Ayrıca algoritmanın farklı sensörlerde de geçerli olabilmesi için uyumlu bir yapı sağlanmıştır [Hu vd., 2019], [Web 16].

Yukarıda açıklanan önışlem adımlarına ve algoritmalara dayalı olarak elde edilen klorofil-a konsantrasyonları, zaman serisi analizine uygun biçimde yapılandırılmıştır. Bu kapsamda, MODOCGA.006 koleksiyonu kullanılarak 2003–2022 yılları arasında, nisan–eylül dönemine ait klorofil-a değerlerinin hem aylık ortalamaları hem de yıllık ortalamaları hesaplanmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde yalnızca yıllık ortalama değerlere odaklanılmıştır. Yıllık ortalamalar, GEE ortamında her yıl için nisan–eylül aylarını kapsayan 6 aylık tarih filtresi uygulanarak hesaplanmıştır. Yani, her yılın nisan–eylül dönemine ait uydu görüntüleri doğrudan filtrelenmiş ve bu dönem içerisindeki piksel bazlı ortalamalar alınmıştır. Bu nedenle, yıllık ortalamalar aylık değerlerin aritmetik ortalaması alınarak değil, doğrudan tarih aralığına dayalı gerçek piksel ortalaması yöntemiyle elde edilmiştir.

Marmara Denizi, bu çalışmada 10 alt bölge ve tüm denizi kapsayan 1 genel bölge olmak üzere toplam 11 bölgeye ayrılarak analiz edilmiştir.

Her bölge için:

- 2003–2022 yılları arasındaki yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonlarının zaman serileri grafiksel olarak sunulmuştur.
- Ayrıca her bölge için, analiz dönemi boyunca gözlenen en yüksek ve en düşük yıllık ortalama değerlerin görüldüğü iki farklı yıl seçilerek bu yıllara ait mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur.

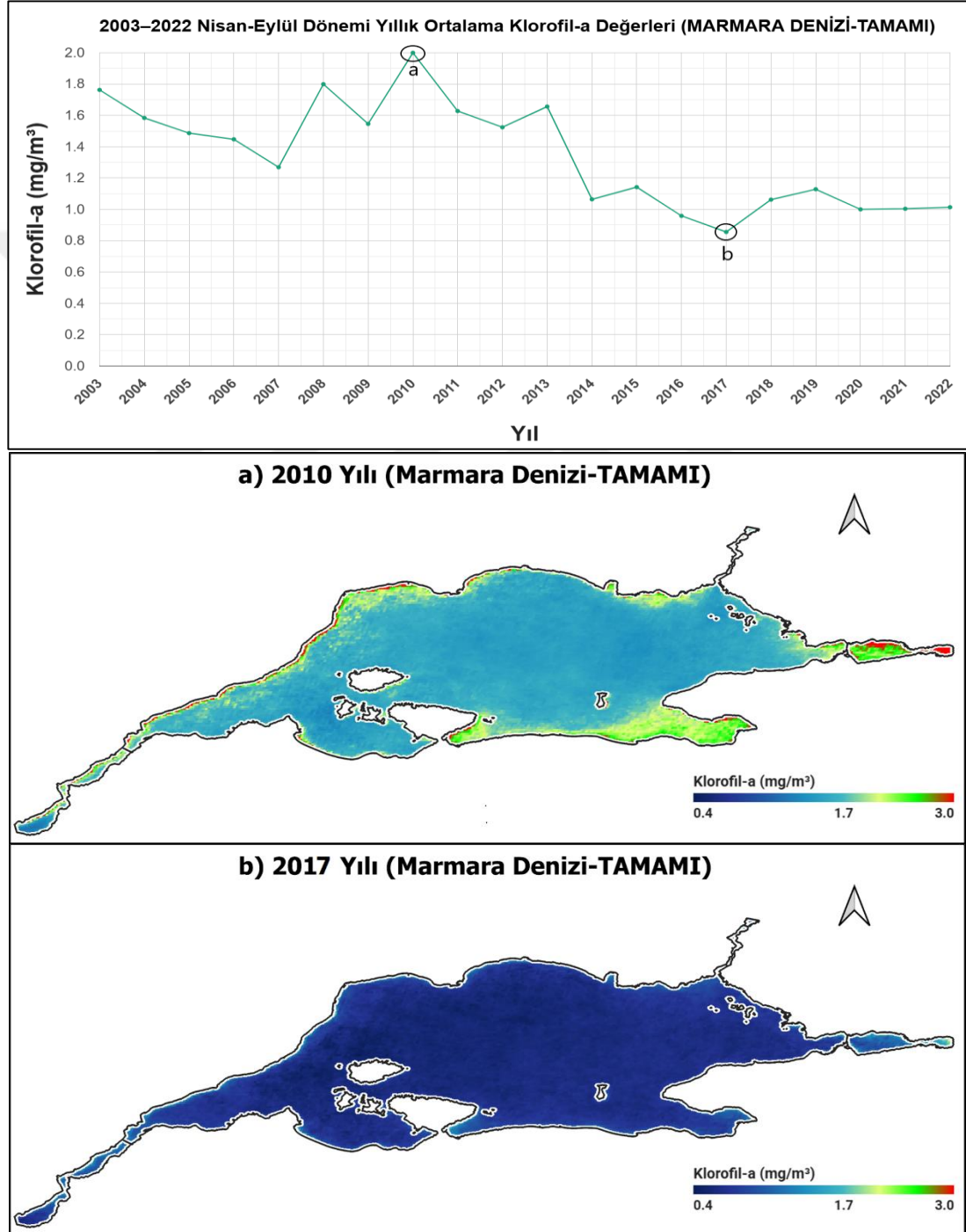
Bu sayede hem zaman içindeki değişim eğilimi hem de mekânsal farklılaşma birlikte değerlendirilmiştir.

Her bir yıla ait klorofil-a haritası, çalışmanın kapsamı ve uzunluğu nedeniyle bu bölümde yer almamıştır. Marmara Denizi geneline ait, 2003–2022 yıllarını kapsayan toplam 20 adet yıllık ortalama klorofil-a haritası, **Ekler** bölümünde sunulmuştur. Bu bölümde ise yalnızca en yüksek ve en düşük değerlere sahip iki yıla ait haritalar örnek olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.5 ile **Şekil 4.15** arasında, belirlenen bölgeler için 2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemine ait yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonlarının zaman serisi grafikleri ile bu dönemde gözlenen en yüksek ve en düşük değerlere ait mekânsal dağılım haritalarına yer verilmiştir.

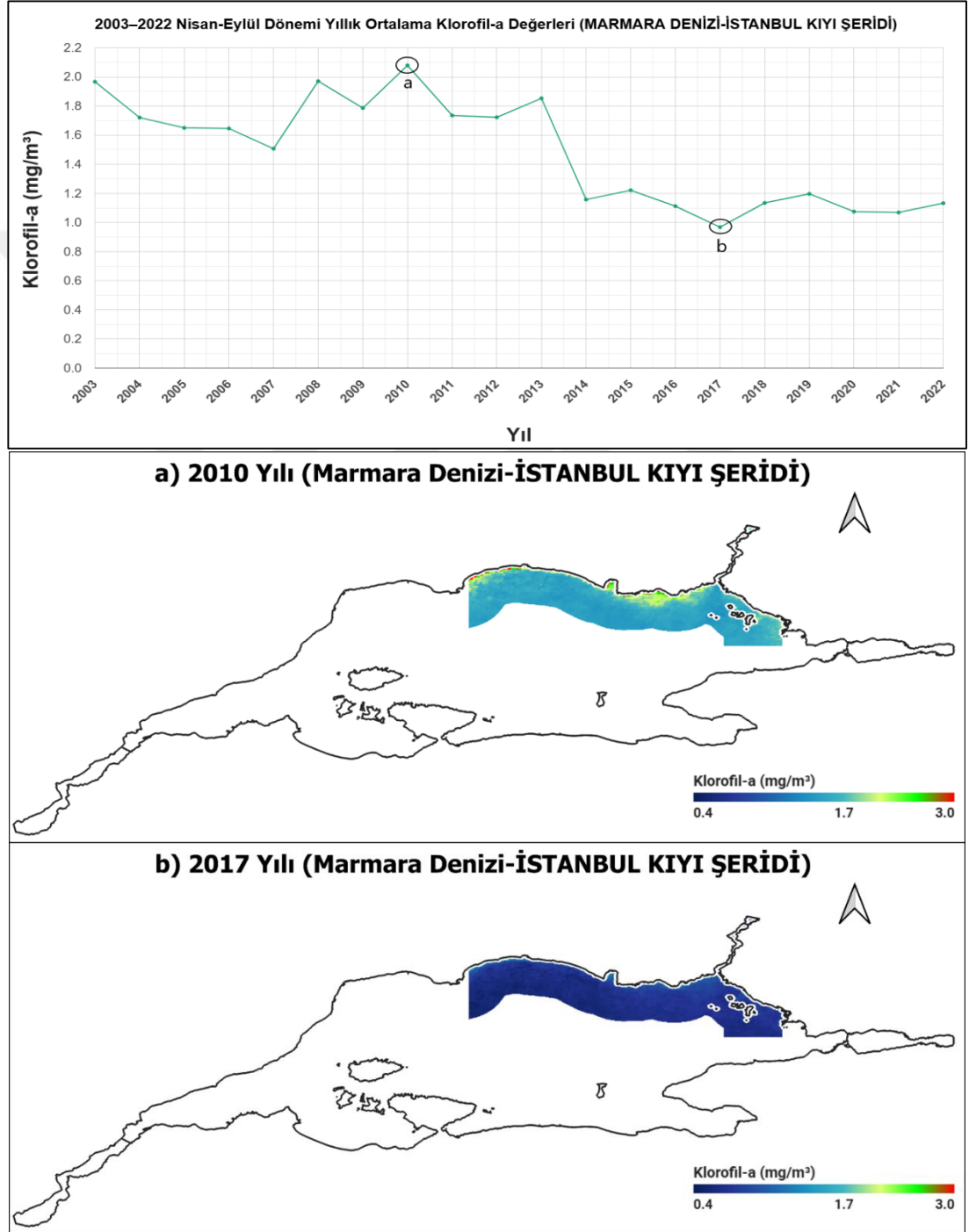


Şekil 4.5'teki zaman serisine göre, Marmara Denizi genelinde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010'da 2.0 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise yaklaşık 0.86 mg/m^3 ile en düşük seviyelerdedir. 2010 yılı haritası incelendiğinde, yoğunluğun özellikle körfezler ve kıyı kesimlerinde olduğu görülmektedir. En düşük değerin görüldüğü 2017'de ise İzmit, Gemlik ve Erdek körfezlerinde düşük düzeyde de olsa klorofil-a birikimi izlenmektedir.



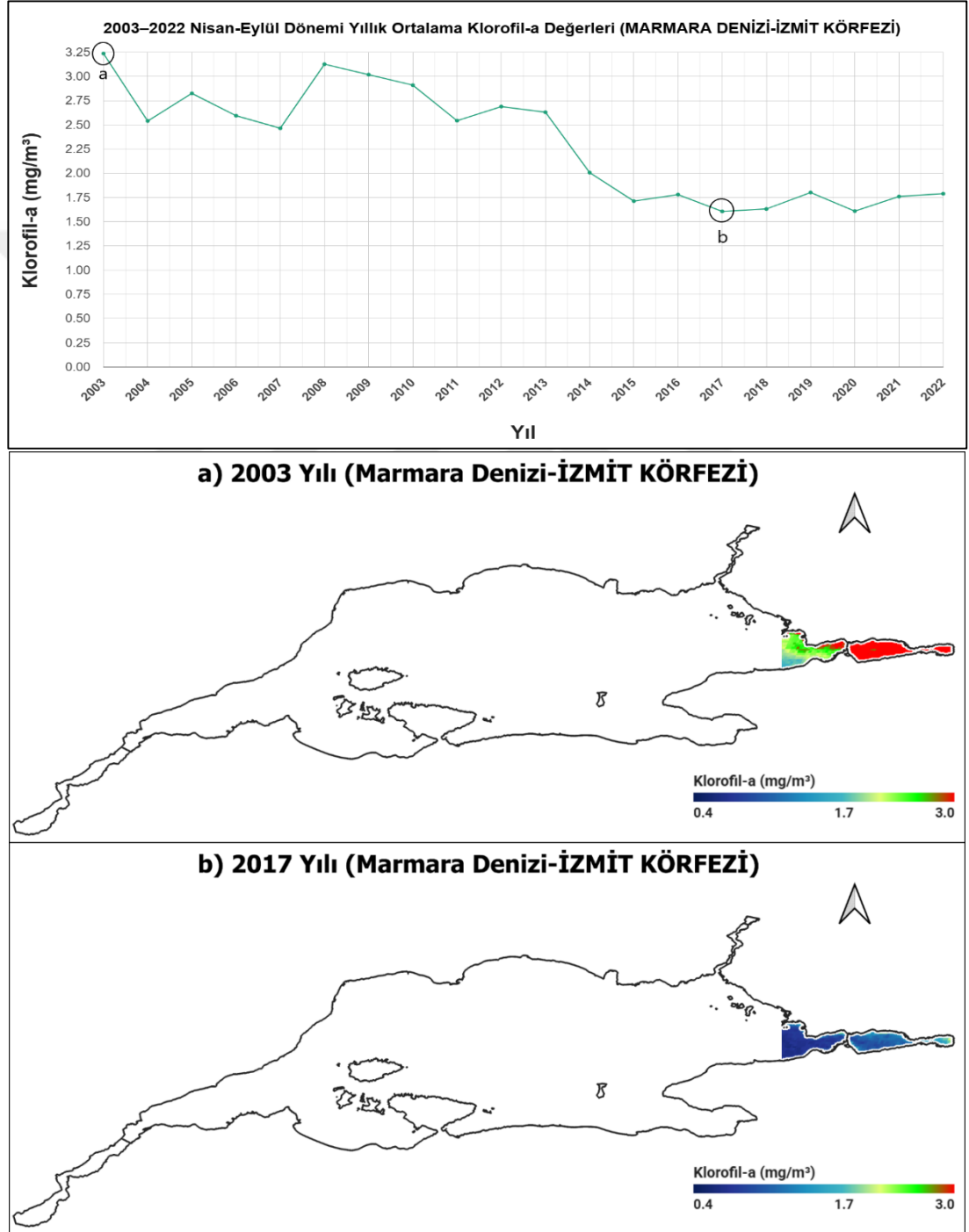
Şekil 4.5: Marmara Denizi geneli için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.6'daki zaman serisine göre, İstanbul kıyı şeridi olarak tanımlanan bölgeye ilişkin, yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu, Marmara Denizi genelinde olduğu gibi 2010 yılında en yüksek (2.08 mg/m^3), 2017 yılında ise en düşük (0.97 mg/m^3) düzeyde gerçekleşmiştir. 2010 yılına ait ortalama klorofil-a haritası, klorofil-a yoğunluğunun özellikle Bakırköy, Avcılar, Beylikdüzü, Büyükçekmece ve Silivri kıyılarında arttığını ortaya koymaktadır.



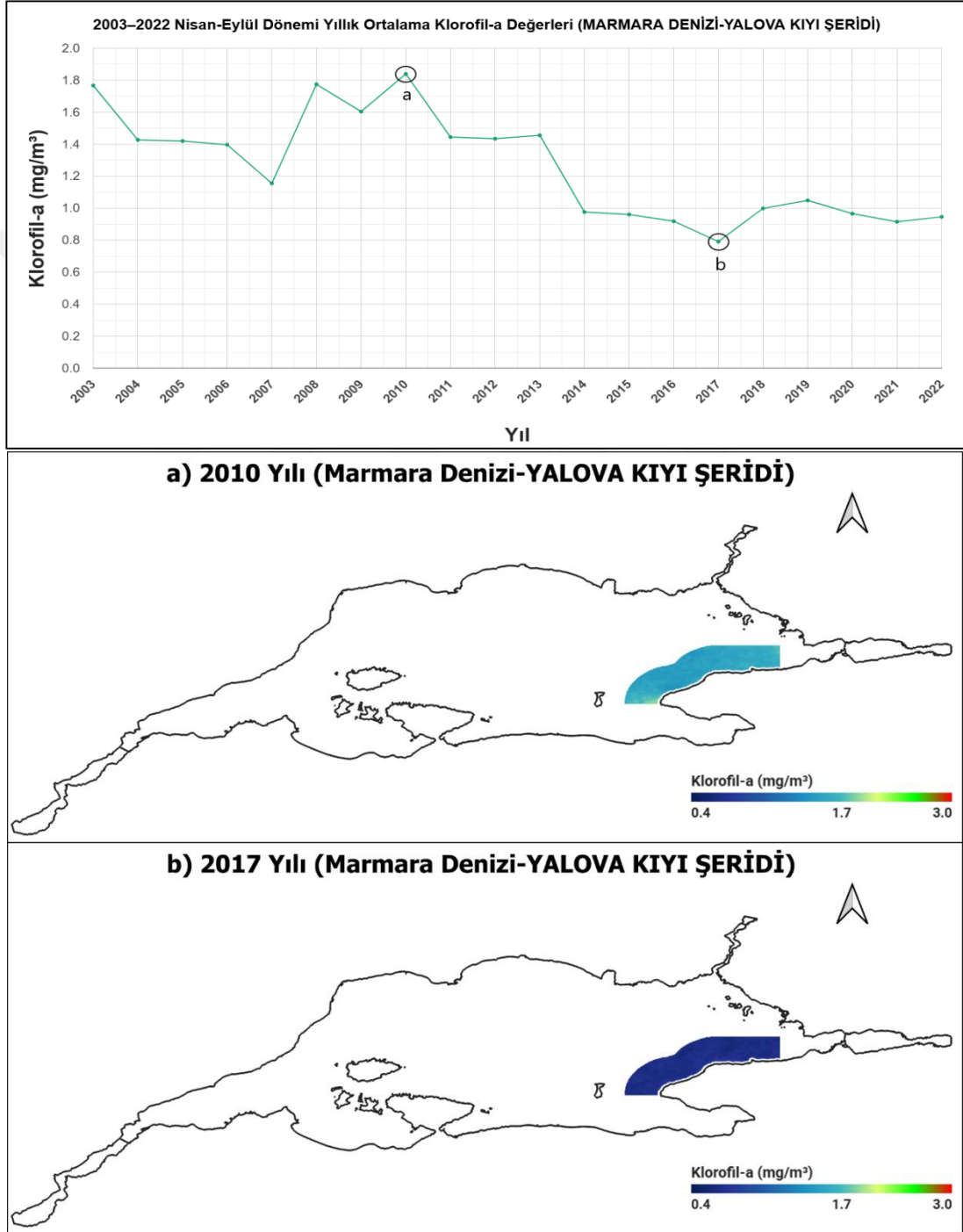
Şekil 4.6: İstanbul kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.7’deki zaman serisine göre, İzmit Körfezi’nde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2003’te 3.24 mg/m^3 ile en yüksek, 2017’de ise yaklaşık 1.61 mg/m^3 ile en düşük seviyede gerçekleşmiştir. 2003 yılı haritasında, özellikle körfezin dar ve kapalı doğu kesimlerinde yoğun klorofil-a birikimi dikkat çekerken; 2017 yılında genel olarak daha düşük bir yoğunluk izlenmiş, körfezin ucunda diğer kısımlara nazaran sınırlı bir artış gözlenmiştir.



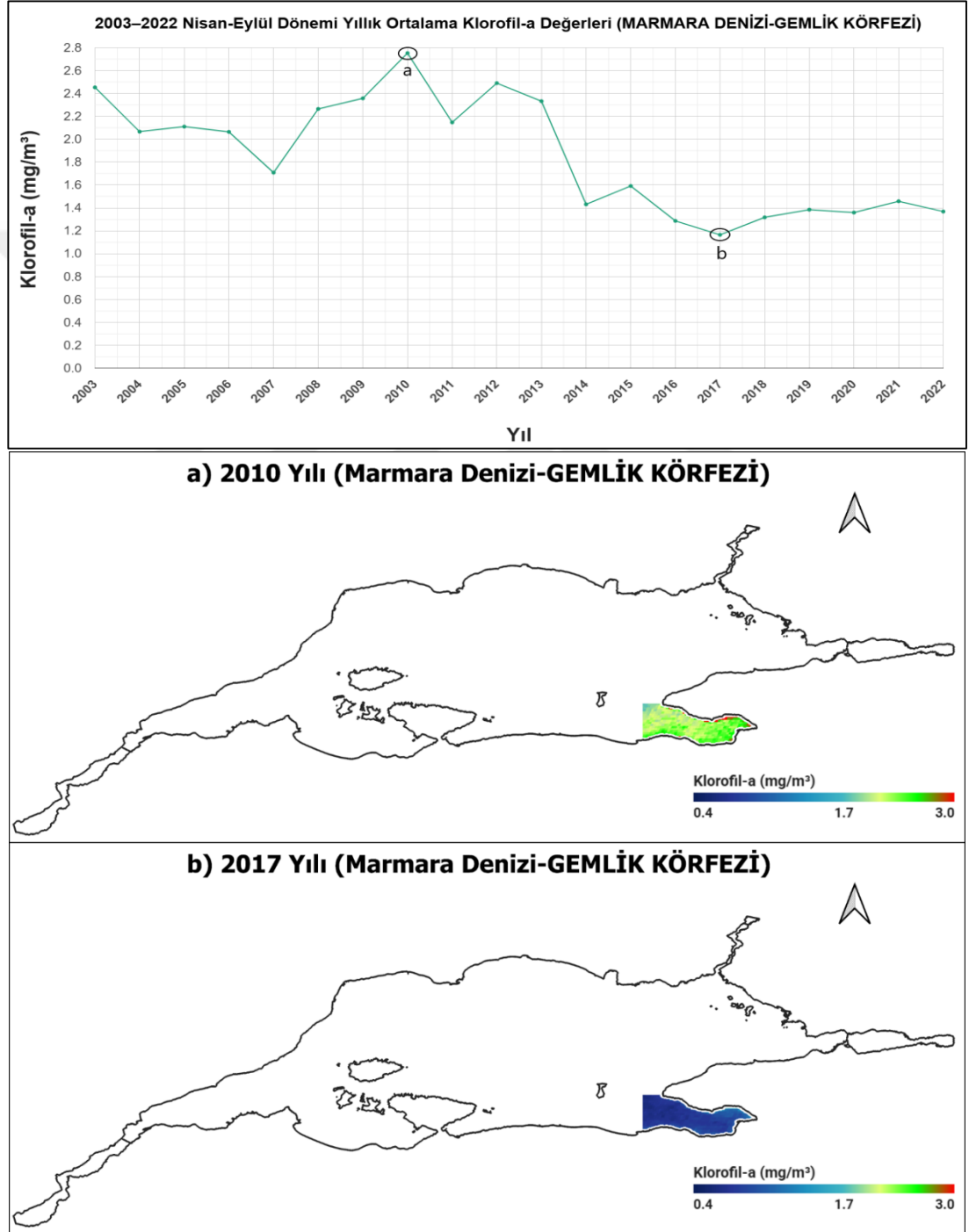
Şekil 4.7: İzmit Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2003 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere; Yalova kıyı şeridinde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010 yılında yaklaşık 1.84 mg/m^3 ile en yüksek seviyeye ulaşmış, 2017 yılında ise 0.79 mg/m^3 ’e kadar düşmüştür. 2010 yılına ait harita, özellikle Armutlu çevresindeki kıyı kesimlerinde klorofil-a yoğunluğunun arttığını ortaya koyarken; 2017 yılına ait dağılımda ise genel bir düşüş gözlenmekte, kıyı boyunca üretkenlik oldukça azalmış görünmektedir.



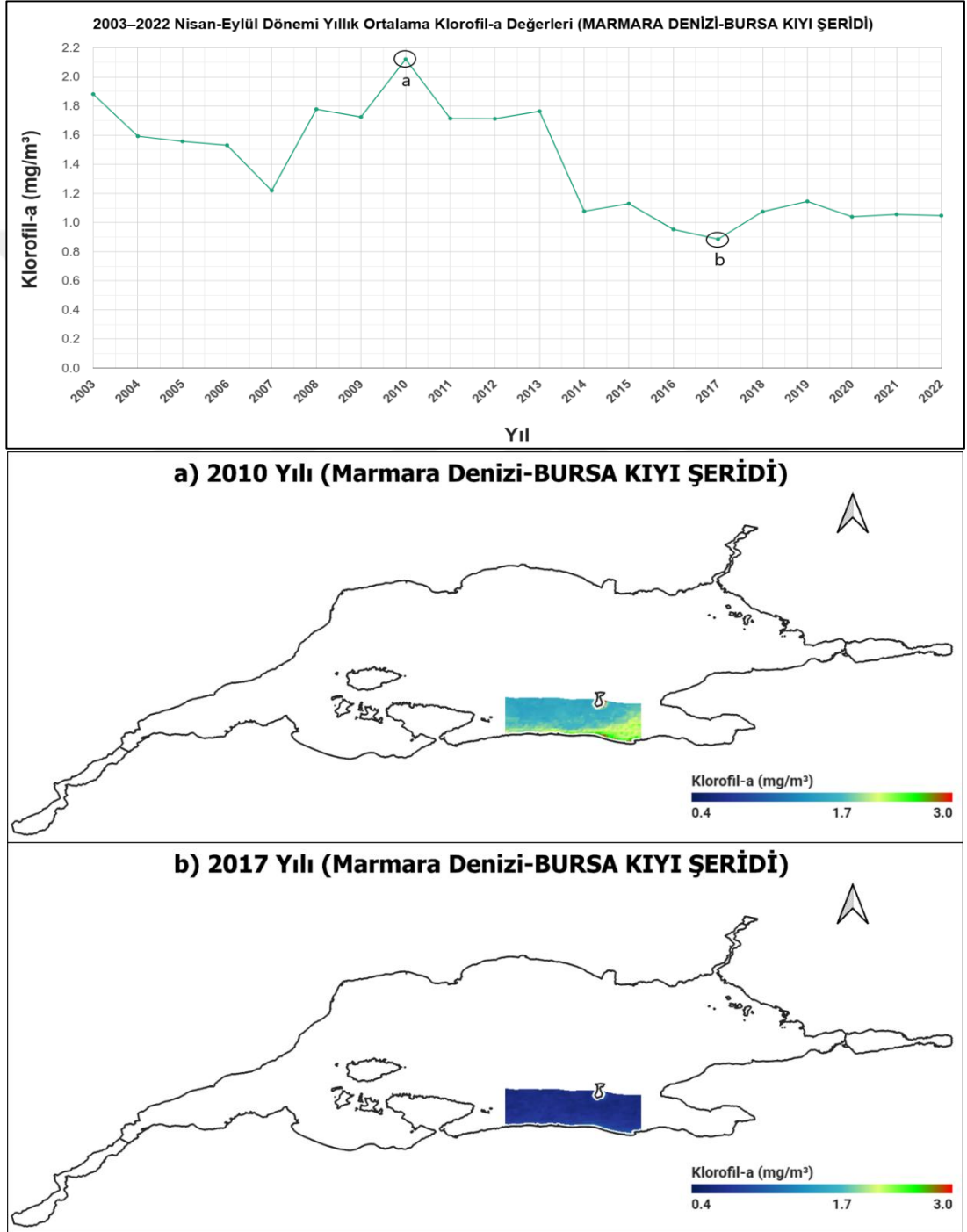
Şekil 4.8: Yalova kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.9'daki zaman serisine göre, Gemlik Körfezi'nde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010'da yaklaşık 2.75 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise 1.17 mg/m^3 ile en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. 2010 yılı haritası, körfezin kuzey ve doğusunda, özellikle Narlı, Kapaklı ve Gemlik ilçeleri çevresinde yoğun birikimi ortaya koyarken; 2017'ye ait mekânsal dağılımda tüm körfez genelinde konsantrasyonun belirgin şekilde azaldığı izlenmektedir.



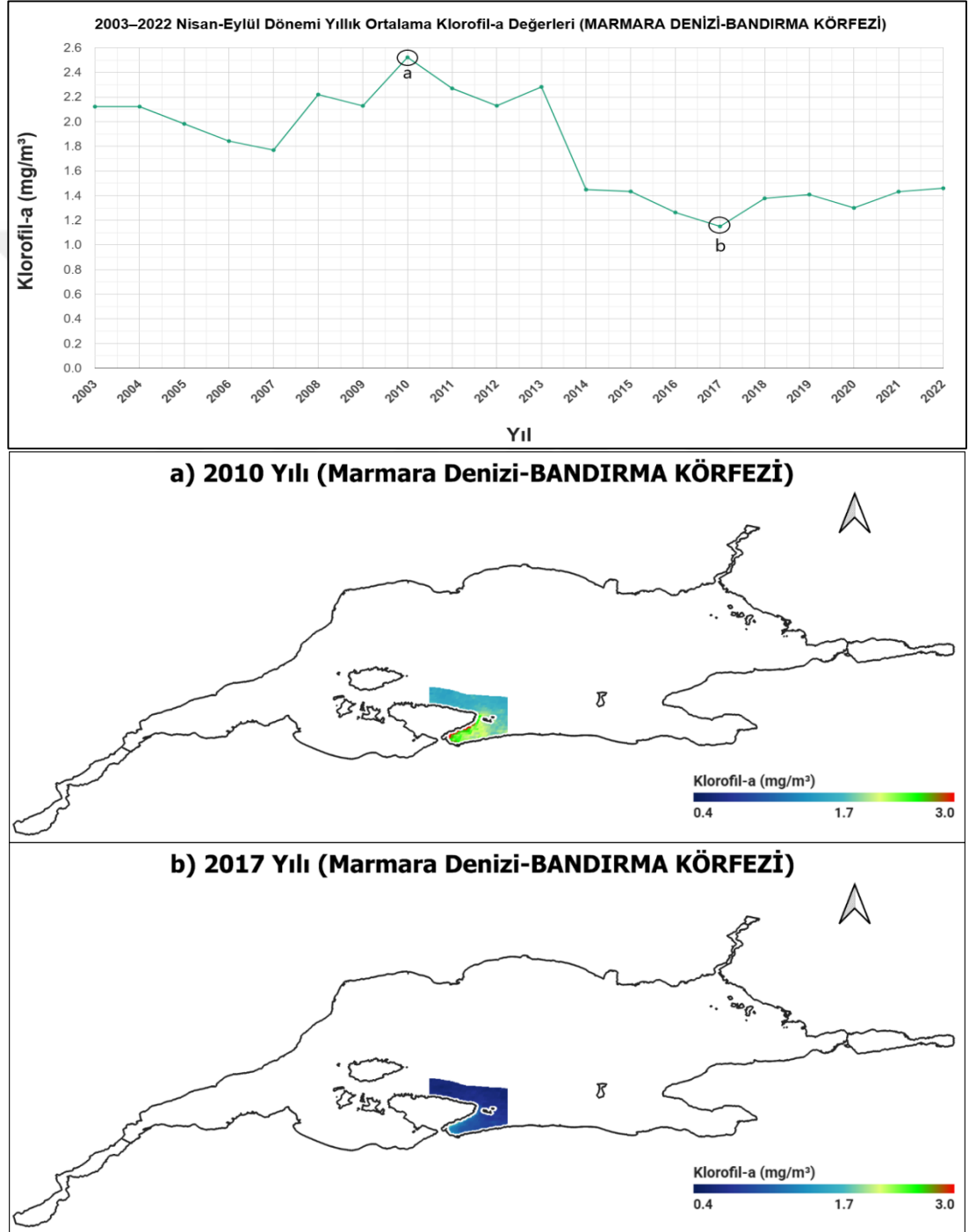
Şekil 4.9: Gemlik Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.10'da sunulan zamansal eğilim, Bursa kıyı şeridi için 2010 yılında yaklaşık 2.12 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise 0.89 mg/m^3 ile en düşük yıllık ortalama klorofil-a düzeylerinin hesaplandığını göstermektedir. 2010 yılına ait harita, özellikle Bursa kıyı şeridi olarak tanımlanan bölgenin kıyı hattında belirgin klorofil-a yoğunluğunu ortaya koyarken; 2017 yılı dağılımında ise genel bir azalma göze çarpmaktadır ve kıyı boyunca üretkenlik sınırlı kalmıştır.



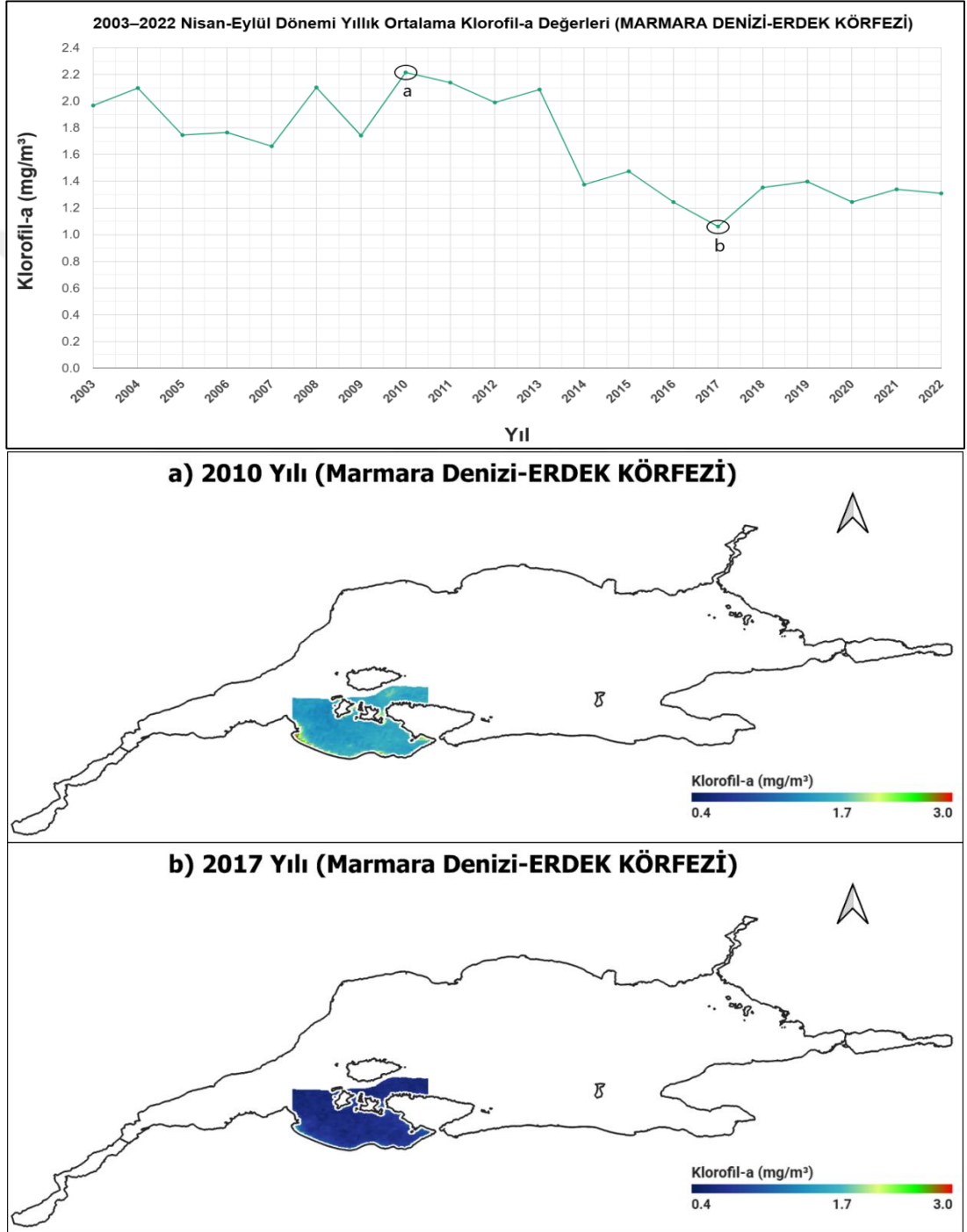
Şekil 4.10: Bursa kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.11'deki grafiğe göre, Bandırma Körfezi'nde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010'da yaklaşık 2.52 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise 1.15 mg/m^3 ile en düşük düzeydedir. 2010 yılı haritası, özellikle Bandırma çevresi ile körfezin kuzeybatısında yoğun klorofil-a birikimini ortaya koyarken; 2017'de tüm körfez genelinde konsantrasyon azalmış, ancak körfezin batıya dönük dar kıyı kesiminde görece yüksek konsantrasyonlar izlenmiştir.



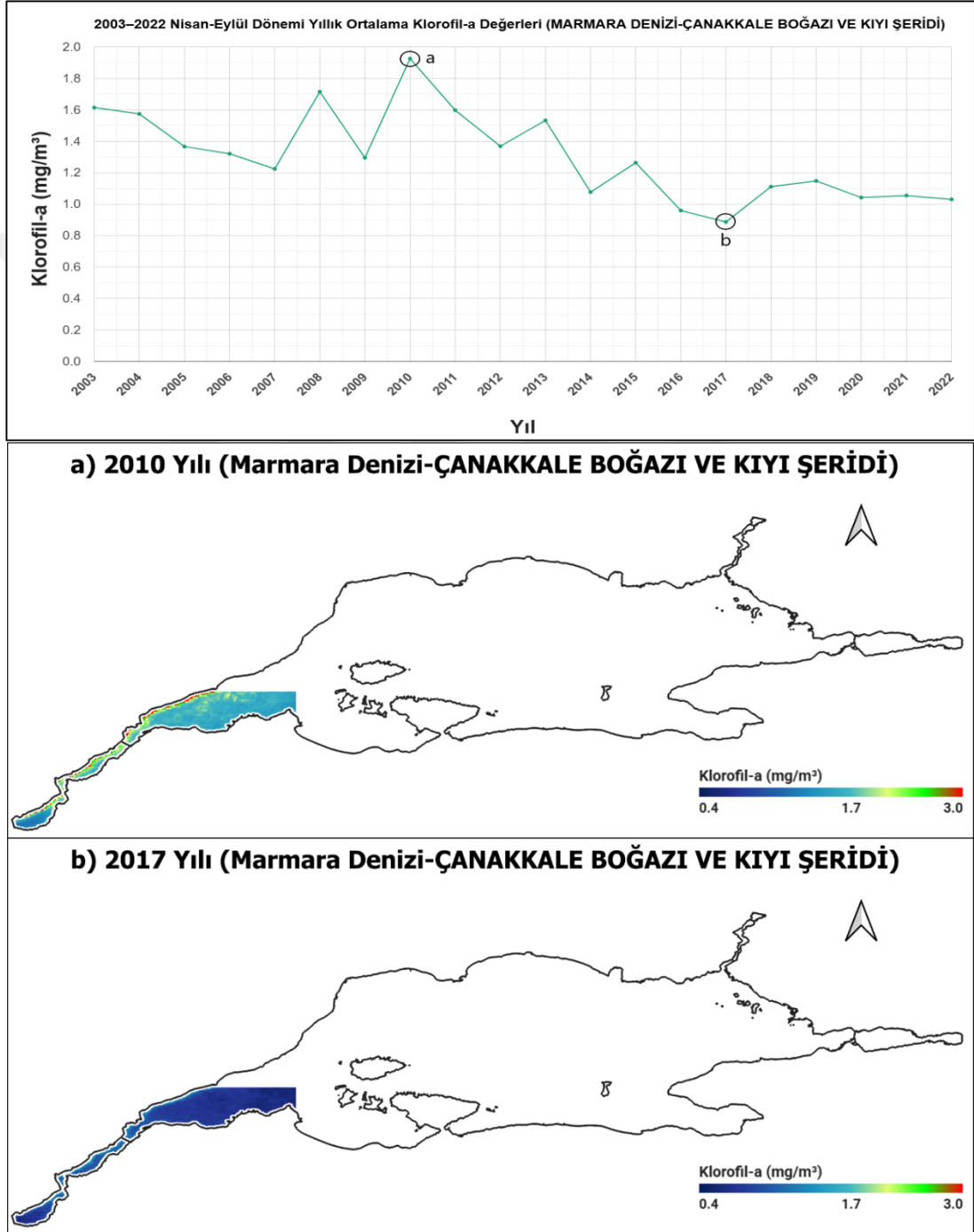
Şekil 4.11: Bandırma Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.12'deki grafiğe göre, Erdek Körfezi'nde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010 yılında yaklaşık 2.21 mg/m^3 ile en yüksek düzeye ulaşırken, 2017'de bu değer 1.06 mg/m^3 'e kadar gerilemiştir. 2010 haritası incelendiğinde; klorofil-a körfez genelinde benzer yoğunluk göstermekle beraber, Karabiga ile kısmen adalar çevresinin öne çıktığı görülmektedir. 2017 yılında ise genel değerler düşmüş, ancak Karabiga kıyılarında sınırlı birikimler izlenmiştir.



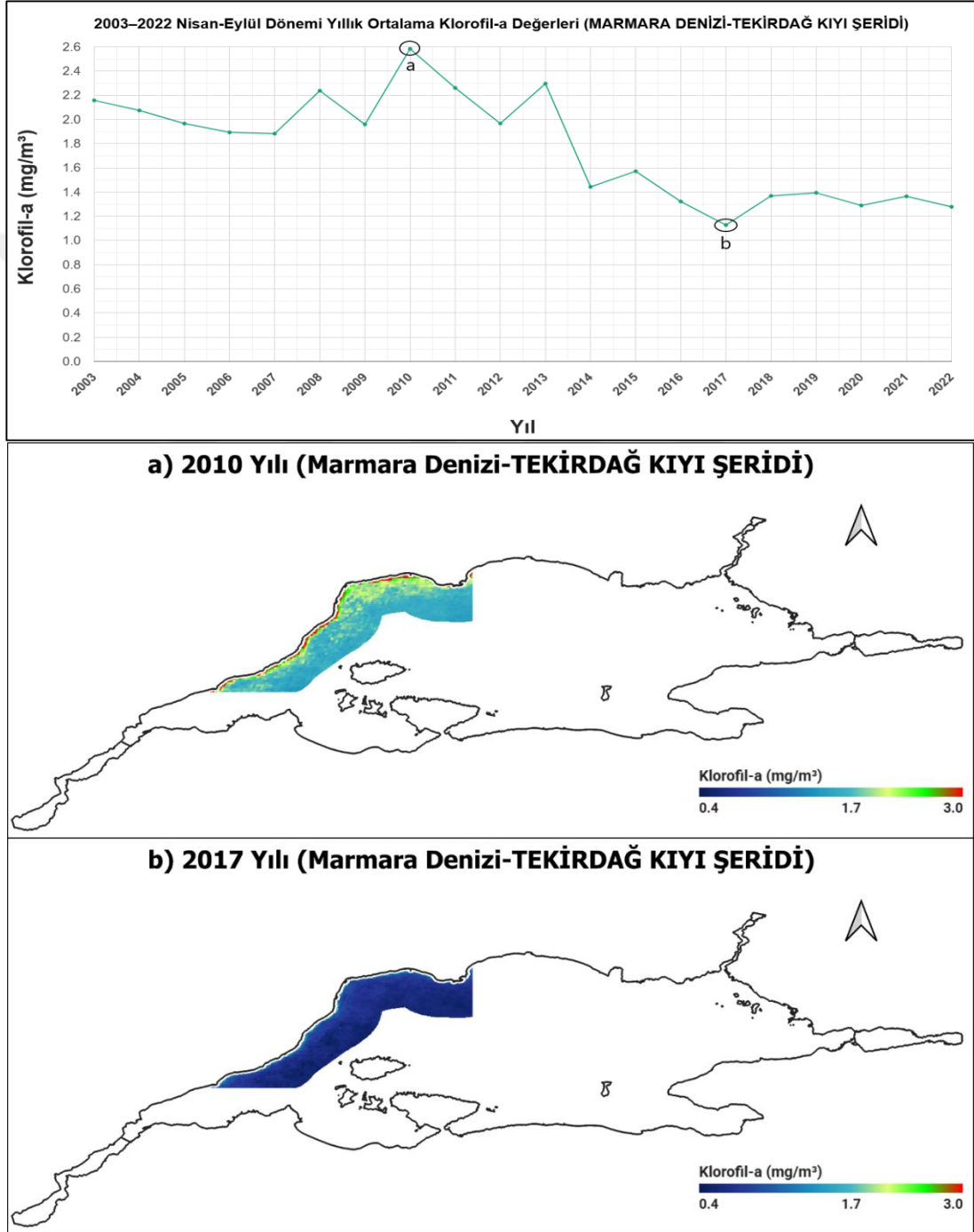
Şekil 4.12: Erdek Körfezi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.13'teki grafiğe göre, Çanakkale Boğazı ve kıyı şeridinde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010'da yaklaşık 1.93 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise 0.89 mg/m^3 ile en düşük seviyelerde hesaplanmıştır. 2010 yılına ait dağılım, özellikle boğazın Gelibolu ve güney kıyıları ile Çanakkale ili çevresinde belirgin klorofil-a birikimini ortaya koyarken; 2017 yılında bu alanlarda yoğunluk azalmış ancak boğazın dar kesimlerinde nispeten daha yüksek kalmıştır.



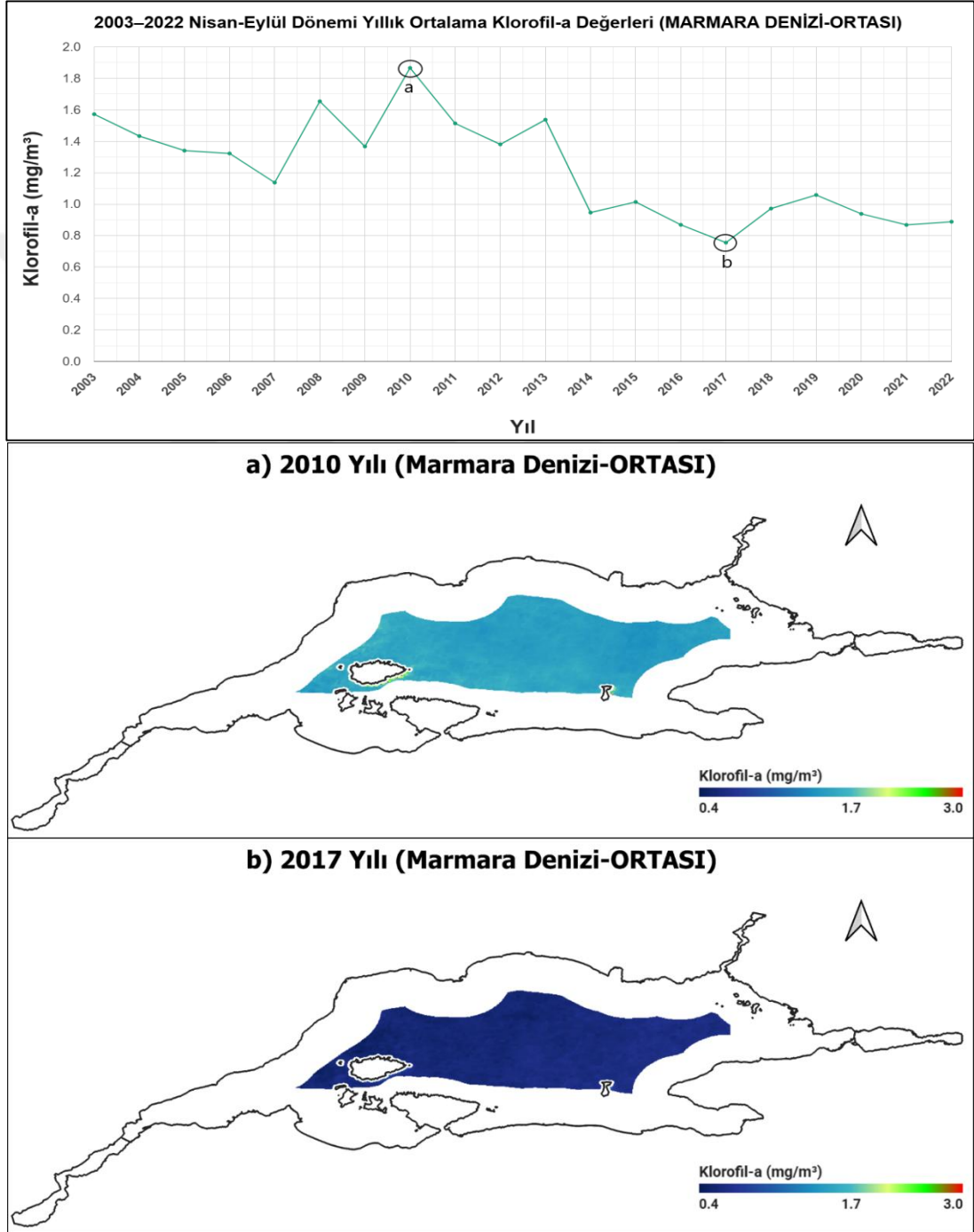
Şekil 4.13: Çanakkale Boğazı ve kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.14'teki zaman serisine göre, Tekirdağ kıyı şeridinde yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010'da 2.58 mg/m^3 ile en yüksek, 2017'de ise 1.13 mg/m^3 ile en düşük seviyede gerçekleşmiştir. 2010 yılına ait harita, özellikle Tekirdağ il merkezi çevresi ile kıyı çizgisinde yüksek yoğunlukları göstermektedir. 2017'de ise tüm şerit boyunca genel konsantrasyon düşmüş, ancak yine aynı bölgelerde görece yüksek değerler izlenmiştir.



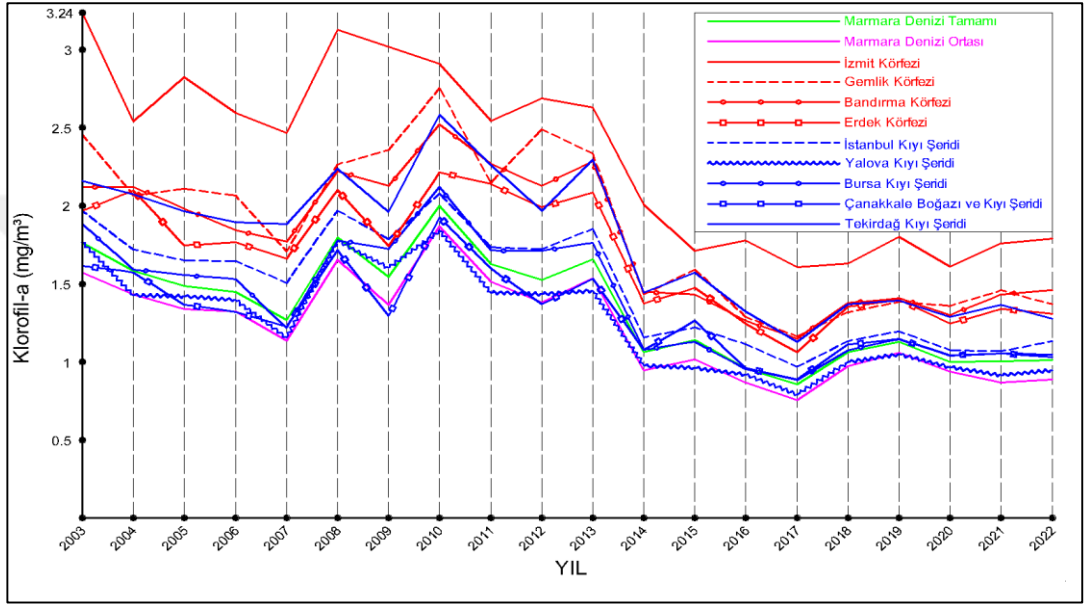
Şekil 4.14: Tekirdağ kıyı şeridi için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.15'e göre, Marmara Denizi ortasında yıllık ortalama klorofil-a konsantrasyonu 2010 yılında 1.87 mg/m^3 ile en yüksek, 2017 yılında ise 0.76 mg/m^3 ile en düşük düzeye ulaşmıştır. 2010 yılı haritası genel olarak homojen bir dağılım sergilemekte olup, Marmara Adası'nın güneydoğu kıyılarında görece yüksek değerler dikkat çekmektedir. 2017 yılında ise bölge genelinde konsantrasyonların düşerek daha düzenli bir dağılımın olduğu görülmektedir.



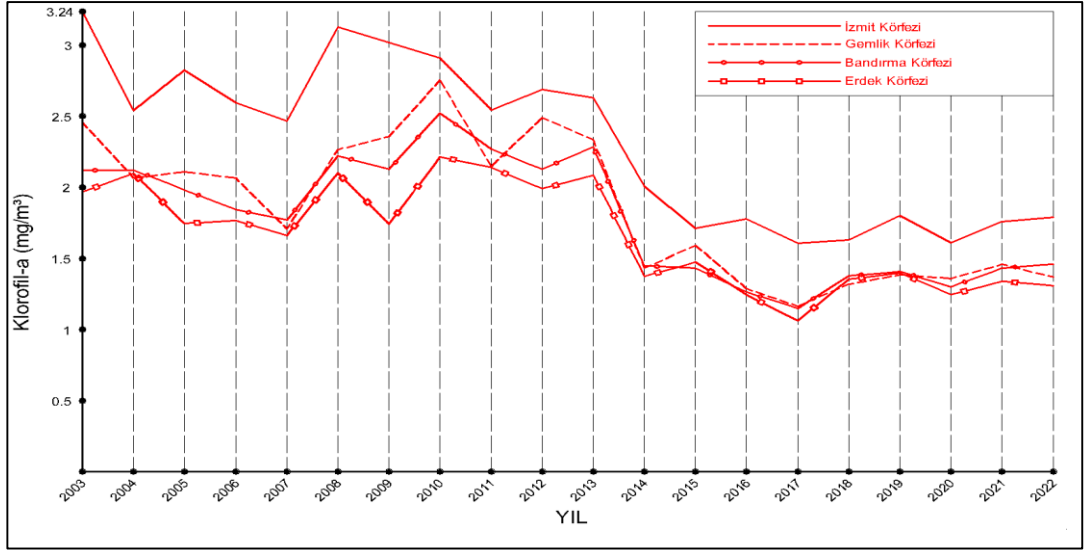
Şekil 4.15: Marmara Denizi ortası için, klorofil-a zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en yüksek) ve 2017 (b:en düşük) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

2003–2022 yılları arasında, Marmara Denizi genelinde ve alt bölgelerde nisan–eylül dönemine ait ortalama klorofil-a konsantrasyonları incelendiğinde, zaman içerisinde dikkat çekici dalgalanmalar gözlenmiştir. Özellikle 2010 yılı, Marmara Denizi genelinde ve birçok bölgede en yüksek klorofil-a değerlerinin tespit edildiği yıl olarak öne çıkmaktadır. 2017 yılı ise, Marmara Denizi genelinde ve birçok alt bölgede minimum seviyelerin gözlemlendiği yıl olmuştur. Bu eğilim, **Şekil 4.16**’da görülmektedir.



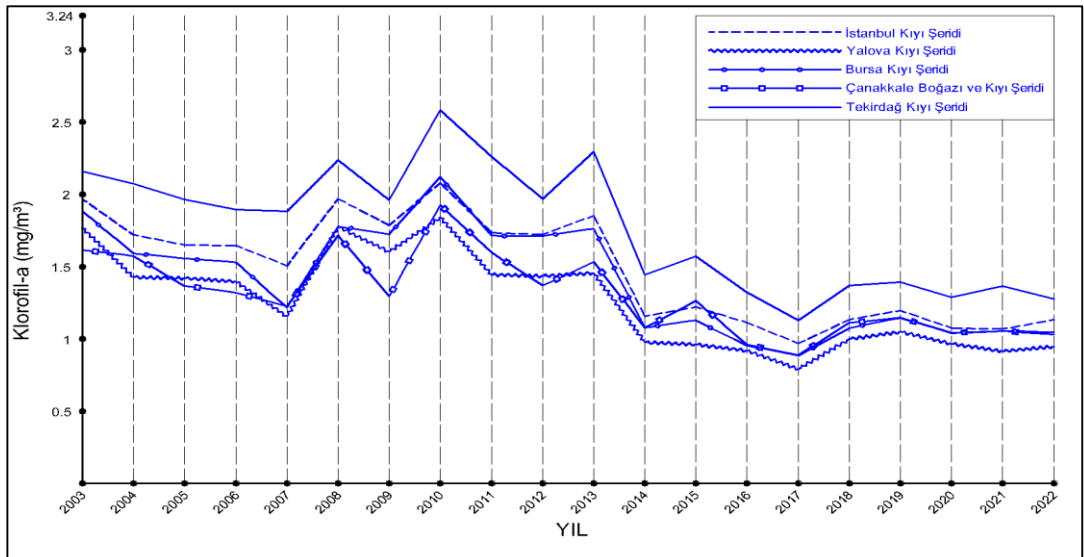
Şekil 4.16: Marmara Denizi geneli ve 10 alt bölge için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).

Ancak İzmit Körfezi, bu genel eğilimden sapma göstererek 2003 yılında en yüksek klorofil-a değerine ulaşmıştır. Bu durum, körfezin erken dönemde kirlilik baskısına maruz kaldığını ve çevresel koşulların farklılaştığını göstermektedir. **Şekil 4.17** incelendiğinde; körfezlerin, Marmara Denizi’nin diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek klorofil-a seviyeleri içerdiği görülmektedir. İzmit, Gemlik, Bandırma ve Erdek körfezleri, özellikle 2003–2013 yılları arasında klorofil-a konsantrasyonu bakımından yüksek üretkenlik seviyeleri sergilemiştir. Bu eğilim, zayıf su sirkülasyonu, besin tuzu birikimi ve insan kaynaklı kirlenmelerle ilişkilendirilebilir. Körfezlerin coğrafi yapısı gereği sınırlı akıntı rejimi, kirlilik yükünün birikmesine ve çevresel koşulların zamanla bozulmasına neden olabilmektedir. Başta sanayi faaliyetleri, kıyı yerleşimleri ve atık su deşarjları olmak üzere insan kaynaklı etkiler, fitoplankton çoğalmasını teşvik ederek klorofil-a seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır.



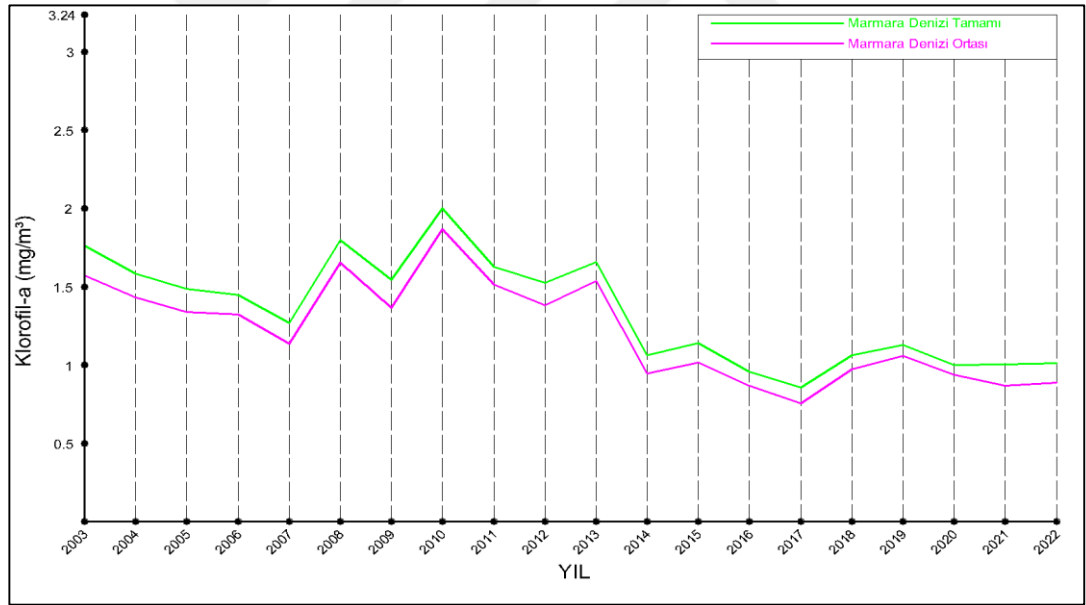
Şekil 4.17: Körfez bölgeleri için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).

Kıyı şeridi bölgeleri incelendiğinde (**Şekil 4.18**); Tekirdağ kıyı şeridi bölgesi dikkat çekici bir şekilde diğer kıyı şeridi bölgelerine kıyasla daha yüksek klorofil-a konsantrasyon değerlerine ulaşmış ve zaman zaman körfezlere benzer seviyelere çıkmıştır. Bu durum, bölgedeki nehir girdileri, tarımsal akış, liman faaliyetleri ve yerleşim baskısıyla ilişkili olabilir. Diğer kıyı şeritleri olan İstanbul, Yalova, Bursa ve Çanakkale bölgelerinde ise görece daha düşük seviyeler izlenmiştir, ancak 2010 yılında bu bölgelerde de kısa süreli artışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18: Kıyı şeritleri için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).

Marmara Denizi tamamı ile ortası karşılaştırıldığında (**Şekil 4.19**); açık deniz (ortası) bölgesinin yıllar boyunca düzenli olarak daha düşük klorofil-a konsantrasyonları içerdiği, buna karşın genel ortalamanın (tüm Marmara) daha yüksek kaldığı görülmektedir. Bu fark, Marmara'nın genel ortalamasının, kıyı ve körfezlerdeki yüksek konsantrasyonlardan etkilendiğini ve bu alanların genel su kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Öte yandan, denizin ortası ile tüm Marmara'yı temsil eden genel ortalama arasında zaman içerisindeki değişim trendleri büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Eğim yönü, eğim şiddeti ve kırılma noktaları neredeyse aynı zamanlara denk gelmektedir. Bu yapısal benzerliğe karşın konsantrasyon farkı, özellikle kıyı bölgelerinde yoğunlaşan kirlilik baskısı, besin girdileri ve antropojenik faaliyetlerin etkisini yansıtmaktadır. **Şekil 4.19**'da görülen iki grafik çizgisi arasındaki fark, büyük ölçüde insan kaynaklı etkilere dayanmaktadır.



Şekil 4.19: Marmara Denizi geneli ve ortası için yıllık ortalama klorofil-a değerlerinin karşılaştırmalı zaman serisi (Nisan–Eylül).

Elde edilen bu bulgular, Marmara Denizi'nde klorofil-a dinamiklerinin yalnızca zamansal değil, aynı zamanda mekânsal olarak da büyük değişkenlik gösterdiğini, bu nedenle bölge bazlı izleme ve değerlendirme yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Zaman serisi grafiklerinden elde edilen eğilimler, uzaktan algılama

tekniklerinin bölgesel su kalitesi izleme süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceğini bir kez daha doğrulamaktadır.

4.3. Marmara Denizi'nin Spektral İndeksler Yardımıyla Zamansal Olarak izlenmesi

Bu bölümde, Marmara Denizi'ndeki fitoplankton değişimlerini zamansal olarak analiz edebilmek amacıyla çeşitli spektral indeksler hesaplanmıştır. İlgili hesaplamalar, MODIS/Aqua uydu sensöründen türetilen ve yüzey yansıma verilerini içeren MYD09GA.061 koleksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Spektral indeks hesaplamalarına geçilmeden önce, bir önceki başlıkta açıklanan klorofil-a analizlerinde olduğu gibi benzer önışlem adımları uygulanmıştır. Aynı çalışma alanı, aynı tarih aralıkları ve benzer kalite-bulut maskeleyme yöntemleri temel alınarak veriler analiz için hazırlanmıştır.

Sentinel-2 L2A verilerinden türetilmiş Marmara Denizi sınır poligonu referans alınarak uydu görüntüleri coğrafi olarak kırılmış ve böylece analiz yalnızca hedef çalışma alanı ile sınırlandırılmıştır. Çalışma, 2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemine odaklanmakta olup, bu zaman aralığı için hem aylık hem de yıllık ortalama indeks değerleri hesaplanmıştır. Uzaktan algılama yoluyla elde edilen spektral bilgiler doğrultusunda, Marmara Denizi'nde zamansal ve bölgesel düzeyde fitoplankton hareketliliği değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Analizlerde yalnızca güvenilir yansıma değerlerinin kullanılabilmesi amacıyla MYD09GA.061 koleksiyonuna özgü kalite kontrol ve bulut maskeleri uygulanmıştır. Böylece atmosferik etkilerden ve diğer optik bozuculardan arındırılmış, daha güvenilir spektral indeks çıktıları elde edilmiştir. Bunun için ilk aşamada, QC_500m bandındaki kalite kontrol bitleri değerlendirilerek, yalnızca tüm bantlar için geçerli ve güvenilir yansıma değerleri içeren pikseller analiz kapsamına alınmıştır. Ardından, state_1km bandı yardımıyla bulut maskesi uygulanmış; bu bandın ilgili bitleri dikkate alınarak bulut içermeyen (clear) pikseller kullanıma dâhil edilmiştir. Her iki filtreleme işleminin birlikte uygulanması sayesinde, analizlerde kullanılmak üzere yalnızca güvenilir, bulutsuz ve atmosferik bozulmalardan arındırılmış pikseller elde edilmiştir.

Sonuç olarak, hesaplanan spektral indeksler, optik bozulmalardan arındırılmış güvenilir yansıma verilerine dayanmaktadır. Kullanılan bit değerleri ve açıklamaları **Tablo 4.6**'da özetlenmiştir. Tablodan da görüleceği üzere QC_500m ve state_1km

bantlarında, bit değeri 00 olan, bulutsuz ve ideal kalitedeki pikseller analizlerde kullanılmıştır.

Tablo 4.6: Kalite ve bulut maskesinde kullanılan bit tanımları [Vermote vd., 2015].

Bant Adı	Bit Dizisi	Bit Değeri	Kalite Kodu Açıklaması
QC 500m	0-1	00	Tüm bantlar için ideal kalitede düzeltme yapılmış.
		01	Bazı veya tüm bantlar ideal kalitede değil.
		10	Tüm bantlar için bulut nedeniyle düzeltme başarısız.
		11	Bazı veya tüm bantlar için diğer nedenlerle düzeltme başarısız.
State 1km	0-1	00	Bulutsuz (Clear).
		01	Bulutlu (Cloudy).
		10	Karışık (Mixed).
		11	Belirsiz, varsayılan olarak temiz (Clear) kabul edilmiştir.

Kalite ve bulut filtresi uygulandıktan sonra, spektral indekslerin hesaplanmasında kullanılacak yüzey yansıma bantları belirlenmiştir. MYD09GA.061 koleksiyonunda yer alan;

- 620-670nm / sur_refl_b01 (kırmızı),
- 841-876nm / sur_refl_b02 (NIR),
- 459-479nm / sur_refl_b03 (mavi),
- 545-565nm / sur_refl_b04 (yeşil),
- 1230-1250nm / sur_refl_b05 (SWIR 1),
- 1628-1652nm / sur_refl_b06 (SWIR 2),
- 2105-2155nm / sur_refl_b07 (SWIR 3)

olmak üzere toplam yedi adet bant analiz kapsamına alınmıştır.

Bu bantlara, MODIS ürün dokümantasyonuna göre uygulanması gereken ölçekleme katsayısı olan 0.0001 çarpanı uygulanmış ve böylece her bir DN değeri gerçek yansıma değerine dönüştürülmüştür. Bu işlem sonucunda elde edilen ölçeklenmiş yedi bant, tüm spektral indekslerin hesaplamasında temel girdi olarak kullanılmıştır.

Bölüm 2.4'te ayrıntılı olarak açıklanan spektral indeksler, bu çalışmada Marmara Denizi'nin yüzeysel optik özelliklerinin ve fitoplankton dinamiklerinin zaman

içerisinde izlenebilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu kapsamda, kalite kontrol ve bulut maskeleyme adımları tamamlanan MYD09GA.061 görüntüleri kullanılarak, ilgili indekslerin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada değerlendirilen indeksler; fitoplankton varlığı (AFAI, FAI, CI, SABI), su yüzeyi yansıtımı ve bulanıklık ($NDWI_{Gao}$, $NDWI_{McFeeters}$, NDTI), vejetasyon ve biyokütle düzeyi (NDVI, NDAVI), müsilaj tespiti (AMEI, MI) gibi farklı su kalitesi bileşenlerine duyarlılık göstermektedir.

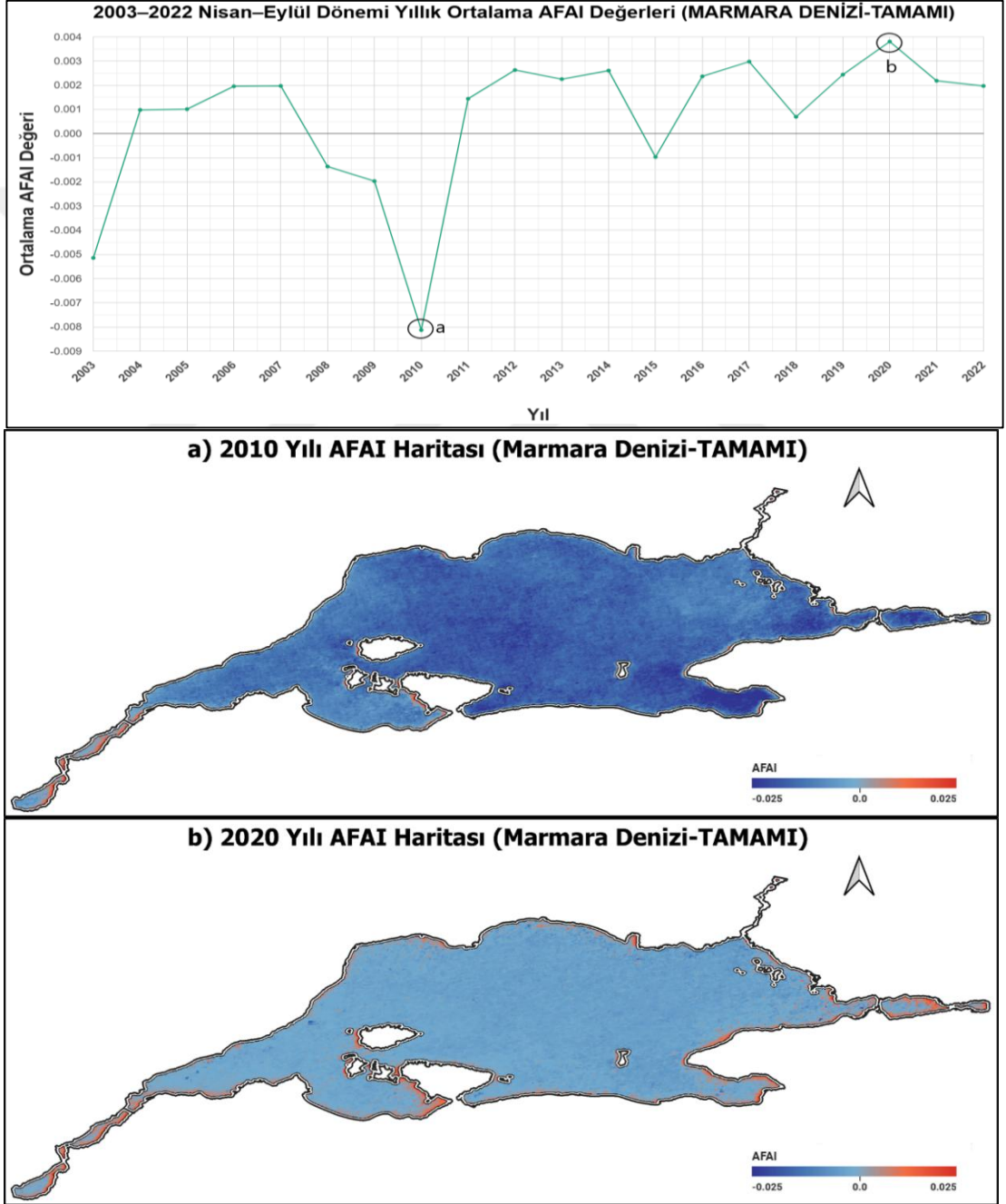
Her bir indeks, daha önce belirlenen yedi spektral banttan türetilmiş ölçekli yansıma değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu işlemler, GEE platformu üzerinde normalizedDifference, expression gibi işlevler aracılığıyla yürütülmüştür.

Hesaplanan spektral indeksler, Marmara Denizi genelini ve onunla birlikte tanımlanmış olan 10 alt bölgeyi kapsayacak şekilde toplam 11 farklı alan için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Zaman boyutunda ise, 2003-2022 arası her yılın nisan–eylül dönemi için hem aylık ortalamalar ($20 \text{ yıl} \times 6 \text{ ay} = 120 \text{ aylık ortalama}$) hem de yıllık ortalamalar olacak şekilde hesaplanmıştır. Böylece indekslerin hem mevsimsel hem de uzun dönemli değişimleri ayrıntılı olarak izlenebilmiştir.

Bu çıktıların bir kısmı, bir sonraki başlık olan “*Klorofil-a ve İndeks Değerleri Arasındaki İlişkilerin Analizi*” kısmında istatistiksel korelasyon ve regresyon analizlerinde kullanılmıştır. Bu analizlerde, veri sayısının artırılması ve istatistiksel sağlamlık açısından aylık ortalama değerler tercih edilmiştir.

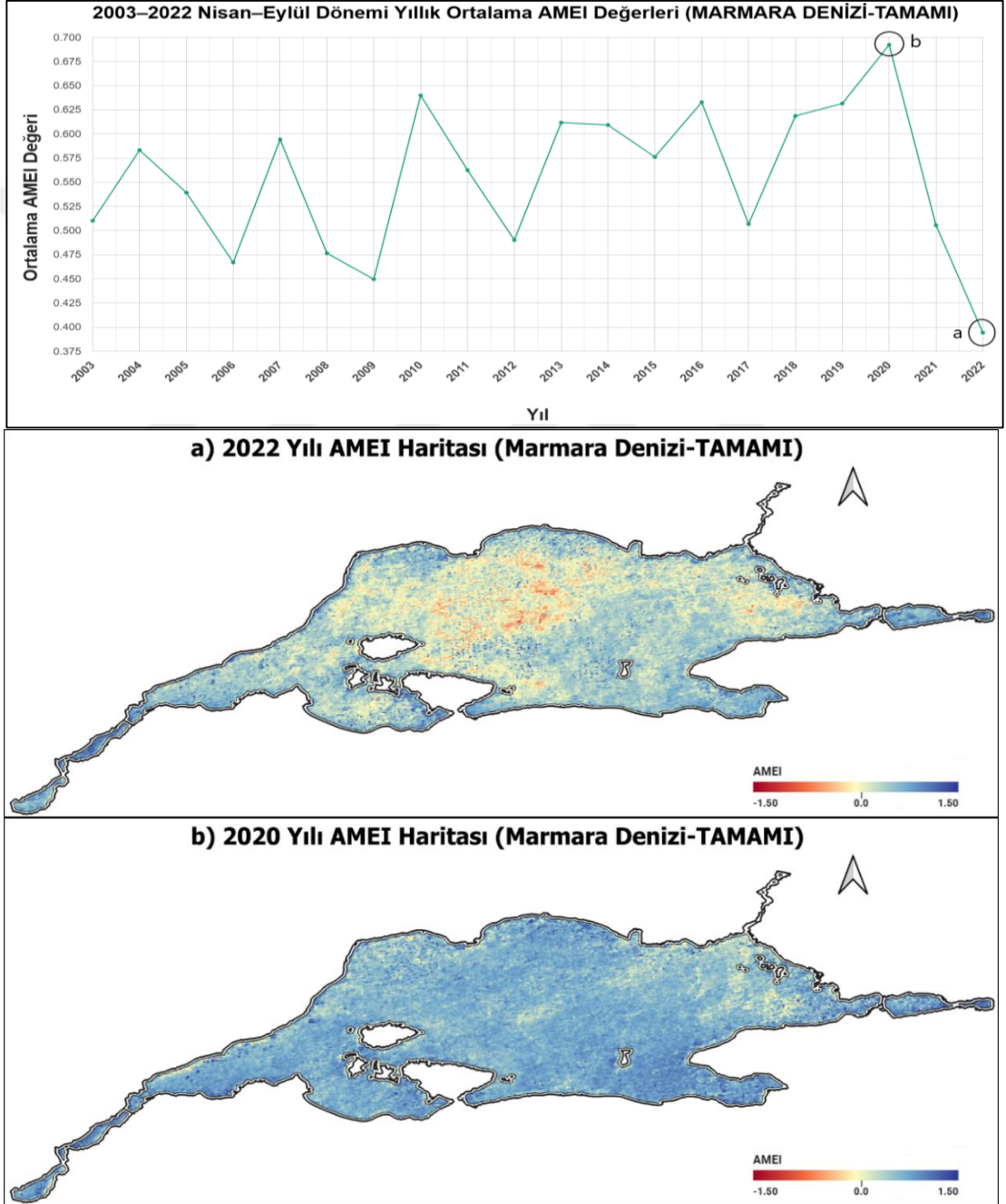
Öte yandan, bu bölümde indekslerin görsel karşılaştırmalarına odaklanılmış; her indeks için Marmara Denizi genelinde hesaplanan yıllık ortalama değerlere ilişkin zaman serisi grafikleri ile en yüksek ve en düşük değerlerin hesaplandığı yıllara ait mekânsal dağılım haritaları sunulmuştur. Böylece her bir spektral indeksin yıllar içindeki değişimi hem nicel hem de görsel olarak değerlendirilmiştir. **Şekil 4.20** ile **Şekil 4.30** arasında yer alan bu görseller, 2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemini kapsamaktadır. Ayrıca, ilgili yıllara ait indeks görüntülerinin histogramları, görsel dağılımların daha ayrıntılı incelenebilmesi amacıyla çalışmanın **Ekler** bölümünde yer almaktadır.

Şekil 4.20'ye göre, Marmara Denizi genelinde AFAI değeri 2010'da -0.008 ile en düşük, 2020'de ise 0.004 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 2010 yılında genel olarak düşük AFAI değerleri gözlenmiş; Çanakkale Boğazı ve Erdek Körfezi'nde kısmi artışlar dikkat çekmiştir. 2020'de ise denizin geneliyle beraber İzmit, Gemlik ve Erdek Körfezleri ile Çanakkale Boğazı ve bazı kıyı alanlarında AFAI değerlerinde belirgin yükselişin olduğu görülmektedir. Bu durum, yüzey alg yoğunluğunun zamanla arttığını ve bazı bölgelerde biriktiğini göstermektedir.



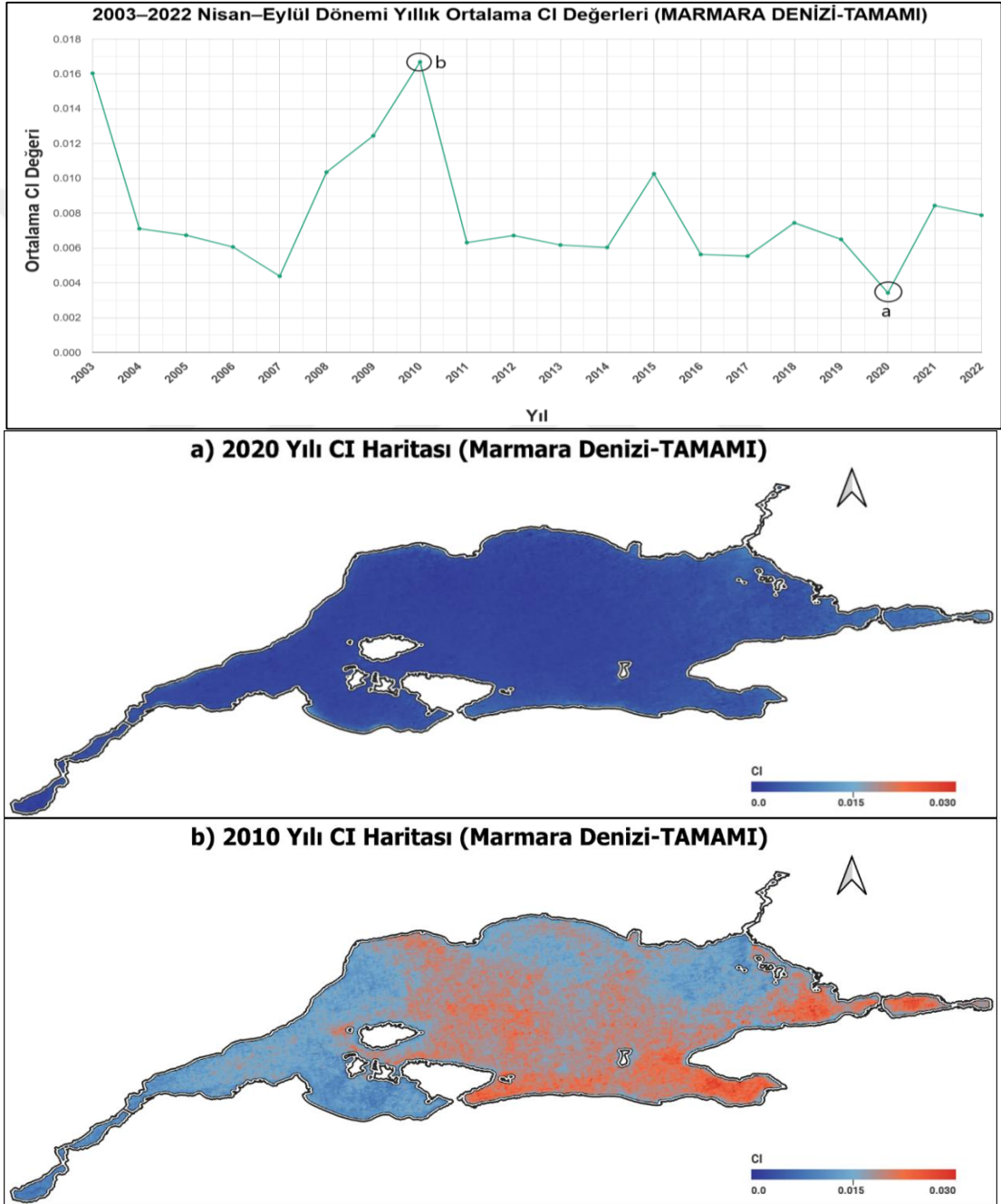
Şekil 4.20: Marmara Denizi geneli için, AFAI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.21'e göre, Marmara Denizi genelinde AMEI değeri 2022'de 0.394 ile en düşük, 2020'de ise 0.692 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 2020 yılında özellikle körfezler ve Çanakkale Boğazı çevresinde yüksek AMEI değerleri öne çıkmıştır. 2022'de ise genel düşüşe rağmen benzer bölgelerde sınırlı artışlar izlenmiştir. Bu durum, müsilaj oluşumlarının hem zamansal hem de mekânsal olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yüksek AMEI değerlerinin biriktiği alanlar, müsilaj için potansiyel odak noktalarıdır.



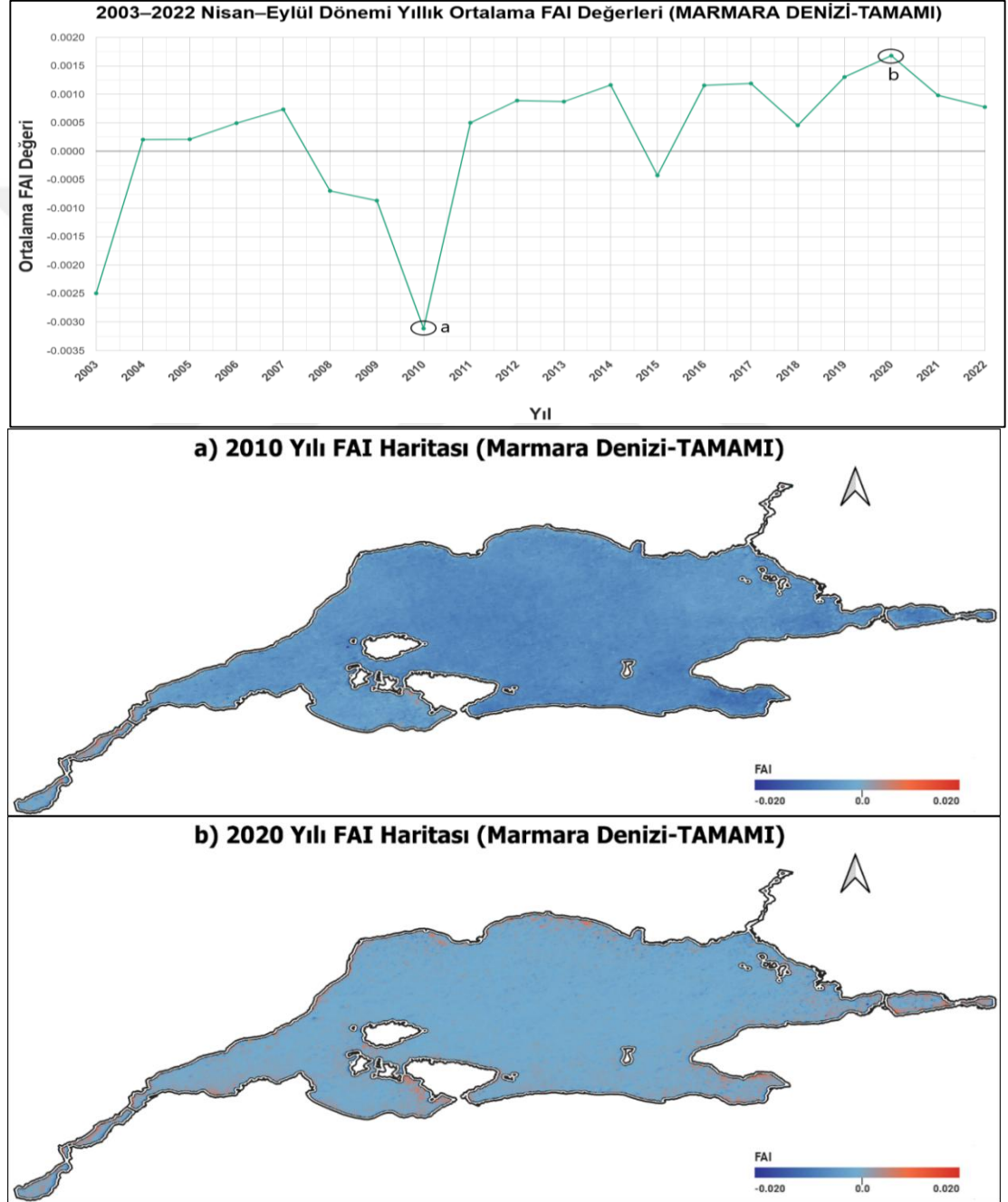
Şekil 4.21: Marmara Denizi geneli için, AMEI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2022 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.22'ye göre, Marmara Denizi'nde CI değeri 2010'da 0.017 ile en yüksek, 2020'de ise 0.003 ile en düşük düzeyde hesaplanmıştır. 2010 haritasında, başta İzmit ve Gemlik körfezleri ile güney kıyıları olmak üzere birçok alanda yüksek; batı ve bazı kuzey bölgelerde ise nispeten düşük CI değerleri gözlenmektedir. 2020 yılında ise deniz genelinde oldukça düşük, ancak yine de pozitif değerler baskındır. İncelenen zaman diliminde CI değerlerinin sıfırın üzerinde olması, bu indeksin Marmara Denizi'nde zayıf da olsa sürekli bir sinyal verdiğini göstermektedir.



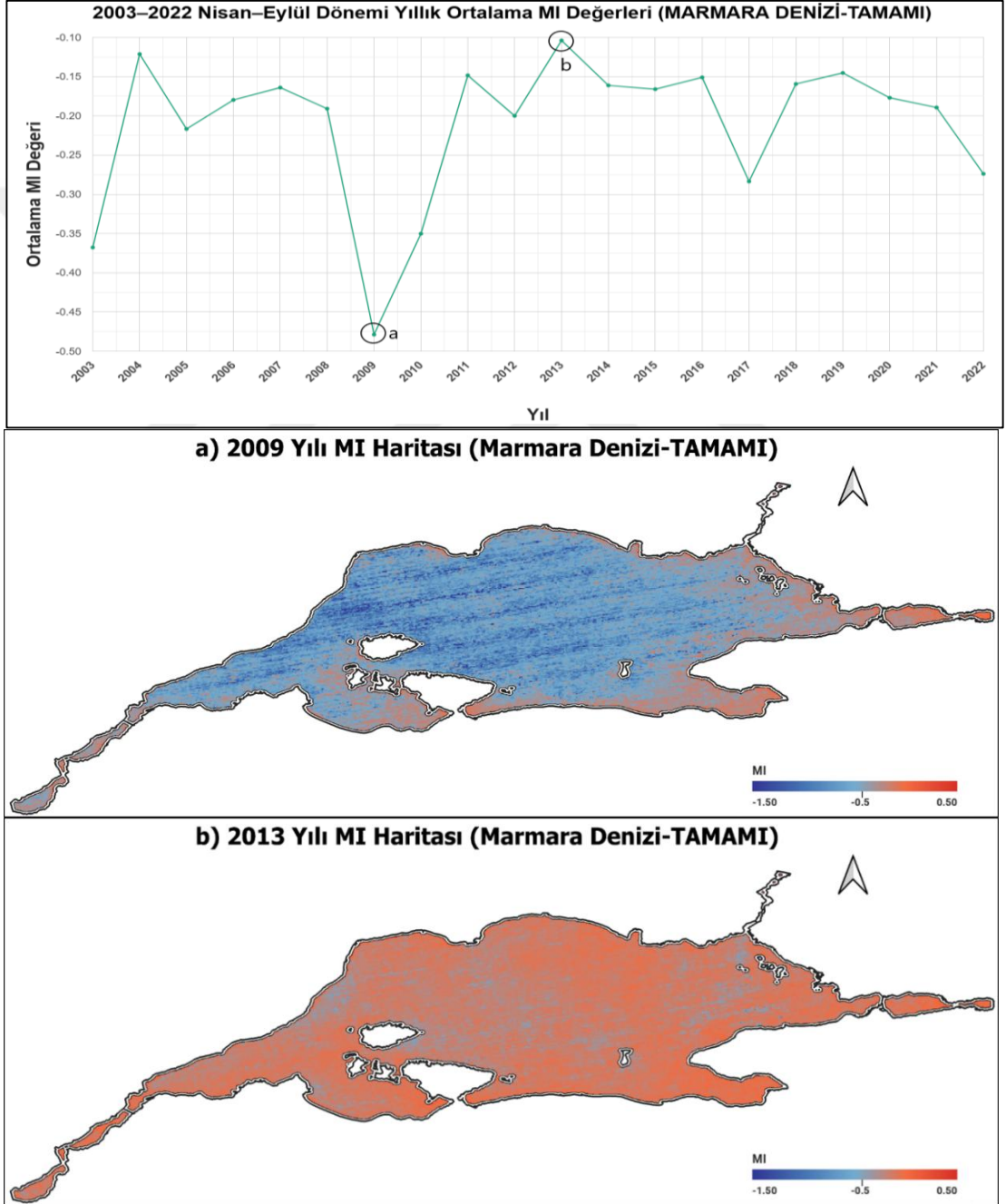
Şekil 4.22: Marmara Denizi geneli için, CI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2020 (a:en düşük) ve 2010 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.23'e göre, Marmara Denizi'nde FAI değeri 2010'da -0.003 ile en düşük, 2020'de ise 0.002 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 2020 haritasında İzmit, Gemlik ve Erdek körfezleri ile İstanbul kıyıları ve Çanakkale Boğazı çevresinde yüksek FAI değerleri öne çıkmaktadır. 2010'da ise FAI değerleri genel olarak düşük ve homojen dağılmıştır. Her iki yılda da Çanakkale Boğazı'nda görece artışlar gözlenmektedir. Bu fark, yüzen alg varlığının 2020'de daha belirgin olduğunu ve özellikle körfez ile kıyı bölgelerinde yoğunlaştığını göstermektedir.



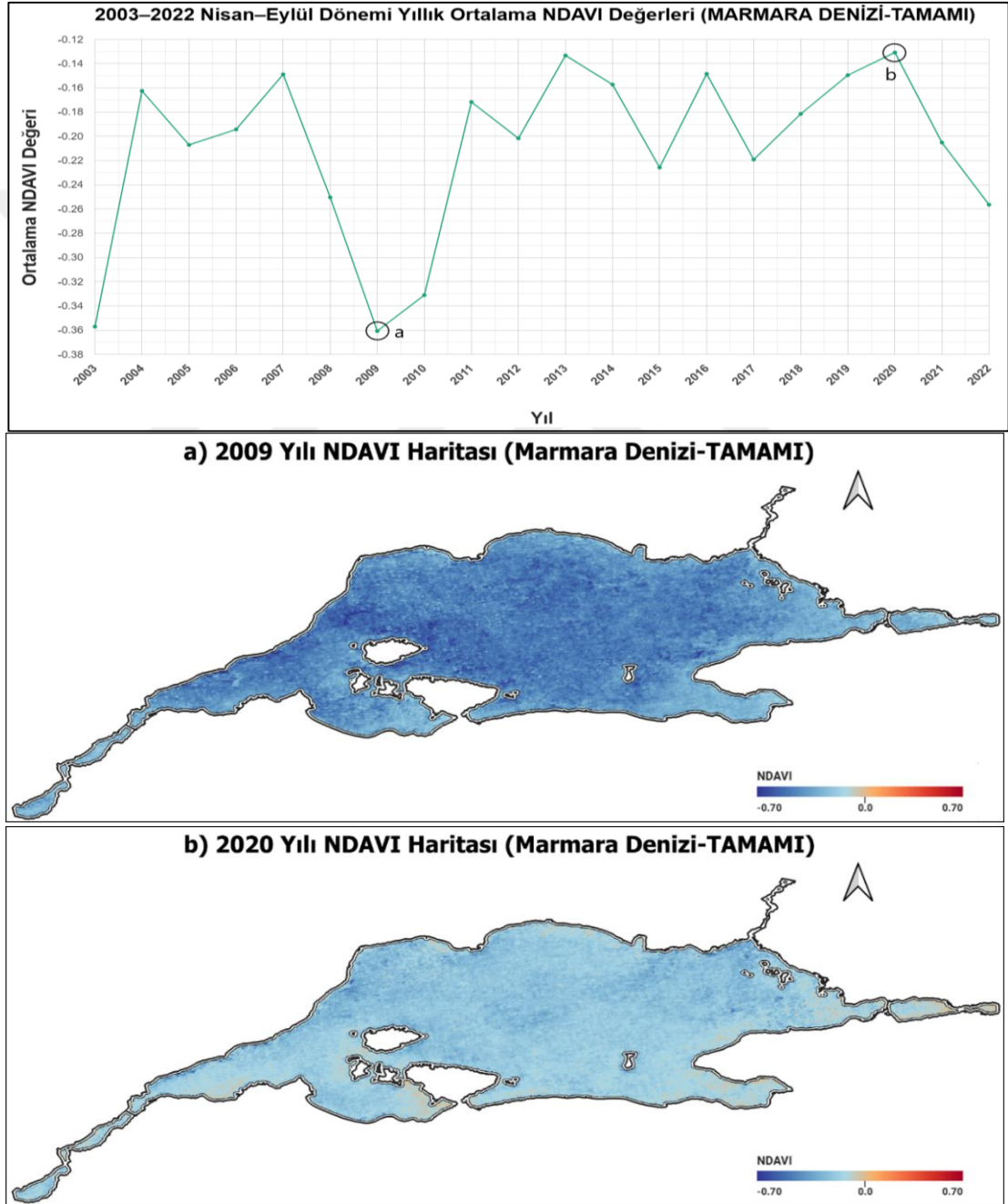
Şekil 4.23: Marmara Denizi geneli için, FAI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.24'e göre, Marmara Denizi'nde MI değeri 2009 yılında -0.479 ile en düşük, 2013'te ise -0.104 ile en yüksek düzeye ulaşmıştır. İncelenen tüm yıllarda değerler negatif olup, 2013'te sifıra yaklaşarak görece daha yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. 2013 haritasında deniz genelinde yaygın şekilde daha yüksek MI değerleri gözlenirken, 2009'da düşük değerler baskın olup, özellikle körfezler ve kuzey kıyılarda nispeten yüksek alanlar dikkat çekmektedir. Bu durum, özellikle 2013 ve benzer yıllarda müsilajın varlığına işaret olabilir.



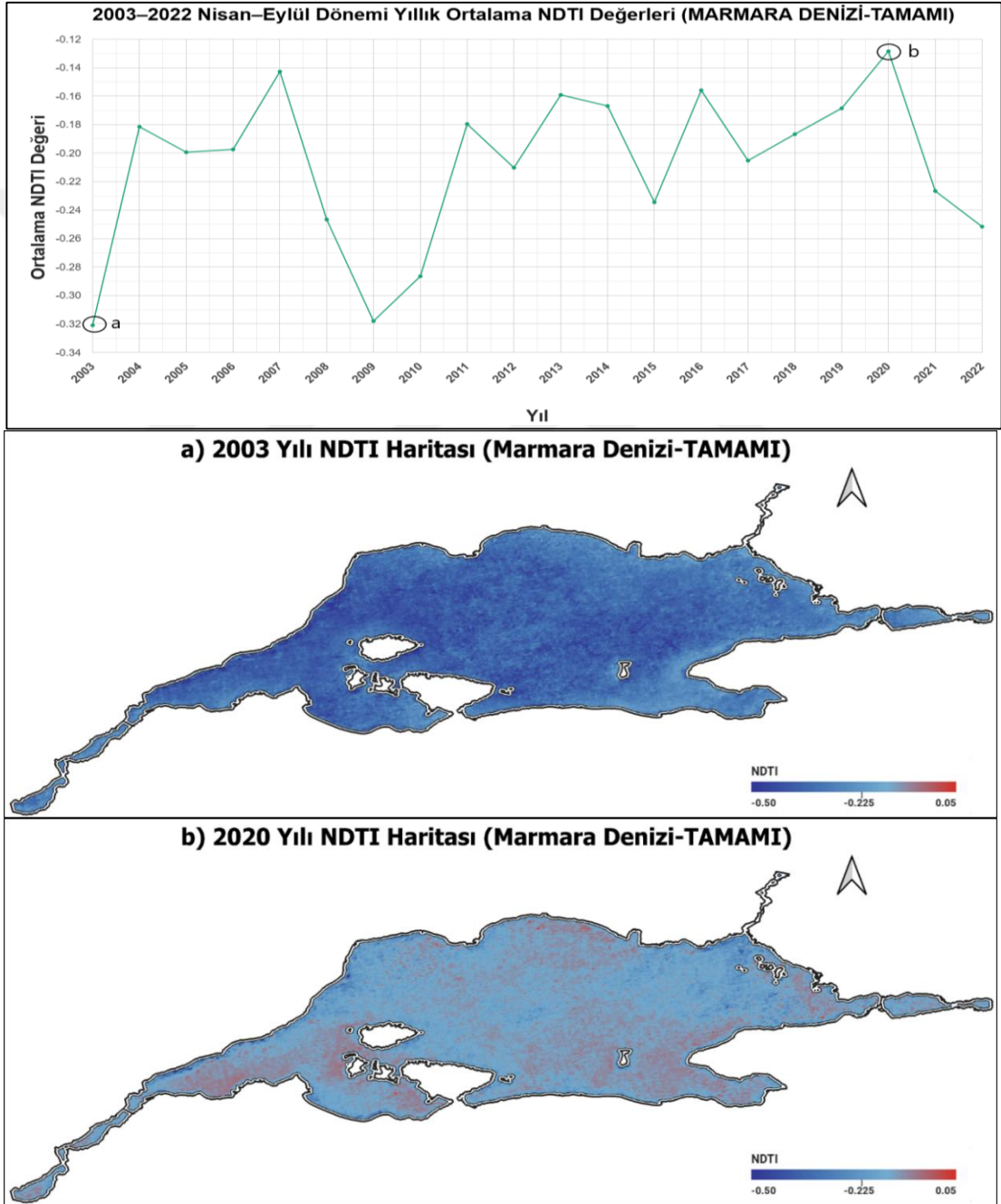
Şekil 4.24: Marmara Denizi geneli için, MI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2009 (a:en düşük) ve 2013 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.25'e göre, Marmara Denizi'nde NDAVI değeri 2009'da -0.361 ile en düşük, 2020'de ise -0.131 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Her iki yılda da NDAVI değerleri negatif olup, zaman serisi boyunca pozitif değere ulaşmamıştır. 2020 haritasında deniz genelinde daha yüksek (sıfıra yakın) değerler gözlenirken, 2009 yılında düşük değerler baskındır. Körfezler ve güney kıyılarda her iki yılda da nispeten yüksek değerler öne çıkmaktadır. Bu durum, NDAVI'nın yıllar içinde farklı mekânsal tepkiler verdiğini göstermektedir.



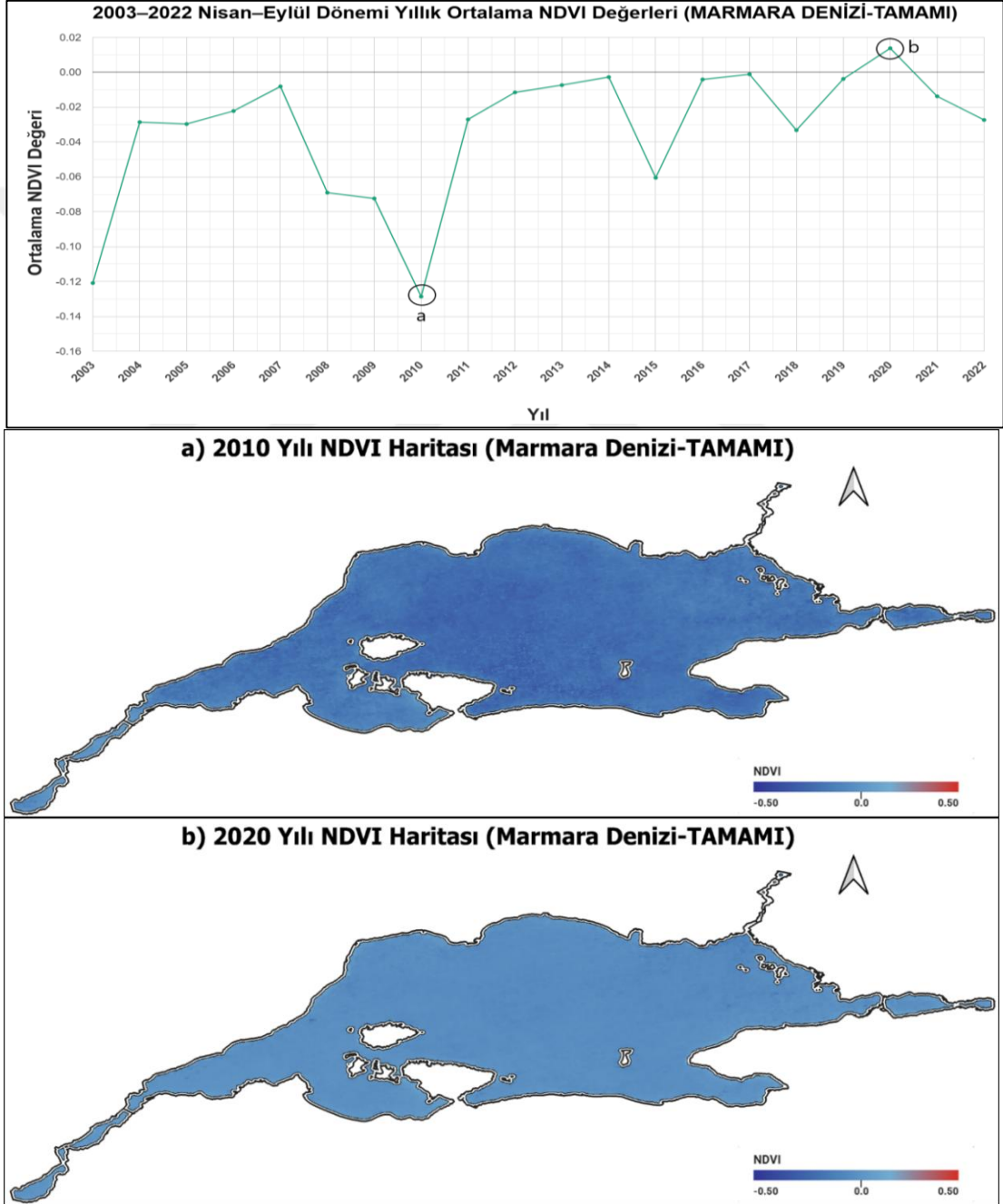
Şekil 4.25: Marmara Denizi geneli için, NDAVI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2009 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.26'ya göre, Marmara Denizi'nde NDTI değeri 2003 yılında -0.321 ile en düşük, 2020'de ise -0.129 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. İncelenen dönem boyunca NDTI değerleri sürekli negatif olup, bu durum genel olarak düşük bulanıklık koşullarını yansıtmaktadır. 2020 haritasında, yer yer dağınık ve görece yüksek (yani sıfıra yakın) NDTI değerleri dikkat çekmektedir. 2003 yılında ise deniz genelinde daha düşük ve homojen bir dağılım gözlenmiştir. Bu durum, 2020'de yüzey sularında bulanıklık artışına işaret edebilir.



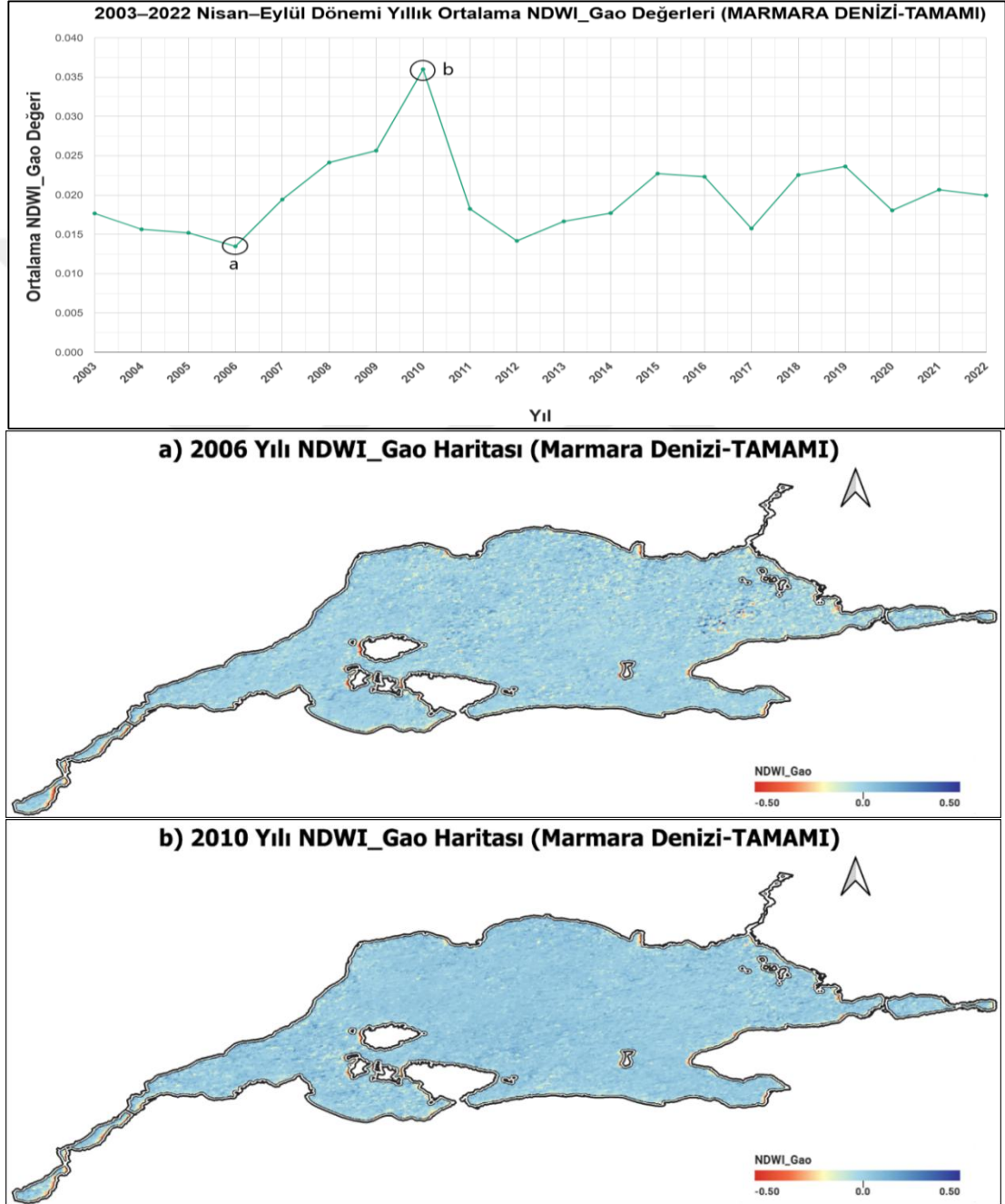
Şekil 4.26: Marmara Denizi geneli için, NDTI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2003 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.27'ye göre, Marmara Denizi'nde NDVI değeri 2010 yılında -0.129 ile en düşük, 2020'de ise 0.014 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. NDVI değerleri genel olarak negatif seyretmiş, yalnızca 2020 yılında sıfırın hemen üzerine çıkmıştır. Hem en düşük hem de en yüksek yıllarda, NDVI değerlerinin deniz genelinde oldukça homojen dağıldığı ve belirgin farklılık gösteren bölgelerin öne çıkmadığı gözlenmiştir. Bu durum, deniz yüzeyinde yansıma farklarının zamansal olarak değişse de mekânsal olarak sınırlı kaldığını göstermektedir.



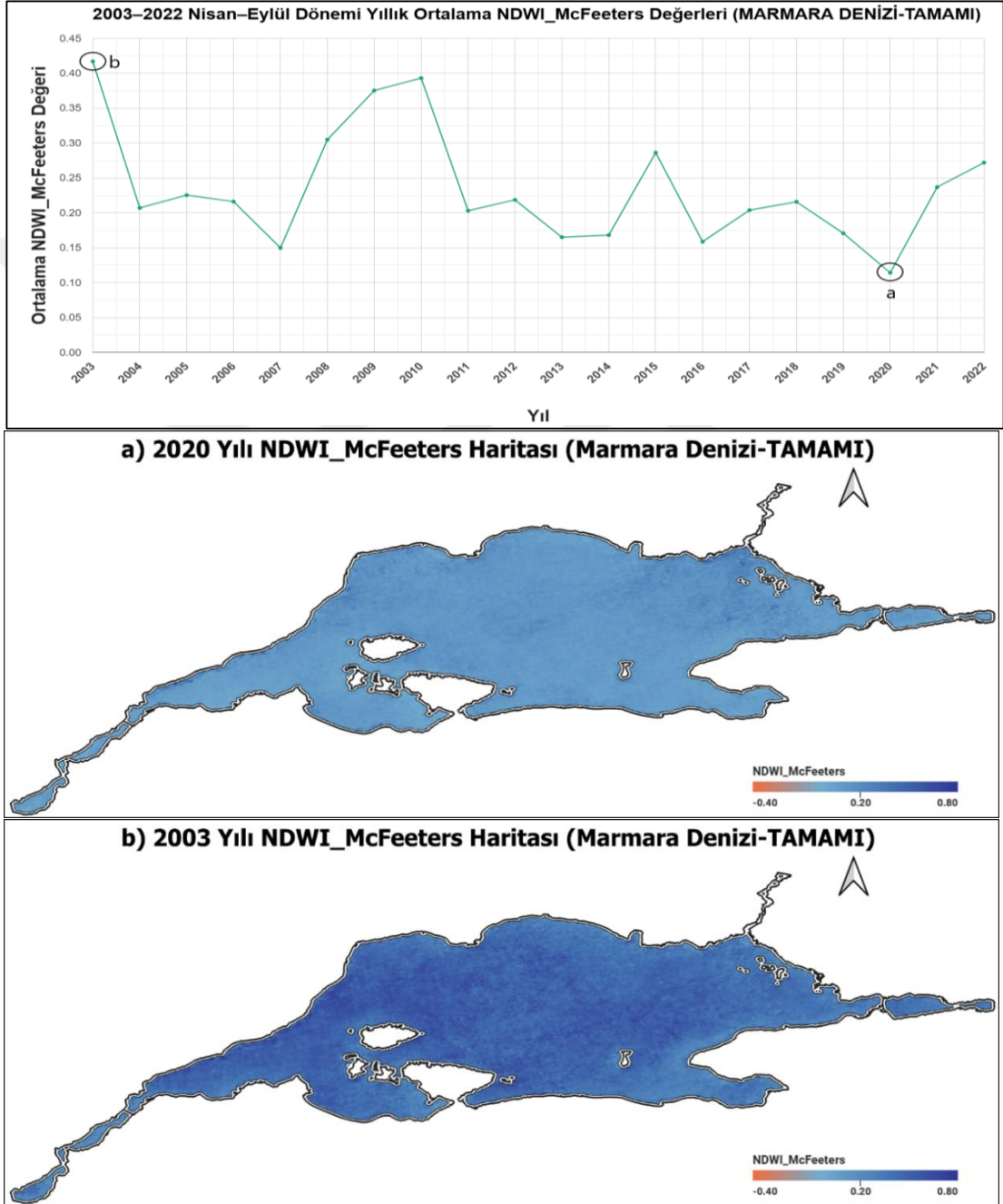
Şekil 4.27: Marmara Denizi geneli için, NDVI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.28'e göre, Marmara Denizi'nde $NDWI_{Gao}$ değeri 2006 yılında 0.013 ile en düşük, 2010 yılında ise 0.036 ile en yüksek düzeye ulaşmıştır. 2010 haritasında, deniz yüzeyinin büyük bölümünde görece yüksek $NDWI_{Gao}$ değerleri görülmektedir. 2006 yılı haritasında ise daha düşük ve sınırlı pozitif değerler dikkat çekmektedir. Her iki yılda da yer yer negatif veya sıfıra yakın alanlar görülse de genel ortalamalar pozitiftir. Bu durum, 2010 yılında yüzey suyu varlığının daha belirgin olduğunu göstermektedir.



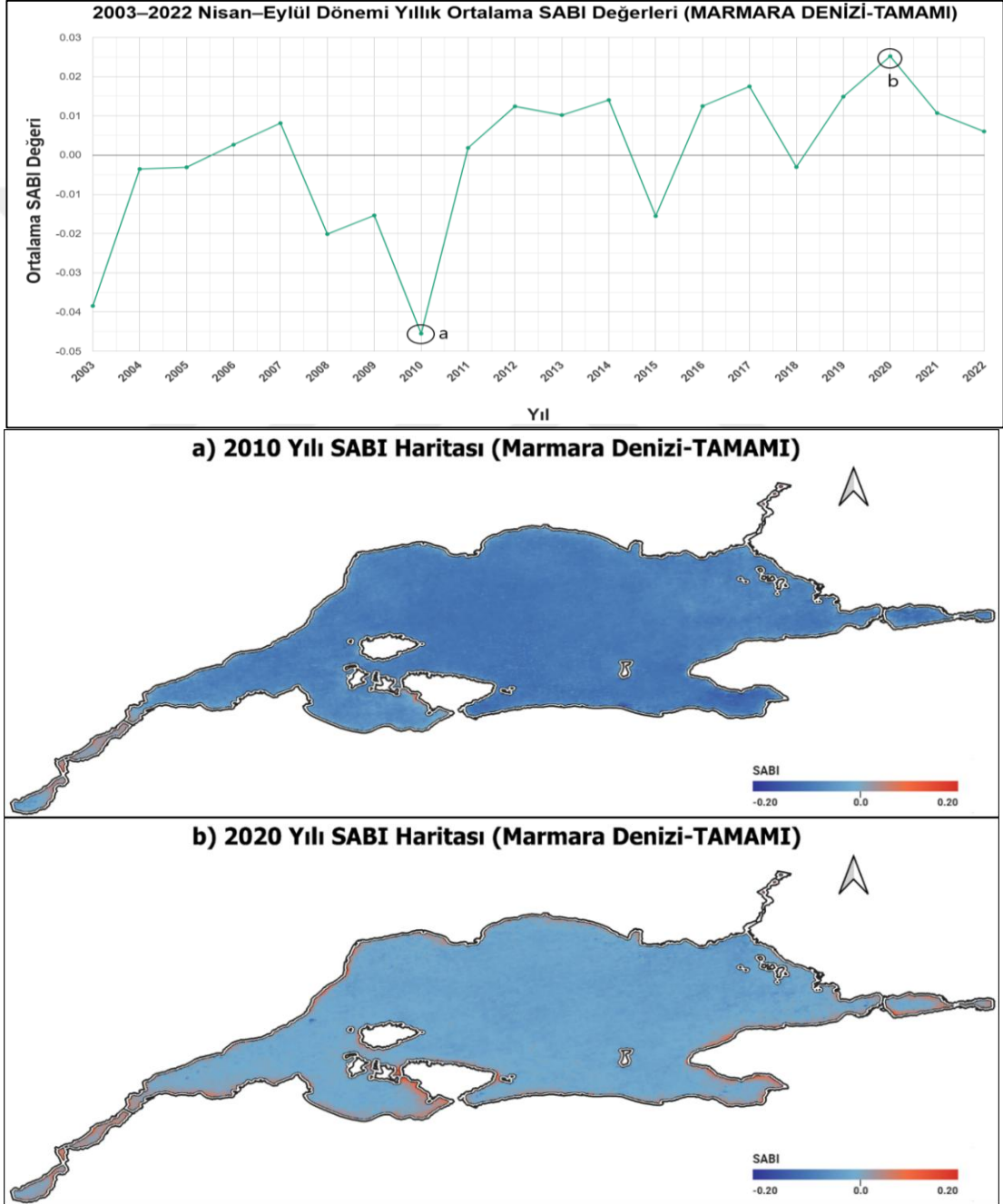
Şekil 4.28: Marmara Denizi geneli için, $NDWI_{Gao}$ zaman serisi grafiği (üstte) ile 2006 (a:en düşük) ve 2010 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.29'a göre, Marmara Denizi'nde $NDWI_{McFeeters}$ değeri 2020 yılında 0.114 ile en düşük, 2003'te ise 0.417 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Çalışılan tüm yıllarda değerlerin pozitif olduğu görülmektedir. Haritalar incelendiğinde, her iki yılda da belirgin bir farklılaşma veya yoğunlaşma alanı bulunmamakta, $NDWI_{McFeeters}$ dağılımı deniz genelinde homojen bir görünüm sergilemektedir. Bu durum, yüzey suyu varlığı açısından mekânsal anlamda büyük bir değişim olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.29: Marmara Denizi geneli için, $NDWI_{McFeeters}$ zaman serisi grafiği (üstte) ile 2020 (a:en düşük) ve 2003 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

Şekil 4.30'a göre, Marmara Denizi'nde SABI değeri 2010 yılında -0.046 ile en düşük, 2020'de ise 0.025 ile en yüksek düzeye ulaşmıştır. 2010 yılı haritasında değerler genel olarak düşük ve homojen dağılmış, yalnızca Çanakkale Boğazı ile kısmen Erdek Körfezi'nde sınırlı yüksek alanlar gözlenmiştir. 2020'de ise SABI değerleri belirgin şekilde artmış; özellikle körfezler, kıyılar ve Çanakkale Boğazı çevresinde yaygın olarak görece yüksek düzeylere ulaşmıştır. Bu durum, 2020'de yüzey alg yoğunluğunun artmış olabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4.30: Marmara Denizi geneli için, SABI zaman serisi grafiği (üstte) ile 2010 (a:en düşük) ve 2020 (b:en yüksek) yıllarına ait mekânsal dağılım haritaları.

2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemine ait yıllık ortalama spektral indeks değerlerinin zaman serisi grafiklerine ve mekânsal dağılım haritalarına bakıldığında, Marmara Denizi’nde yıllar içinde dikkate değer değişimlerin yaşandığı görülmektedir. Bu analizler yalnızca Marmara Denizi genelini kapsamakta olup, her bir indeksin yıllık ortalama eğilimleri ve bu eğilimlerin mekânsal karşılıkları birlikte yorumlanmıştır.

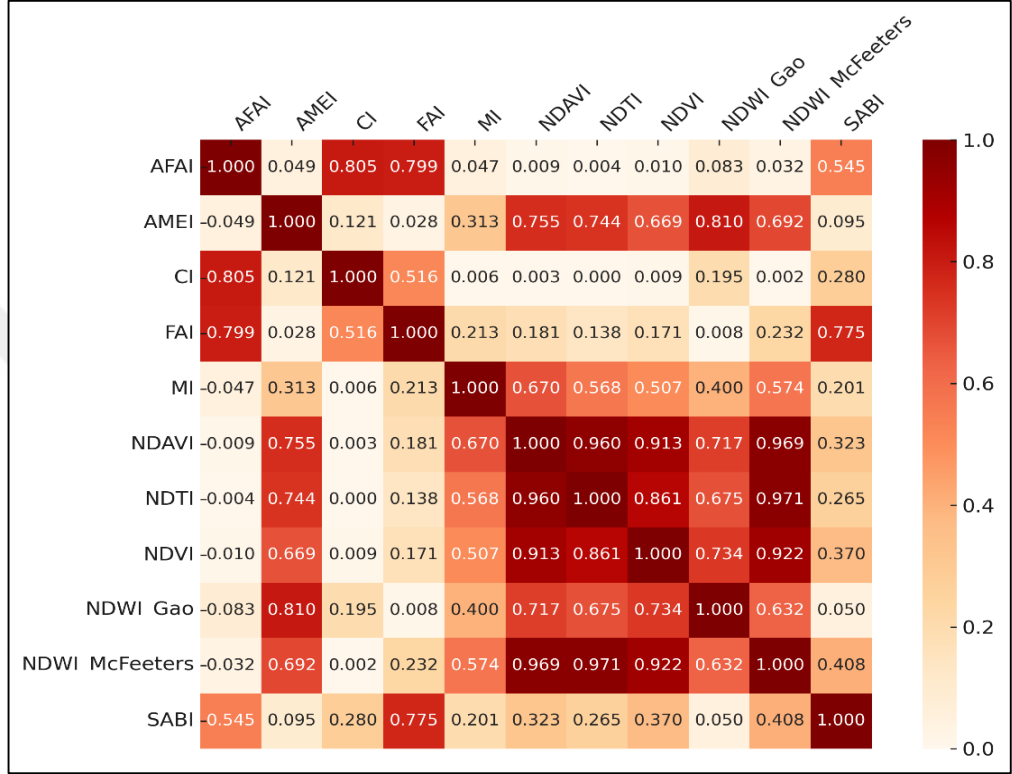
Genel olarak değerlendirildiğinde, birçok indeks için 2010 ve 2020 yıllarının öne çıktığı gözlenmiştir;

- 2020 yılı, AFAI, AMEI, FAI, NDAVI, NDTI, NDVI ve SABI indekslerinin en yüksek yıllık ortalama değerlere ulaştığı dönem olarak öne çıkarken; aynı yıl, CI ve $NDWI_{McFeeters}$ indeksleri açısından en düşük yıllık ortalamaların hesaplandığı yıl olmuştur.
- Öte yandan, 2010 yılı; CI ve $NDWI_{Gao}$ indekslerinin en yüksek yıllık ortalama değerlere ulaştığı, buna karşılık AFAI, FAI, NDVI ve SABI indekslerinin ise en düşük ortalamalara sahip olduğu yıl olarak öne çıkmaktadır.

İndekslerin zamansal eğilimleri arasında kısmi benzerlikler bulunmaktadır. Fitoplankton varlığına duyarlılığı yüksek olan AFAI, FAI ve SABI indekslerine ek olarak, vejetasyon temelli olmasına rağmen bu çalışmada benzer bir davranış sergileyen NDVI indeksi de en yüksek veya en düşük değerlere birlikte ulaşmış; bu dönemlerde benzer coğrafi bölgelerde yoğunluk göstermiştir. Özellikle AFAI, FAI ve SABI indeksleri, İzmit, Gemlik ve Erdek Körfezleri ile Çanakkale Boğazı’nın yanı sıra İstanbul ve Tekirdağ kıyı şeritlerinde benzer mekânsal yoğunluk örüntüleri sergilemiş ve bu bölgelerde birlikte öne çıkmışlardır.

Yıllık ortalama değerler üzerinden yapılan bu zamansal ve mekânsal değerlendirmeler, indekslerin yıllar içerisindeki değişim örüntülerini ortaya koymak açısından önemli bir perspektif sunmaktadır. Bununla birlikte, her bir spektral indeksin yalnızca zamansal eğilimleri değil, aynı zamanda birbirleriyle olan istatistiksel ilişkileri de su kalitesi analizleri açısından anlamlı çıkarımlar barındırmaktadır. Bu doğrultuda, 2003–2022 yılları arasında nisan–eylül dönemine ait aylık ortalama değerler (toplam 120 ay) esas alınarak, indeks çiftleri arasındaki doğrusal ilişkiler, determinasyon katsayısı (R^2) temelinde analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar korelasyon matrisi üzerinden yorumlanmıştır.

Şekil 4.31’de sunulan korelasyon matrisi, her bir indeks çifti arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü görsel olarak ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, R^2 değerinin 1’e yaklaşması, ilgili iki indeksin varyanslarının büyük ölçüde örtüştüğünü; 0’a yakın olması ise iki indeksin birbirinden bağımsız değişim sergilediğini ifade etmektedir.



Şekil 4.31: Spektral indeksler arasındaki R^2 korelasyon matrisi.

Analiz bulgularına göre, bazı indeks çiftleri arasında çok yüksek düzeyde korelasyonlar tespit edilmiştir;

- NDTI–NDWI_{McFeeters} ($R^2 = 0.971$): Çalışmadaki en yüksek korelasyon katsayısı bu iki indeks arasında gözlenmiştir. Her ikisi de su ortamına duyarlı bantlara dayandığından, bulanıklık ve su varlığı gibi ilişkili parametreleri temsil etmeleri bu yüksek uyumu açıklamaktadır. Bu sonuç, NDWI_{McFeeters} indeksinin yalnızca su varlığını değil, aynı zamanda suyun fiziksel karakteristiklerini de dolaylı olarak yansıtabileceğini göstermektedir.
- NDAVI–NDVI ($R^2 = 0.913$): Bu ilişki, iki indeksin yapısal olarak birbirine çok benzeyen bantlar kullanmasından ve her ikisinin de bitki örtüsüne duyarlılığından kaynaklanmaktadır.

- NDAVI–NDWI_{McFeeters} ($R^2 = 0.969$): Bu dikkat çekici yüksek ilişki, NDAVI'nın hem su hem de su bitkileriyle ilişkili spektral tepkilere duyarlı yapısından kaynaklanmaktadır. NDWI_{McFeeters} temel olarak su yüzeylerini ayırt etmek amacıyla geliştirilmişken, NDAVI sucul bitki örtüsünü tanımlamayı hedefler. İki indeksin bu ortak spektral ve tematik duyarlılık alanı, güçlü bir doğrusal ilişki sergilemelerine neden olmuştur.
- AMEI–NDWI_{Gao} ($R^2 = 0.810$) ve AMEI–NDAVI ($R^2 = 0.755$): AMEI indeksinin, özellikle su/kara ayırımına duyarlı olan NDAVI ve NDWI_{Gao} ile yüksek ölçüde benzeştiği görülmektedir.
- AFAI–CI ($R^2 = 0.805$), AFAI–FAI ($R^2 = 0.799$), FAI–SABI ($R^2 = 0.775$) ve AFAI–SABI ($R^2 = 0.545$): Fitoplankton varlığına ve yüzey alg patlamalarına duyarlılıkları nedeniyle, bu indekslerin zaman içinde benzer eğilimler sergilediği, spektral tepkilerinin örtüştüğü ve aralarında anlamlı düzeyde istatistiksel bir ilişki bulunduğu görülmektedir.

Buna karşın, bazı indeks çiftleri arasında oldukça zayıf ya da ihmal edilebilir düzeyde ilişki gözlenmiştir:

- CI–MI ($R^2 = 0.006$) ve FAI–NDWI_{Gao} ($R^2 = 0.008$): Bu indeks çiftleri arasında ortak varyans yok denecek kadar azdır. Benzer şekilde, CI–NDAVI ($R^2 = 0.003$) ve AFAI–NDAVI ($R^2 = 0.009$) arasında da oldukça zayıf ilişkiler tespit edilmiştir.

Genel olarak bu sonuçlar; fitoplankton temelli indekslerin (AFAI, FAI, CI, SABI) kendi aralarında yüksek korelasyon sergilediğini, buna karşılık kara bitki örtüsüne veya su/kara ayırımına duyarlı olan indekslerin (NDVI, NDAVI, NDWI_{McFeeters}, NDWI_{Gao}) ise farklı bir grup olarak hareket ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, indekslerin tasarım amaçlarına ve spektral bant özelliklerine göre kümелendiği ve bu kümeler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunduğu söylenebilir.

4.4. Klorofil-a ile İndeks Değerleri Arasındaki İlişkilerin Analizi

Bu bölümde, MODIS uydu verileri kullanılarak hesaplanan klorofil-a konsantrasyonları ile çeşitli spektral indeksler arasındaki istatistiksel ilişkiler analiz edilmiştir. Çalışmada; MODOCGA.006 koleksiyonundan CI ve OC3M algoritmaları aracılığıyla türetilen klorofil-a değerleri, MYD09GA.061 koleksiyonundan

hesaplanan 11 farklı spektral indeks ile karşılaştırılmıştır. Bu analizlerin temel amacı, söz konusu spektral indekslerin klorofil-a konsantrasyonunu hangi düzeyde temsil edebildiğini belirlemek ve böylece potansiyel modelleme kabiliyetlerini ortaya koymaktır.

Yöntemsel olarak, klorofil-a konsantrasyonu bağımlı değişken, spektral indeksler ise bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, klorofil-a'nın çevresel izleme çalışmalarında temel su kalitesi parametrelerinden biri olması ve doğrudan gözlenebilir bir değişken niteliği taşıması nedeniyle benimsenmiştir. Spektral indeksler ise, bu parametreyi uydu verileri aracılığıyla dolaylı olarak tahmin etmeye yönelik araçlar olarak değerlendirilmektedir.

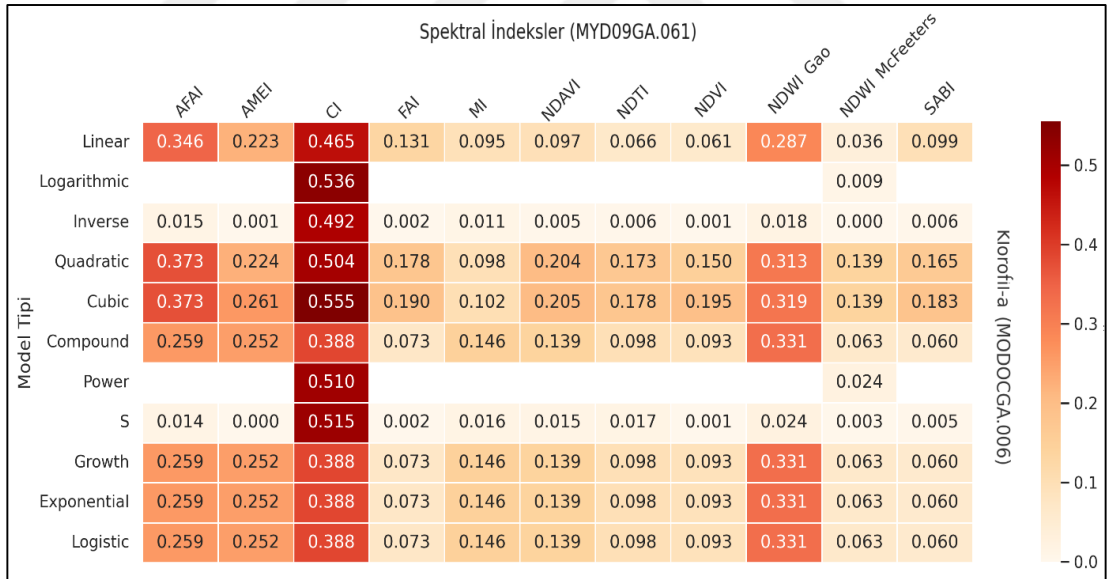
Buna ek olarak, kullanılan iki veri seti arasında önemli bir süreklilik farkı da bulunmaktadır. Klorofil-a hesaplamasında kullanılan MODOCGA.006 koleksiyonu, 17 Şubat 2023 tarihi itibarıyla veri üretimini durdurmuştur. Buna karşın, spektral indekslerin hesaplandığı MYD09GA.061 koleksiyonu hâlen aktiftir. Bu bağlamda yapılan analizler, yalnızca geçmiş yıllara dönük bir karşılaştırma sunmakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekte yalnızca indeks değerlerinden hareketle klorofil-a konsantrasyonunun tahmin edilip edilemeyeceğine dair bir öngörü sağlamaktadır.

Bu kapsamda; 2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemine ait 120 ayın ortalama değerleri esas alınarak, 11 farklı spektral indeks ile klorofil-a konsantrasyonu arasındaki istatistiksel ilişkiler analiz edilmiştir. Analizler, SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, her bir indeks için klorofil-a'ya karşı 11 farklı regresyon modeli uygulanmıştır.

Her bir model için R^2 değeri hesaplanarak, ilgili modelin klorofil-a üzerindeki açıklayıcılık düzeyi belirlenmiştir. Bu sayede, farklı regresyon modelleri altında hangi spektral indekslerin daha yüksek tahmin gücüne sahip olduğu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu yöntemsel yaklaşım, yalnızca indeksler ile klorofil-a arasındaki istatistiksel ilişkilerin belirlenmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda farklı regresyon modelleri üzerinden potansiyel tahmin gücü yüksek indekslerin tespitine de olanak tanımaktadır. Özellikle regresyon tipi değiştikçe indekslerin performansındaki farklılıklar, model seçimi açısından belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

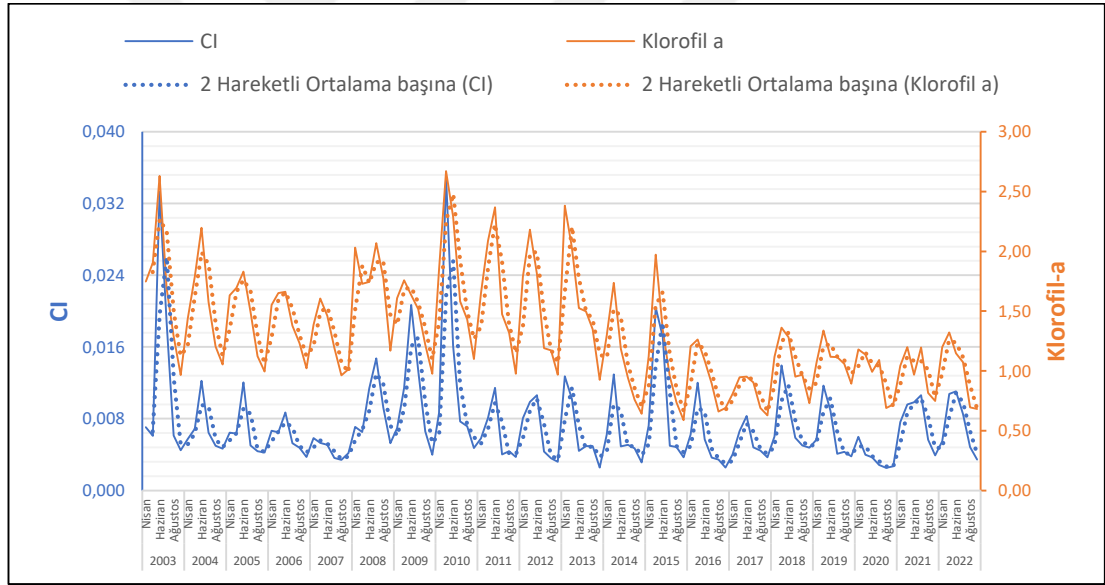
Şekil 4.32'de, MODIS verilerine dayalı olarak hesaplanan klorofil-a konsantrasyonu ile 11 farklı spektral indeks arasında kurulan, 11 farklı regresyon modeline ait R^2 değerleri görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda, klorofil-a ile en güçlü ilişkiyi gösteren indeksin CI olduğu belirlenmiştir; bu indeksin R^2 değeri Cubic regresyon modelinde 0.555 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, CI indeksinin diğer regresyon modellerinde de benzer şekilde orta kuvvette ve tutarlı R^2 değerleri ürettiği; bu yönüyle, klorofil-a konsantrasyonunu temsil etme açısından, değerlendirilen indeksler arasında en başarılı indeks olduğu görülmektedir. CI'yı takiben, AFAI indeksi Quadratic ve Cubic modellerde 0.373'lük R^2 değeri ile ikinci en güçlü ilişkiyi göstermiştir. Öte yandan; SABİ, NDWIMcFeeters, FAI ve MI gibi bazı indekslerin pek çok modelde oldukça düşük R^2 değerlerine sahip olduğu, hatta bazı modellerde korelasyonun yok denecek düzeyde olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu indekslerin bazılarının, klorofil-a konsantrasyonunu modellemede sınırlı bir kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.32: Spektral indeksler ile Klorofil-a arasındaki R^2 korelasyon matrisi.

En yüksek korelasyonun CI ile elde edilmesi nedeniyle, bu indeks ile klorofil-a konsantrasyonu arasındaki zamansal değişim detaylı olarak analiz edilmiştir. **Şekil 4.33**'te, 2003–2022 yılları arasındaki nisan–eylül dönemine ait aylık ortalama CI ve klorofil-a değerlerinin zaman serisi grafikleri sunulmuştur. Grafikte, her iki değişkene ait çizgisel değişimlerin yanı sıra, iki aylık hareketli ortalamalar da gösterilmiştir.

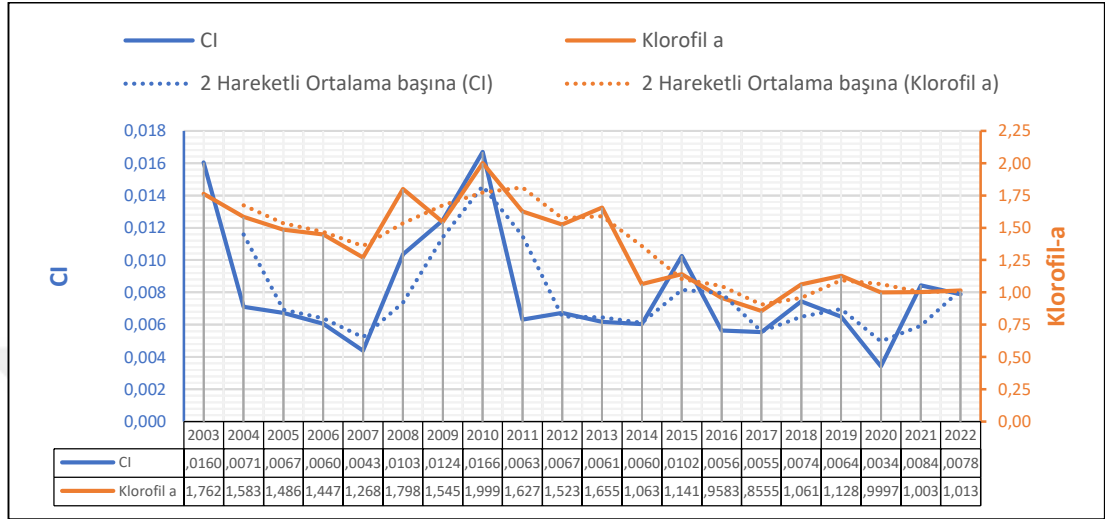
Şekil 4.33'ten de görüleceği üzere; CI ile klorofil-a değerleri arasında belirli dönemlerde örtüşen dalgalanmalar mevcuttur. Özellikle yaz aylarında her iki değişkende de belirgin artışlar gözlenmiştir; nisan ve eylül aylarında ise görece düşük seviyeler hâkim olmuştur. Bu dönemsel paralellik, CI indeksinin klorofil-a konsantrasyonunu mevsimsel düzeyde yansıtabilme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bazı aylarda CI değerlerinin klorofil-a değişimine duyarsız kaldığı ya da farklı tepki verdiği de gözlenmiştir. Bu durum, CI indeksinin aylık düzeyde klorofil-a değişimini temsil etme gücünün mevsimsel koşullar veya optik faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Nitekim regresyon analizleri sonucunda CI indeksi için en yüksek R^2 değeri Cubic modelde 0.555 olarak hesaplanmış olup, bu da indeksin klorofil-a üzerindeki etkisinin orta kuvvette bir ilişkiye işaret ettiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.33: CI ve klorofil-a'nın aylık değerlerine ait zaman serisi grafikleri.

Şekil 4.34'te ise aynı iki değişkenin yıllık ortalama değerlerine ait zaman serisi grafiklerine yer verilmiştir. Grafikteki genel eğilim incelendiğinde, CI ve klorofil-a değerlerinin yıllara göre benzer dalgalanma desenleri sergilediği görülmektedir. Özellikle 2010 yılında her iki değerde de dikkat çekici bir artış yaşanmış, 2013 sonrası ise nispeten bir azalma eğilimi gözlenmiştir. CI değerlerinin, klorofil-a konsantrasyonundaki artış ve azalışlara karşı orta düzeyde bir duyarlılık gösterdiği

anlaşılmaktadır. Bu durum, CI indeksinin yalnızca istatistiksel modelleme açısından değil, aynı zamanda zamansal izleme kapasitesi açısından da anlamlı sayılabilecek bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.34: CI ve klorofil-a'nın yıllık değerlerine ait zaman serisi grafikleri.

Aylık ve yıllık zaman serisi grafiklerinin birlikte değerlendirilmesi, CI indeksinin klorofil-a konsantrasyonunu yalnızca istatistiksel modeller düzeyinde değil, aynı zamanda zamansal değişimlerin izlenmesi açısından da temsil etme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Her ne kadar bazı dönemlerde sapmalar gözlense de, genel eğilimler CI ile klorofil-a arasında orta düzeyde ve tutarlı bir ilişkinin varlığını doğrulamaktadır. Elde edilen bulgular, CI indeksinin Marmara Denizi genelinde klorofil-a konsantrasyonunu izlemeye yönelik en güçlü spektral göstergelerden biri olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, uzaktan algılama temelli indekslerin klorofil-a tahmininde kullanılabilirliğini desteklemekte; indeks seçimi ile birlikte uygulanacak model türünün analiz güvenilirliği üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Marmara Denizi'nde 2003–2022 yılları arasındaki su kalitesi değişiminin, klorofil-a konsantrasyonu ve çeşitli spektral indeksler yardımıyla değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, MODIS uydu verileri kullanılarak zamansal ve mekânsal düzeyde detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırma sürecinde, özellikle fitoplankton yoğunluğuyla ilişkili olan klorofil-a değişimleri, CI ve OC3M tabanlı algoritmalarla hesaplanmış; ayrıca AFAl, FAI, SABI, NDVI, NDWI, AMEI gibi 11 farklı spektral indeks ile değerlendirilmiştir. Analizler, hem Marmara Denizi geneli hem de tanımlanan 10 alt bölge özelinde yürütülmüş, aylık ve yıllık ortalamalar üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, CI ve OC3M algoritmalarıyla elde edilen klorofil-a konsantrasyonu değerleri, birbirini genel olarak desteklemekle birlikte, özellikle belirli yıllarda ve bazı bölgelerde anlamlı farklılıklar göstermiştir. Bu farklar, algoritmaların optik duyarlılıkları ve kullanılan bantlara bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle CI algoritması düşük klorofil-a konsantrasyonlarında daha hassas bir yapı sunarken, OC3M algoritmasının yüksek konsantrasyonlara daha tepkisel olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, MODIS verilerinin 500/1000 m mekânsal çözünürlüğü bazı kıyısız bölgelerde spektral karışıklığa yol açmakta ve bu durum, küçük ölçekli fitoplankton yoğunluklarının doğru temsil edilmesini zorlaştırabilmektedir. Bu bağlamda, gelecekte yüksek mekânsal çözünürlük sunan Sentinel-2 gibi uydu verilerinin kullanılması, özellikle dar körfez ve kıyı alanlarında daha doğru tespitler yapılmasını sağlayacaktır.

Çalışmada kullanılan spektral indekslerin zamansal eğilimleri incelendiğinde, bazı indekslerin klorofil-a konsantrasyonlarıyla orta seviyede ilişki gösterdiği, bazılarının ise sınırlı duyarlılığa sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, farklı indekslerin farklı spektral duyarlılıklara ve hedeflenen optik özelliklere göre geliştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Yine de, örneğin AFAl gibi bazı indekslerin yüzey alg varlıklarını tespit etmede daha etkili olduğu; NDTI'nın ise bulanıklık koşullarında daha stabil sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada ele alınan spektral indekslerin birlikte değerlendirilmesi, farklı su kalitesi parametrelerine ilişkin daha

bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır. İlerleyen dönemlerde, bu indekslerin doğruluklarının farklı hidrolojik koşullar ve mevsimlere göre test edilmesi, model performansını daha da artırabilir.

Çalışmanın bir diğer önemli çıktısı, klorofil-a ile spektral indeksler arasındaki istatistiksel ilişkilerin ortaya konmasıdır. SPSS yazılımı kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizleri, çalışmada kullanılan bazı indekslerin (CI ve AFAI) klorofil-a konsantrasyonunu tahmin etmede görece daha anlamlı ilişkiler kurabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, bu ilişkinin doğrusal modellerin ötesinde, bazı durumlarda logaritmik veya polinomsal yapılarla daha güçlü şekilde ifade edilebildiği görülmüştür. Bu durum, Marmara Denizi gibi optik olarak karmaşık ortamlarda klorofil-a tahmininde tek bir lineer yaklaşımın yeterli olmayabileceğini, daha esnek model yapılarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Öte yandan, uzaktan algılama tabanlı analizlerin doğruluğunu artırmak için yerinde yapılan ölçümlerle, kalibrasyon çalışmaları kritik öneme sahiptir. Özellikle klorofil-a konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi ve spektral indekslerle kurulan ilişkilerin sağlam temellere oturması, ancak sahadan elde edilen güvenilir referans verilerle mümkün olabilir. Dünya genelinde sabit istasyonlardan sürekli veri akışı alınmakta ve bu veriler, uydu gözlemleriyle düzenli olarak karşılaştırılmaktadır. Ancak Marmara Denizi'nde bu tür sürekli ve sistematik yer ölçümlerinin eksikliği, hem CI ve OC3M algoritmalarıyla tahmin edilen klorofil-a değerlerinin hem de farklı spektral indekslerle elde edilen çıktılarının doğruluğunu sınamayı zorlaştırmaktadır. Bu durum, klorofil-a ile bazı indeksler arasında elde edilen düşük korelasyon katsayılarının temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla, ileride bu tür çalışmaların güvenilirliğini artırmak adına, sahaya dayalı yer doğrulama sistemlerinin kurulması büyük önem arz etmektedir.

Ayrıca, CI ve OC3M algoritmalarında kullanılan sabit katsayılar farklı denizel koşullara sahip bölgelerden elde edilen yer ölçümlerine dayanarak türetilmiştir. Marmara Denizi gibi optik özellikleri farklılık gösteren yarı kapalı ve yoğun baskı altındaki bir sistemde, bu katsayıların yeniden kalibre edilmesi, hesaplanan klorofil-a değerlerinin doğruluğunu artırabilir ve spektral indekslerle kurulan korelasyonların güçlenmesine katkı sağlayabilir.

Çalışma kapsamında 20 yıllık bir dönem boyunca Marmara Denizi'nin genel eğilimlerine bakıldığında, özellikle kıyısız bölgelerde ve körfezlerde (örneğin İzmit ve Gemlik Körfezleri) belirgin bir kirlilik baskısı gözlenmiştir. Bu durum, hem klorofil-a ve spektral indeks haritalarından hem de aylık ve yıllık ortalama analizlerden açıkça anlaşılmaktadır. Kıyı ve körfezlere doğru artan bu kirlilik düzeyi, sınırlı sirkülasyon yapısı ve çevresel baskıların birleşimiyle açıklanabilir. Bu bağlamda yerel yönetimlerin, kıyı bölgelerinde yoğunlaşan karasal kaynaklı kirlilikleri daha etkin izleyebilmek adına kapsamlı stratejiler geliştirmesi önem arz etmektedir.

Suyun doğası gereği oldukça dinamik bir yapıya sahip olduğu da unutulmamalıdır. Fitoplankton yoğunluğu, yüzey sıcaklığı, bulanıklık gibi birçok parametre gün içinde bile önemli değişimler gösterebilmektedir. Bu nedenle yalnızca dönemsel ortalamalar değil, günlük veya çok kısa periyotlarla yapılacak izlemeler, çevresel değişimlerin daha erken fark edilmesini ve zamanında müdahale edilmesini sağlayacaktır. Bu doğrultuda, yalnızca MODIS gibi orta çözünürlüklü sensörler değil, Sentinel-3 gibi yüksek mekânsal çözünürlüklü ve benzer frekanstaki uydularla birlikte değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu tür bir multisensör entegrasyonu, özellikle erken uyarı sistemlerinin kurulması açısından son derece kritik bir adımdır.

Bu çalışmanın önemli çıktılarından biri de, GEE platformunun büyük hacimli uydu verilerini hızlı ve etkin biçimde işleyebilme konusundaki kapasitesini ortaya koymasısıdır. GEE'nin sunduğu bulut tabanlı yapı sayesinde, yüksek işlem gücü gerektiren zaman serisi analizleri ve görsel çıktılar kısa sürede ve yüksek doğrulukla elde edilebilmiştir. Bu bağlamda, geliştirilen yapının Marmara Denizi dışındaki benzer bölgelerde de kolaylıkla kullanılabileceği ve yalnızca çalışma alanı ile tarih aralığı değiştirilerek küresel ölçekte uygulanabilir bir analiz çerçevesi sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma hem Marmara Denizi özelinde önemli çevresel eğilimleri ortaya koymuş hem de uydu tabanlı uzaktan algılama yaklaşımlarının çevresel izleme süreçlerindeki etkinliğini göstermiştir. Gelecek çalışmalarda, farklı uzaktan algılama sensörlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, çoklu kaynaklı veri bütünleştirmeleri ve derin öğrenme temelli modellemelerle daha yüksek doğruluk düzeylerinin elde edilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abbas M. M., Melesse A. M., Scinto L. J., Rehage J. S., (2019), “Satellite estimation of chlorophyll-a using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) sensor in shallow coastal water bodies: Validation and improvement”, *Water*, 11 (8), 1621. <https://doi.org/10.3390/w11081621>
- Acar U., Yılmaz O. S., Çelen M., Ateş A. M., Gülgen F., Balık Şanlı F., (2021), “Determination of mucilage in the Sea of Marmara using remote sensing techniques with google earth engine”, *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8 (4), 423-434. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.957284>
- Alawadi F., (2010), “Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI)”, *Proc. SPIE 7825, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*, 782506. <https://doi.org/10.1117/12.862096>
- Bengil F., Mavruk S., Polat S., Akbulut G., (2024), “İskenderun Körfezi kıyı alanlarında sıcaklık ve klorofil-a için uydu ve model temelli veri setlerinin temsil yeteneği üzerine bir değerlendirme”, *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41 (3), 220-225. <https://doi.org/10.12714/egejfas.41.3.07>
- Beşiktepe Ş. T., Sur H. İ., Özsoy E., Latif M. A., Oğuz T., Ünlüata Ü., (1994), “The circulation and hydrography of the Marmara Sea”, *Progress in Oceanography*, 34 (4), 285–334. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90018-3)
- Bhardwaj A., Singh M. K., Joshi P. K., Snehmani, Singh S., Sam L., Gupta R. D., Kumar R., (2015), “A lake detection algorithm (LDA) using Landsat 8 data: A comparative approach in glacial environment”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.004>
- Carlson R. E., (1977), “A trophic state index for lakes”, *Limnology and Oceanography*, 22 (2), 361-369. [doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361](https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361)
- Conopio M., Japor R. K., Blanco A., Tamondong A. M., (2019), “Estimation of chlorophyll-a concentration in laguna de bay using Sentinel-3 satellite data”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W19, 125-132. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-125-2019>
- Çetin T., (2014), “Su Çerçeve Direktifine Göre Biyolojik Kalite Elementleri: Fitoplankton ve Fitobentoz”, *Uzmanlık Tezi*, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara.
- Çölkesen İ., Kavzoğlu T., Sefercik U. G., Öztürk M. Y., (2023), “Automated mucilage extraction index (AMEI): A novel spectral water index for identifying marine mucilage formations from Sentinel-2 imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 44 (1), 105–141. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2158049>

Çölkesen İ., Öztürk M. Y., Altuntaş O. Y., (2024), “Comparative evaluation of performances of algae indices, pixel- and object-based machine learning algorithms in mapping floating algal blooms using Sentinel-2 imagery”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 1613–1634. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02648-1>

Demir B., (2022), “Bölgesel Ölçekte Klorofil-a Konsantrasyonunun Belirlenmesinde Sentinel-3 OLCI Verilerinin Kullanım Olanaklarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Dereli M. A., (2018), “Web tabanlı google earth engine ile NDVI zaman serisi analizi: Şanlıurfa İl Merkezi örneği”, 6th International GAP Engineering Conference, Şanlıurfa, TÜRKİYE, 8-10 Kasım.

Dodds W. K., Whiles M. R., (2010), “Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology – Chapter 18”, 2nd Edition, Academic Press.

Doğan E., Burak S., (2007), “Ship-originated pollution in the Istanbul Strait (Bosphorus) and Marmara Sea”, *Journal of Coastal Research*, 23 (2), 388–394. <https://doi.org/10.2112/040283.1>

Fang C., Song K. S., Shang Y. X., Ma J. H., Wen Z. D., Du J., (2018), “Remote sensing of harmful algal blooms variability for Lake Hulun using adjusted FAI (AFAI) algorithm”, *Journal of Environmental Informatics*, 34 (2), 108–122. <https://doi.org/10.3808/jei.201700385>

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

Gazioğlu C., Gökaşan E., Algan O., Yücel Z. Y., Tok B., Doğan E., (2002), “Morphologic features of the Marmara Sea from multi-beam data”, *Marine Geology*, 190 (1–2), 397–420. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00356-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00356-0)

Gazioğlu C., Çelik O. İ., Çelik S., (2022), “Marmara Denizi 2022 sempozyumu”, Marmara Denizi 2022 sempozyumu bildiriler kitabı, 25-35, İstanbul, TÜRKİYE, 8-9 Ocak.

Gleick P. H., (1996), “Water Resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*”, Ed. by Schneider S. H., vol. 2, 817-823, Oxford University Press.

Güneş A. N., (2024), “Türkiye’de Ramsar Alanı İlan Edilen Sulak Alanlardaki Zamansal Değişimlerin Uzaktan Algılanmış Görüntüler Yardımıyla Takibi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

Hu C., (2009), “A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans”, *Remote Sensing of Environment*, 113 (10), 2118–2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>

Hu C., Lee Z., Franz B., (2012), “Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C1). <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>

Hu C., Feng L., Lee Z., Franz B. A., Bailey S. W., Werdell P. J., Proctor C. W., (2019), “Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124 (3), 1524-1543. <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>

Jerry R., Paul Z., James E., (2003), “Remote sensing techniques to assess water quality”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (6), 695-704. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>

Jia T., Zhang X., Dong R., (2019), “Long-term spatial and temporal monitoring of cyanobacteria blooms using MODIS on google earth engine: A case study in Taihu Lake”, *Remote Sensing*, 11 (19), 2269. <https://doi.org/10.3390/rs11192269>

Joint I., Groom S. B., (2000), “Estimation of phytoplankton production from space: Current status and future potential of satellite remote sensing”, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250 (1-2), 233-255. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(00\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(00)00199-4).

Kavzoğlu T., Çölkesen İ., Sefercik U. G., Öztürk M. Y., (2021), “Detection and analysis of marine mucilage bloom in the Sea of Marmara by a machine learning algorithm from multi-temporal optical and thermal satellite images”, *Map Journal*, 166 (2), 1–9.

Kavzoğlu T., Göral M., (2022), “Google earth engine for monitoring marine mucilage: Izmit Bay in spring 2021”, *Hydrology*, 9 (8), 135. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080135>

Lacaux J. P., Tourre Y. M., Vignolles C., Ndione J. A., Lafaye M., (2007), “Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to rift valley fever epidemics in Senegal”, 106 (1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>

Lillesand T., Kiefer R. W., Chipman J., (2015), “Remote Sensing and Image Interpretation”, 7th Edition, Wiley.

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

Mishra S., Mishra D. R., (2012), “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters”, *Remote Sensing of Environment*, 117, 394-406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>

Okyar M. İ., Üstün F., Orun D. A., (2015), “Changes in abundance and community structure of the zooplankton population during the 2008 mucilage event in the northeastern Marmara Sea”, *Turkish Journal of Zoology*, 39 (1), 28–38. <https://doi.org/10.3906/zoo-1308-11>

- O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchell B. G., Siegel D. A., Carder K. L., Garver S. A., Kahru M., McClain C., (1998), "Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103 (C11), 24937-24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- O'Reilly J. E., Werdell P. J., (2019), "Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6", *Remote Sensing of Environment*, 229, 32-47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>
- Özdoğan N., Sefercik U. G., Kılınç Y., Çalışkan E., Atalay C., (2021), "Su kalitesinin insansız hava aracı verileri ve fiziko-kimyasal parametrelerin analizi ile belirlenmesi: Aydınlar (Gülüç) Çayı örneği", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 23, 572-582. <https://doi.org/10.31590/ejosat.887105>
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., (1973), "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS", Paper presented at the Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, Washington DC, USA, 10–14 December.
- Savun Hekimoğlu B., Gazioğlu C., (2021), "Mucilage problem in the semi-enclosed seas: recent outbreak in the Sea of Marmara", *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8 (4), 402-413. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.955739>
- Sunar F., Özkan C., Osmanoğlu B., (2016), "Uzaktan Algılama", Dördüncü Baskı, Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- Tarı U., Kıyak Olğun N., (2024), "Uydu verisi ve CBS ile Van Gölü klorofil-a dinamiklerinin izlenmesi", *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 10 (1), 60-79. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1317247>
- Tüfekçi V., Balkıs N., Polat Beken C., Ediger D., Mantıkçı M., (2010), "Phytoplankton composition and environmental conditions of the mucilage event in the Sea of Marmara", *Turkish Journal of Biology*, 34 (2), 199–210. <https://doi.org/10.3906/biy-0812-1>
- Vermote E. F., Roger J. C., Ray J. P., (2015), "MODIS Surface Reflectance User's Guide", Collection 6, MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility.
- Vescovi F. D., Marletto V., Montanari G., (2003), "Monitoraggio MODIS di mucilagini nel Mare Adriatico", *Atti della VII Conferenza nazionale ASITA*, Verona, Italy, 28-31 October.
- Villa P., Laini A., Bresciani M., Bolpagni R., (2013), "A remote sensing approach to monitor the conservation status of lacustrine *Phragmites australis* beds", *Wetlands Ecology and Management*, 21, 399–416. <https://doi.org/10.1007/s11273-013-9311-9>
- Web 1, (2025), <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water/page1.php>, (Erişim Tarihi: 12/03/2025).
- Web 2, (2024), <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16806&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, (Erişim Tarihi: 19.12.2024).

Web 3, (2025), <https://www.epa.gov/nutrientpollution/basic-information-nutrient-pollution>, (Erişim Tarihi: 20.05.2025).

Web 4, (2025), <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/marmara-den-z-havzasi-cevresel-gostergeler--revize-20230615152944.pdf>, (Erişim Tarihi: 09.01.2025).

Web 5, (2024), <https://acikders.tuba.gov.tr/course/view.php?id=28>, (Erişim Tarihi: 12.10.2024).

Web 6, (2025), <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/dalgalarin-fizigi>, (Erişim Tarihi: 20.06.2025).

Web 7, (2025), <https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum>, (Erişim Tarihi: 20.06.2025).

Web 8, (2025), <https://tr.wikipedia.org/wiki/Klorofil>, (Erişim Tarihi: 03.03.2025).

Web 9, (2025), <https://openstax.org/books/biology/pages/8-2-the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis>, (Erişim Tarihi: 02.03.2025),

Web 10, (2024), <https://developers.google.com/earth-engine/guides>, (Erişim Tarihi: 05/10/2024).

Web 11, (2024), <https://earthengine.google.com/platform/>, (Erişim Tarihi: 07/10/2024).

Web 12, (2024), <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>, (Erişim Tarihi: 19/09/2024).

Web 13, (2024), <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, (Erişim Tarihi: 19/09/2024).

Web 14, (2024), <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>, (Erişim Tarihi: 20/09/2024).

Web 15, (2024), https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED, (Erişim Tarihi: 19/10/2024).

Web 16, (2025), https://www.earthdata.nasa.gov/apt/documents/chlor-a/v1.0#mathematical_theory, (Erişim Tarihi: 03/02/2025).

Xie C., Li J., Pan F., Fu J., Zhou W., Lu S., Li P., Zhou C., (2018), “Environmental factors influencing mucilage accumulation of the endangered *Brasenia schreberi* in China”, Scientific Reports, 8 (1), 17955. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36448-3>

Yağcı A. L., Çölkesen İ., Kavzoğlu T., Sefercik U. G., (2022), “Daily monitoring of marine mucilage using the MODIS products: A case study of 2021 mucilage bloom in the Sea of Marmara, Turkey”, Environmental Monitoring and Assessment, 194 (3), 170. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09831-x>

Zhang Y., Ma R., Duan H., Loiselle S., Zhang M., Xu J., (2016), “A novel MODIS algorithm to estimate chlorophyll a concentration in eutrophic turbid lakes”, Ecological Indicators, 69, 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.020>

Zhou X., Chen J., Rakstad T. E., Ploughe M., Tang P., (2021), “Water chlorophyll estimation in an urban canal system with high-resolution remote sensing data”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 18 (11), 1876-1880. [doi: 10.1109/LGRS.2020.3011074](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3011074)



ÖZGEÇMİŞ

Emin Yaşar AFACAN, 2008 yılında Erciyes Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlamış ve 2012 yılında mezun olmuştur. 2012–2017 yılları arasında özel sektörde çeşitli görevlerde çalıştıktan sonra, 2017 yılında Fırat Üniversitesi Karakoçan Meslek Yüksekokulu Yapı Denetimi Programı'na öğretim görevlisi olarak atanmış ve bu görevine halen devam etmektedir. 2018 yılından bu yana, Gebze Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programı'nda yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.



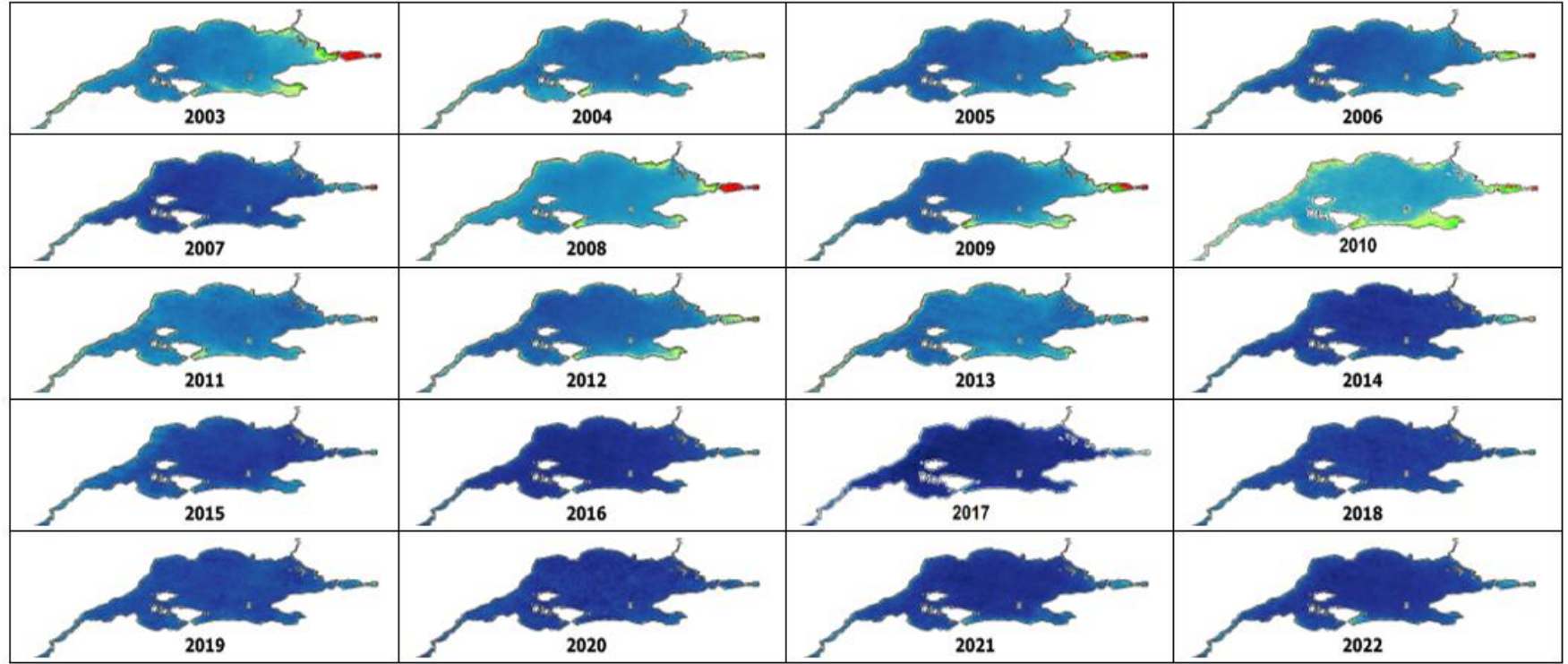
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Çölkesen İ., Afacan E. Y., (2025), “Marmara Denizi’nde 20 Yıllık Su Kalitesinin Zaman Serileriyle Analizi”, 9. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Gebze, Türkiye, 26-27 Mayıs.



EKLER

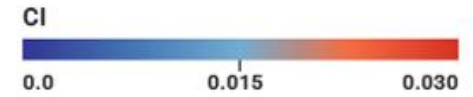
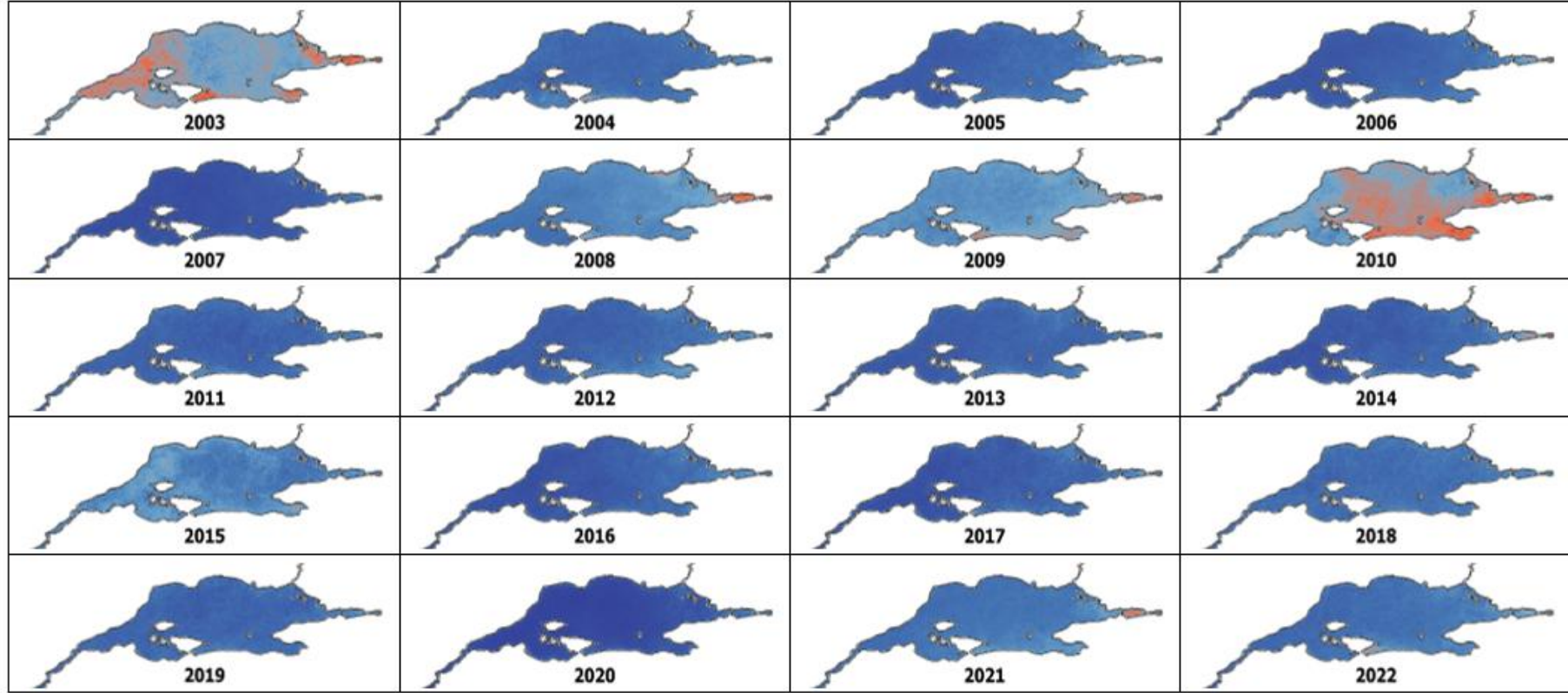
Ek-A: 2003-2022 Nisan-Eylül Dönemine Ait Yıllık Ortalama Klorofil-a Haritaları (MARMARA DENİZİ)



Klorofil-a (mg/m^3)

0.4 1.7 3.0

Ek-B: 2003-2022 Nisan-Eylül Dönemine Ait Yıllık Ortalama CI Haritaları (MARMARA DENİZİ)



Ek-C: 2003–2022 Nisan–Eylül Dönemine Ait Spektral İndekslerin En Düşük ve En Yüksek Değerlerinin Gözlendiği Yıllara İlişkin Histogramlar (MARMARA DENİZİ-TAMAMI)

