



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE  
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI



ODTÜ  
METU

# MARMOD

MARMARA DENİZİ BÜTÜNLEŞİK  
MODELLEME SİSTEMİ  
FAZ II ANA ÇIKTILARI





T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE  
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI



ODTÜ METU

Bu çalışma Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Laboratuvar, Ölçüm ve İzleme Dairesi Başkanlığı yayımıdır.

Bu raporun her türlü basım ve dağıtım hakkı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü'ne aittir. Rapor izinsiz olarak çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.

Eser Adı : Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD): Faz II Ana Çıktıları

ISBN : 978-625-7076-86-9

Adres : Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü  
Mustafa Kemal Mah. Eskişehir Devlet Yolu (Dumlupınar Bulvarı) 9.km  
No: 278 Çankaya/ANKARA

Tel : 0 312 410 10 00

Faks : 0 312 419 21 92

web : [www.csb.gov.tr/gm/ced](http://www.csb.gov.tr/gm/ced)

Kaynak Gösterimi: ÇŞİDB, ODTÜ-DBE (2025). Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD): Faz II Projesi Ana Çıktıları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Fotoğraf: Mehmet BEKLEN, ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü

Kapak Tasarımı: Özgün Evrim SAYILKAN, ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü

Proje web sayfası: <https://marmod.ims.metu.edu.tr/>

ANKARA -2025



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE  
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

ÇED İzin Denetim Genel Müdürlüğü  
Laboratuvar Ölçüm ve İzleme Dairesi Başkanlığı  
Mustafa Kemal Mahallesi Eskişehir Devlet Yolu  
(Dumlupınar Bulvarı) 9.km No: 278 Çankaya/ANKARA  
[www.csb.gov.tr](http://www.csb.gov.tr)



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE  
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI



ODTÜ METU

### **KOORDİNATÖR**

**T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**  
**Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü**

Eyyüp KARAHAN, Genel Müdür  
Fatih EKMEKÇİ, Genel Müdür Yardımcısı

### **PROJE YÜRÜTÜCÜLERİ**

**T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**  
**Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü**

Soner OLGUN, Daire Başkanı  
İbrahim Fatih ERKAL, Şube Müdürü  
Hacer SELAMOĞLU ÇAĞLAYAN, Çevre ve Şehircilik Uzmanı  
Sevil ÖKSÜZ, Çevre ve Şehircilik Uzmanı  
Ebru OLGUN EKER, Çevre ve Şehircilik Uzmanı  
Betül KESKİN ÇATAL, Çevre ve Şehircilik Uzmanı

**Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deniz Bilimleri Enstitüsü**  
Prof. Dr. Barış SALİHOĞLU

### **Raporu Hazırlayanlar**

***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deniz Bilimleri Enstitüsü***

Prof. Dr. Barış Salihoğlu  
Prof. Dr. Mustafa Yücel  
Prof. Dr. Süleyman Tuğrul  
Dr. Öğr. Üyesi Devrim Tezcan  
Prof. Dr. Bettina Fach Salihoğlu  
Dr. Evrim Kalkan Tezcan  
Dr. Öğr. Üyesi Korhan Özkan  
Doç. Dr. Üyesi Koray Özhan  
Doç. Dr. Ekin Akoğlu  
Öğr. Gör. Dr. Hasan Örek  
Dr. Yeşim Ak Örek  
Dr. Mustafa Mantıkçı  
Ali Osman Acar  
Dr. Öğr. Üyesi Berkay Başdurak  
Öğr. Gör. Arife Zenginer Yılmaz  
Nimet Alımlı  
Vladimir Myrsohnychenko

## İÇİNDEKİLER

<b>1</b>	<b><i>EŞSİZ HİDROGRAFİSİ İLE MARMARA DENİZİ</i></b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>MARMARA DENİZİ'NDE KÖTÜYE GİDİŞ NE ZAMAN BAŞLADI?</i></b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b><i>MARMARA DENİZİ BÜTÜNLEŞİK MODELLEME SİSTEMİ (MARMOD) PROJESİ</i></b> .....	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>MARMOD FAZ I Proje Çıktıları</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>MARMOD FAZ II Proje Çıktıları</b> .....	<b>7</b>
3.2.1	MARMOD FAZ II Model Simülasyonları .....	10
3.2.2	Marmara Deniz Besin Ağı Modeli.....	13
3.2.3	TN ve TP Girdilerinin Azaltılmasına Yönelik Yöntem Önerileri.....	14
<b>4</b>	<b><i>GENEL DEĞERLENDİRME, ÖZET VE ÖNERİLER</i></b> .....	<b>18</b>
<b>5</b>	<b><i>MARMOD FAZIII PROJESİ</i></b> .....	<b>21</b>
	<b>REFERANSLAR</b> .....	<b>22</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. MARMOD Faz II verileri ve ayrıca 2024 DEN-İZ verileri dahil Marmara Denizi'nde oksijen ve besin tuzları durumu. ....	9
Şekil 2. Nehir ve noktasal kaynaklı nitrat girdisi (kton/yıl) (Kırmızı: Noktasal Kaynaklar, Mavi: Nehirler).....	11
Şekil 3. Farklı derinliklerde iki senaryo arasındaki oksijen konsantrasyonunda meydana gelecek değişiklikler.....	13

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Noktasal ve yayılı kaynaklarda TN ve TP yük dağılımları (MARAAT ve TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü (2021) verilerinden derlenmiştir) .....	15
Tablo 2. Havza bazında var olan toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) yüklerinin alt havzalardaki yüzdesel dağılımları (değerler Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024'den alınmıştır).....	15
Tablo 3. Susurluk Havzası toplam yayılı azot (TN) ve fosfor (TP) yükü dağılımları (Susurluk Havzası Havza Koruma Eylem Planlarından alınmıştır) .....	16



# MARMARA DENİZİ BÜTÜNLEŞİK MODELLEME SİSTEMİ (MARMOD)

## 1 EŞSİZ HİDROGRAFİSİ İLE MARMARA DENİZİ

Akdeniz ile Karadeniz arasındaki su değişimini sağlayan iki tabakalı Marmara Denizi, Çanakkale ve İstanbul boğazları ile birlikte oşinografi literatüründe Türk Boğazlar Sistemi (TBS) olarak anılmaktadır. Marmara Denizi kendine özgü yapısı ile öne çıkan denizlerden biridir. Marmara Denizi ortalama 40 metre derinlikli İstanbul Boğazı ile Karadeniz'e ve 80 m derinlikli Çanakkale Boğazı ile Akdeniz'e bağlanır. Her iki boğazın sığ olması Marmara Denizi'ni yarı kapalı bir deniz haline getirmektedir. Üç adet derin basenden (Tekirdağ Çukuru, Merkez Çukur ve Çınarcık Çukuru) oluşan Marmara Denizi'nde, maksimum derinliğe Doğu Marmara'daki Çınarcık Baseni'nde (1270m) ulaşılır. Karadeniz ve Akdeniz'in farklı biyolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri bu denizin su kütlelerinde yansıma bulur. Bu nedenle Marmara Denizi'nin yüzeyi Karadeniz kökenli, derin suları ise Ege-Akdeniz kökenli olup tuzluluk, sıcaklık ve oksijen bakımından farklı su kütlelerine sahiptir (Ünlüata ve diğ., 1990, Beşiktepe ve diğ., 1994). Bu farklılıklar Marmara Denizi'ni yer yer daha hassas bir ekosistem haline getirmektedir (Öztürk ve Öztürk, 1996, Yücel ve diğ., 2021).

Marmara Denizi, Karadeniz ve Akdeniz arasında bir geçiş denizi olması ve dolayısıyla iki tabakalı bir yapıda olması ile doğal bir laboratuvarıdır. Marmara Denizi, kıyısında Türkiye ekonomisinin ana unsurlarından birini oluşturarak, ciddi bir insan nüfusunu barındıran İstanbul gibi bir metropolün bulunduğu ve çevresinde önemli düzeyde taşımacılık, tarım, turizm ve balıkçılık başta olmak üzere diğer ekonomik etkinlikleri destekleyen bir iç denizdir (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017). Marmara Denizi'ni çevreleyen Marmara Bölgesi'nin nüfusu Türkiye nüfusunun %30'undan daha fazlasını içerir. Sanayi ve ticaretin yoğun olması nedeniyle, nüfus artış hızı da Marmara Bölgesi'nde diğer bölgelere kıyasla daha fazladır. Bu da Marmara Denizi üzerindeki tarımsal, ticari ve endüstriyel etkinlikler başta olmak üzere insan kaynaklı baskıların artmasına neden olmaktadır (Yücel ve diğ., 2021).

Komşu denizlere kıyasla oldukça küçük olan Marmara Denizi ve İstanbul/Çanakkale boğazlarının oşinografik özelliklerine yönelik çalışmalar 1980'li yıllara kadar oldukça az sayıdaydı. Türk Boğazlar Sistemi'ndeki iki tabakalı ve ters yönlü akıntılarının hızları, sistemin hidrodinamik ve biyokimyasal özellikleri çok az bilinmekteydi. Ülkemizdeki deniz bilimleri enstitülerinin büyük araştırma gemilerine sahip olması ve deneyimli deniz bilimcilerin artışına bağlı olarak, 1985 yılı sonrasında ülkemiz denizlerinde ve Marmara Denizi'nde hassas ölçüm yöntemleriyle oşinografik bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmiş ve detaylı sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır (Örn.; Baştürk ve diğ., 1990, Beşiktepe ve diğ., 1994, Polat ve Tuğrul, 1995, ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017, ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2023).

Marmara Denizi'nde ve boğazlarda en fazla oşinografik araştırmalar yapan kurum olan ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü, R/V BİLİM-2 ile günümüze kadar sistematik bir veri seti

oluşturulmuştur (Beşiktepe ve diğ., 1994; Baştürk ve diğ., 1990; Polat ve Tuğrul, 1995; ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017, ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2023). Veriler incelendiğinde 2000’li yıllara kadar olan dönemde Marmara’nın derin havzalarında birçok deniz canlısının tolere edebileceği miktarda ( $>2$  mg/L, hipoksi sınırı<sup>1</sup>) çözülmüş oksijen olduğu görülmektedir. Ancak ilerleyen yıllarda bu çözülmüş oksijen seviyelerinde önemli bir azalma göze çarpmaktadır (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017; ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021; ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Oksijen değerleri hipoksi<sup>1</sup> sınırının altına inmiştir. Ayrıca, Marmara Denizi’nin özellikle yaz ve sonbahar döneminde ara tabaka olarak geçen ve 25-40 m derinlik aralığını kapsayan bölümde çözülmüş oksijen değerlerinde azalma olduğu dikkat çekmiştir. Oksijen değerlerinin özellikle 20 metre derinlikten itibaren bilim insanlarının tanımladığı canlı yaşamı için kritik eşik sınırının altına inmiş olduğu tespit edilmiştir (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017; ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021).

1990’ların başında gözlenen, deniz canlılarının yaşamı için önemli olan çözülmüş oksijen oranı günümüzde özellikle doğu havzalarda dörtte bir oranının altına düşmüş durumdadır (yaklaşık 80  $\mu\text{M}$ ’den 20  $\mu\text{M}$  altına) (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017; ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021). Bunun nedenleri arasında, Karadeniz’den Tuna yolu ile gelen besin yüklerinin etkisi ve nüfus yoğunluğu ile endüstriyellemenin artmasına paralel yükselen karasal girdiler en önemli olanlarıdır. Karadeniz kaynaklı besin tuzu yüklerinin azalma eğilimi gösterdiği son on yıllık dönemde, Marmara’ya karasal kaynaklardan giren yüklerdeki “artış” eğiliminin devam ettiği, Marmara Denizi’nin gittikçe kötüleşen biyokimyasal özelliklerinden ve yapılan ölçümlerden görülmektedir. Bu durum başta Marmara’da yaşayan deniz canlıları olmak üzere dolaylı olarak bizleri de etkilemektedir (Yücel ve diğ., 2021).

Marmara Denizi’nde çok çeşitli kirlilik baskıları denizel ekosistemin bozulmasına neden olmaktadır. Bölgesel ve sektörel işbirliği çerçevesinde bütüncül bir yönetim planı gerekmektedir. Marmara alt tabaka suları, geçen 20 yılda daha da oksijensiz hale gelmiştir. Özellikle doğu bölgesi derin baseninde oksijen seviyesi %95 azalmış, 9,4  $\mu\text{M}$ ’ın altına kadar düşmüş ve 2016 Sonbahar döneminde 600m’nin altındaki derin sularda dahi oksijensiz koşullar gözlenmeye başlanmıştır (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017; Yücel ve diğ., 2021).

Son dönemde derin çukurda 500m’nin altında oksijenin tükendiği, denitrifikasyonun<sup>2</sup> (azot solunumu) arttığı ve 3-10  $\mu\text{M}$  seviyesinde az da olsa hidrojen sülfür varlığı gözlenmiştir. Bunun çevre bilimleri açısından anlamı ise açıktır. Doğu bölgesinde ve körfez içlerinde yüzeysel derine çökelen organik maddenin alt suda parçalanmasının havalı arıtma/oksidasyonu için oksijen girdisi yetersiz kalmıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021; Yücel ve diğ., 2021).

---

<sup>1</sup> Hipoksi genellikle suda çözülmüş oksijen (DO) konsantrasyonlarının 2 mg/L (2 ppm) altında olması olarak tanımlanır, ancak bu eşik bölgeye ve canlı türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Diaz ve Rosenberg, 2008).

<sup>2</sup>Denitrifikasyon, deniz ekosisteminde azot döngüsünde önemli bir süreçtir. Bu süreçte, nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), düşük oksijen (hipoksik) veya oksijensiz (anoksik) koşullar altında bakteriler tarafından azot gazına ( $\text{N}_2$ ) dönüştürülür. Denitrifikasyon, esasen oksijenin az olduğu bölgelerde, özellikle deniz tortul tabakalarında, oksijen minimum bölgelerinde (OMZ’ler) ve kıyı sulak alanlarında gerçekleşir (Casciotti ve diğ. 2024).

## 2 MARMARA DENİZİ'NDE KÖTÜYE GİDİŞ NE ZAMAN BAŞLADI?

Marmara Denizi'nde ötrofikasyonun gelişmesi, İstanbul Boğazı üst akıntısıyla Karadeniz'den giren azot ve fosfor yüklerinin yıllık miktarının aşırı artış gösterdiği 1980'li yıllarda başlamıştır. Yüzeysel suları ötrofik hale gelmiş ve alt tabaka oksijen derişimi 2,0 mg/L (hipoksia sınırı) altına düşmüştür. Karadeniz'e nehirlerle taşınan kirlilik yüklerinin 1995 sonrasında azalmasıyla su kalitesinde olumlu değişimler meydana gelmiştir. Ancak, Karadeniz su kalitesinin iyileşme sürecinin Marmara Denizi'ne yansması, yüzeysel suları yılda ancak 2 kez yenilenen Marmara Denizi'nde kısa sürmüştür. Karadeniz'de 1995 yılı sonrasında günümüze kadar uzanan su kalitesindeki iyi yönde gelişme, maalesef Marmara Denizi'nde gözlenmemiştir. Bunun ana nedeni; Marmara Bölgesi kıyı alanında yoğunlaşan insan kaynaklı faaliyetler ve yetersiz alt yapı nedeniyle noktasal ve yayılı kaynaklardan denize ulaşan yoğun kirlilik yükleridir. Bu durum, 2010 sonrası dönemde artarak devam etmiştir.

Marmara Denizi ekosistemindeki kötüye gidiş kendisini 2021 yılında Marmara Baseni boyunca gözlemlenen müsilaaj oluşumu ile göstermiştir. 2021 yılı bahar döneminde Marmara Denizi yüzeyinde yoğun sümüksü birikimler ortaya çıkmıştır. Yapılan ilk incelemelerde organik kökenli olduğu anlaşılan bu birikimler Marmara Denizi'nin büyük bölümünü kaplayacak şekilde yayılmış, özellikle kıyısal alanlarda insanları şaşırtacak derecede yoğunlaşmıştır (Yücel ve diğ., 2021).

Deniz salyası ya da bilimsel adıyla 'müsilaaj', denizlerimizde artan deniz suyu sıcaklıkları ve insan kaynaklı baskılar (evsel ve sanayii kaynaklı atıklar, arıtım seviyelerindeki yetersizlikler, aşırı balıkçılık vs.) ile tetiklendiği düşünülen organik bir oluşum olarak bilinmektedir (Yücel ve diğ., 2021). Sümüksü yapısı dolayısıyla başta tüm su kolonu ve deniz tabanında yaşayan canlılar olmak üzere tüm ekosistemi olumsuz etkilemektedir. Dengenin bozulmasının daha büyük ekolojik bozulmalara (dip sularında oksijen tükenmesi, canlıların toplu ölümleri gibi) yol açabileceği öngörülmektedir (Yücel ve diğ., 2021). Tarihsel olarak bakıldığında Marmara Denizi'nde müsilaaj olayı 2007 yılında ilk kez raporlanmıştır (Tüfekçi ve diğ., 2010).

2021 yılında gerçekleşen müsilaaj döneminde ise MARMOD FAZ II Projesi kapsamında ek seferler gerçekleştirilerek müsilaajın dağılımı, kalış süresi, oluşum nedenleri vb. konuları anlamaya yönelik ek çalışmalar gerçekleştirilmiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). 2021 yılının Eylül ayında düzenlenen araştırma seferi kapsamında gerçekleştirilen su kolonu ve deniz tabanı örneklemelerinde, örnekleme yapılan istasyonlarda ve çalışılan derinliklerde görsel olarak müsilaaj oluşumuna rastlanmamıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Yaz başında özellikle 10-25 metre derinlikte sıkıştığı tespit edilen, hem sensör verileri ile varlığını belli eden hem de ağ örneklemeleri ile yoğun biçimde görülen müsilaaj tabakaları Eylül ayında gözlemlenmemiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Bir kısmı ara tabakada kalmış olan müsilaaj burada oksijenli solunum yapan bakteriler tarafından bozunmaya uğramıştır. Kıyısal (<20-30 m derinlik) bölgeler hariç, müsilaajın ara tabaka altına geçtiğine dair bir bulguya rastlanmamıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021).



Müsilajın yapısını ortaya çıkartmaya yönelik gerçekleştirilen kimyasal analizlerin ön sonuçları, müsilajın kimyasal yapısında daha önce Adriyatik, Tiren ve Marmara denizlerinde görülen ile büyük benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Polisakkaritler, proteinler, karboksilik asit ve halkalı yapılar müsilajın ana kısımlarını oluşturmaktadır. Bu sonuç, son dönem oluşan müsilajın öncekiler gibi spesifik deniz organizmaları kaynaklı bir salgı olduğu hipotezini desteklemiştir. Ayrıca yapılan analizler sonucu yüzey ve su kolonundan ayrı ayrı örneklenen deniz salyalarının arasında yapısal olarak önemli bir farklılık tespit edilmemiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021, Yücel ve diğ. 2023). Örneklenen müsilajın yapısal olarak diğer denizlerde deniz salyası oluşumlarına çok benzer bir elemental yapı göstermiş olduğu görülmüştür (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021, Yücel ve diğ. 2023).

Bu kapsamda gerçekleştirilen fitoplankton çalışmaları ise müsilaj döneminde fitoplankton tür çeşitliliğinde ve hücre sıklığında farklılıklar gözlemlendiğini ortaya koymuştur (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Bu dönemde fitoplanktonda baskın grubun diyatomlar olduğu görülmüştür. Diyatomları sırası ile dinoflagellat ve kokkolitoforidler ve diğerleri izlemiştir. Haziran başında görece küçük diyatomlar haziran sonunda ise büyük boy diyatomların (*Cerataulina pelagica*) patlama yaptığı görülmüştür. Her iki dönemde de diyatom türleri baskın olarak bulunmuş ve bunları 4. sırada kokkolitoforid *Emiliania huxleyi* türü izlemiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Bu durum bize besin tuzlarından azot ve fosforun yanı sıra diyatomların gelişmesi, iskelet yapılarının (frustul) oluşabilmesi için en elzem tuzlardan silikatın yeterli düzeyde ortamda mevcut olduğuna işaret etmiştir. Silikatın ortamda bol bulunduğu diyatomlar tarafından hızlıca tüketildiği ve ölüm sürecini (post-bloom) takiben yine hücrelerin çöklediği tabakada çözündüğü bilinen bir durumdur. Basende yüzey ve yüzeye yakın sularda bolca gelişen diyatomun silikat gereksinimini doğal girdiler yanı sıra rejenere silikattan da fazlası ile sağladığı düşünülebilir. Hücre sıklık profilleri incelendiğinde ölen popülasyonun çok düşük bir oranının haloklin altına indiği anlaşılmaktadır. Bu durum bize yüzey ve yüzeye yakın sularda gelişen fitoplanktonun ölümünü takiben haloklinin hemen üzerinde (yaklaşık 15-30 m derinlikler arası) biriktiğini ve orada rejenere olduğunu göstermiştir. Kuvvetli poyraz ve lodos durumlarında bu derinliklerden yüzeye doğru rejenere besin tuzlarının taşınımı büyük olasılıktır. Dolayısı ile Marmara baseni besin tuzları içerikleri bağlamında kendi doğal kısır döngüsü yanı sıra diğer doğal ve antropojenik girdilere aşırı düzeyde maruz kaldığından müsilaj oluşumu sürpriz bir durum olarak tespit edilmemiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021).

Haziran başı ile sonu arasındaki büyük farklılıklardan bir tanesi de Haziran başında incelenen istasyonların tamamının yüzey sularında fitoplankton sıklığı fitoplankton patlaması (bloom) adı verilen litrede bir milyon hücre ve üzeri seviyeyi geçtiği tespit edilmiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). 20 metre altında gözlenen diyatomların hemen hemen büyük çoğunluğu ölü hücreler olup geriye sadece iskelet yapılarının kaldığı bir durum söz konusu olmuştur. Haloklin alt sınırı olarak kabul edebileceğimiz 30 m derinlik ve aşağısında ise çoğunlukla çözülmekte olan diyatom iskeletlerini (frustul) görülmektedir. Marmara için en büyük tehdidin buradan kaynaklandığı belirtilmiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021). Fitoplankton gelişimi yüzey ve yüzeye yakın çok sığ bir tabakaya indirgenmiş olup hemen altında rejenere prosesler hâkim olmaktadır. Alt ve üst su

arasında keskin bir bariyer olarak duran haloklin tabakası büyük oranda modifiye olmuş üst Marmara suyu ile alt Akdeniz suyu arasında katı ve sıvı madde transferinde bariyer olarak rol oynamaktadır. Diğer durumda, yüzeyde gelişen fitoplankton zaman içinde ölümünü takiben aşağılara, tabana doğru giderek çökelse bu durumun müsilajın oluşumunu daha farklı ve azaltıcı yönde etkileme olasılığı yüksek olacaktır. Karadeniz ve Akdeniz’de ışıklı zonda gelişen fitoplankton (özellikle iskelet yapısında kalsiyum karbonat ve silikat içeren kokkolitoforid ve diyatomlar gibi) ölümü sonrası doğal bir şekilde tabana kadar çökebilmektedir fakat bu durum Marmara için daha farklı gelişebilmektedir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021).

Sonuç olarak; Marmara Denizi’nde müsilaj patlaması, ardından müsilaj artıklarının bozunması ve ortamdan ayrılma süreçleri bu denizin dinamiklerinde mevsimsel değişimlerin ötesinde bir değişim yaratmış gibi görünmektedir. Müsilaj Haziran-Temmuz 2021’de Marmara Denizi’nde yüzeyden haloklin tabakasının üstüne kadar (0- 25m) oşinografik çalışmalarla tespit edilmiştir. Eylül 2021 ve Mart 2022’de yapılan çalışmalarda ise denizde müsilaja rastlanmamıştır. Müsilajın batı yönlü Karadeniz kökenli akıntı ile Çanakkale Boğazı’ndan çıkış yaptığı ve ara tabakada kalan kısmının ise bakteriler tarafından ayrıştırılarak parçalandığı düşünülmektedir. Müsilaj varlığında bir aylık süreçte ekosistem farklılıklar göstermiş, plankton türleri baskınlıkları değişmiş ve bu süreçte su kolonunda belirgin oksijen azalmaları gözlemlenmiştir. Marmara Denizi dip sularında oksijen tükenmek üzeredir. Laboratuvar ve saha ölçümleriyle, müsilaj varlığında oksijenin diğer zamanlara göre daha hızlı tüketildiği, ayrıca Marmara Denizi yüzey tabakasında Karadeniz’e kıyasla daha fazla tüketim olduğu ve bunların sebebinin ise müsilaj gibi organik maddelerin Marmara Denizi’nde daha fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir (ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021, Yücel ve diğ. 2023).

T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nca müsilaj oluşumu sonrasında 22 eylemden oluşan “Marmara Denizi Koruma Eylem Planı’nı açıklanmıştır. Bununla birlikte “Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Plan 2021-2024” yayınlanmıştır. Bu plan ile hem müsilajın sebepleri ve sonuçlarının anlaşılması hem de Marmara Denizi havzasının sürdürülebilir ekosistem özelliklerinin korunabilmesi için politika ve stratejilerinin belirlenmesi ve uygulanması hedeflenmiştir. Marmara Denizi’nin çevresel durumunu iyileştirmek ve müsilajın tekrarını önlemek için birçok kurum ve kuruluş tarafında yapılacak olan faaliyetler belirlenmiştir. <https://marmarahepimizin.csb.gov.tr/> websitesinde faaliyetlerin detaylarına ulaşılabilmektedir.

### 3 MARMARA DENİZİ BÜTÜNLEŞİK MODELLEME SİSTEMİ (MARMOD) PROJESİ

ODTÜ-DBE bünyesinde 1980lerden itibaren toplanılan veri setleri ve 2012'den itibaren DEKOSİM oşinografi araştırma altyapısı çerçevesinde yeni nesil gereçlerle toplanan ölçümler ile ÇEDİDGM Genel Müdürlüğü tarafından TÜBİTAK-MAM koordinasyonunda yürütülen Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme çalışmaları ve diğer kurum ve üniversitelerin araştırmaları ile Marmara Denizi dip suları oksijen miktarının neredeyse on kat azaldığı ve yer yer tamamen tükenmiş olduğu gözlenmiştir. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bu probleme çözüm üretmek ve Marmara Denizi'nin bugün ve gelecekte sürdürülebilir sağlıklı bir ekosisteme sahip olmasını sağlamak için ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü ile birlikte 'Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD) Projesi' FAZ I ve FAZ II aşamalarını başarıyla tamamlanmıştır.<sup>3</sup>

#### 3.1 MARMOD FAZ I Proje Çıktıları

Marmara Denizi'ndeki çevresel durumun en önemli göstergelerinden birisi çözülmüş oksijen miktarıdır. MARMOD FAZ I Projesi kapsamında öncelikle tarihsel veriler kurumlar arası iş birliği sayesinde toplanmış ve son durum ortaya konmuştur. 2010 öncesi döneme göre son 15 yılda basende ciddi bir oksijen azalması olduğu görülmüştür. Mevcut durumda Çanakkale ve İstanbul boğazları ile Marmara Denizi'ne taşınan ve Marmara'dan çıkan besin yükleri hesaplanmış ve havzalardan Marmara'ya giren besin yükleri ile beraber **ilk kez Marmara Denizi'ne özgü, fiziksel ve biyojeokimyasal özelliklerini temsil eden ulusal kaynaklarla geliştirilen bütünleşik bir model oluşturulmuştur.**

Tek boyutlu model ileriye dönük olarak Marmara Denizi derin baseni ortalama koşulları için 6 yıllık bir süre için çalıştırılmış ve modelin günümüz koşullarını çok iyi simüle ettiği görülmüştür. Buna göre karışmış tabakanın altındaki ortalama oksijen konsantrasyonu 40  $\mu\text{M}$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Marmara Denizi derin baseni için tarihsel veriye dayanarak referans koşul olarak belirlenen ve aynı zamanda yüksek organizmalar için hipoksiye tolerans alt sınırı olarak kabul edilen 80 mikromolar değerinin çok altında bir değerdir. Bu kritik eşiğin üzerine nasıl çıkabileceği konusunda yönetim planlarına önerilerin geliştirilmesi için çeşitli senaryo model çalıştırmaları uygulanmıştır.

Tüm senaryo sonuçları altı yıllık bir dönemi temsil etmiştir ve bu da sistemin göreceli olarak hızlı biçimde (dip suların kendini yenileme süresi 6 yıl olduğu için minimum olarak alınmalıdır) ancak tüm basen ölçeğinde gerekli önlemlerin kısa sürede (< 1 yıl) devreye alındığı koşullarda hipoksi riskini azaltan bir davranışa en erken 6 yıl içinde geçeceğini göstermiştir. MARMOD ilk faz sonuçlarından **öne çıkan bulgular karasal yükler %40 oranında azaltıldığı takdirde Marmara Denizi alt sularının 6 yıl gibi bir sürede hipoksi eşiğinin üzerine çıkabileceğini göstermiştir. Görece olarak Marmara'yı en fazla etkileyen girdilerin karasal kaynaklı olduğu görülmüş,**

<sup>3</sup> Detaylı bilgiler için bakınız: <https://marmod.ims.metu.edu.tr/>

**bunu sırasıyla Karadeniz’den gelen yükler ve İstanbul Boğazı alt suyuna yapılan deşarjlar takip etmiştir. Önlemlerin daha yavaş bir sürece yayılması durumunda denizin iyileşme süreci de uzayacaktır.**

Yine Model sonuçlarına göre, **Karadeniz’den gelen tüm yükler ortadan kaldırılsa dahi Marmara Denizi dip suları hipoksi eşğini 6 yılda geçememiştir. Ancak Karadeniz’den gelen yüklerle birlikte boğaz alt suyuna verilen yükler beraber ortadan kaldırılınca istenen düzeye yaklaşan bir iyileşme görülmüştür.** Karadeniz’den gelen yüklere bir müdahalenin söz konusu olmayacağı varsayıldığında, Marmara Denizi oksijen seviyelerini arzu edilen seviyelere getirmek için karasal yüklerin azaltılması en öncelikli önlem olarak öne çıkmış ve **İstanbul Boğazı alt suyuna verilen deşarjlar konusunda da alınacak önlemlerin çok etkili olacağı model sonuçlarında görülmüştür.**

İlk fazda karasal noktasal ve yayılı kaynaklardan gelen yüklerin tutarlı tahminlerini yapmadan başarılı uygulama stratejilerinin hayata geçirilmesinin özellikle orta ve uzun vadede mümkün olmadığı belirtilmiştir.

MARMOD FAZ I ile Marmara Denizi oksijen seviyeleri ve bu seviyeleri etkileyen faktörlerle ilgili birçok bilinmeyene ilk kez ışık tutulmuştur.

### **3.2 MARMOD FAZ II Proje Çıktıları**

MARMOD Projesi FAZ I sonuçları; seçilen pilot alanlarda, havza kaynaklı besin yüklerinin yüksek alansal ve zamansal ölçekte ortaya konabilmesi için saha çalışmaları yapılmasını ve bu çalışmaların sonuçlarının kalan alanlara yansıtılarak daha tutarlı besin yükü tahminleri yapılmasını önermiştir. Bunun yanı sıra, su bütçelerinin güncellenip besin yükü ve oksijen alışverişlerinin belirlenmesi, model öngörülerini iyileştirecek şekilde yeni saha çalışmalarının yapılması ve böylece Marmara Denizi mevcut öngörü kapasitesinin daha da artacağı öngörülmüştür.

MARMOD FAZ I Sonuçlarından yola çıkarak, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı yürütücülüğünde ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü koordinasyonunda projenin ikinci aşaması olan MARMOD Faz II Projesi 02 Nisan 2021- 14 Aralık 2023 tarihleri arasında yürütülmüştür.

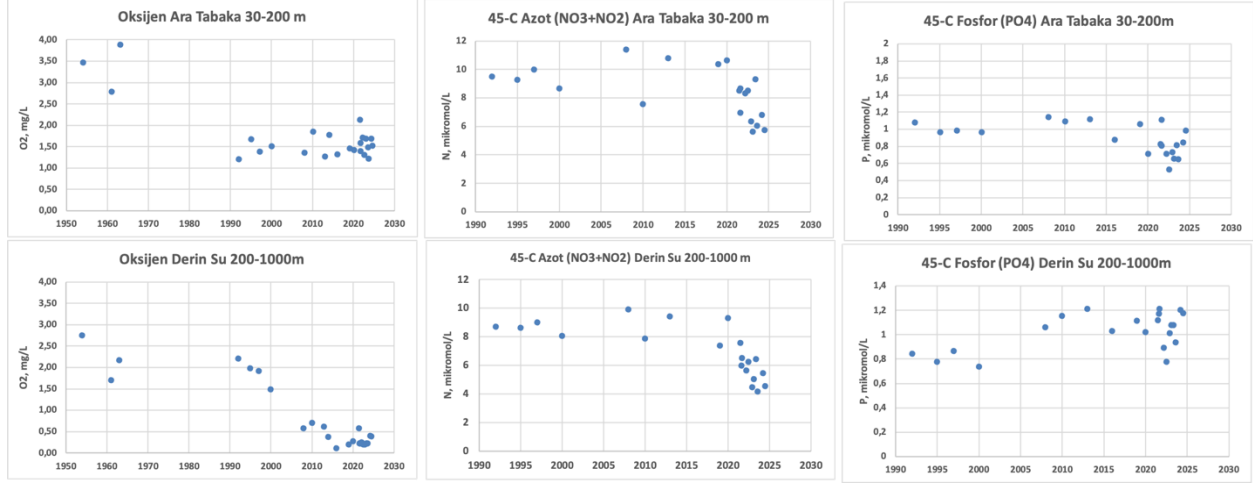
Projenin FAZ II aşamasında gerek yeni gözlemler gerekse üç boyuta taşınan modeller sayesinde Marmara Denizi’ne taşınan yükler hakkında daha güvenli ve alt bölgeler için detaylandırılmış, ilerideki dönemlerde bölgesel çaplı yönetim planları hazırlanırken temel alınabilecek önerilerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Marmara Denizi için kurulacak olan deniz ekosistem modellerine sınır koşullarını sağlamak ve de ileride kurulması planlanan havza modellerine gerekli veriyi sağlamak üzere öncelik Susurluk Havzası olmak üzere, tüm havzalarda çeşitli kaynaklardan hidrolojik, meteorolojik, coğrafi ve de besin yükü verileri derlenerek değerlendirilmiş ve de entegre bir veritabanı oluşturulmuştur. Bununla birlikte MARMOD FAZ II Aşaması ile Marmara Denizi “Dijital İkizi” nin altyapısının oluşturulması hedeflenmiştir.

MARMOD Faz II kapsamında, 2021-2023 yıllarında müsilağ olayının yoğun yaşandığı dönemi de kapsayacak şekilde toplam 10 deniz seferi gerçekleştirilmiştir. Su kolonu ölçümlerine ek olarak,

2022 yaz aylarında toplanan sediman karotlarının da analizleri proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deniz seferlerinin hepsinde yüksek çözünürlüklü veri toplamak için ODTÜ-DEKOSİM altyapısında olan ScanFish cihazı (Su kolonu tarayıcısı) ile seçili hatlar boyunca sürekli ölçümler yapılmıştır. **MARMOD Faz II, oksijensizleşme sürecine dair yeni ve hızlanan gidişatı ortaya koyarken, oksijensizleşmenin tetiklediği yeni süreçleri de ortaya çıkarmıştır.**

Marmara Denizi'nde yapılan ölçümlere göre 1980'li yıllarda kendini göstermeye başlayan besin tuzu aşırı artışı (Polat ve diğ., 1998) günümüzde de görülmektedir. MARMOD Projeleri dahil Marmara Denizi odaklı çalışmalarımız göstermiştir ki, Marmara Denizi genelinde uzun süredir devam eden besin tuzu fazlalığı hem müsilaaj döneminde hem de sonraki dönemlerde devam etmektedir. Besin tuzlarının yüzey sularındaki dağılımları birincil üretim, yağışlar, Karadeniz girdisi ve karasal girdi gibi değişkenlere bağlı olarak örnekleme dönemlerinde değişim gösterse de genellikle Marmara'nın doğusunda ve körfezlerde görece yüksek besin tuzu değerleri ölçülmüştür.

Besin tuzlarının su kolonundaki dağılımları ise yüzeyden farklı olarak özellikle fosfor ve silikatın derinlikle artışı çok belirgin bulunmuş ve bu sonuçlar 90'lı yıllarda yapılan besin tuzu ölçümleri ile (Polat ve diğ., 1998) kıyaslandığında benzer seviyelerde olduğu görülmüştür (Şekil 1). Nitrit-nitrat azotunda ise son 10 yıla kadar belirgin bir artış olsa da son yıllarda 300m'nin altındaki sularda oksijenin çok düşük olmasından dolayı tetiklenen başka bir mikrobiyal respirasyon süreci olan denitrifikasyon sonucu azalma eğilimi göstermesi, derin çukurlarda oksijenin tükenmesiyle başlayan sürecin nitratı da tükettikten sonra sülfat respirasyonuna (son ürün olarak H<sub>2</sub>S üreten) geçilecek olmasının bir habercisidir. **Nitrit-nitrat azotunun 300m'nin altındaki sularda oksijenin çok düşük olmasından dolayı tetiklenen başka bir mikrobiyal respirasyon süreci olan denitrifikasyon sonucu azalma eğilimi göstermesi, derin çukurlarda oksijenin tükenmesiyle başlayan sürecin nitratı da tükettikten sonra sülfat respirasyonuna (son ürün olarak H<sub>2</sub>S üreten) geçilecek olmasının bir habercisidir.** Yüzey sularında ise besin tuzları birincil üreticiler (fitoplankton-makroalg) tarafından hızlıca tüketilerek biyokütleye dönüşmektedir. Bundan dolayı besin tuzları yüzeyde düşük konsantrasyonlarda bulunmuştur (Şekil 1).



Şekil 1. MARMOD Faz II verileri ve ayrıca 2024 DEN-İZ<sup>4</sup> verileri dahil Marmara Denizi'nde oksijen ve besin tuzları durumu.

Klorofil-a fitoplankton biyokütlesi göstergesi olarak ötrofikasyon sınıflandırılmasında ve ölçümünde öne çıkan bir parametredir. Her ne kadar birincil üretim için net bir bilgi sağlamasa da fitoplanktonun besin tuzlarını kullanarak artışı ile üretkenlik açısından önemli bilgiler sağlar. Klorofil-a konsantrasyonları Marmara Denizi'nde mevsimsel ve alansal olarak değişiklik göstermektedir. Klorofil-a 1990'lı yıllarda yapılan çalışmalarda Ocak-Nisan ayları arasında en yüksek değerlerine ulaşarak  $\sim 0,5-10 \text{ mg/m}^3$  arasında değişmiş (Polat ve diğ., 1998) ve 2014-2019 yılları arası yine kış-ilkbahar ayları en yüksek değerler ölçülerek  $0,25-12,31 \text{ mg/m}^3$  aralığında ölçülmüştür (ÇŞİDB, TUBİTAK-MAM, 2021). Haziran 2021 müsilağ dönemi klorofil-a konsantrasyonları geçmiş çalışmaların aksine, yaz dönemini temsilen görece yüksek ölçülmüştür ( $\sim 4-5 \text{ mg/m}^3$ ) (Şekil 1). Klorofil-a'nın yüksek olduğu derinlikler haloklinin üstü 15-20m civarlarında müsilağ tabakasının yoğun olduğu derinlikle paralellik göstermiştir. Klorofil-a müsilağ sonrası Eylül 2021'de 1-1,5 seviyelerine düşmüş ve müsilağ gözlemlenmemiştir. Mart 2022'de ise müsilağ döneminden daha yüksek konsantrasyonlar görülmüş ( $>5$ , max  $12 \text{ mg/m}^3$ ) fakat müsilağa rastlanmamıştır (Şekil 1). İzmit, Gemlik ve Bandırma körfezlerinde besin tuzları, klorofil-a ve secchi disk derinliği gibi ötrofikasyon parametreleri, bu bölgelerin özellikle Marmara'nın batı bölgelerine göre daha ötrofik olduğunu göstermektedir. Marmara Denizi'nin geneli daha önceki yıllarda olduğu gibi (Ediger ve diğ., 2016) MARMOD proje kapsamındaki örnekleme dönemlerinde de ötrofik özelliklerini korumuştur (Şekil 1).

Marmara Denizi'nin ekolojik ve biyojeokimyasal yapısında belirleyici olan haloklin tabakası<sup>5</sup>, yarattığı bariyerden kaynaklı olarak çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının su kolonundaki dağılımını etkilemektedir (Şekil 1). Işıklı tabakada birincil üretim ve atmosfer kaynaklı oksijen özellikle müsilağ döneminde oksijen doygunluk oranını %100'ün üzerine çıkarmış, fakat 20-25 m'den sonra haloklin tabakasının üst kısmı olarak niteleyebileceğimiz kısımda fotosentez için

<sup>4</sup> Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı (DEN-İZ) detaylı bilgi için bakınız: <https://www.den-iz.org>

<sup>5</sup> Haloklin tabakası: Haloklin, su kolonunda dikey yönde tuzluluğun derinlikle hızlı bir şekilde değiştiği tabakadır ve iyi karışmış, tuzluluğun düzgün dağıldığı yüzey suyu katmanının altında bulunur.



gerekli ışığın tükenmesi ile keskin bir oksijen azalması görülmüştür. Su kolonundaki bu oksijen azalması, hem Haziran 2021 sürecinde hem de Eylül 2021 ayına kadar tespit edilmiştir (Şekil 1). Özellikle Çınarcık Çukuru'nda 4 Haziran-28 Haziran 2021 arasında gerçekleştirilen oşinografik seferlerdeki 6 ölçümde su kolonunda 50m'deki düşüş dikkat çekicidir. Bununla birlikte, Çanakkale Boğazı girişi ve İstanbul Boğazı çıkışında yapılan ölçümler sonucu, Akdeniz'den oksijence doymuş giriş yapan sular, Marmara Denizi'ni terk ederken ~150 µM O<sub>2</sub> kaybettiği hesaplanmıştır (Şekil 1).

Sonuç olarak Marmara Denizi'nde müsilağ olsun veya olmasın besin tuzlarının zamanla artışı su kolonunda ve deniz tabanında, özellikle haloklin tabakası altında (>30m), geniş ve kalıcı hipoksik ve anoksik koşullar oluşumuna yol açmaktadır. Son 3 yıldaki (2021-2023) MARMOD Faz II seferlerine göre sistemde oksijen kaybının devam ettiği görülmektedir. Azot ve fosfor aşırı yüklü durum devam etmektedir. Anoksia ile beraber gelişen denitrifikasyonun şiddetlendiği ve derin sudaki nitratı giderek tükettiği net bir trenddir. Bu durum, bir sonraki respirasyon basamağı sülfatlı solunum olduğundan, bu gidişat sürerse sistemin önümüzdeki yıllarda kalıcı sülfatlı solunumun son ürünü olan H<sub>2</sub>S birikimine giderek daha yatkın hale geleceğine işaretir.

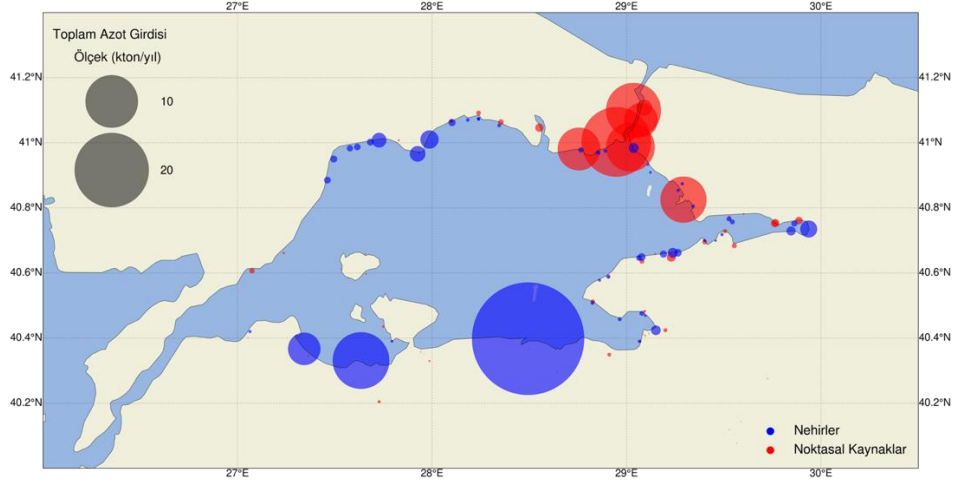
### 3.2.1 MARMOD FAZ II Model Simülasyonları

MARMOD Faz II Projesi kapsamında gerçekleştirilen deniz modelleme çalışmaları, bu proje kapsamında oluşturulan Marmara Bölgesi için yüksek çözünürlüklü (1 km) bir dolaşım modelinin geliştirilmesini ve bu model üzerine bir ekosistem modelinin kurulmasını kapsamaktadır. Marmara Denizi'nin hidrodinamik özelliklerinin bölgesel kullanımda simüle edilmesi için üç boyutlu Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO ver. 3.6) (Madec, 2023) kullanılmıştır.

Ayrıca, Marmara Denizi'nin kendine özgü fiziksel ve biyojeokimyasal özelliklere sahip olması, dünyadaki birçok denizi çalışmak için kullanılan popüler ekosistem/biyojeokimyasal modellerin burada kullanılmasına mümkün kılmamaktadır. Bundan dolayı ODTÜ-DBE tarafından Türkiye'yi çevreleyen tüm denizlerde kullanılması mümkün olan bütünleşik bir modelleme sistemi geliştirilmiştir (Türkiye Bölgesel Denizler Ekosistem Modeli – TURSEM). Bu proje kapsamında bu model Marmara Denizi'ne uygulanmıştır.

#### TURSEM Modelinin 3 Boyutlu Sonuçları

Marmara Denizi'ne nitrat deşarjlarının etkisini değerlendirmek için, ekosistem modeli TURSEM hem nehirlerden hem de MARMOD FAZ II kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen noktasal kaynaklardan nitrat ve fosfat deşarjları dikkate alınarak çalıştırılmıştır. Bu nehir ve nokta kaynakları ve toplam deşarja katkıları Şekil 2'de gösterilmektedir. Haritada 21 ana nehrin coğrafi konumları ve nitrat deşarjları mavi daireler şeklinde gösterilmiştir. Dairelerin boyutu, her nehrin kton/yıl cinsinden yıllık ortalama nitrat deşarjı ile orantılıdır. Noktasal kaynakların coğrafi konumları haritada kırmızı daireler olarak gösterilmiştir. Dairelerin boyutu, her bir noktasal kaynağın kton/yıl cinsinden yıllık ortalama nitrat deşarjı ile orantılıdır.



Şekil 2. Nehir ve noktasal kaynaklı nitrat girdisi (kton/yıl) (Kırmızı: Noktasal Kaynaklar, Mavi: Nehirler)

Genel olarak simülasyonlardan, hem Susurluk havzasından gelen nitrat hem de İstanbul Boğazı'ndaki kaynaklardan gelen nitrat girişinin Marmara Denizi'ni güçlü bir şekilde etkilediği ortaya çıkmaktadır. **Susurluk nehri esas olarak Gemlik Körfezi ve güney Marmara Denizi'ni etkilerken, İstanbul Boğazı'ndan kaynaklanan nitrat, buradan Marmara Denizi'ne giren jet tarafından büyük mesafelere dağıtmakta ve tüm doğu Marmara Denizi'ni etkilemektedir.**

### Model Senaryoları

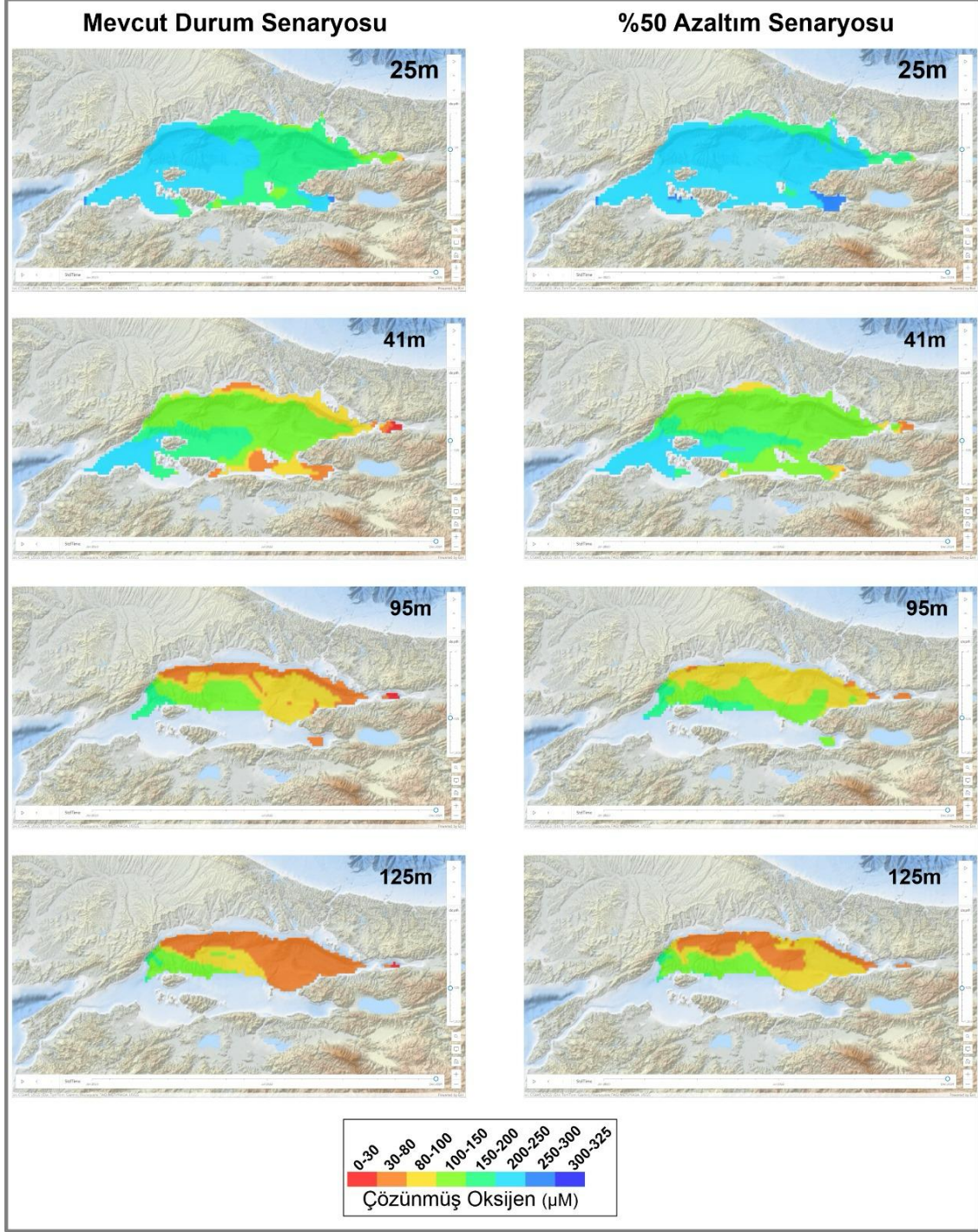
Marmara Denizinin oksijen seviyesinin ve deniz ekosisteminin iyileşmesine yönelik olarak en iyi çözümü bulmak için, aşağıdaki model simülasyonlarının Marmara Denizi'ndeki oksijen konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Günümüz Koşulları Senaryosu (Business As Usual)
- 50% Daha Az Yük Senaryosu

Yukarıda belirtilen iki senaryo, besin yüklerinin hızlı bir şekilde %50 oranında azaltılmasının Marmara Denizi üzerindeki etkisini ve bu etkinin zaman içinde nasıl geliştiğini test etmek için 4 yıl boyunca çalıştırılmıştır. İki simülasyon arasındaki farklar değişik derinlikler için Şekil 3'de verilmiştir.

**Senaryo sonuçları besin girdisinin %50 oranında azaltılmasının Marmara Denizi'ndeki oksijen konsantrasyonu üzerinde önemli bir etkisi olacağını ve 4 yıl sonra 200 metreye kadar olan derinliklerde oksijende umut verici bir artış olduğu göstermiştir.** Azaltım halinde 4 yılda 25 metre derinlikte oksijende önemli bir artış görülecektir. Ancak daha derinlerde artış hızı daha yavaş olmakla birlikte iyileşmeler görülmektedir. Mevcut koşullarda İzmit Körfezi'nde 40-95 metreler arasında tükenmesi beklenen oksijen seviyesinin azaltım sayesinde görece iyileştiği izlenmektedir. 125 metre derinliklerde ise özellikle Doğu Marmara'da oksijen seviyelerinde artış görülmektedir. Benzer iyileşme Bandırma ve Gemlik körfezlerinin de olduğu Güney Marmara'da izlenmektedir.

Bununla birlikte, oksijen konsantrasyonundaki bu iyileşmeler tüm su kolonundaki oksijen konsantrasyonunu en az 80  $\mu\text{M}$ , tercihen tüm su kolonunda 100  $\mu\text{M}$  eşığının üzerine henüz çıkarmaya yetecek bir artış değildir. Bu seviyede bir iyileşme için 6-8 yıla kadar daha uzun bir zaman dilimi gereklidir. **Bu durum, besin girdisinin azaltılması gibi uygun tedbirlerin uygulanması halinde Marmara Denizi oksijen konsantrasyonunun zaman içinde iyileşmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Model sonuçları iyileşmenin en az 4 yıldan fazla süreceğini gösterdiğinden, böyle bir iyileşmenin kendini göstermesinin önemli miktarda zaman alacağı öngörülmektedir.**



Şekil 3. Farklı derinliklerde iki senaryo arasındaki oksijen konsantrasyonunda meydana gelecek değişiklikler.

### 3.2.2 Marmara Deniz Besin Ağı Modeli

Bu proje kapsamında Marmara Denizi ekosisteminin besin ağını incelemek, yapısı ve işleyişinin durumunu anlamak ve balıkçılık baskısının derecesini nicelendirmek amacıyla Ecopath with Ecosim (Christensen ve diğ. 2005) kullanılmıştır. Bu model, dünya çapında en yaygın kullanılan



besin ağı modellerindendir ve üç bileşenden oluşmaktadır: Ecopath (kütle-denge modülü), Ecosim (dinamik modül) ve Ecospace (mekânsal modül).

Marmara Denizi'nin üst trofik seviye canlıları, bu canlıların alt trofik seviye canlılarla ve balıkçılık faaliyetleri ile ilişkilerini içeren bir trofik kütle denge modeli oluşturulmuştur. Modelde yer alan türler ve fonksiyonel gruplar arasında yunuslar, mahmuzlu camgöz, vatoz, palamut, lüfer, berlam, mezigit, kalkan, barbun, istavrit, sardalya, hamsi, derin su pembe karidesi, bentik omurgasızlar, zooplankton, fitoplankton ve detritus bulunmaktadır. Bu model, Marmara Denizi'nin 1990'lar, 2000'ler ve günümüz (2020'ler) koşullarına uygulanmış ve literatür kullanılarak parametrize edilmiştir.

Marmara Denizi Ecopath besin ağı modeline göre 2000'lerin başından günümüze sardalya hariç tüm balıkların av miktarında ciddi azalışlar gerçekleşmiştir. Bu değişimler Pauly ve diğ. (1998)'in işaret ettiği "besin ağına yukarıdan aşağıya doğru avlanma" olgusunun Marmara Denizi balıkçılığı ve balık stokları için gerçekleştiğini göstermektedir. Bu olguya göre yüksek trofik seviyeye sahip balıklar balıkçılık tarafından tercih edildiğinden öncelikli avlanır ve bu balıkların yıllar içerisinde azalması ile balıkçılık daha düşük trofik seviyeye sahip balıkları hedef almak zorunda kalır. Böylelikle balıkçılık gelirleri de düşer. En nihayetinde tüm balıkların avında ciddi azalmalar görülür. Marmara Denizi'nde de son 24 yılda gerçekleşen de bu olgudur. Bu doğrultuda Marmara Denizi'nde Biyoçeşitlilik Shannon Biyoçeşitlilik indeksine göre 2000'lerde 1.83'ten 2020'lerde 1.64'e kadar azalmıştır.

**Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Marmara Denizi biyoçeşitliliğinin korunması için balıkçılık yönetiminde türler arası etkileşimler dikkate alınmalı ve diğer türlerin de popülasyonlarını devam ettirmesine olanak sağlayacak biçimde avcılığı yapılan türler için kota uygulaması benimsenmelidir. Hedef dışı türlerin avlanmasını önlemek için av araçlarının seçiciliğini artırıcı önlemler alınmalıdır. Ekosistemin sağlıklı işlemesi ve balıkçılık yönetimi açısından önemli türlerin korunması için belirli alanlarda koruma alanları oluşturulmalıdır.**

### **3.2.3 TN ve TP Girdilerinin Azaltılmasına Yönelik Yöntem Önerileri**

Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024 kapsamında yer alan TN ve TP yükleri noktasal kaynaklardan MARAAT Projesi<sup>6</sup> kapsamında ve yayılı kaynaklar ise TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü verilerinden derlenmiş olarak aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir. Marmara Denizi kara kökenli TN ve TP yüklerinin çok büyük bölümünün yayılı kaynaklardan geldiği görülmektedir. Bu tabloda yer alan yayılı kaynaklı yük hesaplamaları alıcı ortama ulaşan kirlilik yükü olmayıp, kaynağında (karada) oluşan TN ve TP değerleri olarak ton/yıl biriminde hesaplanmıştır. Yine de bu bilgi sisteme giren yük miktarı hakkında kapsamlı bir bilgi sunmaktadır.

---

<sup>6</sup> ÇŞİDB, 2021. Marmara Denizi Havzası Noktasal Kirlilik Yüklerinin Tespiti (MARAAT) Projesi.

Tablo 1. Noktasal ve yayılı kaynaklarda TN ve TP yük dağılımları (MARAAT ve TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü (2021) verilerinden derlenmiştir)

	TN (ton/gün)	TP (ton/gün)	TN (kiloton/yıl)	TP (kiloton/yıl)	% TN	% TP
<b>Noktasal Kaynaklar</b>	192.2	20.8	70.1	7.6	<b>17.6</b>	<b>8.8</b>
<b>Yayılı Kaynak</b>	902.4	214.4	329.4	78.3	<b>82.4</b>	<b>91.2</b>
Toplam	1095	235	400	86		

Marmara bölgesinde Marmara Denizini etkileyen havzaların TN ve TP yük miktarları Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024 kapsamında ortaya konulmuştur. Bu değerler Tablo 2’de bir araya getirilerek havza bazında TN ve TP yüklerinin alt havzalardaki yüzdesel dağılımları ortaya verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü üzere Susurluk Havzası uygulanan gübre açısından en büyük payı oluştururken Çanakkale, Kuzey Marmara ve İzmit Körfezi havzaları bunu izlemektedir.

Tablo 2. Havza bazında var olan toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) yüklerinin alt havzalardaki yüzdesel dağılımları (değerler Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024’den alınmıştır)

Havza	TN %	TP %
<b>Susurluk Havzası (Güney Marmara)</b>	<b>61.7</b>	<b>59.2</b>
Manyas Gölü Althavzası	12.5	12.4
Simav-Susurluk Çayı Althavzası	25	25.5
Ulubat Gölü Althavzası	19.6	16.5
Nilüfer Çayı Havzası	4.6	4.8
<b>Çanakkale Havzası</b>	<b>18.9</b>	<b>18.9</b>
Çanakkale Boğazı Havzası	5.2	5
Biga-Gönen Althavzası	13.7	13.9
<b>İzmit Körfezi</b>	<b>8.5</b>	<b>9.7</b>
İznik Gölü Havzası	1.8	1.8
İzmit-Gemlik Körfezi Havzası	6.7	7.9
<b>Kuzey Marmara Havzası</b>	<b>11</b>	<b>12.4</b>

Özellikle mikro havza boyutunda gerçekleştirilen değerlendirmede (TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, 2021) 2269 adet mikro havzaya bölünen Marmara Denizi 255 tanesinin riskli olduğu görülmektedir. **Büyük bölümünün Susurluk Havzasında yer aldığı bu riskli alanlarda özellikle uygulanması gereken iyileştirme tekniklerinin bu bölgede önceliklendirilmesi gerekmektedir.**

Yayılı yükler genel olarak Güney Marmara’da yoğunlaşırken, noktasal yükler İstanbul çevresinde yoğunlaşmıştır. Yayılı kaynaklardan gelen yükler biraz daha ayrıntılı olarak başka projelerde de



incelenmiştir. Örneğin yayılı yüklerin çok yoğun bulunduğu Susurluk Havzası Havza Koruma Eylem Planları'nda Susurluk Havzası toplam yayılı azot yükü dağılımlarının farklı kaynakları incelendiğinde (Tablo 3) yayılı azot kirliliği, baskın olarak tarımsal faaliyetlerden ve hayvan yetiştiriciliğinden kaynaklanmakta olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Susurluk Havzası toplam yayılı azot (TN) ve fosfor (TP) yükü dağılımları (Susurluk Havzası Havza Koruma Eylem Planlarından alınmıştır)

<b>Kaynaklar</b>	<b>TN (%)</b>	<b>TP (%)</b>
Toplam gübre	63.3	72.8
Toplam arazi kullanımı	13.7	3.8
Toplam hayvancılık	19.8	23.0
Toplam atmosferik taşınım	2.5	-
Toplam sızıntı suyu	0.5	0.1
Toplam foseptik	0.2	0.3

Buradan yola çıkarak toplam yayılı kaynaklı TN yüklerinin %75 oranında tarımsal faaliyetlerden %25 oranında tarım dışı faaliyetlerden kaynaklandığı görülmektedir.

Güney Marmara'da Susurluk Havzasını oluşturan alt havzalardan Manyas Gölü alt-havzası, Ulubat Gölü alt-havzası ve İznik Gölü alt-havzalarında oluşan kirlilik yükleri nehirlerle öncelikle burada bulunan Manyas, Uluabat ve İznik Göllerine taşınmaktadır. Bu yükler göllere ulaştıktan sonra göllerin kendi iç dinamik (biyojeokimyasal) döngülerine katıldıktan sonra göllerin çıkış noktasından derelere ve sonrasında Marmara Denizi'ne ulaşmaktadır.

### ***3.2.3.1 Yayılı Kaynaklardan Gelen Yüklerin Alıcı Ortamlarda Belirli Bir Seviyenin Altına İndirilmesi***

2021 yılından gerçekleştirilen Marmara Denizi Eylem Planı Koordinasyon Toplantısı'nın ardından açıklanan Marmara Denizi Koruma Eylem Planı yayılı kaynaklar için aşağıda belirtilen adımların atılması konusunda açıklamalar yapılmıştır.

- İyi tarım ve organik tarım uygulamaları ile basınçlı ve damlama sulama sistemleri yaygınlaştırılması,
- Marmara Denizi'yle ilişkili havzalarda, dere yataklarına yapay sulak alanlar ve tampon bölgeler oluşturularak kirliliğin denize ulaşması önlenecek olması,
- Türkiye Çevre Ajansı eliyle Marmara Denizi ile ilişkili tüm havzalardaki denetimlerin uzaktan algılama, uydu ve erken uyarı sistemleri, insansız hava araçları ve radar sistemleri kullanılarak yapılacak olması.

Bu maddeler yayılı kaynaklardan gelen yüklerin azaltılmasında önemli rol oynayacaktır. Birinci maddede geçen iyi tarım ve organik tarım uygulamaları yukarıda bahsedilen ilk basamak olan "Kaynak Kontrolü" basamağı uygulamalarını kapsamaktadır. İyi tarım uygulamalarına çiftçilerin besin maddelerini (gübre) doğru miktarda, yılın doğru zamanında, doğru yöntemle ve doğru

yerleştirmeyle uygulaması ve toprağın (ve içerdiği besinlerin) erozyona ve su yollarına kaybolmaya en duyarlı olduğu zamanlarda tarlalarda çıplak toprak (ekilmemiş alan) dönemlerini önlemek için örtü bitkileri veya çok yıllık türler ekmeleri gereklikleri de eklenmektedir.

### **3.2.3.2 Noktasal Kaynaklardan Gelen Yüklerin Azaltılması**

Noktasal kaynaklardan gelen TN ve TP yüklerinin azaltılması bu yüklerin kaynağına erişimin daha iyi bilinmesinden dolayı yayılı yüklerle göre uygulaması daha kolay olup, teknoloji geliştirme ve gerekli yatırımların yapılması noktasında yayılı kaynaklar gibi yine önemli adımların atılmasını gerektirir. MARAAT Projesi kapsamında Marmara Bölgesi'nde noktasal kaynaklardan kaynaklanan TN ve TP yükleri incelenmiş olup bu inceleme Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024 içerisinde yer almaktadır. **Bu strateji planında özetlendiği gibi Marmara Bölgesi'nde atık su kaynaklı ortalama yük dağılımları İstanbul'un TN ve TP yüklerinin yaklaşık %85'inden sorumlu olduğunu, Balıkesir, Bursa ve Kocaeli ile beraber bu oranların yaklaşık %98'e ulaştığı görölmektedir.**

2021 yılından gerçekleştirilen Marmara Denizi Eylem Planı Koordinasyon Toplantısı'nın ardından açıklanan Marmara Denizi Koruma Eylem Planı Marmara Denizi'nin iyileştirilmesi için çok önemli eylem maddelerini içermektedir. Bu eylem planı maddelerinden TN ve TP yüklerinin azaltılmasına yönelik maddeler belirtilmiş olup bu maddelerin uygulanmaya başlaması noktasal kaynaklardan Marmara Denizi'ne gelen yüklerin azaltılmasında çok büyük rol oynayacaktır. Bugüne kadar yapılan projelerden ortaya çıkan bu maddeler noktasal kaynaklardan yük azaltımı konusunda en önemli adımları içerisinde barındırmaktadır.

### **3.2.3.3 Mevcut Eylem Planı ve Ulusal Mevzuat İnceleme**

Genel olarak değerlendirildiğinde alıcı ortamlarda N ve P azaltılmasına yönelik ilgili mevzuatın uygulamalarının farklı bakanlıklar arasında oluşturulacak iş birliğine bağlı olduğu görölmektedir. Alıcı ortamlarda N ve P azaltılmasına yönelik bu raporda bahsedilen 3 ana süreç mevcut olup bu **süreçler kaynak kontrolü, süreç kontrolü ve son işlem** olarak sınıflandırılmaktadır. İlgili mevzuat ve yönetmelikler incelendiğinde **N ve P azaltılmasına yönelik tedbirler ana olarak kaynak kontrolüne yönelik olup diğer iki süreç hakkında mevzuatta ilgili yönetmelik ve uygulama esasları bulunmamaktadır.** Kaynak kontrolünün çok önemli bir aşama olduğu biliniyor olsa da, toprağa uygulanan N ve P miktarının %100 verimlilikte sadece bitkiler tarafından alınması ve hiç sızıntı olmayacağının ve bunun kontrolünün zor olduğu düşünölmektedir. O yüzden **Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği** (R.G. Tarih: 23 Temmuz 2016, Sayı: 29779) kapsamında yapılacak izleme çalışmalarında bu **verimliliğin de izlenerek belirlenmesi gerekmektedir.** Tarım alanından sızan N ve P'nin alıcı ortama ulaşana kadar azaltılmasına yönelik süreç kontrolü ve son işlem basamaklarında kullanılan tedbirlerin bölgesel bitki üretimi, iklim özellikleri, toprak yapıları göz önüne alınarak uygulanması N ve P'nin alıcı ortamda azaltılması için gerekli görölmektedir.

## 4 GENEL DEĞERLENDİRME, ÖZET VE ÖNERİLER

Marmara Denizi üzerindeki baskı unsurları oldukça çeşitlidir ve gelinen noktada sektörel çözümler yeterli olmamaktadır. Bunun yerine bütüncül ve sorumlulukların paylaşıldığı yaklaşım ve önlemlere ihtiyaç vardır. Bu kapsamda, Marmara Denizi'nin mevcut durumu açısından bütüncül bir değerlendirilmenin ortaya konması, senaryolara dayalı modelleme simülasyonları ile desteklenerek kirlilik yüklerinin azaltım tedbirlerinin alınması, noktasal kirlilik kaynaklarının belirlenmesi, ekosistem temelli yaklaşım esas alınarak Marmara Denizi'nin korunmasına yönelik eylemlerin oluşturulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunun için Marmara'ya özgü ekosistem temelli Marmara Bütünleşik Model Sistemi'nin oluşturulması ve değişen ekolojik özellikleri doğru öngörebilen modellerin kullanımı gereklidir (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017).

MARMOD FAZ II süresince yapılan deniz seferleri; oksijen kaybının sürmekte olduğunu ve sistemin azot-fosfor yüklü durumunun devam ettiğini göstermiştir. MARMOD projesi kapsamında ve ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü tarafından yürütülen diğer Marmara Denizi çalışmalarında belirgin bir iyileşme belirtisi gözlenmemiştir. MARMOD Faz II kapsamında gerçekleştirilen karasal kaynaklı yük hesapları ve toplanan deniz verileri, Marmara Denizi 3B model çalışmasına girdi olarak kullanılmıştır. Karasal azot-fosfor yükleri ve organik girdiler, kaynakları nereden olursa olsun doğu ve kuzeydoğu Marmara'da akümüle olduğu ve en ağır ekosistem tahribatının da bu bölgede gerçekleştiği gözlenmiştir. İstanbul Boğazı güney girişi ve İstanbul güney kıyıları, İzmit, Bandırma ve Gemlik körfezleri saha sonuçları muhtemel en yoğun girdilerin bu bölgelerden gerçekleştiğini göstermektedir.

Modelleme çalışma sonuçları; kuzey ve kuzeydoğudaki noktasal kaynakların azaltılmasını önermektedir. Bu bölgelerdeki noktasal kaynakların etkileri, özellikle kuzeydoğu Marmara'da görülmekte ancak farklı hava koşullarının etkisinde değişen akıntı sistemi nedeniyle tüm Marmara'yı da etkileyebilmektedir.

Bir diğer öneri ise; Susurluk, Biga ve Gönen akarsularından gelen besin yükünün azaltılmasıdır. Susurluk, Gönen ve Biga nehirlerindeki azot seviyeleri çok ciddi bir kirlilik yüküne işaret etmektedir. Havza içinde bulunan düşük arıtma seviyesine sahip tüm atık su tesislerinin iyileştirilmesi ve nehir yataklarına direkt deşarjdan kaçınılması oldukça önemlidir. Ayrıca, atık su deşarjlarının yapay sulak alanlar ile tamponlanması, nehir yatağı boyunca besin tutulumu için 20-100 m vejetasyon tampon bölge uygulaması, nehir ağızlarında ve yatak boyunca uygun alanlarda besin tutulumu için taşkına imkan veren doğal sulak alan restorasyonu seçeneklerinin değerlendirilmesi de bölgeye yönelik çözüm odaklı uygulamalar olarak önerilebilir. Tarım uygulamalarında gübreleme faaliyetlerinin kontrol altına alınması da yönetsel olarak önceliklendirilmesi gereken konulardan biridir.

Özellikle Susurluk Havzası yayılı kaynaklarına yönelik uygun zeminlerde sulak alanların geliştirilmesi, seller sonucu derelerden kaynaklanacak azot yükünü azaltacaktır. Nüfusun yoğun olduğu büyükşehir kentsel atık sularının "reaktif organik madde" içeriğinin mümkün olduğunca

artılarak düşürülmesinin ardından, eğimin uygun olduğu kıyısal alanlarda en az 45m derinlikte alt tabaka sularına deşarjı önerilir.

Sürdürülebilir yönetim için yatırım bütçelerinin çoğu zaman önceliklendirmelere tabi olacağı öngörülebilir. Bu durumda, İstanbul Boğazı bölgesi derin deniz deşarjları da dahil olmak üzere, öncelikle yüksek organik madde artımı sağlayan biyokimyasal arıtma sistemlerine yönelik yatırımların önceliklendirilmesi önerilmektedir. Organik yükten ziyade amonyak yükünün ağır bastığı deşarjlarda ise biyolojik arıtım ve yüksek seviyeli oksijenli amonyak oksidasyonu yeterli olacaktır. Bir miktar alt su yükünün yine de Karadeniz'e ulaşacağı ortadadır. Karadeniz'e ulaşan atık su kaynaklı nitrat iyonları batı Karadeniz'de haloklin tabakasının altında kaldığından ağırlıklı olarak oksijensiz sulara karışmaktadır. Ancak, yine de bu yükün tamamının Karadeniz alt tabakasında kalacağını varsaymak tamamıyla doğru olmayacaktır. ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü tarafından son yıllarda detaylı yapılan çalışmalar, özellikle Boğaz çıkışında hem şelf üzerinde hem de açıklarda dikey ve yatay yönde karışım süreçlerinin etkili olduğunu göstermiştir.

Tüm Marmara Bölgesi'nde ama öncelikle kuzey ve kuzeydoğu Marmara kıyılarında yük azaltım önerileri ise şu şekilde sıralanabilir; noktasal evsel atık deşarjlarının N ve P'den tamamen arıtılması, İzmit, Bandırma ve Gemlik körfezlerinde noktasal sanayi girdilerine dikkat edilmesi, soğutma sularına proses kimyasalları N, P tuzları karışma olasılığına bakılması, varsa regüle edilmesi, oksijen azlığı ve besin tuzu birikiminin en fazla olduğu doğu Marmara (Çınarcık Çukuru, İzmit Körfezi) kıyı bölgelerinin de yeni kıyı yapılaşma projelerinde yağmur suları ile N, P girişini önleyici tasarımlara gidilmesi önerilmektedir.

Yayıllı kaynaklarda üretim aşamasında TN, TP ve organik madde yük azaltım tedbirlerinin geliştirilmesi için sektörel ölçekli projelerin yüksek potansiyelli yüklere öncelik verilerek geliştirilmesi ve pilot uygulamaların yapılması önerilir. Karasal ve deniz alanları ölçüm sonuçlarını içeren veri bankası, Faz III proje çalışması aşamasında gerçekleştirilmesi hedeflenen "Marmara Dijital İkizi" modelinin geliştirilmesi, kalibrasyonu ve farklı senaryoların simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde veri bankası sonuçları kullanılacaktır. Karasal kaynaklı yüklerin orta ölçekli programla azaltılmasının Marmara ekosistemindeki olumlu sonuçlarının öncelikle yılda 2 kez yenilenen üst tabaka ekosisteminde görülmesi beklenir. Su berraklığının artışı ve klorofil bolluğunun azalması öncelikle gözlenecektir. Ancak, yenilenme süresi 10 yıl ötesinde olan derin (500m) sularda oksijensiz koşulların günümüz iklim değişikliği koşullarında oldukça yavaş iyileşme göstereceği ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü uzmanlarının ortak görüşüdür. Bunun doğru tahmini, karada ve denizde yapılan/yapılacak sistematik verilerle sürekli desteklenen 3D "Marmara Dijital İkiz" modelinin sistemi doğru temsil yeteneği ve iklim değişikliği etkisini de içine katan simülasyon sonuçlarından, hangi yük azaltım şartlarında gelişeceğini öngörmek mümkün olacaktır. Bu zorlukların bilimsel çözümü, FAZ III ile sürdürülmesi planlanan MARMOD çalışmasının amacı ve temel hedeflerini oluşturmaktadır.

MARMOD FAZ II kapsamında geliştirilen Marmara Denizi Besin Ağı Modeli sonuçlarına göre; Marmara Denizi biyoçeşitliliğinin korunması için balıkçılık yönetiminde türler arası etkileşimler dikkate alınmalı ve diğer türlerin de popülasyonlarını devam ettirmesine olanak sağlayacak

biçimde avcılığı yapılan türler için kota uygulaması benimsenmelidir. Hedef dışı türlerin avlanmasını önlemek için av araçlarının seçiciliğini artırıcı önlemler alınmalıdır. Ekosistemin sağlıklı işemesi ve balıkçılık yönetimi açısından önemli türlerin korunması için belirli alanlarda koruma alanları oluşturulmalıdır.

## 5 MARMOD FAZIII PROJESİ

Dijital ikiz çalışmalarının devamlılığını sağlamak amacıyla, MARMOD Faz III Projesi Orta Doğu Teknik Üniversitesi- Deniz Bilimleri Enstitüsü koordinasyonunda 10 Temmuz 2024 tarihinde başlamıştır. Proje 2025 yılı sonunda tamamlanacaktır. Proje ile Dijital İkiz bileşenleri geliştirilecek, Marmara Denizimiz gerçeğe en yakın biçimde simüle edilecek, senaryolar artırılacak ve eylem planı önerileri detayları artırılacaktır.

Karasal ve deniz alanları ölçüm sonuçlarını içeren veri bankası, Faz III proje çalışması aşamasında gerçekleştirilmesi hedeflenen “Marmara Dijital İkizi” modelinin geliştirilmesi, kalibrasyonu ve farklı senaryoların simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde veri bankası sonuçları kullanılacaktır. Karasal kaynaklı yüklerin orta ölçekli programla azaltılmasının Marmara ekosistemindeki olumlu sonuçlarının öncelikle yılda 2 kez yenilenen üst tabaka ekosisteminde görülmesi beklenir. Su berraklığının artışı ve klorofil bolluğunun azalması öncelikle gözlenecektir. Ancak, yenilenme süresi 10 yıl ötesinde olan derin (>500m) sularda oksijensiz koşulların günümüz iklim değişikliği koşullarında oldukça yavaş iyileşme göstereceği öngörülmektedir. Bunun doğru tahmini, karada ve denizde yapılan/yapılacak sistematik verilerle sürekli desteklenen üç boyutlu “Marmara Dijital İkiz” modelinin sistemi doğru temsil yeteneğine bağlıdır. İklim değişikliği etkisini de içine katan simülasyon sonuçlarından bu iyileşmenin hangi yük azaltım şartlarında gelişeceğini öngörmek mümkün olacaktır. Bu zorlukların bilimsel çözümü, FAZ III ile sürdürülmesi planlanan MARMOD çalışmasının amacı ve temel hedeflerini oluşturmaktadır.



## REFERANSLAR

- Baştürk, Ö., Tuğrul, S., Yılmaz, A., Saydam, C., 1990. Health of the Turkish Straits: Chemical and Environmental Aspects of the Sea of Marmara. METU-Institute of Marine Sciences, Technical Report, No.90/4, ERDEMLI, İçel, 69 pp.
- Beşiktepe, Ş., 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, 285-334.
- Casciotti, K.L., T.A. Marshall, S.E. Fawcett, and A.N. Knapp. 2024. Advances in understanding the marine nitrogen cycle in the GEOTRACES era. *Oceanography*37(2):85–101.
- ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017. Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi: Faz I Proje Final Raporu (MARMOD-Faz I), Ankara.
- ÇŞİDB, 2021. Marmara Denizi Havzası Noktasal Kirlilik Yüklerinin Tespiti (MARAAT) Projesi.
- ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021. Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi FAZ II Projesi (MARMOD - FAZ II) 2021 Yılı Ara Raporu, Ankara.
- ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2022. Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi FAZ II Projesi (MARMOD - FAZ II) 2022 Yılı Değerlendirme Raporu, Ankara.
- ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2023. Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi: Faz II Projesi Final Raporu (MARMOD-Faz II), Ankara.
- Ediger, D., Beken, C., Yuksek, A., & Tuğrul, S., (2016). EUTROPHICATION IN THE SEA OF MARMARA. *SEA OF MARMARA: MARINE BIODIVERSITY, FISHERIES, CONSERVATION AND GOVERNANCE*, vol.42, 723-736.
- Madec, G. and the NEMO System Team, 2023. NEMO Ocean Engine Reference Manual, Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.8167700>
- ODTÜ-DBE, ÇŞB, 2021. Marmara Denizi Müsilaj Çalışması Ön Değerlendirme Raporu, Ankara, Türkiye, 103s .
- ODTÜ-DBE, ÇŞİDB, 2022. Marmara Denizi Müsilaj Çalışması Ön Değerlendirme Raporu, Ankara, Türkiye, 127s.
- Öztürk B., Öztürk A. A., 1996. in: Dynamics of Mediterranean straits and channels., Birand F, Editor, Ciesm Science Series, Monako, pp.205.
- Öztürk B., Öztürk A. A., 1996. in: Dynamics of Mediterranean straits and channels., Birand F, Editor, Ciesm Science Series, Monako, pp.205.
- Polat, Ç. ve S. Tuğrul. 1995. Nutrient and Organic Carbon Exchanges between the Black and Marmara Seas through the Bosphorus Strait. *Cont. Shelf Res.* 15 (9): 1115-1132.
- Polat, Ç., Tuğrul, S., Çoban, Y., Baştürk, Ö., Salihoğlu, İ., 1998. Elemental composition of seston and nutrient dynamics in the Sea of Marmara. *Hydrobiologia*, 363, 157-167.
- Tüfekçi V., Balkıs N., Beken C.P., Ediger D. and Mantıkçı M. 2010. Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara. *Turk J Biol*, 34: 199-210.
- Ünlülata, Ü., Oğuz, T., Latif, M. A., & Özsoy, E., 1990. On the physical oceanography of the Turkish Straits. The physical oceanography of sea straits, 25-60.
- Yücel, M. vd., 2023. “MARMOD Projesi ile Yeni Oşinografik Yaklaşımlar Işığında Marmara Denizi'nde Oksijensizleşme ve Müsilajın Yayılımı”. *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*. Yıl: 2. Sayı: 3. ss. 58-72.
- Yücel, M., Özkan, K., Fach, B., vd. 2021. Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Editörler: Öztürk, İ., Şeker, M. Turkish Academy of Sciences, Ankara.
- <https://marmarahepimizin.csb.gov.tr/>
- <https://marmod.ims.metu.edu.tr/>

