

THE STUDY OF DEOXYGENATION AND MUCILAGE FORMATION IN THE MARMARA SEA USING NOVEL OCEANOGRAPHIC APPROACHES IN THE FRAME OF MARMOD PROJECT

Mustafa YÜCEL

Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: myucel@ims.metu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7478-902X>

Evrin KALKAN TEZCAN

Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: evrimkalkan@ims.metu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-7713>

Hasan ÖREK

Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: orek@ims.metu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2957-0934>

Bettina FACH

Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: bfach@ims.metu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4688-1918>

Devrim TEZCAN


Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: devrim@ims.metu.edu.tr


 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4137-9101>

Sinan ARKIN

Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: sinan.arkin@icloud.com

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7805-4015>


Ehsan SADIHGRAD
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: ehsan@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2031-9989>


Ali Osman ACAR
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: aliacar@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9813-8387>


Mustafa MANTIKÇI
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: mantikci@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9492-2166>

Korhan ÖZKAN
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: okorhan@metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1911-6508>

Koray ÖZHAN
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: koray@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0189-3993>

Sinan HÜSREVOĞLU
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: shusrev@gmail.com
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0548-9979>

Yeşim AK ÖREK
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: yesimak@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0331-8033>

Süleyman TUĞRUL
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: tugrul@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3234-0961>

Barış SALİHOĞLU
Dr., ODTÜ, Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli, Mersin
Mail: baris@ims.metu.edu.tr
 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-7713>

ABSTRACT

The Marmara Integrated Modelling System Project (MARMOD) is funded by the Ministry of Environment, Climate Change and Urbanization of Turkey and coordinated by METU Institute of Marine Sciences. The project is implemented in two phases - Phase 1 (2017-2018) and Phase 2 (2021-ongoing) and aims to uncover the factors leading to deoxygenation and mucilage formation and strives to develop ecosystem-based solutions. In the frame of Phase 1, marine data of the last four decades have been compiled, deoxygenation trends in deep basins have been established and nutrient load reduction proposals have been developed based on a 1-D model. In Phase 2, marine expeditions and mucilage investigations have been undertaken with the development of a new three dimensional Marmara Digital Twin. According to MARMOD results, eutrophication conditions continue with the accompanying deoxygenation, collectively forming the basis for mucilage events. Marmara Sea is still resisting to pressures and only with the implementation of the Marmara Sea Action Plan the ecosystem degradation can be reversed. We propose that at least a 50% reduction in nutrient loads is needed for the start of improvement. With MARMOD's Marmara Digital Twin a state of art, nationally-developed decision support tool will be available to policy makers.

Keywords: Sea of Marmara, Mucilage, Dissolved Oxygen, Ecosystem Models, Oceanography, Digital Twin.

Makale Atıf Bilgisi: Yücel, M.-Tezcan, E. K. vd. (2023). "MARMOD PROJESİ ile Yeni Oşinografik Yaklaşımlar Işığında Marmara Denizi'nde Oksijensizleşme ve Müsilajın Yayılımı". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*. Yıl: 2. Sayı: 3. ss. 82-96.

Makale Türü: Araştırma
Geliş Tarihi: 13.11.2022
Kabul Tarihi: 25.12.2022
Yayın Tarihi: 31.01.2023
Yayın Sezonu: Ocak 2023

MARMOD PROJESİ İLE YENİ OŞİNOGRAFİK YAKLAŞIMLAR IŞIĞINDA MARMARA DENİZİ'NDE OKSİJENSİZLEŞME VE MÜSİLAJIN YAYILIMI

Mustafa YÜCEL
Evrım KALKAN TEZCAN, vd.

ÖZ

Marmara Denizi'nde oksijensizleşmeye ve müsilaj oluşumuna neden olan faktörlerin belirlenip ekosistem tabanlı çözüm önerileri geliştirmeyi amaçlayan Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Projesi (MARMOD) Faz I (2017-2018) ve Faz II (2021-sürüyor) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü koordinasyonunda yürütülmektedir. Projenin ilk fazında son 40 yılın verileri derlenmiş, Marmara Denizi derin basenlerindeki oksijensizleşme trendleri ortaya konmuş ve 1-B model ile çözüm önerileri, yük azaltım senaryoları ile ortaya konmuştur. İkinci fazda bu çalışma deniz seferleri, müsilaja özel analizler ile 3-B Dijital İkiz geliştirme çalışmaları ile devam etmektedir. MARMOD Projesi sonuçlarına göre denizin azot-fosfor yükü durumu, aşırı organik madde fazlalığı ve oksijen azlığı probleminin devam etmekte olduğu ve bunların müsilaja da neden olan temel sorunu oluşturduğu bir kez daha önümüzde belirmektedir. Marmara Denizi çevresel baskılara direnmektedir. Ancak yürürlüğe konulan Marmara Denizi Eylem Planı'nın uygulanması ile beraber ekosistem sağlığının geriye çevrilmesi mümkün olacaktır. Karasal kaynaklı azot ve fosfor yüklerinin en az % 50 oranında azaltımı asgari bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen MARMOD Dijital İkizi Marmara Denizi'nin sağlığına kavuşma yollarını planlayacak, bilimsel olarak en yeni modelleri içeren, özgün ve milli bir karar destek aracı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Marmara Denizi, Müsilaj, Çözünmüş Oksijen, Ekosistem Modeli, Oşinografi, Dijital İkiz.

Marmara Denizi Genel Özellikleri

Marmara Denizi kendine özgü yapısı ile öne çıkan denizlerden biridir. Marmara Denizi ortalama 40 metre derinlikli İstanbul Boğazı ile Karadeniz'e ve 80m 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 oluşan Marmara'da, maksimum derinliğe (1270m) Doğu Marmara'daki Çınarcık Baseni'nde ulaşılır. Karadeniz ve Ege Denizi-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: 608; Beşiktepe ve diğ., 1994: 49). Bu farklılıklar Marmara Denizi'ni yer yer daha hassas bir ekosistem haline getirmektedir (Öztürk ve Öztürk, 1996: 250; Yücel ve diğ., 2021: 268).

Marmara Denizi, İstanbul ve Çanakkale Boğazları'ndan oluşan Türk Boğazlar Sistemi (TBS) Karadeniz ile Akdeniz arasındaki etkileşimi sağlayan, su, ısı ve kütle taşınımının yanı sıra kıtalar ve denizler arasında taşımacılık ve enerji geçişlerini denetleyen bir yapıdır (Yücel ve diğ., 2021: 268).

Marmara Denizi Karadeniz ve Akdeniz arasında bir geçiş denizi olması ve dolayısıyla iki tabakalı bir yapıda olması ile doğal bir laboratuvardır. Marmara Denizi, kıyısında Türkiye'nin 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: 136). Marmara Denizi'ni çevreleyen Marmara Bölgesi'nin nüfusu Türkiye nüfusunun %30'undan daha fazladır. Sanayi ve ticaretin yoğun olması nedeniyle, nüfus artış hızı da Marmara Bölgesi'nde daha fazladır. Bu da Marmara Denizi üzerinde tarımsal, ticari ve endüstriyel etkinlikler başta olmak üzere insan kaynaklı baskıların artmasına neden olmaktadır (Yücel ve diğ., 2021: 268).

Marmara Bütünleşik Model Sistemi (MARMOD) Projesi

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 değerlendirmenin 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 simüle edebilen modellerin kullanımı gereklidir (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deniz Bilimleri Enstitüsü (ODTÜ-DBE), 1980'li yıllardan bu yana yürüttüğü farklı projeler kapsamında Marmara Denizi'nden veri toplamaktadır. Veriler incelendiğinde 2000'li yıllara kadar olan dönemde Marmara'nın derin havzalarında birçok deniz canlısının tolere edebileceği miktarda ($>80 \mu\text{mol/L}$, hipoksi sınırı) çözünmüş oksijen olduğu görülmektedir. Ancak ilerleyen yıllarda bu çözünmüş oksijen seviyelerinde önemli bir azalma göze çarpmaktadır (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136; ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021: 91; ODTÜ-DBE, ÇŞİDB, 2021: 103). Oksijen değerleri hipoksi sınırının altına inmiştir. Ayrıca, Marmara Denizi'nin özellikle yaz ve sonbahar döneminde ara tabaka olarak geçen ve 25-40m derinlik aralığını kapsayan bölümde çözünmüş 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: 136; ÇŞİB, ODTÜ-DBE, 2021: 91).

1990'ların başında gözlenen, deniz canlılarının yaşamı için önemli olan çözünmüş 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: 136; ÇŞİDB, ODTÜ-DBE, 2021: 91). Bunun nedenleri arasında, Karadeniz'den Tuna yolu ile gelen besin yüklerinin etkisi ve nüfus yoğunluğu ile endüstriyellemenin artmasına paralel yükselen kara girdileri en önemli olanlardır. 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: 268).

Marmara'daki kirlilik kaynaklarının yönetim eksikliği bölgenin mevcut durumundan anlaşılmaktadır. Bunun sonucunda, Marmara alt tabaka suları, geçen 20 yılda daha da oksijensiz hale gelmiştir. Özellikle doğu bölgesi derin baseninde oksijen seviyesi % 95 azalmış, $9.4 \mu\text{M}$ 'in altına kadar düşmüş ve 2016 Sonbahar döneminde 600m'nin altındaki derin sularda oksijensiz koşullar dahi gözlenmeye başlanmıştır (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136; Yücel ve diğ., 2021: 268).

Son dönemde derin çukurda 500m'nin altında oksijenin tükendiği, denitrifikasyonun (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 yüzeyden derine çökelen organik maddenin alt suda parçalanmasının havalı arıtma/oksidasyonu için oksijen girdisi yetersiz kalmıştır (ODTÜ-DBE, 2021: 103; Yücel ve diğ., 2021: 268).

MARMOD FAZ I

Marmara Denizi için yapılan bu değerlendirmeler karşısında T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2017 yılında acil alınması gereken tedbirleri belirlemek amacıyla Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD) Projesi-Faz I çalışmalarını başlatmıştır. Burada en önemli hedef, Marmara'da 1-boyutlu modeller yardımıyla Akdeniz'den gelen oksijenli sular ile Karadeniz ve karasal kökenli yüklerin farklı derinlik tabakalarında etkileşimlerinin çözümlenmesi olmuştur (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

MARMOD Projesi Faz I kapsamında öncelikle tarihsel veriler kurumlar arası iş birliği sayesinde toplanmış ve güncel verilerle son durum ortaya konmuştur. 2010 öncesi döneme göre son 15 yılda basende ciddi bir oksijen azalması olduğu görülmüştür. Mevcut durumda Boğazlar Sistemi ile Marmara'ya taşınan ve Marmara'dan çıkan besin yükleri de 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 (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

MARMOD FAZ I Sonuçları

MARMOD Faz I sonuçları ile Marmara Denizi'nin rehabilitasyonu için tüm Marmara Baseni'ni içine alacak bir rehabilitasyon planı gerekliliğini ortaya konmuştur (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136). Tek boyutlu model ileriye dönük olarak Marmara derin baseni ortalama koşulları için 6 yıllık bir süre için çalıştırılmış, modelin günümüz koşullarını çok iyi simüle ettiği görülmüştür. Buna göre karışım tabakasının altındaki ortalama oksijen konsantrasyonu 40 mikromolar olarak ortaya çıkmıştır. Marmara derin baseni için tarihsel veriye dayanarak referans koşul olarak belirlenen ve aynı zamanda yüksek organizmalar için hipoksiye tolerans alt sınırı olarak kabul edilen 80 μM değerinin çok altında olan bu değer kritik eşiğin üzerine çıkabileceği konusunda yönetim planlarına destek olması için çeşitli senaryo model çalıştırmaları uygulanmıştır (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

MARMOD Faz I Projesi model sonuçları Karadeniz'den gelen tüm yükler ortadan kaldırılsa dahi Marmara Denizi dip suları hipoksi eşiğini 6 yılda geçemeyeceğini göstermiştir. Ancak Karadeniz'den gelen yüklerle birlikte boğaz alt suyuna verilen yükler ortadan kaldırıldığında istenen düzeye yaklaşan bir iyileşme görülmüştür. Karadeniz'den gelen yüklerle bir müdahalenin söz konusu olmayacağı varsayıldığında, Marmara Denizi oksijen miktarını arzu edilen seviyelere getirmek için karasal yüklerin azaltılması en öncelikli önlem olarak öne çıkmıştır. Görece olarak Marmara'yı en fazla etkileyen girdilerin karasal kaynaklı olduğu görülmekte, bunu sırasıyla Karadeniz'den gelen yükler ve boğaz alt suyuna yapılan deşarjlar takip etmektedir. Boğaz alt suyuna verilen

deşarjlar konusunda da alınacak önlemlerin Marmara Denizi ekosisteminin iyileştirilmesinde önemli etkisi olacağı model sonuçlarında görülmüştür (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

Ayrıca Susurluk Havzası'nda öncelikli olmak üzere yaygın olarak akarsu kenarı tampon bölge uygulamasına geçilmesi, İstanbul öncelikli olmak üzere kentsel atıkdeşarjlarının hızla en verimli şekilde artırılmasına imkan verecek yatırımlar yapılması vedeşarj noktalarının hassas Marmara ekosistemini en az etkileyecek şekilde seçilmesi ve uzun vadede yük azaltımlarına imkan verecek planlama (tarım ve gübre kullanımı yönetimi, kentsel alanlardan yüzeysel su/yağış akışı ile gelen yüklerin yönetimi gibi) ve uygulama çalışmalarının yapılması Marmara Denizi'nin ekolojik olarak sürdürülebilir yönetimi için ivedikle alınması gereken önlemler olarak önerilmiştir (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

Marmara Denizi'ne özgü, oksijen seviyelerini kritik eşikğin üzerine çıkarabilecek çevresel yönetim ve ekolojik yaklaşımlı besin yükü azaltım planları oluşturulmuştur. Marmara Denizi oksijen seviyeleri ve bu seviyeleri etkileyen faktörlerle ilgili birçok bilinmeyene ilk kez ışık tutulmuştur. (ÇŞB, ODTÜ-DBE, 2017: 136).

MARMOD FAZ II

MARMOD FAZ I projesi ile elde edilen sonuç ve önerileri daha da detaylandırmak ve geliştirmek amacı ile T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü ile iş birliği içinde projenin ikinci aşaması olan MARMOD FAZ II Projesi 2021 yılında başlatılmıştır ve çalışmaları sürdürülmektedir. Projenin bu aşamasında gerek yeni gözlemler gerekse 3-boyuta taşınan modeller sayesinde Marmara Denizi'ne taşınan yükler hakkında daha güvenli ve alt bölgeler için detaylandırılmış, önümüzdeki dönemlerde bölgesel çaplı yönetim planları hazırlanırken temel alınabilecek öneriler geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, ekosistem yaklaşımlı 3-boyutlu Marmara Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD) geliştirilecektir. Okyanus sistemlerinde ve Karadeniz'de uygulanabilirliği doğrulanmış ekosistem temelli model, iki tabakalı Marmara Denizi ekosistemine adapte edilecektir.

İlk fazda yapılan analizler güncel havza kaynaklı besin yükü tahminlerinin gerçek değerlerden büyük oranda düşük olduğuna işaret etmektedir. Karasal, noktasal ve yayılı kaynaklardan gelen yüklerin daha tutarlı tahminlerini yapmadan başarılı uygulama stratejileri hayata geçirmek özellikle orta ve uzun vadede mümkün değildir. Bu nedenle MARMOD projesinin ikinci fazında seçilen pilot alanlarda, havza kaynaklı besin yüklerinin yüksek alansal ve zamansal ölçekte ortaya koyacak saha çalışmaları ile bu çalışmaların sonuçları kalan alanlara yansıtılarak daha tutarlı besin yükü tahminleri yapılması planlanmaktadır. Su

bütçelerinin güncellenip besin yükü ve oksijen alışverişlerinin belirlenmesi ve model öngörülerini iyileştirecek şekilde tasarlanan yeni saha çalışmalarının yapılması ile mevcut öngörü kapasitesinin daha da artacağı öngörülmektedir.

MARMOD FAZ II İlk Bulgular ve Müsilaj Olayı

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 kıyısız alanlarda insanları şaşırtacak derecede yoğunlaşmıştır (Yücel ve diğ., 2021: 268).

Deniz salyası ya da bilimsel adıyla 'müsilaj' 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: 268). Sümüksü yapısı dolayısıyla özellikle 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: 268). Marmara Denizi'nde müsilaj olayı 2007 yılında ilk kez raporlanmıştır (Tüfekçi ve diğ., 2010: 11).

Haziran 2021'de ODTÜ-Deniz Bilimleri Enstitüsü'ne ait olan R/V Bilim-2 MARMOD FAZ II projesi kapsamında ilk planlı seferini gerçekleştirmek üzere Marmara Denizi'ne gitmiştir. Ancak neredeyse tüm Marmara'ya yayılan müsilajı ve etkilerini yerinde gözlemleyip anlamak, su kolonu içindeki dağılımını araştırmak için T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile koordineli olarak yaklaşık bir ay süresince R/V Bilim-2 gemisi ile Marmara'da araştırmalara devam edilmiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞİB, 2021: 103).

2021 yılında R/V Bilim-2 ile gerçekleştirilen araştırma seferlerinde (Haziran, Temmuz ve Eylül aylarında), müsilaj olayının ortaya çıkışı, yayılımı ve ortadan kalkması denizel parametreler ile takip edilmiştir. 2021 yılı müsilaj olayının çıkış nedenlerinin anlaşılmasına yönelik gerçekleştirilen araştırma seferinde hem sensör verileri ile varlığını belli eden hem de ağ örneklemeleri ile yoğun biçimde tespit edilen, özellikle 10-25m derinliklerde sıkıştığı gözlemlenen müsilaj tabakaları Eylül (2021) ayında gözlenmemiştir. Derin su örneklerinde ve 20-50m arası çeşitli yüzey ve sediman örneklerinde de herhangi bir müsilaj oluşumuna rastlanmamıştır. Ayrıca, Çanakkale Boğazı ve Ege Denizi çıkışından da örneklemeler yapılmış ve müsilaj oluşumuna rastlanmamıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞİB, 2021: 103).

İlk analizlere göre, daha da önce yüzey tabakada sıkıştığı gözlemlenen müsilajın bir bölümü bu tabakada aktif olan batı yönlü Karadeniz kökenli akıntı ile Çanakkale Boğazı'ndan çıkış yapmış, ancak ara tabakada bir kısmı kalmıştır. Burada oksijenli

solunum yapan bakteriler tarafından bozunmaya uğramıştır. Eylül ayı (2021) çalışmasında kıyasal (<20-30 m derinlik) bölgeler hariç, müsilajın ara tabaka altına geçtiğine dair bir bulguya rastlanmamıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞİB, 2021: 103).

Müsilaj dönemi (Haziran 2021) ve sonrası (Eylül 2021) oksijen ölçüm değerleri karşılaştırıldığında ise Marmara Denizi ara tabaka geçiş (20-100 m) sularının Haziran ayındaki seviyelerden daha az çözünmüş oksijen içerdiği görülmüştür. Özellikle Çınarcık Baseni de denilen Doğu Marmara Denizi ve İzmit Körfezi'nde 80 µM değerinde olan hipoksi eşiği Haziran sonunda bu bölgelerde 28-30m sınırındayken 22-25m derinliğe kadar yükselmiştir. Bu da eğer yeni oksijen içeren su girdisi olmaz ise hem yaz sonu tabakalaşması hem de yukarıda bahsedilen müsilajın da dahil olduğu organik birikimin bakteriyel çözünmesi ile yüzey sularının ciddi oksijen baskısı altına gireceğini göstermiştir. Marmara'nın daha derin sularında (>200m) ise devam eden çok düşük oksijen seviyeleri büyük bir değişiklik göstermeden devam etmiştir (ODTÜ-DBE, ÇŞİB, 2021: 103).

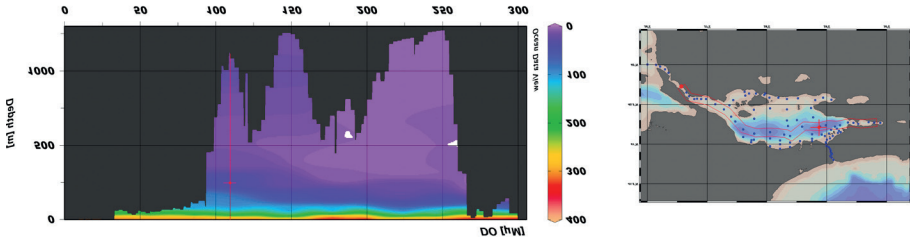
Ayrıca Eylül çalışmasında, Haziran ayında gözlenmeyen bir olgu olarak özellikle Erdek Körfezi, Marmara Adası civarı ve Susurluk Nehri Deltası'nın önünü temsil eden güney sahanlıkta 30-100m bandında ara tabakaya oksijen girdisi ve yeni su girişi tespit edilmiştir. Yapılan üç adet güney-kuzey yönlü Scanfish kesitleri ile bu su girişinin özellikle güneye yeni oksijen pompaladığı, ama orta ve Kuzey Marmara'ya bir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Güney Marmara'ya bu yeni oksijen girişinin özellikle Gemlik Körfezi'ne kadar uzandığı tespit edilmiştir. Müsilajın etkilerini, bu yeni Akdeniz su girişi o bölgelerde bir nebze hafifletmiştir. Bunların yanında, derin basende hep gözlemlenen 400-700 m arası Akdeniz suyu kaynaklı küçük bir oksijen girişinin devam etmekte olduğu gözlenmiş ve Çanakkale Boğazı'ndan giren Akdeniz suyunun Marmara'yı hala ayakta tuttuğu çıkarımı yapılmıştır (ODTÜ-DBE, ÇŞİB, 2021: 103).

2022 Yılı-Son Durum Değerlendirmesi

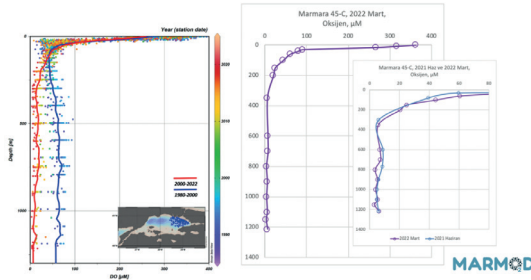
2022 yılında Mart ve Mayıs dönemlerinde iki araştırma seferi daha gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma seferlerinde de süregelen bir trend olan oksijen azalmasının yapılan ölçümlerle devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 1). Mayıs -2022 ile müsilaj olayının sürdüğü Mayıs/Haziran-2021 dönemleri karşılaştırıldığında; yıllardan beri oksijen azlığı sorunu ile bugün de mücadele etmekte olan Marmara Denizi'nin ara tabaka geçiş suları (20-100 m) ve derin sularının daha fazla oksijen içermediği görülmektedir. Oksijen azlığı bütün Marmara baseninde devam etmektedir ve meydana gelen müsilaj olayının geride bıraktığı oksijen faturasının Marmara Denizi'ni etkilemeye devam ettiği anlaşılmaktadır. Çanakkale Boğazı kaynaklı oksijence zengin dip akıntının kış koşulları ile ilgili şekilde zayıf kaldığı

gözlemlenmiş, özellikle Doğu Marmara derin sularına 2021'e kıyasla daha da az oksijen girişi olabileceği bulunmuştur (Şekil 2). 2022'de devam edecek olan araştırma seferleri ile bu süreç yakından izlenecektir.

2021'e göre 2022 yılında da Marmara Denizi'nin azot ve fosfor besin tuzları ile yüklü hali devam etmektedir. Sadece Doğu Marmara'da derin sularda bir azot kaybı oluşmaya başlamıştır. Bunun nedeni muhtemelen anoksiyaya bağlı mikrobiyal denitrifikasyon süreçleridir (Şekil 3). Bahar aylarında artan birincil üretim ile beraber birincil üretimin 25m ve üstünde yoğunlaştığı ise tüm basendeki floresans ölçümlerinden anlaşılmaktadır (Şekil 4). Yüzeysel üretimin özellikle Çınarcık Çukuru merkezli bir alanda yoğunlaştığı ve İzmit iç Körfezi'nde ciddi bir üretim olduğu görülmüştür (Şekil 4). İzmit İç Körfezi'ndeki üretimin aşırı besin tuzu yükünden dolayı olduğu düşünülmektedir. Çınarcık Çukuru civarındaki üretimin ise, İstanbul Boğazı'ndan çıkan jetin etkisi ile birleşen bir döngüden kaynaklanmaktadır. Büyükçekmece ve Küçükçekmece'den çıkan görece az tuzlu suların batıya doğru uzandığı tespit edilmiştir. Bu akı hattı boyunca üretim olmaması, akının yeni olduğunu düşündürmektedir (Şekil 5). Marmara baseni bu dönemde Kapıdağ Yarımadası doğu ucundan kuzeyde Tekirdağ'a doğru uzanan bir hat boyunca ikiye ayrılmıştır. Bu durum İstanbul Boğazı ile Kapıdağ Yarımadası arasında oluşan büyük döngü nedeni ile olmaktadır. Bu döngü yüzeysel sularını bu sınırlar içinde kendi içinde döndürmektedir. Bu durum ise İzmit Körfezi'ndeki suların zaman zaman körfez içine hapsolmesine neden olmaktadır.

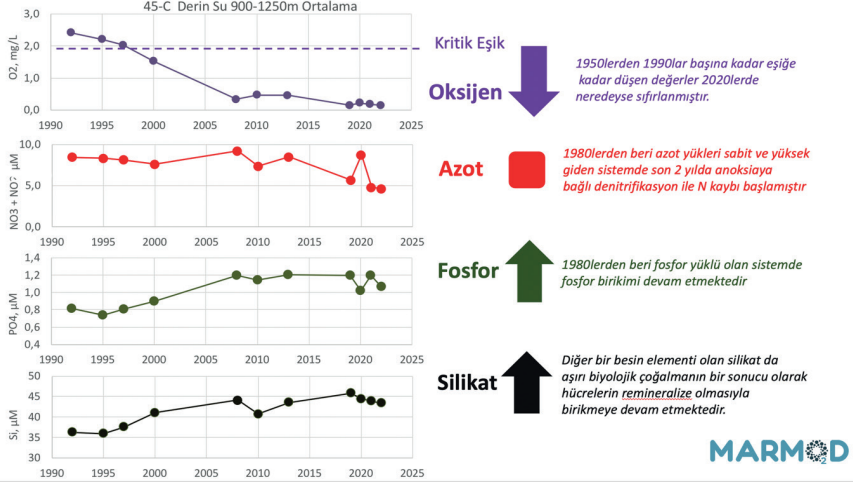


Şekil 1. 2022 Mart sonu/Nisan başı itibariyle Marmara Denizi çözünmüş oksijen haritası.

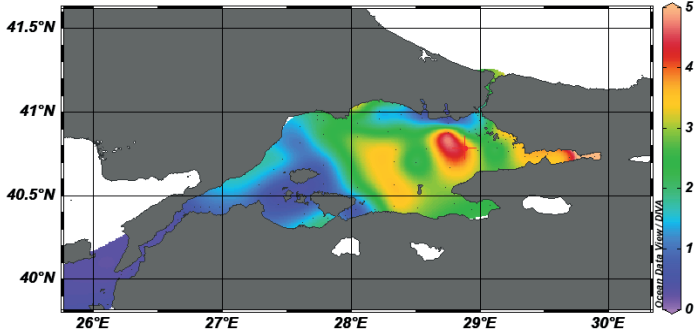


Şekil 2. Sol panel: Marmara'da uzun dönem (1980'den beri) oksijen kaybı ile Sağ panel: 45-C istasyonu özelinde 2022 ile 2021 oksijen durumunun kısa vadeli karşılaştırılması.

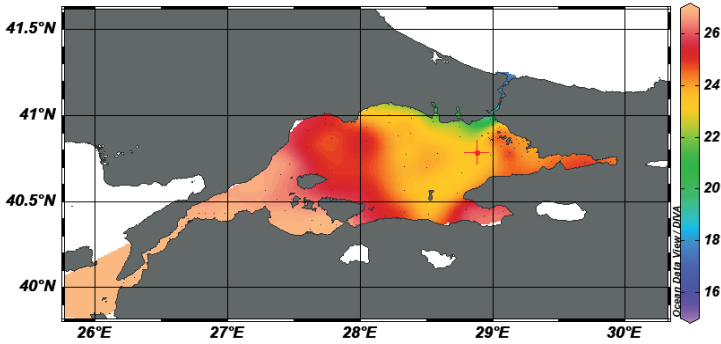
En Derin Sularda Uzun Vadeli Azot-Fosfor Değişimleri



Şekil 3. 2022 Mart sonu/Nisan ayı en derin sularda uzun vadeli oksijen ve besin tuzları değişimleri (R/V Bilim-2 verileri de dahil edilmiştir. Marmara Denizi oksijen kaybı ve azot-fosfor yüklü durumu 2022'de de korumaktadır.)



Şekil 4. 2022 Mart sonu/Nisan başı yüzey floresans dağılımı (ÇŞİB, ODTÜ-DBE, 2022: 203).



Şekil 5. 2022 Mart sonu/Nisan başı yüzey tuzluluk dağılımı (ÇŞİB, ODTÜ-DBE, 2022: 203).

Müsilaj ve Sonrası Genel Değerlendirme: Marmara Dijital İkizi ile Yeni bir Karar Destek Sistemine Doğru

Marmara Denizi, özellikle 1980'li yılların başından beri Marmara Bölgesi havzası kıyasal alanda yoğunlaşan hızlı kentleşme ve artan endüstriyel faaliyetlerin ürettiği atık suların doğrudan etkisi altında kalmaktadır. Alt tabaka oksijence zengin Akdeniz suyu ile beslense de, yüzey ve dip tabakası arasındaki güçlü yoğunluk farkı sonucu oluşan keskin haloklin, yüzeyden alt tabakaya oksijen girişini özellikle ilkbahar-sonbahar dönemlerinde sınırlamaktadır.

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 Boğazi'nden 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. MARMOD Faz II Projesi 2022'deki çalışmaları tamamlandığında bu mevsimsel dinamik daha net ortaya konabilecektir.

MARMOD Faz 2 Projesi kapsamında yapılan mevsimsel seferler ve geliştirilecek Dijital İkiz ve 3-boyutlu hidrodinamik-biyojeokimyasal model ile Marmara Denizi sağlığını etkileyen kısa dönemli dinamikler daha iyi çözümlenebilecektir. Ancak bu çalışmalar olgunlaştıktan sonra yeni bir müsilaj oluşumu ya da Marmara Denizi'ni etkileyebilecek yeni riskler ile ilgili bilimsel bazlı cevapları bulmak mümkün olabilecektir. Marmara Denizi'nde müsilaj oluşumunun nedeni, etkileri, oluşumunu tetikleyen faktörlerin ne olduğu ve önlenmesine yönelik öneriler ayrıntılı olarak çalışılmaya devam edilmektedir.

Dijital ikizler, doğal sistemlerin sayısal bir kopyasını barındırmaktan da öte doğa-iklim-insan etkileşimini de içerecek şekilde süreçleri ve senaryoları da içermekte, kullanıcılara salt bir modelden öte sistemin dinamiklerini ilk elden deneyimleme kavramını içermektedir (Şekil 6). MARMOD -FAZ II kapsamında 2021'de görülen müsilaj sonrasında Marmara Denizi için fiziksel, biyojeokimyasal ve ekosistem modüllerini içeren 3-boyutlu bir model geliştirilmiştir. Fiziksel oşinografik model ve TURSEM'in (Türk Denizleri için geliştirilen ekolojik

model) testleri tamamlanmış, Dijital İkiz'in tüm modüllerinin ise 2023 yılının sonuna kadar tamamlanması hedeflenmektedir. Marmara Denizi'ne taşınan kirlilik yüküne ilişkin tüm verileri girerek oluşturulacak Dijital İkizi sayesinde Marmara Denizi'nde yaşanan müsilaj ve diğer kirlilik problemlerini oluşmadan engellemeyi, iyi kalite deniz ekosisteminin tekrar gelişmesini, biyolojik çeşitliliğin artırılmasını ve Marmara Denizi'nde ekolojik dengenin korunması hedeflenmektedir.



Şekil 6. Marmara Denizi Dijital İkizi şeması

Marmara Denizi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, Marmara Denizi ekosisteminin geç olmadan iyileştirilmesi ve çözüm önerileri üretilebilmesi ancak bütünlükçü Deniz Bilimleri yaklaşımı ile gerçekleşebilir. Bu kapsamda, Marmara Denizi'nin mevcut durumu ortaya konmuş, Marmara Denizi'nin karşı karşıya kalacağı ekolojik problemlere yönelik çalışmalar ise ayrıntılı şekilde sürdürülmektedir. Özellikle Marmara Denizi'nin karşı karşıya olduğu oksijensizleşme problemi ve bu temel değişimin ana kaynaklarını gözlem ve model simülasyon sonuçlarıyla MARMOD Faz II Projesi kapsamında anlama ve çözüm önerilerini oluşturma çalışmaları devam etmektedir. Yayılı ve noktasal kaynak girdilerinin hızla azaltılması, balıkçılık faaliyetlerinin ekosistem öncelikli yaklaşımla düzenlenmesi ve geniş bir paydaş katılımı ile oluşturulan, bilimsel tabanlı Marmara Denizi Eylem Planı sabır ve kararlılıkla uygulanması Marmara Denizi için elzemdir. 2023 yılı sonunda projenin tamamlanması ile

uygun yönetmelikler çerçevesinde atık sularda gerekli yük azaltım önerileri sunularak Marmara Denizi'nin su kalitesinin ekolojik temelli geliştirilmesine katkı sağlanacaktır.

Kaynakça

Beşiktepe, S., Sur, H.İ., Özsoy, E., Latif, M.A., Oğuz, T. ve Ünlüata Ü. (1994). "Circulation and hydrography of the Marmara Sea". *Progress in Oceanography*, Sayı: 34, 285 – 334.

ÇŞB, ODTÜ-DBE (2017). Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi: Faz I Proje Final Raporu (MARMOD-Faz I), Ankara.

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.

ODTÜ-DBE, ÇŞB (2021). *Marmara Denizi Müsilaj Çalışması Ön Değerlendirme Raporu*, Ankara, Türkiye, 103s.

Tüfekçi V., Balkıs N., Beken C.P., Ediger D. ve Mantıkçı M. (2010). "Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara". *Turkish Journal of Biology*, Sayı: 34, 199 – 210.

Öztürk, B., Öztürk, A. A., (1996). "On the biology of the Turkish straits system. In: Dynamics of Mediterranean Straits and Channels". *No spécial 17*, 205-221. Briand, F. (Ed.). Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco.

Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A. ve Özsoy E. (1990). On the physical oceanography of the Turkish Straits, In: L.J. Pratt (Ed) *The Physical Oceanography of Sea Straits*, NATO/ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 25-60.

Yücel, M., Özkan, K., Fach, B., ve diğ. (2021). "Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri". Editörler: Öztürk, İ., Şeker, M. *Turkish Academy of Sciences*, Ankara.