Önsöz

Marmara Denizi ekosistemi bölgede aşırı artış gösteren nüfus, şehirleşme, sanayi, turizm, gemicilik, tarım ve balıkçılık gibi faaliyetler ve yetersiz kalan atıksu arıtımı sonucu bozulmuştur. Marmara Denizi nehirler ve deşarjlar aracılığı ile organik yükü artmış, avcılık ile biyolojik çeşitliliği azalmış, kıyı tahribatı ile ekosistemi bozulmuş, sanayii ve denizcilik faaliyetleri ile kimyasal ve ses kirliliğine maruz kalmış bir iç denizimizdir. Marmara Bölgesi'nin ekonomik kapasitesi artışı ile deniz kirliliği ve oksijensizleşme kendini göstermiştir. İklim değişimi tüm bu baskıların yanında en az zararı verebilecek etki olarak görülebilir. Tüm bu baskılar sonucu 1980'li yıllardan başlayan ötrofikasyon etkileri kendini süreç içinde zararlı alg çoğalmaları, balık ölümleri, deniz anaları artışı ve en güncel olarak müsilaj oluşumu ile göstermiştir. Aslında müsilaj Marmara Denizi'nde dalgıçların kayıtlarında 1992 yılında, 2008-2010 yılları arasında da bilimsel olarak kayıt altına alınmıştır. Bu çerçevede Deniz Ortamında Müsilaj/mukus Oluşumunu Denetleyen Faktörlerin Laboratuvar Koşullarında İncelenmesi, (TÜBİTAK Proje No: 108Y083) gerçekleştirilmiştir. 2021 Mart ayında yüzeyde belirmeye başlayan müsilaj Haziran-Temmuz arasında tüm Marmara Denizi yüzey (0-20m) su kolonunu kaplamıştır. Müsilajın yapısı gereği bu materyalin bakteriler tarafından tüketileceği düşünülerek bu proje hayata geçirilmiştir.

Marmara Denizi, bundan önceki çalışmalarda da gösterildiği gibi, müsilaj olsun olmasın ötrofikasyon tehtidi altındadır ve bu durum ara tabaka ve dip sularda çözünmüş oksijenin, yani yaşam kaynağının, tükenmesine sebep olmaktadır. Akdeniz ve Karadeniz arasında bir geçiş yolu olan, dünyada eşi benzeri olmayan hidrolojik ve ekolojik yapıya sahip olan ve ayrıca yüzyıllar boyu büyük medeniyetlerin beşiği konumunda olan iç denizimizi iyileştirmek, korumak ve bir sonraki nesillere sağlıklı bir şekilde bırakmak bizlerin sorumluluğundadır.

Bu çalışma meşakkatli ve uzun süren deniz çalışmaları sonucunda gerçekleşmiştir. Bu sebepten ötürü çalışmaya katkı veren ODTÜ Deniz Bilimleri Enstitüsü personeline ve R/V Bilim 2 gemisi mürettebatına en içten dileklerimle teşekkür ederim. Bu çalışma Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından fonlanan Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi (MARMOD): Faz II Projesi ve T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından fonlanan Deniz Ekosistem ve İklim Araştırmaları Merkezi (DEKOSİM) altyapı projesi imkanları ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen proje çalışması TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje No: 121G001).

İçindekiler

1 GİRİŞ 1

2 Literatür özeti 3

3 Gereç ve yöntem 7

3.1 Plankton Metabolizması ve Müsilaj Oksijen Tüketimi Deneyleri (İP 1) 9

3.1.1 Üst, ara ve alt tabakada oksijen tüketim hızlarının belirlenmesi 10

3.1.2 Işıklı tabakada C^{14} yöntemi ile birincil üretim hızlarının belirlenmesi 12

3.1.3 Işıklı tabakada O2 yöntemi ile net komünite üretim hızlarının belirlenmesi 13

3.1.4 Müsilajın O_2 tüketim hızının belirlenmesi 13

3.2 Fiziksel-Kimyasal ve Biyolojik ölçüm ve analiz teknikleri (İP 2) 14

3.3 Plankton solonumunun parametrize edilmesi (İP3) 19

4 Bulgular 21

4.1 Marmara Denizi'nin Müsilaj Sırasında ve Sonrasında Fiziksel ve Biyokimyasal Durumu (İP 2) 21

4.1.1 Müsilajın Scanfish cihazı ile Dağılımının Belirlenmesi 21

4.1.2 Müsilaj dönemi (Haziran-Temmuz 2021) çevresel değişkenler 22

4.1.3 Müsilaj Sonrası Dönem (Sonbahar 2021- İlkbahar 2022) 33

4.2 Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonlarının Karşılaştırılması 43

4.3 Marmara Denizi'nde Müsilaj Sırasında ve Sonrasında Plankton Komünitesi (İP 2) 48

4.3.1 Fitoplankton Çeşitliliği 48

4.3.2 Amplikon dizileme ve metabarkodlama yöntemi ile plankton çeşitliği 62

4.4 Plankton Metabolizması ve Müsilajın Oksijen Üzerine Etkileri 65

4.4.1 Üst, Ara ve Alt tabakada oksijen tüketim hızlarının belirlenmesi 65

4.4.2 Işıklı tabakada C^{14} yöntemi ile birincil üretim hızlarının belirlenmesi 73

4.4.3 Işıklı tabakada O_2 yöntemi ile net komünite üretim hızlarının belirlenmesi 74

4.4.4 Müsilajın O_2 tüketim hızının belirlenmesi 75
4.5 Plankton solunumunun parametrize edilmesi (İP3) 76
5 Tartışma 77
6 Sonuç ve Öneriler 82
KAYNAKLAR 83

Tablo Listesi

Tablo 2. Haziran başı ve sonu basende mevcut baskın türler. 49
Tablo 3. 1-11 Haziran arası toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri. 49
Tablo 4. 27 Haziran 2 Temmuz arası toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri. 50
Tablo 5. Mart 2022 dönemi toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri. 59
Tablo 6. Mart 2022 dönemi baskın türler 60
Tablo 7. Metabarkodlama yöntemi ile elde edilen tülerin bolluk dereceleri ve ekosistem fonksiyonları 64
Tablo 8. Haloklin altı istasyonlardaki model sonuçlarına göre organik karbon konsantrasyonu (OC_{bf}) ve tüketim eğimi (α) ve tüketim hızı değerleri 70
Tablo 9. Fotosentez ışık ilişkisi ile hesaplanmış fotosentetik parametrelerin istasyonlardaki sonuçları 73
Tablo 10. Fotosentez ışık ilişkisi ile hesaplanmış net komünite üretim hızları parametrelerin istasyonlardaki sonuçları 74

Şekil Listesi

Şekil 1. İş paketleri ve aralarındaki ilişkiler 7
Şekil 2. Yaz 2021 dönemi 01.06.2021-03.07.2021 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar 8
Şekil 3. Sonbahar 2021 dönemi 12.09.2021-25.09.2021 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar 8
Şekil 4. İlkbahar 2022 dönemi 27.03.2022-01.04.2022 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar 9
Şekil 5. R/V Bilim 2 gemisinde plankton metabolizmasını çalıştığımız biyoloji laboratuvarı 10
Şekil 6. Firesting Fiber optik oksijen sensör cihazı (OPTODE) (solda), BOD şişesi içerisinde oksijen sensörü ve müsilaj örneği (sağda) 11
Şekil 7. Özel yapım su ışıklı-karanlık, su sirkülasyonlu ve sıcaklık kontrollü inkübatör ve OPTODE sistemi (solda), alt tabaka örneklerinin ölçüldüğü karanlık su sirkülasyonlu ve sıcaklık kontrollü inkübatör (sağda) 11
Şekil 8. Özel yapım C^{14} birincil üretim deneylerinin yapıldığı ışıklı su sirkülasyonlu doğrusal inkübatör ve şişe içerilerindeki PAR değerlerinin ölçümü 13
Şekil 9. Müsilaj örneklerinin 200 µm göz genişliğine sahip WP2 ağı ile toplanması (solda) ve müsilaj örneği (sağda) 14
Şekil 10. R/V Bilim 2 araştırma gemisi ve CTD Rozet sistemi 15
Şekil 11. ScanFish (Su Kolonu Tarayıcısı) cihazı ve çalışma prensibi 15
Şekil 12. Haziran seferi 10 – 19.06.2021 tarihleri arası Scanfish ile gerçekleştirilen çekim hatları 16
Şekil 13. Marmara Denizi'nde belirlenen hatlarda ScanFish cihazı ile farklı derinliklerde ölçülen bulanıklık değerleri 21
Şekil 14. Marmara Denizi Doğu-Batı kesiti 01.06 – 01.07.2021 tarihleri arasındaki sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri 24
Şekil 15. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti 01.06 – 01.07.2021 tarihleri arasındaki sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki su kolonunda derinlik ve bölgesel değişimleri 25
Şekil 16. Marmara Denizi haziran seferleri oksijen doygunluk (%) değerlerinin yüzey (üst) ve dip su alansal dağılımları 26

Şekil 17. Haziran ayında dikeyde inorganik çözünmüş azot (nitrat artı nitrit) ve fosfor (fosfat) dağılımları 28
Şekil 18. Haziran 2021 ortası itibariyle inorganik çözünmüş azot (nitrat artı nitrit) ve fosforun (fosfat) yüzey sularında dağılımları 28
Şekil 19. Haziran seferi Çanakkale Boğazı – İstanbul Boğazı arası Marmara Denizi kesitinde besin elementleri dağılımı 30
Şekil 20. Haziran seferi güney-kuzey ekseninde Susurluk havzası ve Silivri arasında Marmara Denizi kesitinde besin elementleri dağılımı 30
Şekil 21. Haziran seferi İzmit Körfezi doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı 32
Şekil 22. Haziran seferi Marmara Güney Şelfi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı 32
Şekil 23. Marmara Denizi doğu-batı kesiti Eylül ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri 34
Şekil 24. Marmara Denizi doğu-batı kesiti İlkbahar 2022 (Mart) sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri 35
Şekil 25. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti Eylül ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri 36
Şekil 26. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti Mart 2022 ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri 37
Şekil 27. Marmara Denizi Mart 2022 besin tuzları, çözünmüş oksijen, floresans konsantrasyonları ve secchi disk dağılım haritaları 39
Şekil 28. Marmara Denizi batı-doğu (Çanakkale Boğazı- İzmit Körfezi) kesiti Mart 2022 ayı besin elementleri su kolonu dağılımları 40
Şekil 29. Marmara Denizi kuzey-güney kesiti Mart 2022 ayı besin elementleri su kolonu dağılımları 41
Şekil 30. Mart 2022 Marmara Denizi Güney Şelfi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı 42
Şekil 31. Mart 2022 Marmara Denizi İzmit Körfezi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı 43
Şekil 32. Marmara Denizi Haziran ve Eylül aylarında bazı istasyonlarda 0-50m oksijen ölçümlerinin karşılaştırılması 44
Şekil 33. Haziran-Temmuz ve Eylül seferlerinde Marmara Denizi'ndeki tüm CTD Oksijen öçümlerinin karşılaştırması. Mavi çizgi Haziran-Temmuz, kırmızı çizgi ise Eylül verilerinin

ortalamasını göstermektedir. Kesikli çizgi %100 oskijen doygunluğu belirtmek için koyulmuştur. Mavi ve kırmızı çizgi arasındaki gölgeli mor alan iki sefer arası Marmara Denizi'nde azalan oksijeni temsil etmektedir. 44
Şekil 34. Haziran- Eylül seferleri sırasında 45-C Çınarcık Çukurunda 0-200m arasında ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonları 45
Şekil 35. Marmara Denizi Çanakkale Boğazı girişi ve İstanbul Boğazı çıkışı su kolonu oksijen karşılaştırması 46
Şekil 36. Marmara Denizi Haziran 2021, Eylül 2021 ve Mart 2022 dip çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının (mg/l) dağılım haritaları 47
Şekil 37. 1-11 Haziran (sol) ve 27 Haziran-2 Temmuz (sağ) Marmara fitoplanktonu grup dağılımı 51
Şekil 38. Haziran başında istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı. 52
Şekil 39. Haziran sonunda istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı. 52
Şekil 40. Haziran başında derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı. 53
Şekil 41. Haziran sonunda derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı. 54
Şekil 42. Haziran başı istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı. 55
Şekil 43. Haziran başı istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı. 55
Şekil 44. Haziran sonu istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı. 56
Şekil 45. Haziran sonu istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı. 56
Şekil 46. Mart 2022 Marmara fitoplanktonu grup sıklıklarının dağılımı. 58
Şekil 47. Mart 2022 dönemi istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı. 58
Şekil 48. Mart 2022 dönemi derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı. 59
Şekil 49. Mart 2022 dönemi istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı. 61
Şekil 50. Mart 2022 dönemi istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı 61
Şekil 51. Marmara Denizi ve Karadeniz Yaz 2021 (müsilaj süreci) su kolonu plankton solunum hızları 67
Şekil 52. Marmara Denizi ve Karadeniz Sonbahar 2021 (müsilaj sonrası) su kolonu plankton solunum hızları 68
Şekil 53. Marmara Denizi İlkbahar 2021 (müsilaj sonrası) su kolonu plankton solunum hızları 69
Şekil 54. Haloklin altı (30m) oksijen tüketim deneyleri 70

Şekil 55.Marmara Denizi ölçüm yapılan tüm dönemlerde su kolonunda tabakalara (0-10m:Yüzey, 10-20m: Haloklin üst tabakası, 20-30m: Haloklin alt tabakası, >30: Haloklin altı)göre ortalama alınmış günlük oksijen tüketimi (üstte), günlük klorofil-a normalize edilmiş oksijen tüketimi (altta). Hata barları tabakalardaki örneklerin ortalamasının standart hatasını göstermektedir. 72
Şekil 56. Marmara Denizi (MS) ve Karadeniz (BS) Haziran 2021 – Eylül 2021 su kolonunda tabakalara göre ortalama alınmış oksijen tüketimleri karşılaştırması 72
Şekil 57. Oksijen yöntemi ile ölçülen net komünite plankton hızlarına uygulanan model ve ışık şiddeti..... 75
Şekil 58. Regresyon analizi sonucu günlük plankton solunum hızı (R_{veri}) ve model ile tahmin edilen plankton solunum hızı ($R_{fonksiyon}$) karşılaştırması. Verilen çizgi 1:1 noktalarını temsil etmektedir. 76

Özet

Projenin amacı, Marmara Denizi'nde 2021 ilkbahar-yaz aylarında oluşan müsilajın su kolonunda oksijen tüketim hızlarını arttırarak yaratabileceği oksijen azalmasını deneysel ve yerinde ölçümler ile araştırıp, plankton solunumu ve birincil üretimi ile çevresel değişkenler arasında bağlantı kurup oksijen tüketim süreçlerini anlamaya çalışmaktır.

Marmara Denizi'nin ve müsilajın mevsimsel ve alansal dağılımı göz önünde bulundurularak, müsilaj süreci (Yaz 2021) ve müsilaj sonrası (Sonbahar 2021- İlkbahar 2022) plankton metabolizması toplamda 53 noktada, su kolonunu temsilen yüzey, ara tabaka ve alt tabaka gibi farklı derinliklerden örneklemeler yapılmıştır. Plankton solunumu/oksijen tüketim hızları ve net komünite üretimi hassas ve yüksek çözünürlüklü fiber optik oksijen sensörler (OPTODE) ile özel yapım ışıklı-karanlık inkübatörlerde ölçülmüştür. Müsilajın varlığında Marmara Denizi'nde oksijen tüketim hızları diğer dönemlere göre yaklaşık 2 kat fazla bulunmuş ve su kolonunda oksijen azalmalarına sebep olduğu tespit edilmiştir. Işıklı yüzey tabakada üretilen fotosentez kaynaklı organik karbon gün içinde tüketilmekte ve canlı-cansız partikül organik maddeler ışığın ulaşmadığı haloklin tabakasında heterotroflar tarafından tüketilerek keskin oksijen azalmalarına yol açmaktadır. Haloklin altı tabaka tüketim sonuçlarına göre organik karbonun bozunabilir fraksyonunun çevirim değeri (turnover rate) Kuzey Denizi-Baltık Denizi geçiş bölgesiyle benzer hesaplanmıştır. Fakat Marmara Denizi alt tabaka sularının yıl boyunca 15 °C olması ve iklim değişikliği ile artan bu sıcaklıklar, alt tabaka tüketim değerlerini yükseltmekte ve oksijen tüketimini hızlandırmaktadır. Oşinografik zaman serisi çalışmaları sonucunda Marmara Denizi haloklin ve altı (20-100m) sularda Haziran ayındaki seviyelerden daha az çözünmüş oksijen içerdiği görülmektedir.

Bu çalışma ile müsilajın oksijen tüketim hızlarını arttırdığı hipotezi test edilmiş ve elde edilen sonuçlara göre doğru bulunmuştur. Müsilajın oluşumunu tetikleyen faktörlerin ortadan kalkmadığı ve müsilaj olsun veya olmasın Marmara Denizi çift tabakalı sistemi ve net heterotrofik yapısı ile oksijen sorunun çözümü için karasal kaynaklı organik madde girdilerinin azaltılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Müsilaj, Plankton solunumu, oksijen azalması, OPTODE, birincil üretim

Abstract

The Project aims to investigate the oxygen depletion that can be caused by the mucilage formed in the spring-summer of 2021 in the Marmara Sea by increasing the oxygen consumption rates in the water column, with experimental and on-site measurements, and to understand the oxygen consumption processes by finding a relationship between plankton respiration and primary production and environmental variables.

Considering the seasonal and spatial distribution of the mucilage and the Marmara Sea, the plankton metabolism during the mucilage process (Summer 2021) and after the mucilage (Autumn 2021-Spring 2022) was studied at 53 points in total, representing the water column from different depths such as surface, intermediate layer and sub-halocline. Plankton respiration/oxygen consumption rates and net community production were measured in custom-built light-dark incubators with sensitive and high-resolution fiber optic oxygen sensors (OPTODE). In the presence of mucilage, oxygen consumption rates in the Sea of Marmara were found to be approximately 2 times higher than in other periods and it was determined that it caused oxygen decreases in the water column. Photosynthetically produced fresh organic carbon in the photic surface layer was rapidly consumed during the day, and living and non-living particulate organic materials were consumed by heterotrophs in the halocline layer, where light could not penetrate, caused sharp oxygen reductions. Sub-halocline layer consumption rates showed that, the turnover rate of the degradable fraction of organic carbon in The Marmara Sea was similar to that of the North Sea-Baltic Sea transition region. However, the fact that the sub-halocline and bottom layer waters of the Marmara Sea are ~15 °C throughout the year and increasing temperatures with climate change would enhance the substrate consumption hence increase the oxygen consumption. As a result of oceanographic time series studies, it has been found that the Marmara Sea contains less dissolved oxygen than the levels in June in the halocline and below (20-100 m) waters.

In this study, the hypothesis that mucilage increases oxygen consumption rates was tested and found to be acceptable according to the obtained results. In order to solve the oxygen deficiency problem of the Marmara Sea that has two-layered water column and net heterotrophic ecosystem, and where the factors triggering the formation of mucilage has not been disappeared and with or without mucilage occurrence, terrestrial organic matter inputs should be reduced.

Keywords: Mucilage (Sea snot), plankton respiration, oxygen depletion, OPTODE, primary production

1 GİRİŞ

Marmara Denizi'nde 2021 Mart ayında belli bölgelerde yüzeyde görülmeye başlayan müsilaj, Haziran ayında Marmara'nın tüm yüzey kolonunda tespit edilmiştir. Bugüne kadar yapılmış araştırmalarda müsilajın kaynağının fitoplakton-bakteri kaynaklı olabileceği savı öne çıkmaktadır. Kimyasal analizlerden müsilajın içeriğinin karbonhidrat ve polisakkarit yapıda olduğu gösterildiğinden ve bakteriler için besin kaynağı oluşturabileceği düşüncesiyle bu ayrıştırma sırasında oksijen harcanacağı bilinmektedir. Bu proje ile amacımız, müsilajın su kolonunda oksijen tüketim hızlarını arttırarak yaratabileceği oksijen azalmasını deneysel ve yerinde ölçümler ile araştırıp, plankton solunumu ve birincil üretimi ile çevresel değişkenler arasında bağlantı kurup oksijen tüketim süreçlerini anlamaya çalışmaktır.

Literatürde denizde oluşan müsilajın oksijen tüketimlerine ve dolayısıyla denizin oksijen dengesine nasıl etki yaptığı ile ilgili çalışma bulunamamıştır. Bilindiği üzere Marmara Denizi'nin derin basenlerinde ve İzmit Körfezi orta baseninde 1980'li yıllarda gelişmeye başlayan hipoksia günümüzde anoksik koşulların oluşmasına kadar ilerlemiştir (MARMOD Faz I). Müsilajın içeriğinin karbonhidrat ve polisakkarit temelli olması (Penna vd., 2003; Polat-Beken vd., 2010), zaman içerisinde denizdeki heterotrof bakteriler tarafından ayrıştırılırken oksijenin tüketileceği düşünülmüştür. Özellikle bu durumun çift tabakalı sisteme sahip olan Marmara Denizi'nde 30m sığ bölgelerde deniz tabanında, 30m den derin bölgelerde ise haloklin tabakasında ve ardından çökmeyle daha derin sularda oksijeni azaltması beklenmektedir.

Ötrofikasyon, biyolojik pompa, karbon dögüsü ve oksijen bütçesi gibi biyojeokimyasal süreçlerin kilit mekanizması olan plankton metabolizması üzerine çalışmalar Marmara Denizi'nde çok kısıtlıdır (Zeri vd., 2014). Yürütülen bu çalışma ile müsilaj süresince ve sonrasında plankton solunumu, su kolonu oksijen ölçümleri ve diğer oşinografik değişkenler ölçülerek Marmara Denizi'ndeki plankton metabolizması ve çözünmüş oksijen konsantrasyonları üzerine etkiler anlaşılmaya çalışılmıştır.

Projenin çıktıları MARMOD projesi kapsamında çalışılmakta olan dijital ikiz ve üç boyutlu hidrodinamik-biyojeokimyasal modelin girdileri olarak kullanılabilecek ve Marmara Denizi'ne özgü çevresel yönetim ve ekolojik yaklaşımlı planlara katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Proje hedefleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- Marmara Denizi'nde plankton solunumu (oksijen tüketimi) süreçlerinin ve müsilajın bu süreçlere etkilerinin saptanması. Yenilikçi yöntemler (Fiber optik oksijen sensörleri-OPTODE) ile

Marmara Denizi'nin farklı bölgelerinde su kolonunda yapılacak müsilaj/plankton oksijen tüketim hızlarının ölçümü ile müsilajın tüketime katkısının olup olmadığının belirlenmesi.

- Birincil üretim/müsilaj oluşumunda ve tüketiminde yer alan planktonik organizmaların (fitoplankton, bakteri) rollerinin ortaya konması. Müsilaj içeriği ve su kolonundaki mikroorganizmaların kalitatif ve kantitatif belirlenmesi.
- Marmara Denizi'nde uzun süredir haloklin ve haloklin altı sularda yaşanan oksijen azalması veya hipoksianın sebeplerini ve müsilajın etkilerini kantitatif yöntemler ile saptamak. Su kolonundaki çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının, ışıklı tabakadaki birincil üretim, su kolonundaki organik madde miktarları ve karakterleri (çözünmüş-partikül) ve plankton solunumu arasında kurulacak matematiksel ilişki ve bunların bölgesel ve zamansal farklılıkları.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Müsilaj literatüre göre 1860 yılından itibaren Yeni Zellanda'nın Tasman ve Golden Bay (Büyük Okyanus) bölgesinde (MacKenzie vd., 2002), 1872 yılından itibaren ise Adriyatik Denizi'nin kuzey bölgelerinde (Giani vd., 2005; Stachowitsch vd., 1990) yaklaşık olarak 10-20 yıl aralıklarla görülmüştür. 2000'li yılların başında ise müsilaj oluşum frekansları her iki bölgede de artmıştır. Müsilajın ülkemizde ilk olarak 2007 yılının Ekim ayında Marmara Denizi, İzmit Körfezi'nde oluştuğu literatüre girmiş olsa da, 1992 yılında Erdek Körfezi'nde müsilajın dalgıçlar tarafından video ile kayıt edildiği bildirilmiştir (Tüfekçi vd., 2010). Müsilaj Marmara Denizi'nde 2008, 2009 ve 2010 yıllarında da görülmüş, müsilaj oluşum mekanizmalarını, içeriğini ve denizdeki takibini içeren ülkemizdeki ilk ve en kapsamlı çalışma ile (Deniz Ortamında Musilaj/mukus Oluşumunu Denetleyen Faktörlerin Laboratuar Koşullarında İncelenmesi, Proje No: 108Y083 TÜBİTAK" (Polat-Beken vd., 2010)), genel olarak diğer denizlerde oluşan müsilaj ve çevresel faktörlerin (müsilajın içeriği, oluşumundan sorumlu olabileceği baskın fitoplankton türleri (ör: dinoflagellat; Gonyaulax fragilis), deniz ortamının insan kaynaklı aşırı organik yüklenmesi, deniz sıcaklıklarında artış gibi) benzerlik taşıdığı bilimsel olarak gösterilmiştir. Marmara Denizi'nde 2021 Mart ayında yüzeyde görülmeye başlanan ve yoğunluğunu arttırarak Haziran ayında tüm yüzey tabakasını (<30m) kaplayan müsilaj (Yücel vd., 2021), neredeyse literatürdeki örnekleri gibi 10 yıllık bir aradan sonra tekrarlanmıştır. Bu çok büyük oluşumun yapışkan yapısı ve yüzeyleri kaplaması sebebiyle ilk akla gelen etkisi olan hareketli deniz canlılarının (balıklar, yengeçler vb.) fiziksel aktivitelerini kısıtlaması ve hareketsiz (sesil) canlılarda ise (mercanlar, süngerler vb.) su ile temasını keserek yaşamları için gerekli besin ve oksijeni almalarını engellemesinin yanında, Marmara Denizi'nin uzun süredir dip sularının ve mevsimsel olarak ara tabakasında yaşanan oksijen azlığına (hipoksia) nasıl etki edeceği cevaplanması gereken önemli bir bilim problemidir. Literatürde denizde oluşan müsilajın oksijen tüketimlerine ve dolayısıyla denizin oksijen dengesine nasıl etki yaptığı ile ilgili çalışma bulunamamıştır. Bu proje ile ana hedef yenilikçi yaklaşım ve tekniklerle Marmara Denizi'nde oluşan müsilajın su kolonunda oksijen tüketimine etkisini belirlemek ve bu süreçleri etkileyen faktörleri ortaya çıkarmaktır.

Müsilajın kimyasal yapısının polisakkarit ve karbonhidrat içerikli olması ve deneylerle yapılan çalışmalarda bu yapıların fitoplankton hücre salgıları ile benzeştiği, müsilajın oluşumunun fitoplankton kaynaklı olduğu savını güçlendirmektedir (Kovac vd., 2006; Polat-Beken vd., 2010,), fakat bakterilerin ve virüslerin bu süreçteki rolü hala tam olarak anlaşılamamıştır (Del Negro vd.,

2005; Pugnetti vd., 2005,). Ayrıca müsilajın içeriği ve müsilaj ile çevrili sulardaki karbonhidrat miktarları müsilajsız sulara göre çok daha yüksek bulunmuştur (Penna vd., 2003; Polat-Beken vd., 2010).

Marmara Denizi özellikle son 40 yıldır yoğun insan baskısı altındadır, son yıllarda yapılan çalışmalarda su kolonunun ara ve alt tabakalarında uzun yıllardır süregelen oksijen azalması ve azlığı (hipoksia) oluştuğu görülmektedir. Bölgede artan nüfus, şehirleşme, sanayi, turizm, gemicilik, tarım, balıkçılık gibi faaliyetler ve yetersiz kalan arıtım tesisleri sonucu denize ulaşan nehirler ve deşarjlar ile Marmara Denizi'ndeki organik yükler artmış ve ötrofik hale gelmiştir (Ediger vd., 2016). Ayrıca Marmara Denizi, Türk Boğazlar Sistemi ile farklı yoğunluktaki iki denizin sularını taşımasıyla, ekolojik ve biyokimyasal olarak üst tabakada (0-20m) Karadeniz, alt tabakada (>30m) ise Akdeniz suyu özelliklerini taşımaktadır. İki su tabakasının arasında ise tuzluluk farkından dolayı 10-20m kalınlığında sürekli ve keskin bir yoğunluk ara tabakası bulunmaktadır (Ünlüata vd., 1990; Beşiktepe vd., 1994). Marmara Denizi'nin yüzey sularını oluşturan Karadeniz'in kuzeybatı kıta sahanlığından siklonik akıntılarla İstanbul Boğazı aracılığı ile giren sular, Tuna, Dinyester ve Dinyeper gibi nehirlerin taşıdığı inorganik ve organik yükleri taşımaktadır. Her ne kadar son 30 yıllık dönemde Avrupa'da bulunan bu nehirlerde önlemlerin alınmasıyla taşıdıkları yükler azalsa da (Kroiss vd., 2003; Ludwig vd., 2009) Marmara Denizi'nin yüzey sularında üretim ve tüketim süreçlerini önemli derecede kontrol eden miktarlarda organik karbon ve inorganik besin tuzları giriş yapmaktadır. Ege'den Çanakkale Boğazı ile Marmara Denizi'nin alt tabakasına giren çok tuzlu, organik maddece fakir fakat doygun oksijenli sular (7-8 mg/L), 6-7 yıllık bir süreçte Marmara'yı İstanbul Boğazı aracılığı ile terk ederken yaklaşık olarak 10 kat inorganik tuzlarca zenginleşir ve taşıdığı oksijenin neredeyse çoğunu (4-6 mg/L) tüketerek (ÇŞB, TÜBİTAK-MAM 2017), kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirir (Polat ve Tuğrul, 1995). Tüm bu değişimlere ve doğal süreçlere tuzluluk ara tabakasının etkisi çok büyüktür. Ara tabaka bir bariyer görevi görerek; atmosferden alt tabakaya oksijen taşınımını engeller, ara tabakada biriken canlı ve cansız askıda katı maddeler ışığın alt tabakaya ulaşmasını kısıtlayarak birincil üretimin yüzey tabaka ile sınırlı kalmasına sebep olur ve alt tabakada oksijen üretimi olmaz, ara tabakada biriken organik madde heterotrof bakteriler tarafından parçalanarak hem oksijen tüketilir hem de organik maddelerin inorganik tuzlara dönüşmesine ve su kolonunda en yüksek konsantrasyonlarına çıkmalarına sebep olur, ara tabakada artan inorganik tuzlar yeni birincil üretime sebep vererek yüzey tabakada uzun süreli alg çoğalmalarını destekler. Bunlara ek olarak İstanbul Bogazı dinamiklerinin alt-üst tabaka karışımında ve dolayısıyla ekosistem dinamiklerinde önemli bir rölü olabileceği yakın geçmişte yapılan modelleme çalışmalarında ortaya çıkmaktadır (Oğuz, 2017).

Örneğin güçlü boğaz üst tabaka akıntısının olduğu bazı dönemlerde (genellikle kış ve ilkbahar), bu akıntının ara ve alt tabakalardan üst tabakalara su taşıdığı, bu tabakaları besin tuzu ve organik madde açısından zenginleştirdiği ve alg patlamalarına neden olduğu düşünülmektedir. Öfotik tabakaya besin girdisi sağlayan nehir ve noktasal kaynaklara ek bir girdi olan bu sürecin Marmara oksijen bütçesi üzerindeki ektisi araştırılması gereken bir unsurdur. Görüldüğü üzere Marmara Denizi'nin oksijen dengesi karmaşık birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişkene bağlıdır. Marmara Denizi'nin bu karmaşık oksijen dengesine ek olarak, 2021 yılı Haziran ayında müsilajın üst tabakada yoğun şekilde bulunduğu (Yücel vd., 2021) bildirilirken ve literatüre göre müsilajlı su kolonun partikül organik karbon (POC) ve çözünmüş organik karbonca (DOC) zengin olması (Giani vd., 2005; Polat-Beken vd., 2010), aerobik solunumlarını organik karbon üzerinden gerçekleştiren heterotrofik bakterilerin oksijen tüketim hızlarını arttırarak oksijen azalmasına sebep olması beklenmektedir. Her ne kadar bu durum, atmosferden oksijen girdisi ve fotosentez ile üretilen oksijen sebebiyle, oksijence zengin üst tabakada oksijen azalmasına sebep olmayacaksa da ışığın ulaşmadığı ara tabaka ve alt tabakada oksijen tüketimini arttırarak oksijen azalmasına ve hipoksik koşulların oluşmasını hızlandırması beklenmektedir.

Plankton solunumunu özellikle heterotrof bakteriyel oksijen tüketimini etkileyen diğer önemli bir etken ise ortamdaki organik karbonun ne kadar kullanılabilir olduğudur (Mantıkcı vd., 2020; Smith ve Kemp, 2003). Her ne kadar okyanusların mezopleajik bölgelerinde POC'nin çözünerek derin sulara DOC sağladığı bilinse de (Cho ve Azam, 1988) bunun tersi bir durum Hansen ve Bendtsen (2014) tarafından, Marmara Denizi'nin hidrografik ve oşinografik yapısına benzerlik gösteren çift tabakalı deniz sistemene sahip olan Baltık Denizi'nde yaptıkları çalışmada, POC'nin üst tabakadan çökerken kullanılabilir DOC'yi içine aldığını ve alt tabakada solunumun yakıtı olarak DOC'nin tüketildiğini göstermişlerdir. Marmara Denizi su kolonunda organik madde karakterizasyonu, taşınımı ve tüketimi, ayrıca müsilajın ve diğer çevresel değişkenlerin bu süreçlere nasıl etki ettiği tam olarak bilinmemektedir.

Her ne kadar müsilaj konusunda bilim insanlarınca uzun yıllardır çalışılsa da, oluşum mekanizmalarının karmaşıklığından dolayı paremetrize edilemediğinden, öngörülemeyen zamanlarda meydana geldiği için bu oluşum "fenomen" olarak adlandırılmaktadır. Müsilajın oluşum mekanizmaları üzerine çalışmalar bize gelecekte bu tür olayların yaşanmaması için alınabilecek önlemlere ışık tutması açısından önemli olmakla birlikte, müsilajın denizde yaratacağı ekolojik ve biyojeokimysal değişikliklerin veya etkilerin öngörülebilir olması ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için "etki" çalışmaları, oluşum mekanizmaları kadar önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın 2021 Marmara Denizi'nde meydana gelen oldukça büyük müsilaj olayında başrolü oynayan plankton (fitoplankton-bakteri) metabolizmasını anlamaya ve müsilajın yaratabileceği oksijen azalmasını tahmin edebilmeye yönelik deneysel, anlık ölçümler ve tarihsel verilerin kullanılmasını içeren çalışmaları ile bu olayı anlamamıza ışık tutması beklenmektedir.

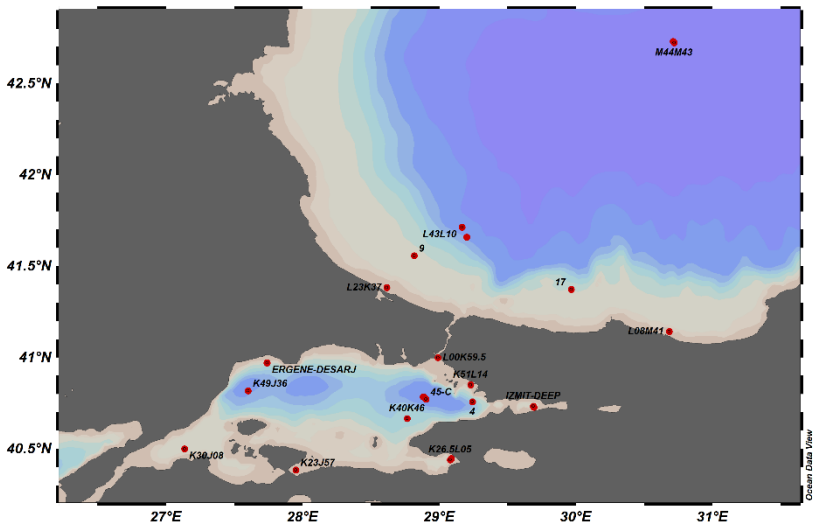
3 GEREÇ VE YÖNTEM

Bu proje 3 ana iş paketi içerecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1). İP1 ve İP2 R/V Bilim-2 gemisi ile saha çalışmalarından örnekleme yapılarak gerçekleştirilmiştir.

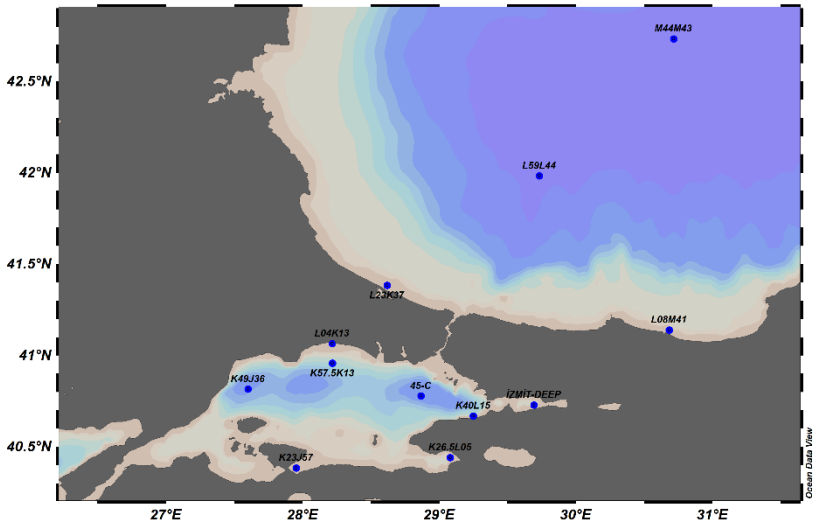


Şekil 1. İş paketleri ve aralarındaki ilişkiler

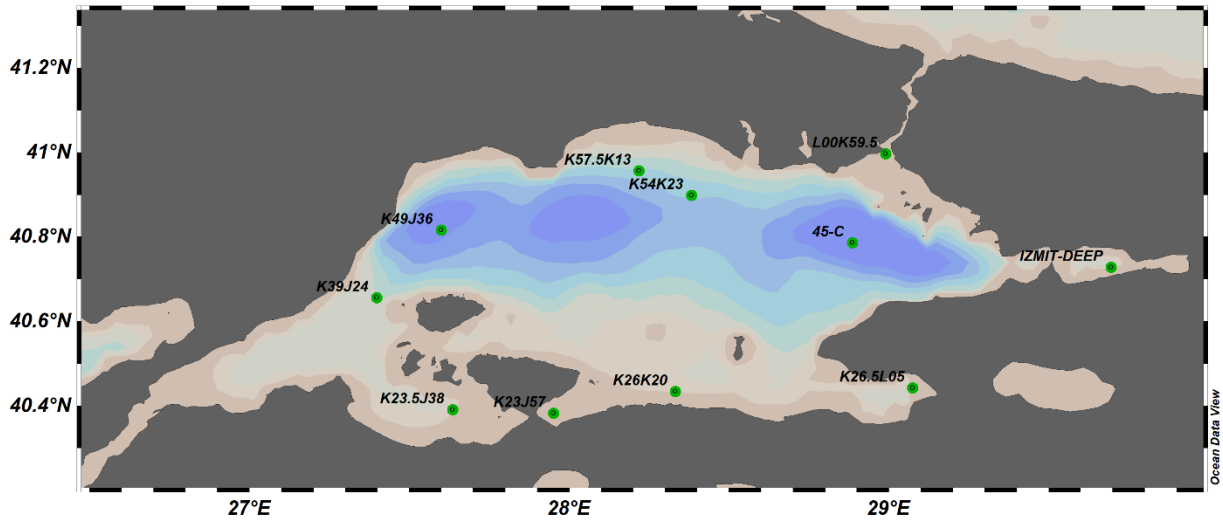
Örnekleme istasyonları haritaları ve tarihleri Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir. Deniz çalışmaları ve bu raporda sunulan bazı sonuçlar Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından fonlanan Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi (MARMOD): Faz II Projesi ve T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından fonlanan Deniz Ekosistem ve İklim Araştırmaları Merkezi (DEKOSİM) altyapı projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje önerisinde de sunulduğu gibi, Haziran 2021'de müsilaj döneminde bir ön çalışma yapılmış ve bu proje kapsamında alınacak ve kurulacak sistemlerle 10 istasyonluk bir sefer çalışması planlanmıştır. Planlanan bu çalışma Marmara Denizi'nde 27.03.2022-01.04.2022 tarihleri arasında 11 istasyonda gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Planlanan proje çalışmalarından önce MARMOD ve DEKOSİM kapsamında müsilaj dönemi sonrası 12.09.2021-25.09.2021 tarihleri arasında Marmara Denizi'nde bir sefer daha gerçekleştirilmiş ve bu proje kapsamında planlanan istasyonların sayıca fazlasından elde edilen oşinografik sonuçlar da, bilimsel olarak değerlendirebilmek adına bu raporda da sunulmuştur.



Şekil 2. Yaz 2021 dönemi 01.06.2021-03.07.2021 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar



Şekil 3. Sonbahar 2021 dönemi 12.09.2021-25.09.2021 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar



Şekil 4. İlkbahar 2022 dönemi 27.03.2022-01.04.2022 tarihleri arasında örnekleme yapılan istasyonlar

İlkbahar 2022 araştırma seferinde örnekleme ve ölçümü yapılan parametrelerin listesi aşağıda verilmiştir. İstasyonlarda örnekleme derinlikleri yüzeyden dip derinliğine kadar CTD cihazının sensörleri ile suyun fizikokimyasal özelliklerine göre belirlenmiştir.

- Plankton solunumu (Üst, Ara ve Alt tabaka-10 istasyon)
- Birincil üretim (C14 ve Oksijen Yöntemi Işıklı tabaka-5 istasyon)
- Besin tuzları konsantrasyonları (NO3, NH4, PO4, Si) (10 istasyon profil)
- Secchi disk ölçümleri (sadece gündüz istasyonlarında)
- Oksijen ve pH (10 istasyon profil)
- Klorofil-a (10 istasyon profil)
- Yüzey klorofil değerleri (seyir boyunca)
- Fitoplankton tür tayini (10 istasyon profil)
- Fitoplankton (akış sitometresi) (10 istasyon profil)
- Fitoplankton pigmentleri (HPLC) (10 istasyon profil)
- Partikül organik karbon (POC), partikül organik azot (PON), suda toplam organik karbon (TOC) ve suda toplam azot (TN) (10 İstasyon profil)

3.1 Plankton Metabolizması ve Müsilaj Oksijen Tüketimi Deneyleri (İP 1)

Bu iş paketi kapsamında 4 alt başlık belirlenmiş olup deney tasarımları ve analiz yöntemleri aşağıda anlatılmaktadır.

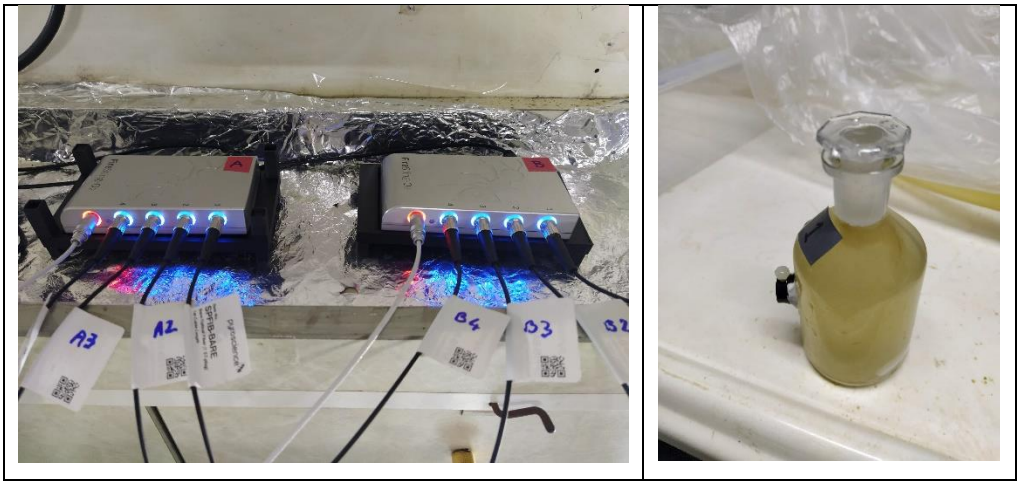
İstasyonlarda üst, ara, alt tabaka, klorofil ve müsilajın pik yaptığı derinlikler ve ışıklı tabakanın derinliği gibi değişkenler CTD üzerinde bulunan sensörler ile belirlenmiş ve su örneklemeleri bunlara göre yapılmıştır.



Şekil 5. R/V Bilim 2 gemisinde plankton metabolizmasını çalıştığımız biyoloji laboratuvarı

3.1.1 Üst, ara ve alt tabakada oksijen tüketim hızlarının belirlenmesi

Üst, Ara tabaka ve klorofil veya müsilajın pik yaptığı derinliklerden alınacak su örnekleri, çift olacak şekilde (replike) içerisinde optik sensörler bulunan 60-150 ml'lik kapaklı cam şişelere (BOD şişesi) hava kabarcıkları oluşturmadan aktarılır (Şekil 6) Şişler bulundukları derinlikteki sıcaklık koşullarındaki su sirkülasyonlu karanlık kutular içerisinde en az 2 saat olmak üzere inkübe edilerek (Şekil 7), ölçüm frekansı dakikada 1 kere olacak şekilde oksijen ölçümleri fiber optik oksijen sensörleri (FireSting O_2-Pyroscience) (Şekil 6) ile yapılır (Klimant vd., 1995, Mantıkcı vd, 2017).



Şekil 6. Firesting O_2 (PyroScience) fiber optik oksijen sensör cihazı (OPTODE) (solda), BOD şişesi içerisinde oksijen sensörü ve müsilaj örneği (sağda)

Alt tabaka örneklerinde oksijen tüketim hızlarının üst ve ara tabakadan daha düşük olacağından dolayı, ölçülebilir anlamlı bir oksijen azalmasının tespiti yapılabilmesi için, örnekler 40 günün üzerinde haftada 1 kere olacak şekilde fiber optik oksijen sensörleri ile ölçülmüştür. Bu örnekler 50ml lik kapaklı cam şişelere, replike alınarak, Marmara Denizi'nin alt su (~40m) sıcaklığı olan 15.4 C de sabitlenmiş su sirkülasyonlu karanlık kutuda inkübe edilmiştir. Oksijen tüketim hızları, oksijen konsantrasyonlarının zamana karşı değişimiyle, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanır.



Şekil 7. Özel yapım su ışıklı-karanlık, su sirkülasyonlu ve sıcaklık kontrollü inkübatör ve OPTODE sistemi (solda), alt tabaka örneklerinin ölçüldüğü karanlık su sirkülasyonlu ve sıcaklık kontrollü inkübatör (sağda)

3.1.2 Işıklı tabakada C^{14} yöntemi ile birincil üretim hızlarının belirlenmesi

Fitoplankton fotosentez hızları ışık şiddetlerine göre C^{14} tekniğiyle (Steemann-Nielsen, 1952) doğrusal inkübatörde belirlenmiştir (Mantıkcı, 2015; Markager vd., 1999). Bu yöntem ile fitoplankton tarafından çeşitli ışık şiddetlerinde alınan karbonun hızı fotosentez-ışık (P-E) ilişkisine göre ölçülmektedir (Webb vd., 1974). Maksimum fotosentez hızı, fotosentez-ışık ilişkisinin başlangıç eğirişi ve ışık doyum şiddeti hesaplanarak fitoplankton ekofizyolojisi hakkında bilgi edinmek mümkün olacaktır. Örnekler 1 m derinlikten su kolonunu temsilen alınmıştır. Işık geçirmeyen bir şişede muhafaza edilen 1 lt deniz suyu örneğine düşük radyoaktiviteye sahip karbon 14 (C^{14}) eklenmiş. Daha sonra örnekler 62ml Nunc cell kültür şişelerine konarak, 12 farklı ışık şiddetinde ve 2 adette karanlık şişe 2 saat boyunca su sıcaklık kontrollü doğrusal inkubatörde bekletilmiştir. Daha sonra şişeler inkübatörden çıkarılarak özel bir pompa ve vakum düzeneğiyle GF/F (Glass-fibre filters, Ø 25 mm) kullanılarak süzülmüştür. Filtreler sintilasyon şişelerine konduktan sonra üstlerine 0.2ml 0.1N HCI eklenerek 24 saat bekletilmiştir. Bekleme süresinden sonra üzerine 10 ml sintilasyon kokteyli eklenen örnekler yine en az 24 saat karanlıkta bekledikten sonra sıvı sintilasyon sayıcıda ölçümleri yapılarak üretim miktarları hesaplanmıştır. pH elektrodu kullanılarak titrasyon yöntemiyle inorganik karbon konsantrasyonu, pH ve alkalinite ölçülmüştür. Ölçümler Bilim-2 gemisinde, ODTÜ-DBE laboratuvarında ve C^{14} ölçümleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesindeki sintilasyon cihazı yapılmıştır.

Fotosentetik parametreler modifiye bir üssel doyum modeli (Webb vd., 1974) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$P=P_{est}x\left[1\text{-}\exp^{(-\alpha \text{ x } I/P_{est})}\right]\text{-}c$$

Bu denkleme göre P fotosentez hızı, α başlangıç eğrisi ve I ışık şiddetidir. Işık doygunluğuna ulaşmış fotosentez hızı (Maksimum fotosentez hızı-P_{max}) P_{est} + c ile hesaplanmıştır. Biyokütle spesifik parametreler (P_{max}, α) fitoplankton biyokütlesi göstergesi olan klorofil *a* ile normalize (P^{B}_{m}, α_B) edilmiştir.



Şekil 8. Özel yapım C^{14} birincil üretim deneylerinin yapıldığı ışıklı su sirkülasyonlu doğrusal inkübatör ve şişe içerilerindeki PAR değerlerinin ölçümü

3.1.3 Işıklı tabakada O_2 yöntemi ile net komünite üretim hızlarının belirlenmesi

Işıklı tabakayı temsil edecek şekilde 1m den alınan su örnekleri, 8 farklı ışık şiddetinde (yüzey PAR değerinin %1-%100 arası) özel yapım inkübatorde 2 saat boyunca fiber optik sensörlerle oksijen üretimleri ölçülmüştür (Şekil 7). Işık kaynağı LED lambalar ile sağlanmıştır. Oksijen doygunluğu alınan örneklerde %100'e yakın veya fazla olduğu durumlarda, örneklerdeki oksijen seviyeleri N_2 gazı verilerek düşürülmüştür (Mantıkcı vd., 2017). C^{14} yönteminde kullanılan hesaplama yöntemleri kullanılarak net üretim hesaplanmıştır.

3.1.4 Müsilajın O_2 tüketim hızının belirlenmesi

Su kolonunda müsilajın yoğun olduğu derinliklerden (0-30m) 200 µm göz genişliğine sahip WP2 ağı (çember çapı 57 cm) ile müsilaj toplanarak madde 1.1 de anlatılan yöntem ile oksijen tüketim hızları ölçülmüştür (Şekil 6, Şekil 9).



Şekil 9. Müsilaj örneklerinin 200 µm göz genişliğine sahip WP2 ağı ile toplanması (solda) ve müsilaj örneği (sağda)

3.2 Fiziksel-Kimyasal ve Biyolojik Ölçüm ve Analiz Teknikleri (İP 2)

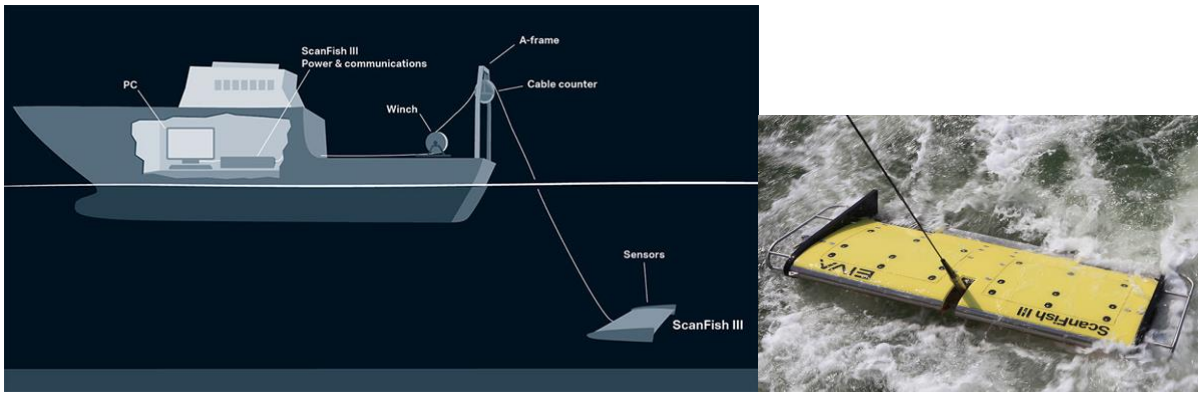
Fiziksel ölçümler

ODTÜ-DBE R/V Bilim-2 gemisinde bulunan entegre Seabird CTD-Rozet sistemi, <1m çözünürlükte derinlik (basınç), sıcaklık, tuzluluk, yoğunluk parametrelerinin yüksek duyarlıklı ölçümleri, sistemin üzerinde yer alan florometre ve turbidimetre ile klorofil-a floresansı, bulanıklık ölçümleri yapılır (Şekil 10). Rozet su örnekleme sistemi ile istenilen derinliklerden alınan su örneklerinde çeşitli biyo-kimyasal ölçümler yapılabilmektedir. Seabird CTD üzerine monteli PAR sensörü ile su kolonundaki fotosentetik aktif ışınım düzeyleri kesintisiz olarak ölçülmektedir. Ayrıca her istasyonda PAR ölçümleri yanı sıra gündüzleri Secchi disk derinliği ölçümleri de yapılır.



Şekil 10. R/V Bilim 2 araştırma gemisi ve CTD Rozet sistemi

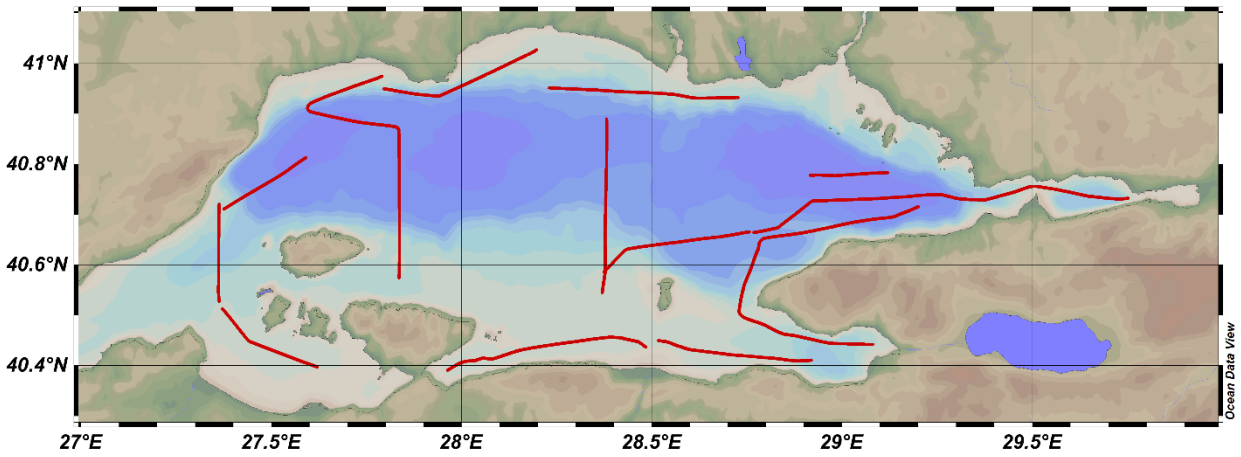
Scanfish (Su Kolonu Tarayıcısı) gemi tarafından çekilen, hareket halindeyken su kolonunda yukarı aşağı hareket ederek deniz suyunun fiziksel parametrelerini yüksek çözünürlükte ölçebilen modern bir cihazdır (Şekil 11). Geminin arkasından çekilen Scanfish isimli bu sistem deniz yüzeyinden 400 metre derinliğe kadar salınım yaparak çok yüksek çözünürlükte veri toplayabilmektedir. DEKOSİM projesi kapsamında alınan, Türkiye'de sadece ODTÜ-DBE'de bulunan bu sistem, geleneksel yöntemlere göre çok daha fazla yüzey alanı tarayabilmektedir. Kesintisiz veri toplayabilmesinden dolayı hem düşey yönde hem de yanal yönde değişimler yerinde gözlenebilmektedir.



Şekil 11. ScanFish (Su Kolonu Tarayıcısı) cihazı ve çalışma prensibi

Müsilajın yayılım sürecini incelemek için gerçekleştirilen Haziran-Temmuz araştırma seferinde ScanFish ile sürekli ölçümler yapılmıştır (Şekil 12).

Marmara Denizi'ndeki deniz trafiğini göz önünde bulundurularak tüm baseni temsil edecek şekilde Scanfish ölçümlerinin yapıldığı hatlarda CTD ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Her iki ölçümde de kıyı, açık ve boğaz bölgeleri temsili olabildiğince yansıtılmaya çalışılmıştır. Ancak İstanbul Boğazı Marmara Denizi çıkışındaki yoğun deniz trafiği nedeni ile Scanfish çekimleri bu bölgelerde yapılamamıştır.



Şekil 12. Haziran seferi 10 – 19.06.2021 tarihleri arası Scanfish ile gerçekleştirilen çekim hatları

Fitoplankton pigmentleri: Fitoplankton pigment çalışmaları seçilecek istasyonlarda (tercihen gündüz) CTD üzerindeki florometre verisinden klorofil-a nın düşey dağılımına göre maksimum 4 veya 5 derinlikten alınacak örneklerde yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) yöntemiyle yapılacaktır. Cam fiberinden yapılmış filtrelere yeteri kadar (Filtrasyon hacmi işlem sırasında filtreler görsel olarak kontrol edilerek karar verilecek) süzülmüş ve sıvı azotta veya dondurulup saklanmış örnekler seferden sonra en kısa sürede analiz edilecektir. Analizler donmuş örnekler 3 ml % 90'lık aseton içerisine atılarak ultrasonikatör ile 30 saniye süresince parçalanması ve hücrelerdeki boyar maddeleri (pigmentler) çözücü içerisine geçirilmesi ile başlamaktadır. Bu çözelti kromatografi cihazına verilmeden önce en az 8 saat +4 derecede karanlıkta bekletilerek filtre üzerindeki materyalin tamamen çözünmesi sağlanır. Sonrasında bu örnekler 5000 rpm hızda santrifüj edilerek katı partiküller (Filtre parçaları inorganik partiküller vs.) tabana çökertilir (Kullanılan bu method Barlow vd., 1993' belirttiği ve Mantoura ve Llewellyn, 1983'nin ters-faz

metodunun modifiye edilmiş halidir). Pigment analizleri C8 kolon kullanılarak sıvı kromatografi cihazında (HPLC-Agilent 1100) yapılır. Yürütücü fazda %80 metanol ve %20 1M amonyum asetat (A solventi) ile %100 metanol (B solventi) olmak üzere iki solvent kullanılır. Cihazın çalışma koşulları; akış hızı dakikada 1 ml ve solventlerden kullanım miktarı (dakika; %A solvent; %B solvent (0;75;25), (1;50;50), (20;30;70), (25;0;100), (32;0;100). Ardından kolonun tekrar normal koşullara dönmesi için 2.5 dakika beklenir. Santrifüj edilen örnekler viallere alınarak soğutuculu otomatik örnekleyici tablasına (autosampler) yerleştirilir (en az 500 µl). Örnek otomatik enjektör yardımıyla 500 µl çekilerek ayrı bir viale alınır ve üzerine 500 µl 1 M amonyum asetat eklendikten sonra sonra bu karışımdan 200 µl cihaza otomatik olarak enjekte edilerek analiz başlatılır (her bir analiz yaklaşık 39 dakika sürmektedir). Analiz sonuçları, standartların ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak hesaplanır. Kullanılan yöntemle 14 pigment ölçülmektedir. Bu pigmentler; 19'-but-fucoxanthin (But),19'-hex-fucoxanthin (Hex), Chlorophyll c2, Chlorophyll c3, Diadinoxanthin (Diad), Divinyl chl-a, Zeaxanthin (Zea), Fucoxanthin (Fuc), Alloxanthin (Allo), Lutein (Lut), Peridinin (Per), Chlorophyll a, Chlorophyll b ve beta carotene.

Klorofil a: Güneş ışığının ulaştığı en alt derinliğe kadar olan tabakadan standart veya florometreye bakılarak istenilen aralıklarla örnekler alınır. 1-5 litrelik plastik şişelere aktarılan deniz suyu örnekleri en kısa sürede, zayıf ışık altında GF/F tipi filtre kâğıtlarından süzülür. Filtre üzerinde tutulan plankton içerikli partikül maddeler analize kadar derin dondurucuda saklanır. Klorofil a ölçümleri için ön işlem basamakları HPLC metodu ile aynıdır. Ön hazırlık aşaması tamamlanan örnekler Hitachi 3600 spektroflorometrede 420 nm eksitasyon ve 669 nm emisyon dalga boylarında ölçülür (Strickland ve Parsons, 1972). Klorofil-a ölçümü yapıldıktan sonra örnek 1N HCL ile asitlenerek tekrar ölçülür ve feopigment değeri okunur. Yapılan ölçümün doğrulanması, için klorofil-a standardı ile hazırlanmış en az 5 farklı derişimde okuma yapılarak bir standart doğrusu elde edilerek hesaplamalar bu doğruya göre yapılır. Buna ek olarak asetondan kaynaklanacak ek değer de ölçülerek tüm ölçümlerden çıkarılmaktadır (Blank değeri).

Çözünmüş oksijen (ÇO): Yüzeyden tabana kadar uzanan su kolonunun belirlenen derinliklerinden alınan deniz suyu örnekleri, özel yapılmış 150 ml'lik cam kapaklı cam şişeler içerisine plastik hortum aracılığı ile hava kabarcıkları oluşturmadan aktarılır. Deniz suyu örneklerinin havadaki oksijenle kirlenmesini önlemek için boş cam şişeler, örnekleme yapmadan önce bir dakika kadar argon gazı ile yıkanır ve örnekleme anına kadar ağzı kapalı tutulur. Çözünmüş oksijen ölçümleri Winkler titrasyon metodu ile R/V Bilim-2 gemisinde sefer sırasında

yapılacaktır. Özel cam şişelere alınan ve ortamdaki oksijen miktarıyla orantılı olarak oluşan mangan çökelekleri, asit ilavesi ile çözündürülür ve örneğe eklenmiş olan iyodür çözeltisi ile tepkimeye girer. Açığa çıkan iyot, standart tiyosülfat çözeltisi ile titre edilir. Titrasyonun dönüm noktası nişasta çözeltisi veya redoks potansiyel elektrodu kullanılarak belirlenir. Karanlıkta korunan örneklerin analizi normal olarak iki saat içerisinde tamamlanır. Ölçümlerin hassasiyet derecesi ~0.05 ppm'dir.

Partikül Organik Madde (POM): deniz suyunun süzülmesinde kullanılacak GF/F tipi filtre kağıtları kullanılmadan önce 450-500 °C'de bir saat yakılarak filtre yapısında bulunan organik madde oksitlenir. İstasyonlarda alınan 5-10 litre deniz suyu örnekleri, en kısa sürede ve düşük emme basıncı uygulayarak GF/F tipi filtre kağıtlarından süzülür. Daha sonra 5-10 ml distile su ile yıkanır ve steril petri kutuları içerisinde derin dondurucuda analize kadar korunur. Bu ölçümler ODTÜ-DBE laboratuvarında yapılacaktır. Elementar Vario El Cube model CHN analiz cihazı kullanılacaktır. Analiz öncesinde dondurulmuş filtreler önce 50-60 derecede kurutulur, daha sonra kısa bir süre HCL buharında tutularak filtre üzerindeki karbonat bileşikleri uzaklaştırılır. Desikatör içerisinde vakumlanarak tekrar kurutulan filtreler 15-20 mg'lık 4-5 parçaya ayrılarak kalay kapsüller içerisine yerleştirilir ve kapsüllerin ağzı kapatılır. Cihazın örnek haznesi bölümüne yerleştirilen filtre örnekleri sırayla cihazın oksitleme kolonuna düşer ve oksijen gazı yardımıyla 1020°C'de ısıtılır. Oluşan karbon ve azot gazları, TCD detektörü yardımıyla kantitatif olarak ölçülür. Bulunan değerler süzülen su hacmine bölünerek birim hacimdeki organik karbon ve azot derişimleri hesaplanır. Elde edilen POC ve PON derişimlerinin molar (C/N) oranı, süzülen örnek içerisindeki organik madde yapısındaki C/N oranını verir. Toplam partikül fosfor (toplam PP) tayini için filtre kağıdı üzerine toplanan organik içerikli partikül madde 450°C'de ısı Persulfatlı çözeltide parçalanan ve pH'sı 7'ye ayarlandıktan sonra fosfat analiz metodu kullanılarak spektrofotometrik yöntemle partikül fosfor ölçümü yapılır.

Deniz suyunda TOC-DOC ve TN analizi: TOC analizi için belirlenen derinliklerden alındanan deniz suyu örneklerine pH'ı 2.0'nin altına düşecek şekilde 6.0 N HCl asit ilavesi yapılır ve +4 ˚C'de analiz edilinceye kadar muhafaza edilir. TN örneklerine ise asit ilavesi yapılmadan -20 ˚C'de saklanır. ODTÜ-DBE laboratuarında bulunan Teledyne Tekmar TORCH model TOC/TN analizörü ile yüksek sıcaklıkta katalitik parçalama metodu (HTCO) ile cihazın otomatik örnekleyici haznesine yerleştirilen örneklerde TOC ve TN örnekleri sırasıyla NDIR (TOC) ve kemilüminesans (TN)

detektörlerine ulaşarak kantitatif olarak ölçülür (Grasshoff ve diğ., 1983). DOC, TOC konsantrasyonundan POC konsantrasyonunun çıkartılmasıyla hesaplanacaktır (Cauwet ,1999)

Besin elementleri: Reaktif silikat, nitrat, nitrit ve orto-fosfat analizleri için deniz suyu örnekleri 100 ml'lik plastik (HDPE; seyreltik HCL ile yıkanmış) şişelere alınır. Koruyucu kimyasal eklemesi yapmadan silikat örnekleri buzdolabında, fosfat ve nitrat örnekleri ise derin dondurucuda analiz zamanına kadar saklanır. Ayrı şişelere alınan nitrit örnekleri ise bekletilmeden klasik spektrofotometrik yöntemle analiz edilir. Besin elementleri (NO_3, NO_2, $Si(OH)_4$ ve o-PO_4) ölçümünde dört kanallı Technicon A II model oto-analizörü kullanılır. Çok sayıda örneğin devamlı analizine olanak veren bu otomatik sistemde kullanılan ölçüm yöntemleri Technicon firmasınca geliştirilmiş ve zaman içerisinde revize edilerek uluslararası standart ölçüm metotları olarak kabul edilmiştir. Bu standart yöntemlerin hassasiyeti fosfat için 0.02, nitrat için 0.05 ve silikat için de 0.1 µM mertebesindedir.

Fitoplankton: Fitoplankton örneklemeleri Rozet üzerine takılı kapama şişeleri ile yapılarak yaklaşık 100 ml deniz suyu koyu renkli cam şişelere alınıp üzerine 2.5 ml gluteraldehit konularak fiske edilir (Uysal, 2000, 2001). Laboratuvara getirilen örnekler mevcut fitoplankton yoğunluğuna göre farklı hacimlerdeki çöktürme kaplarında bırakılarak, nicel ve nitel incelemeler için ters faz-kontrast mikroskop kullanlır. Örnek içinde başlıca diatomlar, dinoflagellatlar ve kokkolitoforitler olmak üzere mevcut tüm gruplara ait hücreler tür düzeyinde tanımlanır ve fitoplankton tür çeşitliliği ve bolluğu belirlenir. Synechococcocus, Prochlorococcus ve küçük ökaryotların (pikoplankton) bolluklarının belirlenebilmesi için ODTÜ-DBE plankton laboratuvarı'nda bulunan Apogee marka akış sitometre (flow cytometer) cihazı kullanılmaktadır. Su kolonunda belirli derinliklerden Niskin şişeleri ile alınan örnekler, koyu renkli cam şişelere alınıp üzerine son hacim %2 olacak şekilde Gluteraldehit eklenerek fikse edilir. Daha sonra laboratuvara getirilen örnekler akış sitometre cihazında analiz edilerek içerisindeki Synechococcocus, Prochlorococcus ve küçük ökaryotların bolluk miktarları belirlenir.

3.3 Plankton Solonumunun Parametrize Edilmesi (İP3)

Deneysel ve çevresel değişkenlerden elde edilecek sonuçlar aynı platformda ve formatta birleştirilmiştir. Verilerin görsel olarak analizi ve istatistik çalışmaları ODV, SigmaPlot, SAS, R ve MATLAB programları ile kullanılarak yapılmıştır. Veriler ODTÜ DBE'nin sahip olduğu veri tabanında saklanmaktadır. Değişkenler arası istatistiksel hesaplamalarda Spearman korelasyon

analizi uygulanmış, R^2 değerleri >0.3 ve <-0.3 p değerleri ise <0.05 anlamlı istatistiksel ilişki olarak kabul edilerek verilmiştir.

Ayrıca solunum hızının (R) çözünmüş oksijen (DOW) ve deniz suyu sıcaklığı (T) ile olan ilişkisinin belirlenmesi amacı ile regresyon analizi yapılmıştır. Bu kapsamda R'nin DOW ve T ile ilişkisi aşağıdaki fonksiyon ile modellenmiştir:

$$R = a\ DOW^b\ T^c$$

Burada a, b ve c fonksiyon parametreleridir ve regresyon analizi ile bu parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Regresyon kapsamında, veriler ile fonksiyonun tahmin ettiği değerlerin farkını ölçen aşağıdaki objektif fonksiyonu kullanılmıştır:

$$O = \sum_i \left| R^i_{\text{veri}} - R^i_{\text{fonksiyon}} \right|^2 = \sum_i \left| R^i_{\text{veri}} - a\ DOW^b_i\ T^c_i \right|^2$$

Objektif fonksiyonunu minimize eden a, b ve c değerleri

$$\min_{a,b,c} O = \min_{a,b,c} \sum_i \left| R^i_{\text{veri}} - a\ DOW^b_i\ T^c_i \right|^2$$

yukarıda verilen R fonksiyonunun tahminlerinin ölçülen R değerlerine en yakın olmasını sağlayan değerlerdir.

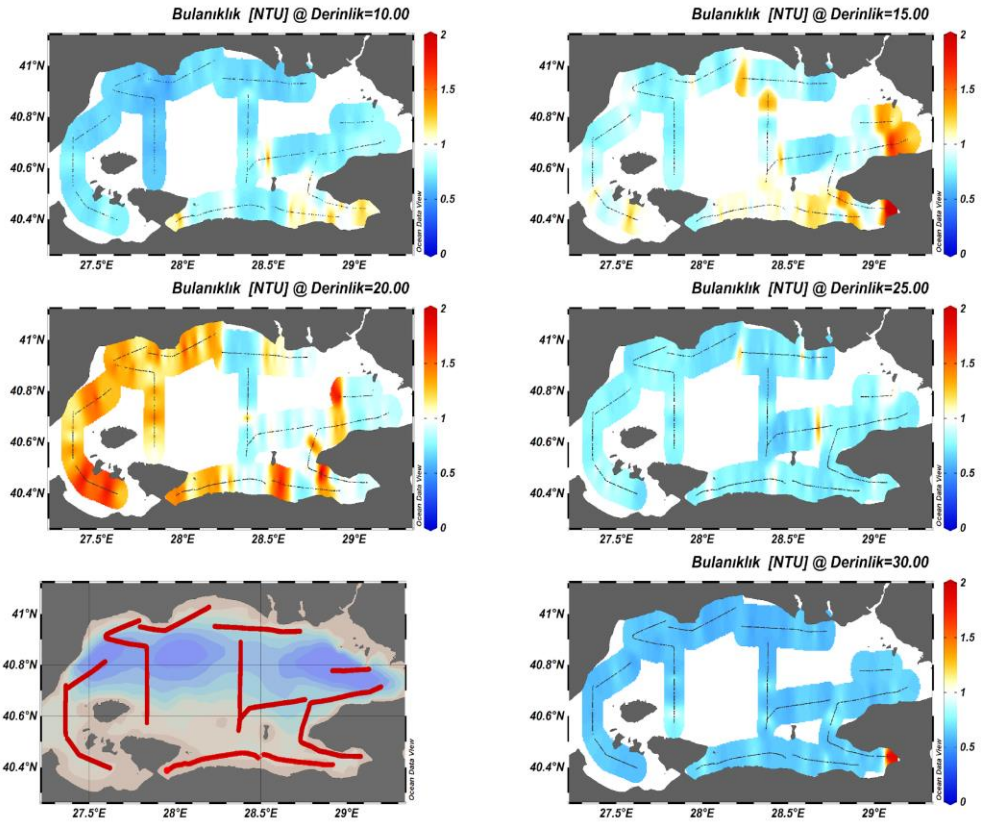
Yukarıda belirtilen minimizasyon problemi MATLAB yazılım paketinin içerdiği Genetik Algoritma (GA) yöntemi ile çözülmüştür (Goldberg et al. 1989). Bu yöntem iteratif bir yöntemdir ve tahmin edilmesi istenilen parametreler için belirlenen parametre değer aralıklarında gelişigüzel (random) 100'den fazla başlangıç değeri oluşturarak başlar. Parametre uzamındaki bu değerler $\{\{a_1, b_1, c_1\}, \{a_2, b_2, c_2\}, \{a_3, b_3, c_3\} \dots\}$ başlangıç "nüfusunu" oluşturur. Bu nüfusun bireylerinin seçilim değerleri (fitness) yukarıdaki objektif fonksiyonu kullanılarak belirlenir. Seçilim değerleri düşük olan bireyler elimine edilir. Seçilim değerleri yüksek olan bireyler ise bir sonraki iterasyon için saklanır. Yüksek seçilim değerli bireylerden bir sonraki iterasyon için yeni bir nüfus oluşturulur. Bu nüfus bir önceki iterasyonda yüksek seçilim değerleri olan bireylerin mutasyona uğratılarak (gelişigüzel küçük değerler eklenerek) ve çiftleştirilerek (iki bireyin değerlerinin birleşimi) oluşturulur ve tekrar seçilim değeri hesabı yapılır. Algoritmanın sonlanması maksimum iterasyon sayısına ulaşılması veya seçilim değerlerinin iterasyonlar arasında fark göstermemesi durumunda olur ve bu aşamada en yüksek seçilim değerine sahip bireyin parametre değerleri algoritmanın çıktısıdır. GA yöntemlerinin diğer minimizasyon yöntemlerine göre en büyük avantajı lokal yerine global minimuma ulaşma yetenekleridir.

4 BULGULAR

4.1 Marmara Denizi'nin Müsilaj Sırasında ve Sonrasında Fiziksel ve Biyokimyasal Durumu (İP 2)

4.1.1 Müsilajın scanfish cihazı ile dağılımının belirlenmesi

Marmara Denizi'nde belirlenen hatlar boyunca bulanıklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 13). Bulanıklık deniz suyunun berraklığının ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada bulanıklık ölçümleri müsilaj dağılımını ve yoğunluğunu haritalamak için kullanılmıştır. Scanfish (Su Kolonu Tarayıcı) verileri ile Marmara Denizi'nde yapılan bulanıklık taraması CTD profilleri ile de uyumlu olarak müsilajın özellikle 10-25 m bandına sıkıştığı bulgusunu ortaya çıkartmıştır (Şekil 13). Bu durum yüzeyde müsilaj gözlensin veya gözlenmesin değişmemiştir. Bu sonuçlara göre, ilk 10 metrede müsilaj seyrek görülmektedir.



Şekil 13. Marmara Denizi'nde belirlenen hatlarda ScanFish cihazı ile farklı derinliklerde ölçülen bulanıklık değerleri

4.1.2 Müsilaj dönemi (Haziran-Temmuz 2021) çevresel değişkenler

MARMOD Faz II kapsamında 01.06.2021 – 01.07.2021 tarihleri arasında Marmara Denizi'nde gerçekleştirilen Haziran ayı seferlerinde CTD cihazının sensörleri ile toplanan sıcaklık, tuzluluk, oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Elde edilen kesintisiz verilerin yüzeyden 100 m (0-100m) derinliğe kadar ulaşan su kolonunda doğudan-batıya (Şekil 14) ve güneyden-kuzeye (Şekil 15) hatlar halinde ölçüm sonuçları dağılımları verilmiştir.

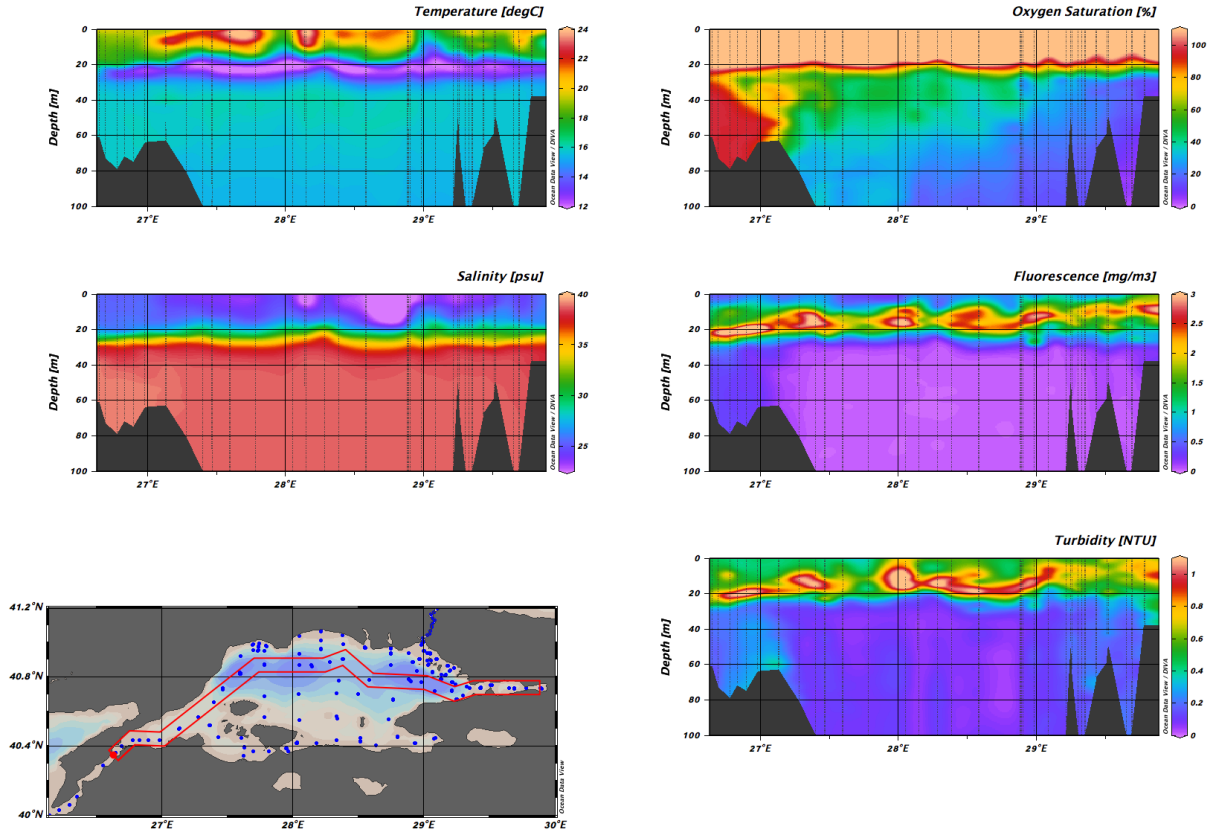
Hidrografik sonuçlara göre yaz dönemi yüzey suyu sıcaklığı bölgesel olarak kıyısal alanda 20-25°C arasında değişim göstermiştir. Yüzeydeki az tuzlu sıcak su tabakasının altında 15-30 m arasındaki derinlikte daha soğuk keskin bir haloklin ara tabakası kalıcı olarak varlığını yıl boyunca sürdürmektedir. Yaz dönemi haloklin su sıcaklığı ortalama 12°C seviyesindedir. Haloklin altında ise tabana kadar tuzluluğu 38.5-38.8 psu ve sıcaklığı 15.0-15.5 C° seviyesinde olan Ege Denizi kökenli tuzlu su tabakası vardır.

Bu dönemde Marmara boyunca meydana gelen müsilajın alansal ve derinliğe bağlı bulanıklık ve göreceli biyokütle dağılımı CTD cihazı üzerindeki bulanıklık ve floresans sensörleri ile kantitatif olarak ölçülmüştür. Şekillerde verilen alansal dağılım kesitlerinden görüleceği üzere yaklaşık yüzeyden 30 m derinliğe kadar uzanan üst tabakada müsilajın yoğun olarak bulunduğu saptanmıştır. Müsilaja neden olan biyokütle göstergesi klorofil-a konsantrasyonları en yüksek değerlerde (>3 mg/m^3) haloklin tabakasının üst kısmında ölçülmüştür. Müsilajın tüm Marmara'ya yayıldığı gözlenmiş ve ara tabaka alt sınırına inildikçe çok keskin bir azalım göstermiştir. Sağlıklı deniz ekosistemlerinde güneş ışığının ulaştığı yüzey sularında gerçekleşen fotosentez-solunum gibi biyokimyasal süreçler ve atmosferik oksijenin yüzey sularına penetre etmesi ile fotosentezin gözlendiği üst tabaka suları oksijence doygundur (>%100). Müsilajın hakim olduğu yüzey tabakasında aşırı plankton üretimine bağlı olarak oksijen doygunluğu %100'ün üzerine çıkmıştır. Akıntıların görece zayıf olduğu körfezlerde aşırı üretime bağlı olarak %150 seviyesine kadar yükselmiştir (Şekil 14- Şekil 16). Bunun başlıca sebebini ortamda bulunan aşırı fitoplanktonun gerçekleştirdiği fotosentez sonucu ortama verdiği oksijen olarak yorumlamak mümkündür. Yüzey tabakada oksijen fazlalığı yaşanırken haloklin, haloklin altı tabaka ve dip sularda ciddi oksijen azalmaları görülmektedir (Şekil 14- Şekil 16).

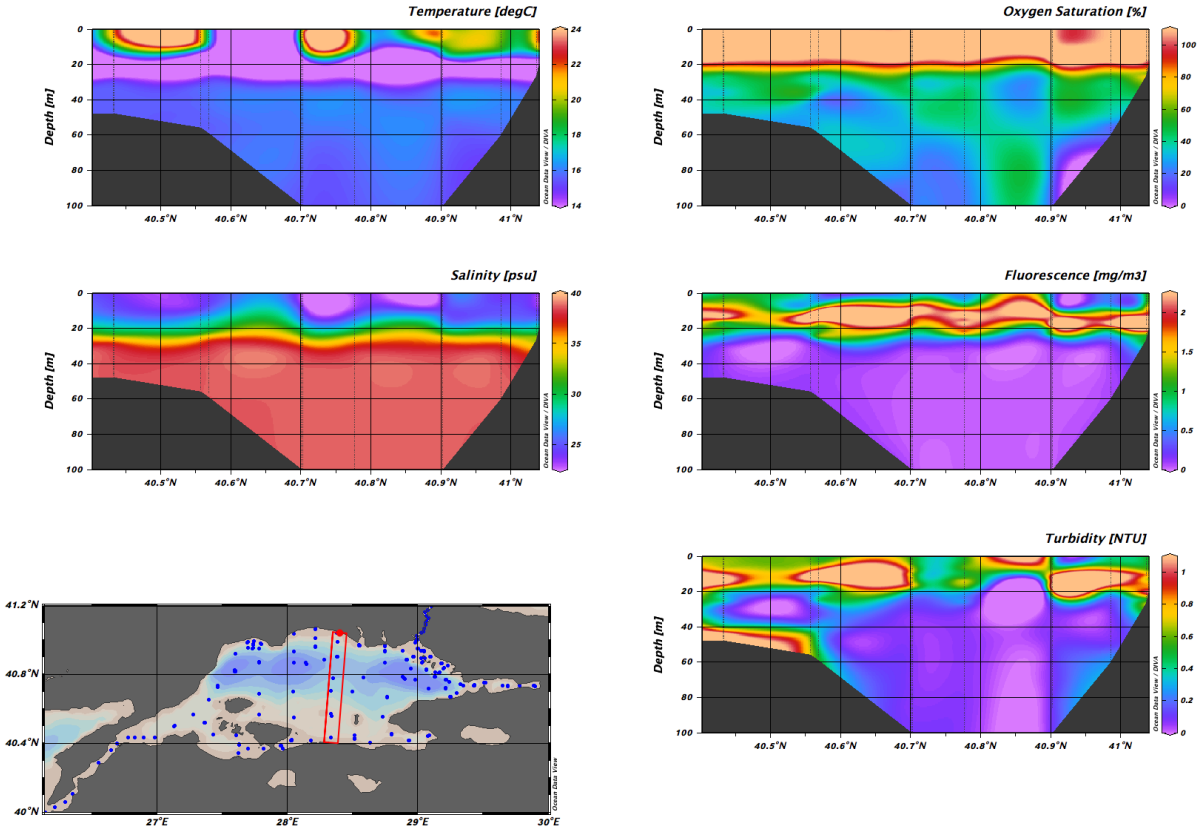
Üst tabaka suları oksijence doygun iken haloklin alt sınırında, oksjen çok hızlı azalmış ve keskin oksijen minimum değerlerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Haloklin altı derin tuzlu sularda ise oksijen derişimi çok düşüktür (<0.2 mg/L) ve dip sularda anoksik (oksijensiz) durum gelişmiştir. Özellikle doğu Marmara'nın dip sularında tükenme noktasına ulaşmıştır (<0.2 mg/L). Marmara orta ve batı baseni derin çukurlarında ise hipoksik koşullar (<1.0 mg/L) gelişmiştir (Şekil 16).

Oksijen ölçüm sonuçlarının batı-doğu kesiti (Çanakkale-İstanbul Boğazı arası) incelendiğinde Marmara Denizi'nin dip sularına akan Akdeniz suyunun oksijence doygun (%100) olduğu görülmektedir. Doğu basenine ulaştığı ve kaldığı 6-8 yıllık sürede oksijen içeriğinin tamamının tükendiği ve son yıllarda kalıcı hale gelen anoksik (oksijen <0.1 mg/L) duruma ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca, son yıllarda yaz sonu dönemi saha çalışmalarında doğu basenindeki Çınarcık Çukuru dip sularında düşük seviyede mevsimsel hidrojen sülfür birikimi de gözlenmiştir. Sonbahar-kış döneminde orta basenden doğu basenine ulaşan görece yüksek oksijen taşıyan soğuk Ege suları ile bu sülfür birikiminin oksijenli sularla karışarak oksitlendiği gözlenmiştir. Ancak, Marmara orta baseninde de oksijen düşük olduğundan yer değişitiren suların miktarı ve oksijen içeriği 2016 sonrasında doğu baseni dip sularında anoksik koşulların kısmen iyileşmesi için yetersiz kaldığı ve anoksik durumun 700m altında sürdüğü gözlenmiştir. Son yıllarda gerçekleştirilen ölçüm sonuçları değerlendirmesine göre, Marmara dip sularının Ege'den giren oksijenden fazla partikül organik maddenin yüzeyden dip sularına ulaştığı açıkça görülmektedir.

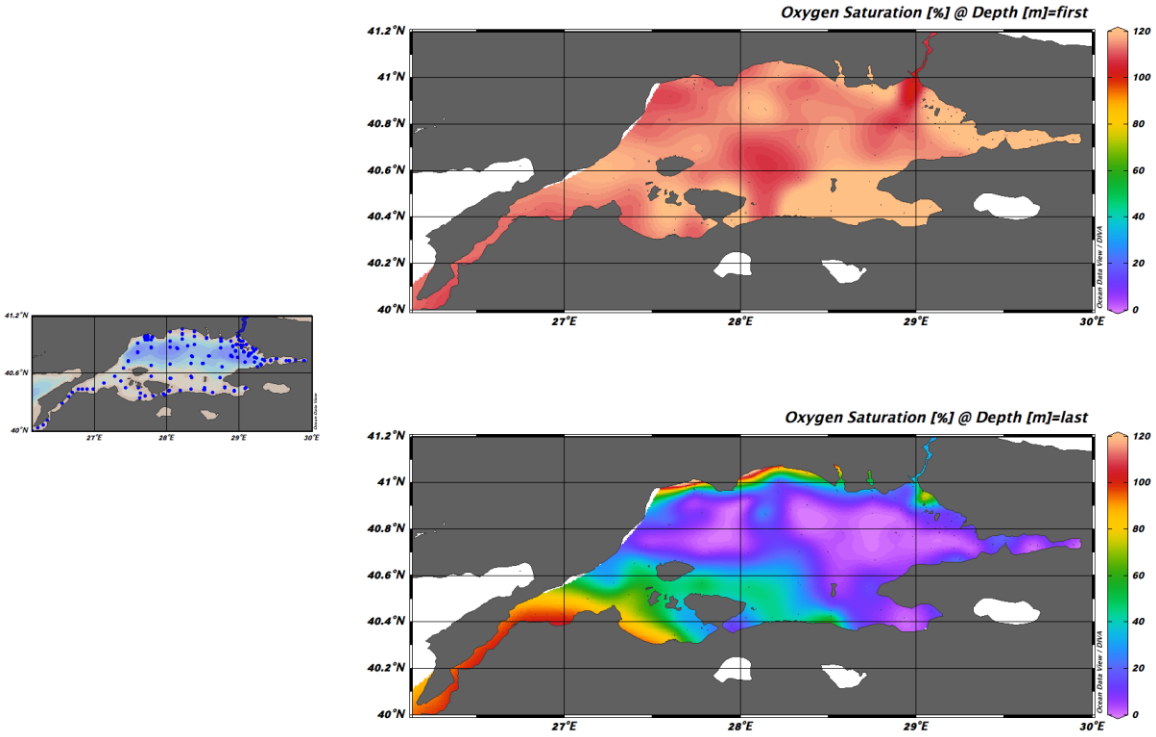
Güney-Kuzey hattı arasında yapılan detaylı ölçüm sonuçlarına göre ara tabakada belirgin müsilaj yoğunluğu dağılımı değişimi gözlenmemiştir. Müsilaj-fitoplankton kaynaklı yüksek floresans, bulanıklık ve oksijen doygunluk değerleri tüm üst tabaka su kolonununda yüksektir. Haloklin alt sınırında keskin azalım eğilimi göstermiştir (Şekil 15).



Şekil 14. Marmara Denizi Doğu-Batı kesiti 01.06 – 01.07.2021 tarihleri arasındaki sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri



Şekil 15. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti 01.06 – 01.07.2021 tarihleri arasındaki sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki su kolonunda derinlik ve bölgesel değişimleri



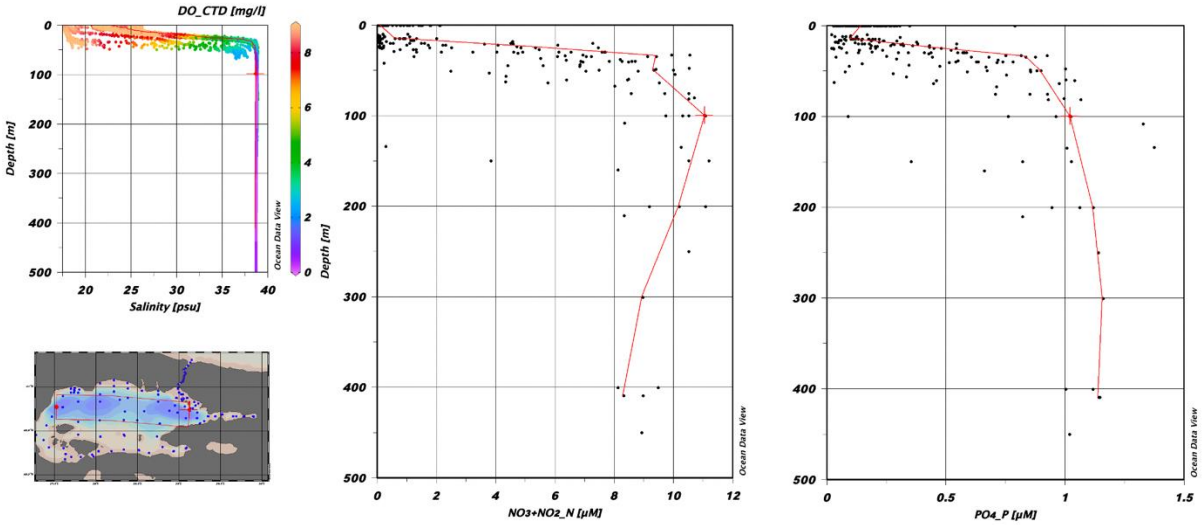
Şekil 16. Marmara Denizi haziran seferleri oksijen doygunluk (%) değerlerinin yüzey (üst) ve dip su alansal dağılımları

Marmara Denizi iki tabakalı hidrodinamik yapıya ve bu kalıcı yapının yarattığı kendine özgü ekosisteme sahiptir. Fotosenteze dayalı organik madde az tuzlu yüzey sularında olduğu için yüzey sularına farklı kaynaklardan giren besin elementleri yıl boyunca değişen oranlarda tüketilmektedir. Kış ve yağışlı dönemlerde artan besin iyonları girdisi, Karadeniz kaynaklı TN ve TP girdisiyle birleşince yüzey sularında aşırı plankton üretimi olmaktadır. Besin elementlerinin bolluğu ve N/P/Si oranındaki belirgin değişimlerle farklı çökelme hızlarında, farklı plankton türlerinin baskın hale geldiği gözlenmiştir. Aşırı üretime bağlı olarak yüzey sularında reaktif N, P iyonları derişimi düşüktür. Geçmiş yıllarda (2010 öncesi) haloklin alt sınırında başlayan reaktif N, P birikiminin müsilajın olduğu 2021 ilkbahar yaz döneminde, POM çökelme hızı düşük olduğu için ara tabakada gözlenen yoğun POM oksidasyonu ile birlikte ara tabaka da çok belirgin arttığı gözlenmiştir (Şekil 17). Bu artış profilleri, aynı alandaki oksijen profilleri ile ters yönlü uyum içindedir.

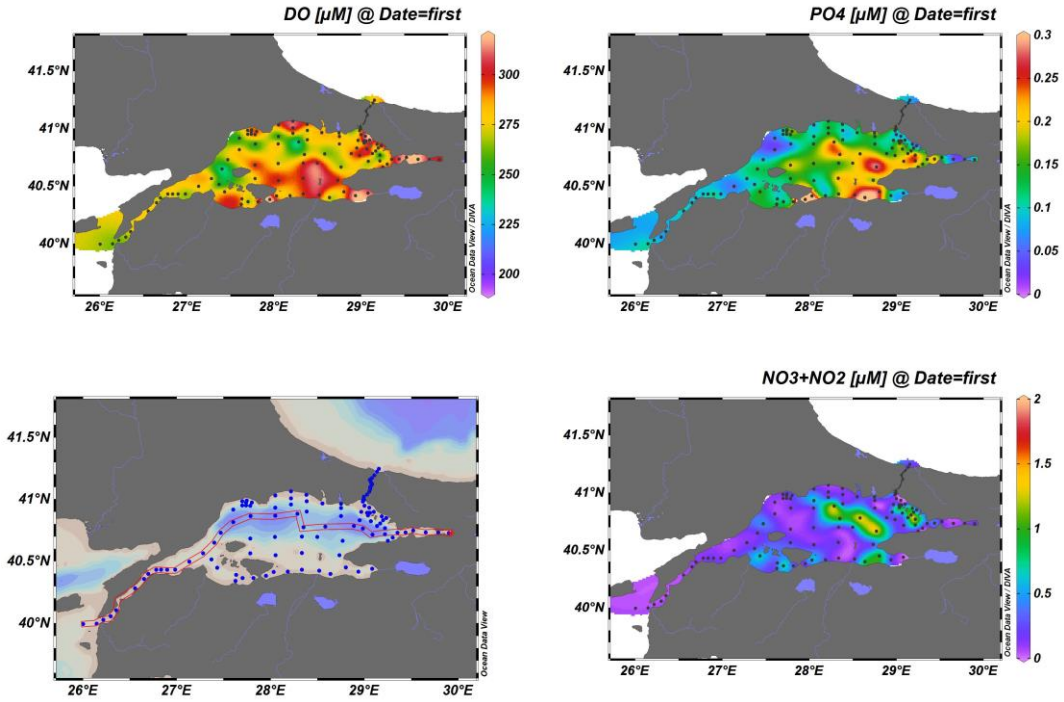
Reaktif N, P iyonları boğaz girişinde ve karasal kaynaklı kirliliğin yüksek olduğu kıyısal alanlarda görece yüksektir (Şekil 17). Susurluk bölgesi atıklarını taşıyan nehir sularının getirdiği aşırı azot yükünün izleri yüzey dağılımda çok belirgindir. Yine Adalar-Tuzla bölgesi atık suların etkisinde kalan alanlarda nitrat derişimi yüksek ölçülmüştür. Boğazdan, alt tabakadan ve karasal kaynaklardan giren N, P yüklerine orantılı olarak Marmara yüzey suları N/P oranları basen

boyunca alansal değişim göstermiştir. Bu kaynakların karışımı ve tüketiminden arta kalan besin iyonları Çanakkale üst akıntısı ile Kuzey Ege üst tabaka ekosistemini beslemektedir. Karadeniz'den 17-17,5 psu tuzluluk değerler ile giren az tuzlu yüzey suları boğaz çıkışındaki dinamik alt-üst tabaka arasında giren az tuzlu yüzey sularının yaz sonbahar döneminde Marmara baseni içinde 22-24 arasında değiştiği gözlenmiştir. Marmara üst ve alt tabaka sularında ölçülen tuzluluk, nitrat ve fosfat değerleri toplu olarak Şekil 17'de çizilmiştir. Tuzluluk, yüzeydeki Karadeniz kökenli üst tabaka suların altındaki haloklin içinde 15-35 m arasında çok hızlı artış göstermiş ve alt tabakada 38,5 psu üzerine çıktığı gözlenmiştir. Üst tabaka suları oksijence doygundur; ara tabakada keskin azalış göstermiş ve tuzlu alt tabaka sularında, doğu baseninde, 1.5 mg/L altına düşmüştür. Batı baseninde, Ege'nin oksijenli tuzlu sularında ise doğu basenine göre daha yüksektir. Besin iyonları bölgesel dağılımı da oksijen değerlerinin alansal değişimine çok benzerdir. Oksijeni düşük alanlarda besin iyonları yüksektir. Haloklin alt sularında nitrat ve fosfat değerlerinin maksimum seviyelere ulaştığı ve aynı derinliklerde de oksijen aynı oranda düşüklüğü görülmektedir. Nitrat (nitrat+nitrit toplamı) 30-150m arasında 11-12µM değerlerine ve fosfat konsantrasyonları (PO_4-P) ise yer yer 1.4 µM kadar ulaştığı gözlenmiştir. Alt tabaka su kolonunda ki fosfat derişimi genelde derin sulara doğu zayıf artış eğilimi ve 1.1-1.2 µM aralığında değişim göstermiştir. NO_2+NO_3-N derişimi ise 300m altındaki sularda oksijen çok düşük olduğundan denitrifikasyon sonucu azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalma doğu baseni dip sularında çok belirgindir ve N/P oranı 50-150m derinlikle yaklaşık 10 seviyesinde iken oksijensiz hale gelen dip sularda 5-6 seviyesine düşmüştür. Bu değişim, dip sularda POM oksidasyonu ile açığa çıkan nitrat derişiminin yaklaşık yarısının denitrifikasyon tepkimesinde tüketildiğini açıkça göstermektedir. Bu oranın 1.0-1.5 µM seviyesi altına düşmesi ile dip sularda kalıcı hidrojen sülfür birikimine sebep olacağı öngörülmektedir. Mevcut kirlilik yükünün devam etmesi ve müsilajla çökmesi engellen POM girdisinin artmasıyla sülfürlü suların oluşumunun hızlanması öngörülmektedir.

Dikey profiller için Şekil 17'deki seçilen bölgede NO_2+NO_3-N yüzeyde yer yer 2 µM'a kadar çıkmakta, PO_4-P ise yüzeyde maksimum 0.3-0.4 µM değerlerine ulaşmaktadır. Şekil 17 ve Şekil 18'da ise Haziran 2021 ayında basenin genelindeki yüzey besin elementleri dağılımı gösterilmiştir. Hem N hem de P yüzey değerlerinin değişkenlik göstermekle beraber genelde Doğu Marmara kesimlerinde yüksek olduğu, kıyısal bölgelerde en yüksek değerlerine ulaştığı belirtilebilir.



Şekil 17. Haziran ayında dikeyde inorganik çözünmüş azot (nitrat artı nitrit) ve fosfor (fosfat) dağılımları

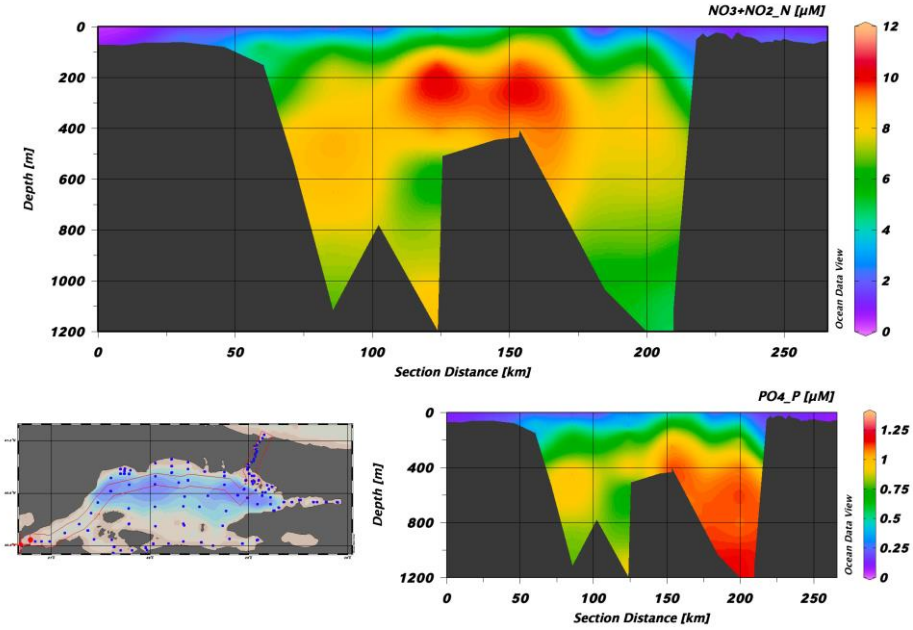


Şekil 18. Haziran 2021 ortası itibariyle inorganik çözünmüş azot (nitrat artı nitrit) ve fosforun (fosfat) yüzey sularında dağılımları

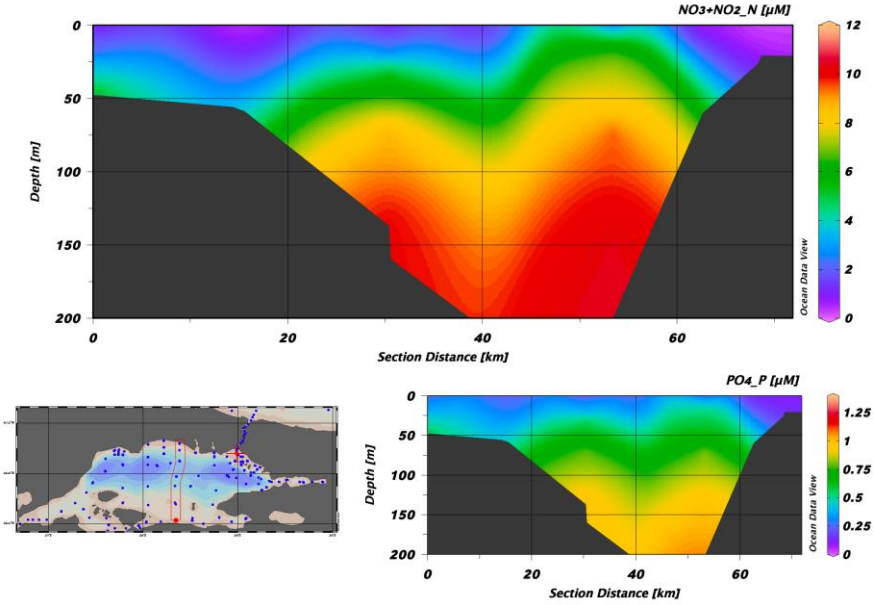
Marmara baseni su kolonunda ölçülen reaktif inorganik azot (nitrat+nitrit) ve reaktif fosfor değerleri bölgesel olarak hem üst tabaka sularında hem de yüzeyden dip suya kadar çizilen doğu-batı (Çanakkale Boğazı- İstanbul Boğazı arası) ve Orta Marmara kuzey -güney yönlü kesitlerde belirgin

farklılıklar göstermiştir (Şekil 19). Reaktif besin tuzları, fotosenteze dayalı tüketimden dolayı yüzey sularında düşüktür. Karasal girdi kaynaklarının debisine ve lokasyonuna bağlı olarak belirgin artış gözlenen alanlar vardır. Fotosentez tabakasının altında inorganik besin iyonları derişimlerinin belirgin artış gösterdiği bilinen özelliktir. Tuzlu dip sular besin iyonlarınca zengindir ve kaynağı da yüzeyden çökelen POM'un havalı ortam bakterilerince parçalanması ve yüzeye göre durağan (ortalama 6-7 yılllık kalış süresi) olan dip sularda birikmesidir. Belirtilen özelliklerin alansal dağılımlarının genel yapısını gözeten kesitler, Şekil 19 ve Şekil 20'te açık şekilde görülmektedir. Çanakkale Boğazı alt akıntısıyla giren ve 30 metre derinliğin altında Marmara Denizi alt tabakasını oluşturan tuzlu sular, düşük nitrat ve fosfat değerleri ile Marmara iç sularına karışır. Giren hacim kadar yaşlı sular oksijence fakirleşmiş, besin iyonlarınca yaklaşık 10 kat artarak İstanbul Boğazı alt akıntısı ile Karadeniz'e ulaşır. Bir kısmı da ağırlıklı olarak Boğaz'ın Marmara girişine yakın bölgede üst sulara karışarak birkaç aylık sürede üst akıntılarla Çanakkale Boğazı yoluyla Ege Denizi'ne ulaşır. Yüzey sularına karışan besin iyonlarının önemli bir oranı fotosentez yoluyla tüketilir ve POM yapısında alt sulara çöker ve parçalanma-oksidasyon yoluyla inorganik besin iyonları olarak alt tabaka besin iyonları bütçesine eklenir (Şekil 19). Önceki bölümde de vurgulandığı üzere oksijence çok fakir olan doğu basenindeki Çınarcık Çukuru dip sularında (>700m) nitrat (NO_2+NO_3-N) değerlerinde denitrifikasyon yoluyla belirgin (%40-50) azalma olduğu belirlenmiştir. Marmara karasal baskıların devam etmesi halinde -değişen iklimsel şartlar da dikkate alındığında- doğu baseni dip sularında kalan nitrat iyonlarının tamamen tüketileceği ve oksijensiz, hidrojen sülfür birikiminin kalıcı olabileceği öngörülmektedir.

Marmara Denizi'nde elde edilen verilerden çizilen kuzey-güney yönlü kesit Şekil 20'te çizilmiştir. Doğu-batı yönlü kesite benzerdir. Oksijence fakirleşen dip sularda besin iyonları birikimi/zenginliği belirgindir. Kuzey ve güney kıyısal-kıta sahanlığı alanlarının karşılaştırmalı değerlendirmesinden, güney alanı kıta sahanlığı yüzey ve dip sularının reaktif N ve P iyonlarınca daha zengin olduğu görülebilir. Bu bölgesel farkın kaynağı Susurluk havzasından sürekli yüksek debilerde giren azot fosfor yüklerinin kıyı sularda birikimidir; bir kısmı fotosentezde kullanılır, organik bileşiklere döner ve bir miktarı POM olarak alt sulara çökelir. Yüzey suyunda kalanlar genel akıntı sistemi ile Marmara basenine taşınır. Yüzey suyunun dağılımı incelendiğinde karasal girdilerin doğrudan etki alanı görülebilir.



Şekil 19. Haziran seferi Çanakkale Boğazı – İstanbul Boğazı arası Marmara Denizi kesitinde besin elementleri dağılımı

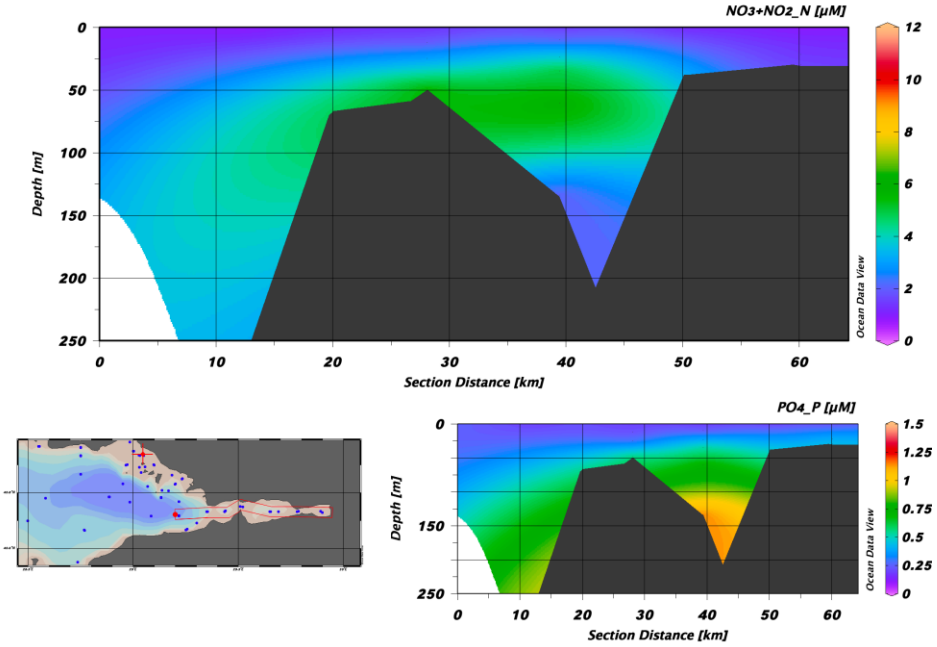


Şekil 20. Haziran seferi güney-kuzey ekseninde Susurluk havzası ve Silivri arasında Marmara Denizi kesitinde besin elementleri dağılımı

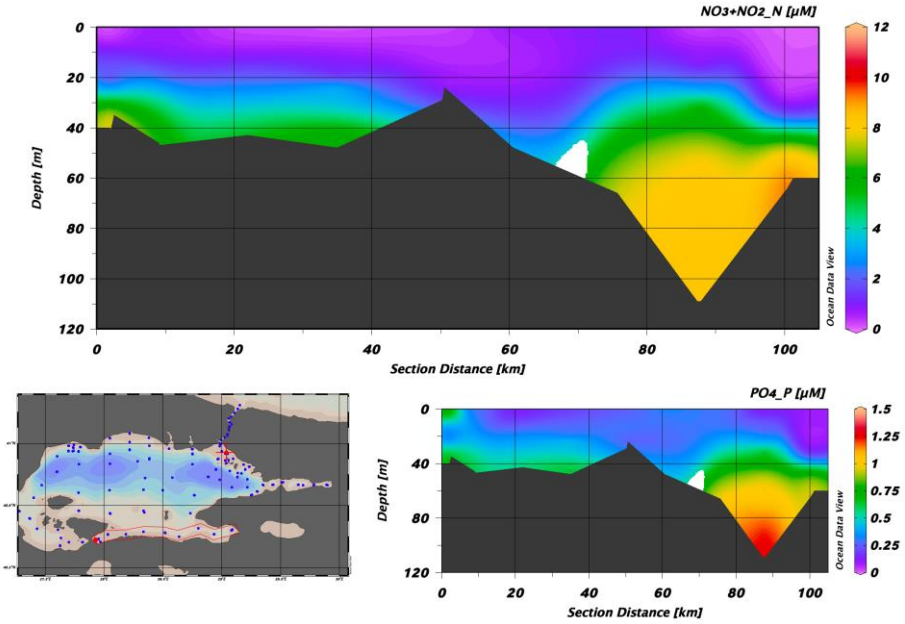
Marmara Denizi'nin kuzeydoğusunda yer alan yarı kapalı İzmit Körfezi'nin hidro-kimyasal yapısı Marmara Denizi'ne benzerdir ve iki tabakalı deniz ekosistemi vardır. Bu bölgenin suları 1980'li

yıllardan beri artan endüstriyel faaliyetler ve yoğun nüfus artışı ile aşırı azot ve fosfor yükü almaktadır. Kentsel atık sular son yıllarda arıtılarak Körfezde farklı noktalardan deşarj edilmektedir. Körfez suları doğu Marmara suları ile yenilendiğinden, giren suların kirli olması körfeze ek yük taşımaktadır. Son yıllarda Körfez orta bölgesi dip sularında yaz döneminde çok belirgin hidrojen sülfür birikimi olduğu gözlenmiştir. Körfeze deşarjlar ve sellerle aşırı azot yükü taşındığında yüzey sularında besin iyonları zenginleşmesi ve N/P/Si oranında anormal değişimler olduğu ve müsilaja neden olan planktonik canlıların üretimi ve bolluğu aşırı artmıştır. Deniz ekosistemin doğal dengesi bozulduğu için ara tabakada yoğun organik madde birikimi ve bunun üstünden beslenen heterotrofların müsilajlı katı madde oluşumunu aşırı arttırdığı yapılan saha çalışmasında gözlenmiştir. Bu anormal değişime bağlı olarak Körfezde sadece yüzeyde oksijen doygunluğu vardır. Keskin haloklin içinde benzer keskin bir oksijen azalması ve suboksik/anoksik duruma ulaştığını gösteren sonuçlar görülmüştür (Şekil 21). Fotosenteze dayalı tüketimle yüzey sularında reaktif inorganik N ve P değerleri düşüktür. Haloklin içinde artarak alt tabakadaki yüksek değerler doğu Marmara dip sularına benzerdir. Körfez'in orta bölge dip sularında (>100m) oksijensiz durum yaz-sonbahar döneminde kalıcı hale gelmiştir. Son yıllarda dip sularda nitrat iyonlarının tükenme noktasına ulaştığı ve çok belirgin hidrojen sülfür birikimi gözlenmiştir.

Susurluk havzasından taşınan kirli akarsuların beslediği güney Marmara kıta sahanlığı sularında Haziran-Temmuz 2021 döneminde inorganik besin elementleri değerlerinin yüksek olduğu yukarıda vurgulanmıştır. Ancak dip suları Marmara açık suları ile doğrudan etkileşim içinde olduğundan, İzmit dip sularında gözlenen oksijensiz koşullar kıta sahanlığı dip sularında oluşmamıştır. Güney kıta sahanlığına açılan Bandırma Körfezi de insan kaynaklı (özellikle endüstriyel ve kentsel atık sular) karasal girdilerin yoğun baskısı altındadır. Şekil 22'de görüleceği üzere Bandırma Körfezi-Gemlik Körfezi arasındaki kesitte özellikle bu iki körfez iç sularına belirgin fosfor ve azot girdisi olduğu görülmektedir. İç körfezlerde su kalitesi kötüdür ve Marmara'da müsilaj oluşumunu tetikleyen ve besleyen önemli sıcak noktalar içinde yer almaktadır. Bandırma Körfezi'nde yüzey sularında aşırı reaktif fosfat girdisi ve fazlalığı vardır. Gemlik körfezi yüzey sularında endüstriyel ve kentsel atık su kaynaklı N ve P girdisi vardır. İç körfez sığdır ve suların yenilenme süreleri uzun olduğundan dip sularında oksijen azlığı çok belirgindir ve buna bağlı nitrat ve fosfat değerleri yüksektir.



Şekil 21. Haziran seferi İzmit Körfezi doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı

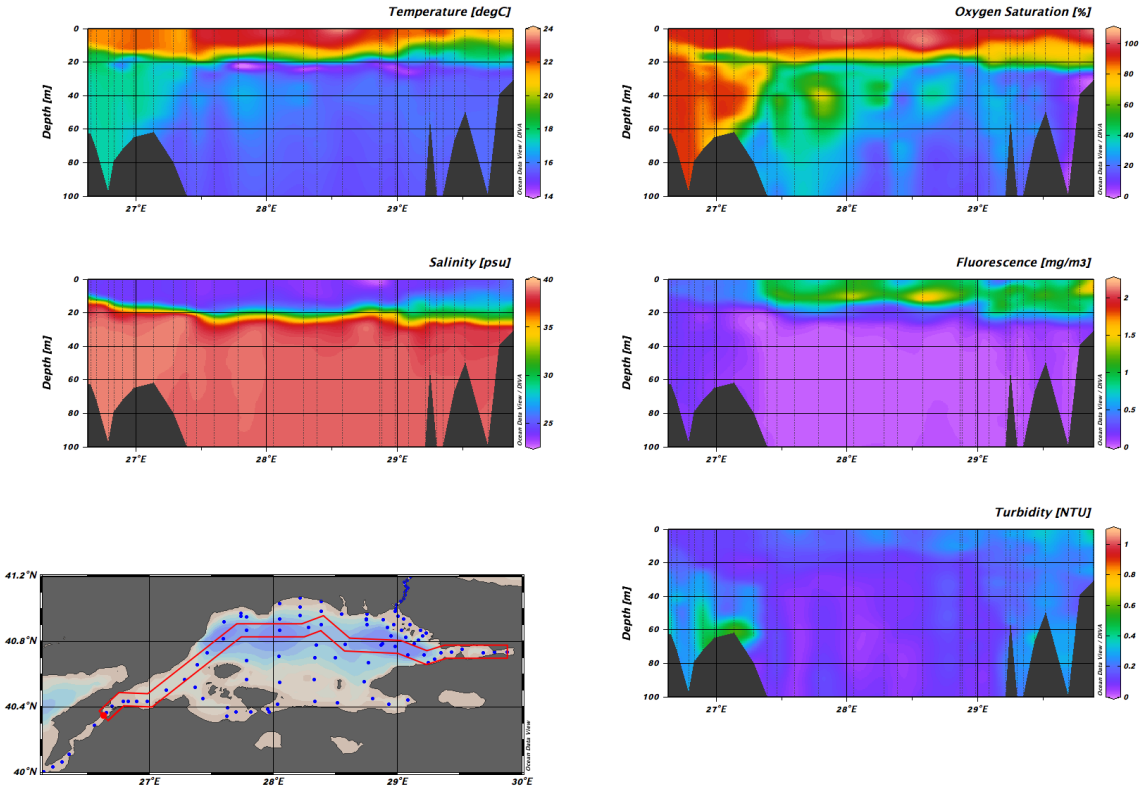


Şekil 22. Haziran seferi Marmara Güney Şelfi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı

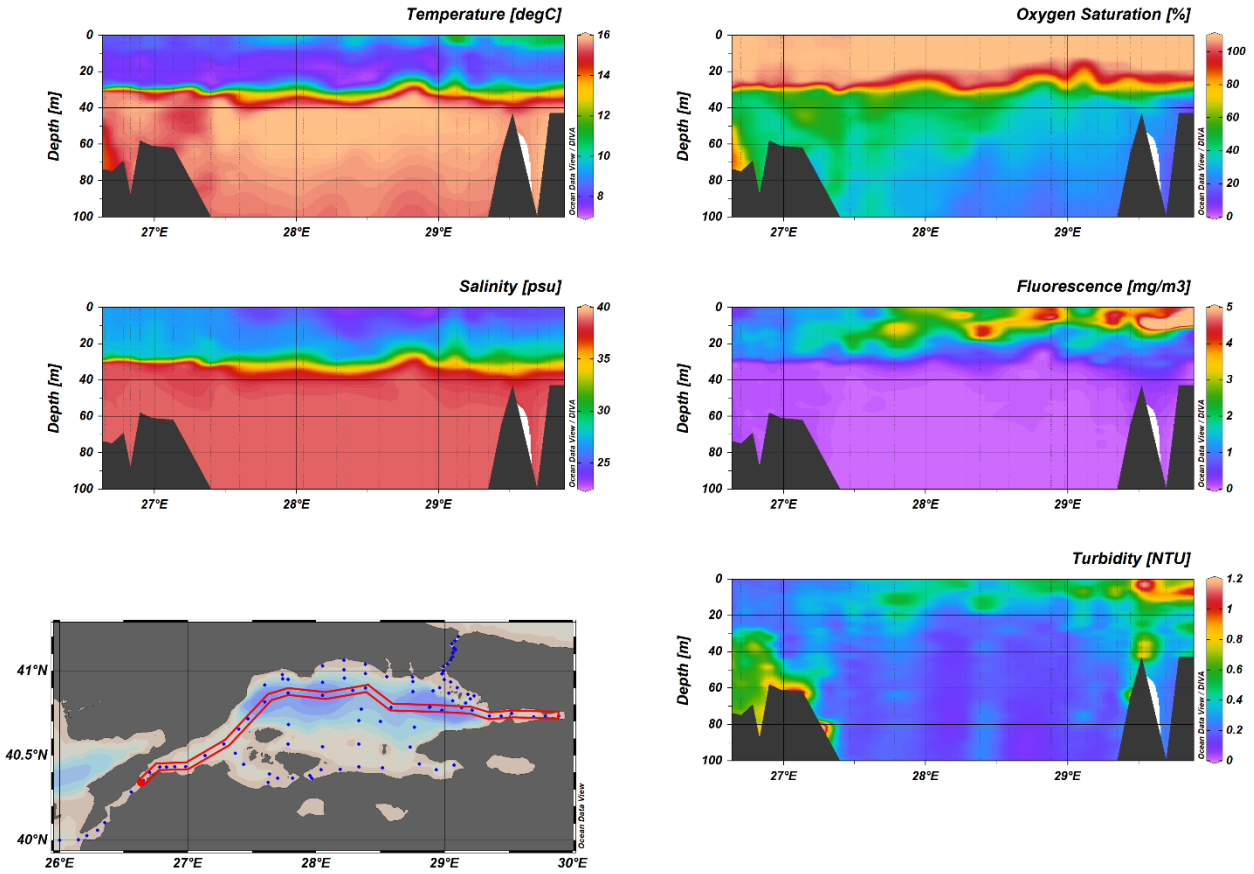
4.1.3 Müsilaj sonrası dönem (Sonbahar 2021- İlkbahar 2022) çevresel değişkenler

Marmara Denizi'nde ilkbahar-yaz döneminde gözlenen yoğun müsilajın zaman-mekân ölçekli değişimini belirlemek için daha önce belirlen noktalarda ve alanlarda Eylül 2021 ve Mart 2022 aylarında oşinografik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Haziran seferlerindeki gibi aynı yöntemle yerinde kesintisiz ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen alansal değişimler şekillerde gösterilmiştir (Şekil 23-Şekil 31). Hidrografik ölçüm sonuçlarına göre; Eylül 2021'de yüzey ve haloklin ara tabakası su sıcaklığı ortalama +2C° artmıştır, yüzey suları sıcaklığının 22-23 C° ve ara tabakanın 14 C° seviyesine ulaştığı görülmektedir (Şekil 23). Mart 2022'de ise yüzey tabakası kış koşullarından sonra 8 C° düşmüştür (Şekil 24). Haloklin ara tabakası, Marmara Denizi iki tabakalı sistemine özgü kalıcı bir fiziksel yapıdır ve Eylül dönemi alansal dağılımında belirgin bir değişim görülmemiş; 15-30m derinlikler arasındaki yapısal özelliklerini korumuştur. İlkbaharda ise haloklin başlangıç derinliği artmış 25-30m derinliklerde görülmüştür. Bulanıklık sonuçları incelendiğinde Haziran-Temmuz ayına göre çarpıcı değişim olduğu ve müsilaj ve müsilajı oluşturan yoğun biyokütlenin üst ve ara tabakası varlığının kaybolduğu gözlenmiştir. Mart 2022'de biyokütle belirgin şekilde artmış fakat müsilaj oluşumu gözlenmemiştir. Klorofil-a konsantrasyonları doğu-batı kesitine bakıldığında Çanakkale Boğazı'ndan İzmit Körfezi'ne doğru önceki yılların aynı dönemine benzer arttığı belirlenmiştir. Eylül 2021'de klorofil konsantrasyonu Haziran dönemine kıyasla yüzeyde ve ara tabakada belirgin azalmış (1-1,5 mg/m^3); üst-ara tabakadaki aşırı oksijen doygunluk oranları Eylül ayında normal değer olan %100 seviyelerine geri dönmüştür (Şekil 23). Kuzeydoğu Ege'den gelen tuzlu dip suyu oksijen doygunluk değerleri Marmara girişinde %100 doygunluk oranına yakın seviyesini korumuş ve oksijenli dip suyun Biga Yarımadası ve Marmara Adası'na doğru aktığı çizilen oksijen kesitince açıkça görülmektedir (Şekil 23). Bu dönemde güney şelfi üzerinde müsilajın gözlenemez olmasıyla Susurluk açıklarında ara ve dip su oksijen değerlerinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 25). Elde edilen sonuçlara göre oksijence zengin tuzlu Akdeniz suları ancak batı ve orta Marmara baseni dip sularına azalan oranda oksijen taşıyabildiği gözlenmiştir (Şekil 23, Şekil 24). Özellikle 100 m'den sığ olan alanların dip suları kısmen oksijenli durumdadır. Mart 2022'de doğudan batıya doğru klorofil konsantrasyonlarının arttığı görülmektedir. Kuzey güney dikey kesitinde de görüldüğü üzere klorofil konsantrasyonları yüzey sularda görece yüksektir (Şekil 26). Özellikle Boğaz jeti etkisi alanında olan bölgelerde (İzmit Körfezi, Çınarcık Çukuru ve orta Marmara) klorofil konsantrasyonlarının 4 mg/m^3'ü aştığı görülmektedir. Bulanıklık değerleri her ne kadar İzmit Körfezi'nde görece yüksek olsa da bu dönem herhangi bir müsilaj oluşumuna rastlanmamıştır.

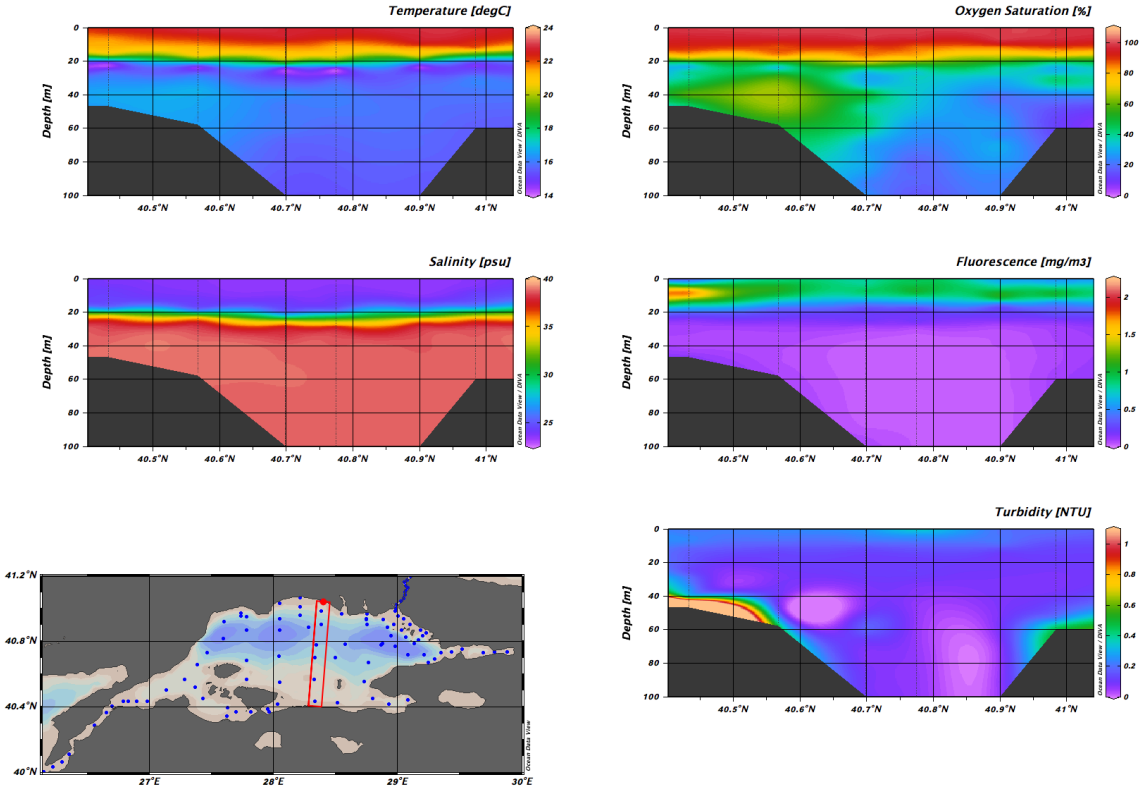
Artan fitoplankton biyokütlesi ile üretimin bu dönemdeki artışı yüzey tabakada %100 doygunluk oranını aşmıştır.



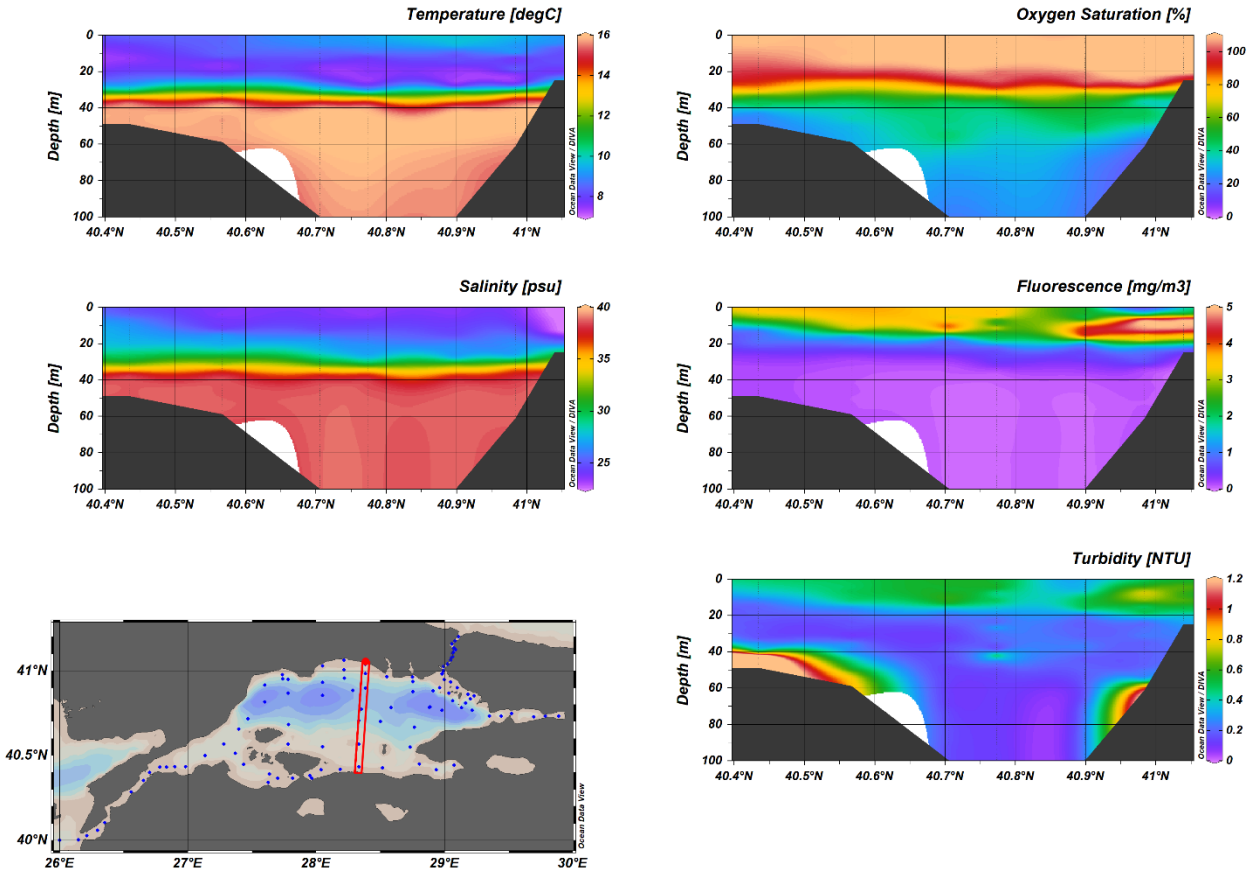
Şekil 23. Marmara Denizi doğu-batı kesiti Eylül ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri



Şekil 24. Marmara Denizi doğu-batı kesiti İlkbahar 2022 (Mart) sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri



Şekil 25. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti Eylül ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri

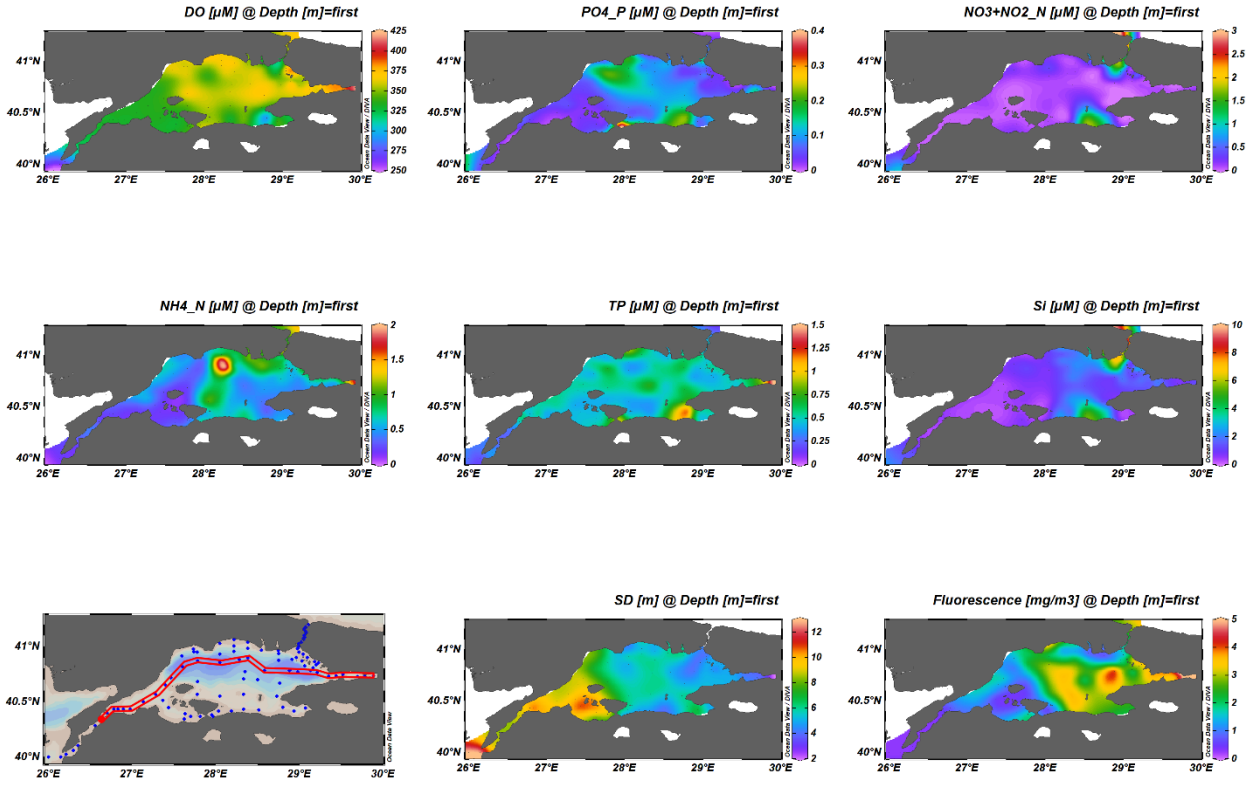


Şekil 26. Marmara Denizi güney-kuzey kesiti Mart 2022 ayı sıcaklık, tuzluluk, % oksijen doygunluğu, floresans ve bulanıklık değerlerinin 0-100m arasındaki değişimleri

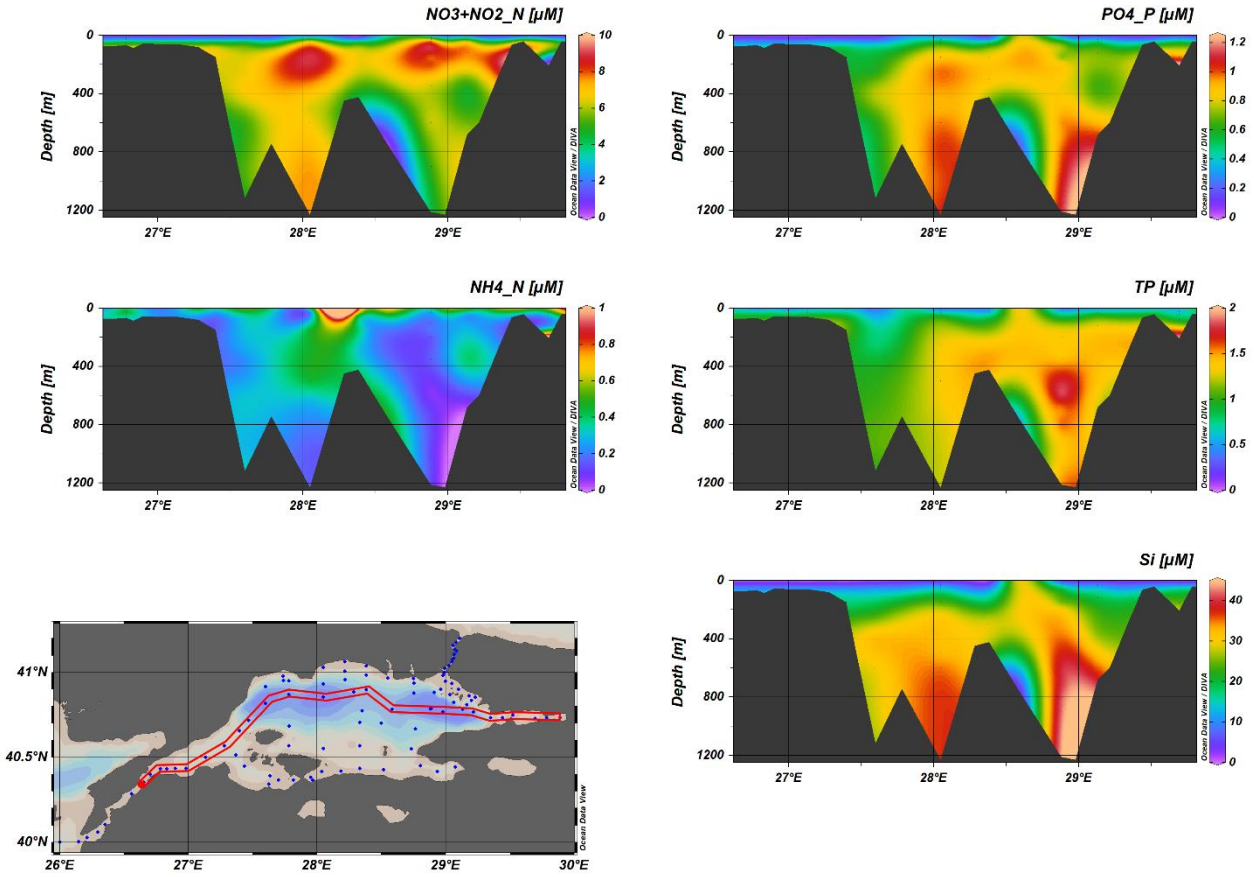
Müsilaj sonrası dönem olan Mart 2022'de besin tuzları, çözünmüş oksijen, floresans konsantrasyonları ve secchi disk değerleri yüzey dağılım haritaları (Şekil 27), doğu-batı kesiti (Şekil 28), kuzey-güney kesiti (Şekil 29) ve İzmit Körfezi kesiti (Şekil 30) besin tuzlarının su kolonu konsantrasyon dağılımları verilmiştir. PO_4-P (fosfat) yüzey konsantrasyonları genellikle 0.1 µM civarı olup, Gemlik Körfezi, İzmit Körfezi ve Tekirdağ civarlarında 0.2 µM düzeyindedir. En yüksek konsantrasyona (0.5 µM) Bandırma Körfezi'nde rastlanılmıştır. Fosfat konsantrasyonları su kolonu boyunca derinlik ile artış göstermiş olup İzmit Körfezi ve Marmara Çukurlarında en yüksek değer olan 1.2 µM ulaşmıştır. NO_2+NO_3-N (Azot) konsantrasyonları yüzey sularda homojen olarak dağılmış ve ortalama olarak 0.5 µM seviyesindedir. İstanbul Boğazı ve Susurluk çayı civarında azot konsantrasyonları 1.5-2 µM'a yükselmiştir. Su kolonunda 200m civarı en yüksek konsantrasyonlarına (10 µM) çıkan azot değerleri diplere doğru 6-7 µM düşmüştür. Gemlik ve İzmit Körfezlerinde 40m'den derinlerde görece yüksek değerler (>6 µM) ölçülmüştür.NH_4-N (Amonyak) konsantrasyonları yüzeyde ortalama 0.7 µM ve kuzey Marmara'da ise en yüksek

konsantrasyon olan 2.1 µM ölçülmüştür. Su kolonunda homojen dağılım gösteren amonyak 0.2-0.4 µM aralığında değişmiştir. TP (toplam fosfat) 0.2 ile 1.8 µM arasında yayılım göstermiş, görece yüksek konsantrasyonlar İzmit, Bandırma ve Gemlik Körfezlerinde gözlemlenmiştir. Derinlik ile artış gösteren TP, İzmit Körfezi ve Marmara çukurlarında 1.5-2 µM değerlerine çıkmıştır. Si (silikat) konsantrasyonları yüzeyde genellikle düşük miktarda olup, İstanbul Boğazı ve Susurluk civarında görece yüksek değerler (>5 µM) ölçülmüştür. Silikat su kolonunda derinlik ile artmış olup Marmara çukurlarında 50 µM değerlerine ulaşmıştır. Secchi Disk derinliği 2 ile 13m arasında değişmiş olup, batıdan doğu Marmara'ya doğru belirgin şekilde azalmış, en düşük değer İzmit iç Körfez'de ölçülmüştür. Klorofil-a konsantrasyonları yüzeyde bölgelere göre değişkenlik göstermiş olup batıdan doğuya doğru artış görülmüştür. Klorofil-a 0.3 ile 12.3 mg/m^3 arasında değişmiş olup, yüksek değerler boğaz jetinin etkisinde olan İzmit Körfezi, Çınarcık Çukuru ve Orta Marmara'da ölçülmüştür.

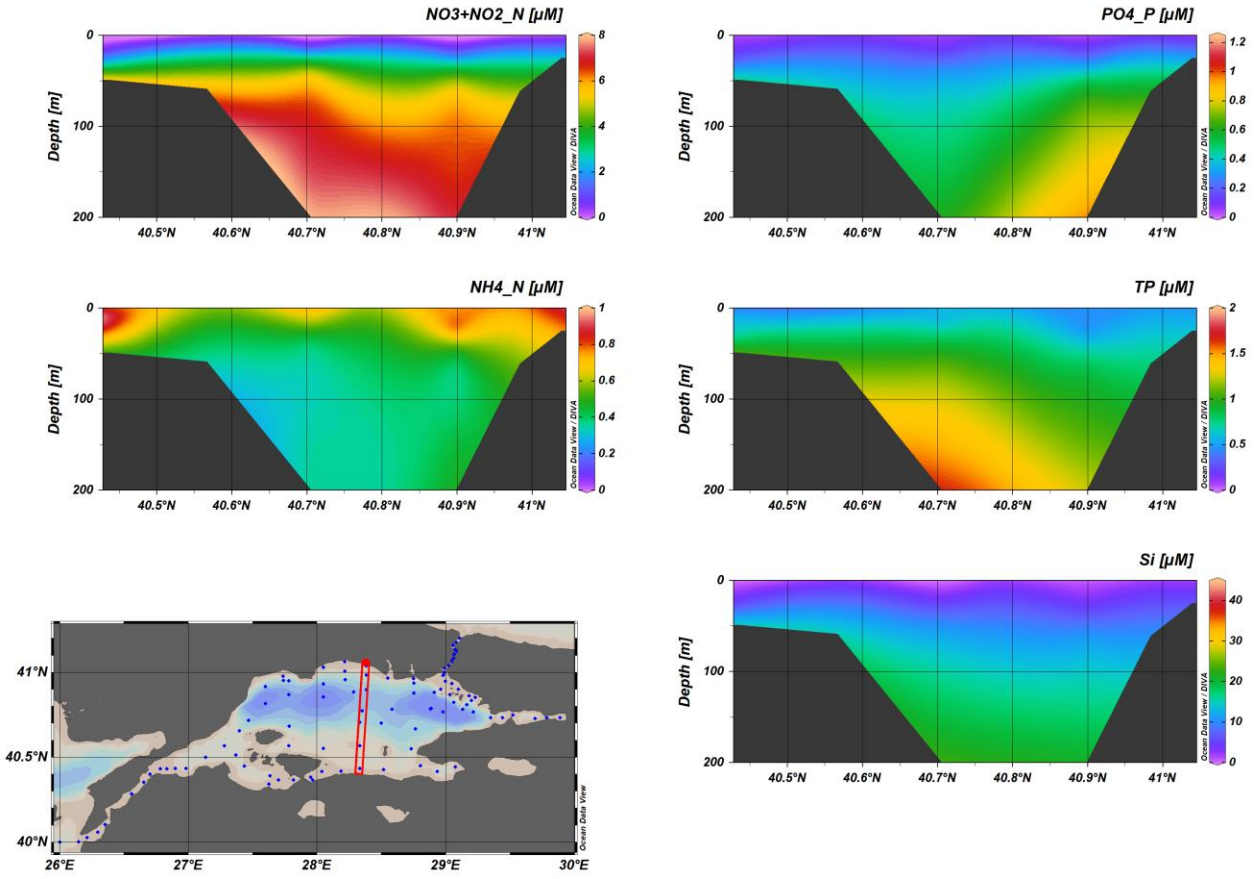
Marmara yüzey Azot (nitrat+nitrit toplamı) konsantrasyonları 30-150m arasında 11-12µM değerlerine, ise yer yer 1.4 µM kadar ulaştığı gözlenmiştir. Fosfat derişimi alt tabaka su kolonunda genelde derin sulara doğu zayıf artış eğilimi ve 1.1-1.2 µM aralığında değişim göstermiştir. NO_2+NO_3-N derişimi ise 300m altındaki sularda oksijen çok düşük olduğundan denitrifikasyon sonucu azalma eğilimi göstermiştir.



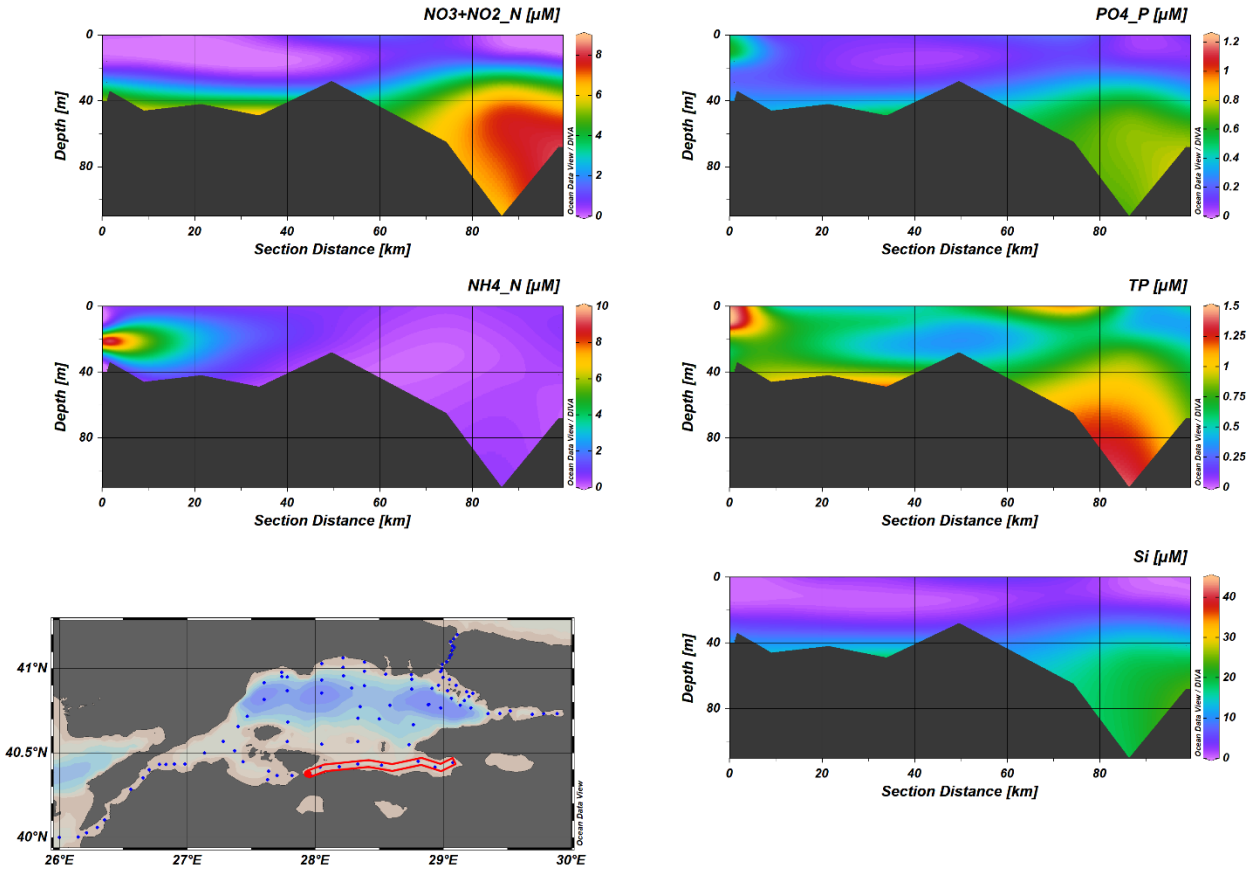
Şekil 27. Marmara Denizi Mart 2022 besin tuzları, çözünmüş oksijen, floresans konsantrasyonları ve secchi disk dağılım haritaları



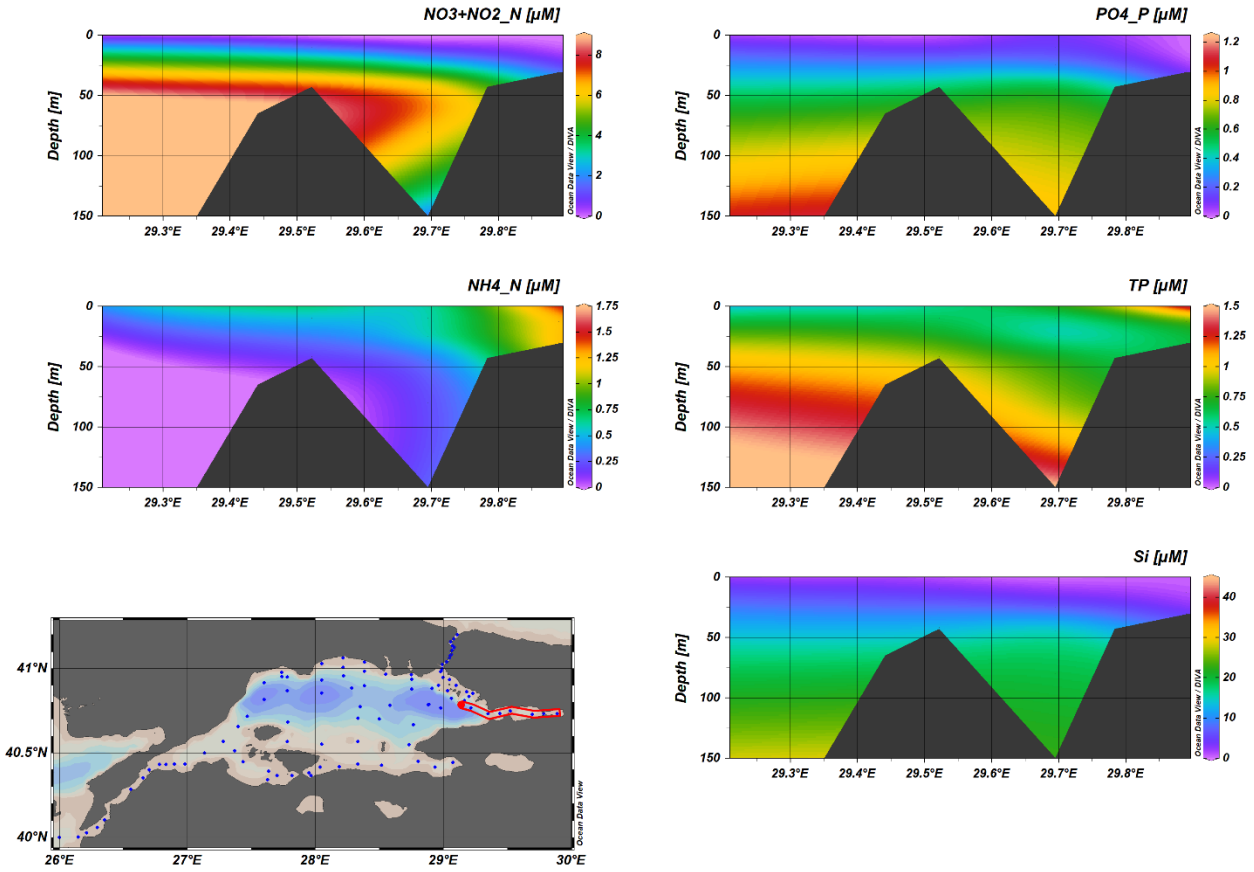
Şekil 28. Marmara Denizi batı-doğu (Çanakkale Boğazı- İzmit Körfezi) kesiti Mart 2022 ayı besin elementleri su kolonu dağılımları



Şekil 29. Marmara Denizi kuzey-güney kesiti Mart 2022 ayı besin elementleri su kolonu dağılımları



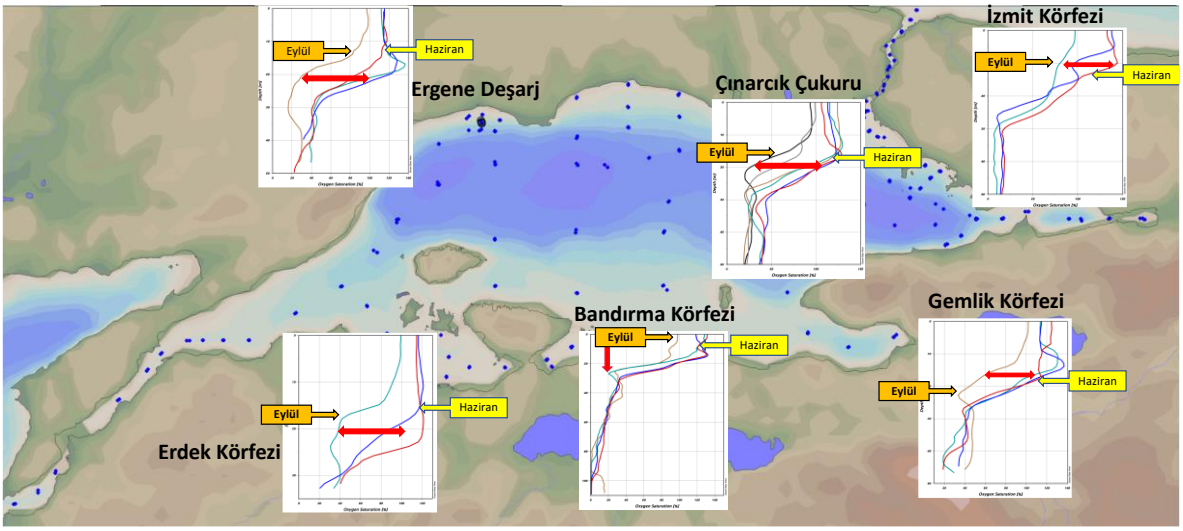
Şekil 30. Mart 2022 Marmara Denizi Güney Şelfi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı



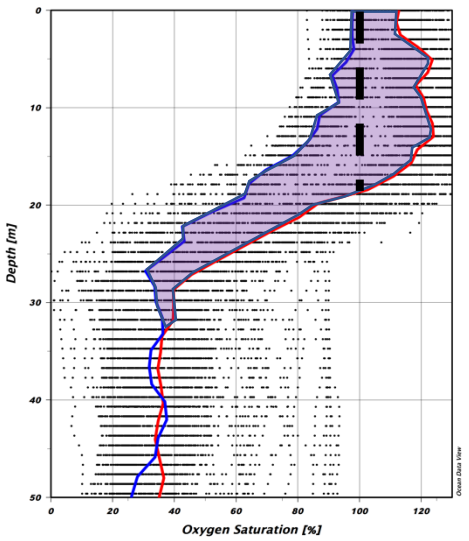
Şekil 31. Mart 2022 Marmara Denizi İzmit Körfezi boyunca doğu-batı ekseni kesitinde besin elementleri dağılımı

4.2 Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonlarının Karşılaştırılması

Müsilajlı ve müsilajsız dönemleri karşılaştırabilmek için 2021 Haziran ve Eylül'de ölçülen bazı istasyonlarda oksijen profilleri Marmara genelini temsil edilecek 6 istasyonda gösterilmiştir (Şekil 32). Doğudan batıya İzmit Körfezi, Gemlik Körfezi, Çınarcık Çukuru, Bandırma Körfezi, Ergene Deşarj bölgesi ve Erdek Körfezi olarak sıralanabilir. Haziran ayında bu istasyonlarda en az iki kere ölçüm yapılmıştır. Çınarcık Çukuru, İzmit Körfezi ve Gemlik Körfezi profillerinde Haziran ayı içerisinde 25-50µM değişim gözlenmiş Haziran-Eylül arası ise neredeyse tüm istasyonlarda özellikle yüzeyden haloklinin alt sınırına kadar %80'e varan oksijen doygunluğu azalmıştır (Şekil 33).

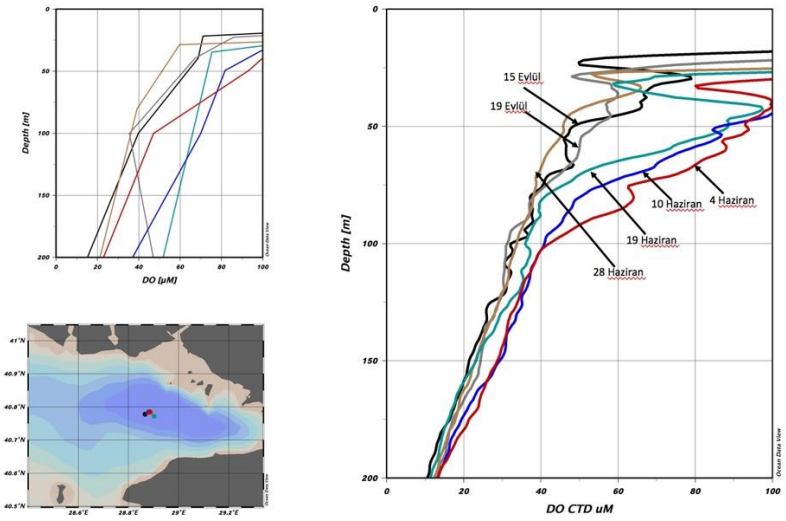


Şekil 32. Marmara Denizi Haziran ve Eylül aylarında bazı istasyonlarda 0-50m oksijen ölçümlerinin karşılaştırılması



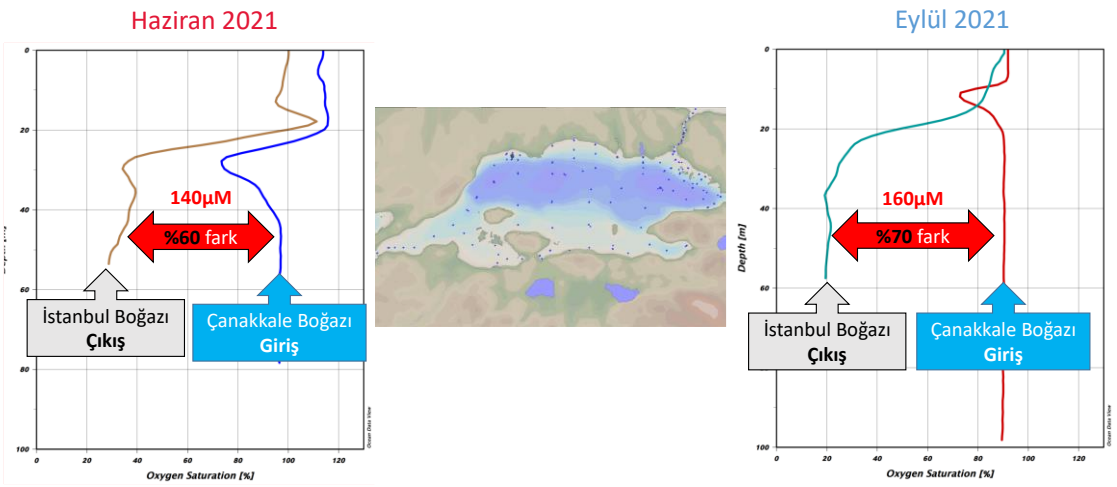
Şekil 33. Haziran-Temmuz ve Eylül seferlerinde Marmara Denizi'ndeki tüm CTD Oksijen öçümlerinin karşılaştırması. Mavi çizgi Haziran-Temmuz, kırmızı çizgi ise Eylül verilerinin ortalamasını göstermektedir. Kesikli çizgi %100 oskijen doygunluğu belirtmek için koyulmuştur. Mavi ve kırmızı çizgi arasındaki gölgeli mor alan iki sefer arası Marmara Denizi'nde azalan oksijeni temsil etmektedir.

45-C Çınarcık Çukuru istasyonu Haziran-Eylül 0-200m arası CTD oksijen ölçümlerine detaylı olarak bakıldığında (Şekil 34), özellikle Haziran ayı boyunca görülen 25-75m arası oksijen konsantrasyonlarındaki azalma sonucu Eylül ayının sonlarına kadar korunmuştur. Haziran ayı boyunca 20-30m'de CTD ile belirlenen oksijen azalmasından hesaplanan oksijen tüketim hızları $5 \mu molL^{-1}O_2$ $Gün^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Müsilaj içeriğinin karbonhidrat ve polissakkarit yapıda olması ve ölçüm sonuçlarının uyumu bize su kolonunda bulunan müsilajın bakteriler tarafından parçalanırken ortamdaki oksijeni harcadıkları ve özellikle ışığın ulaşmadığı derinliklerde hipoksik koşulların oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

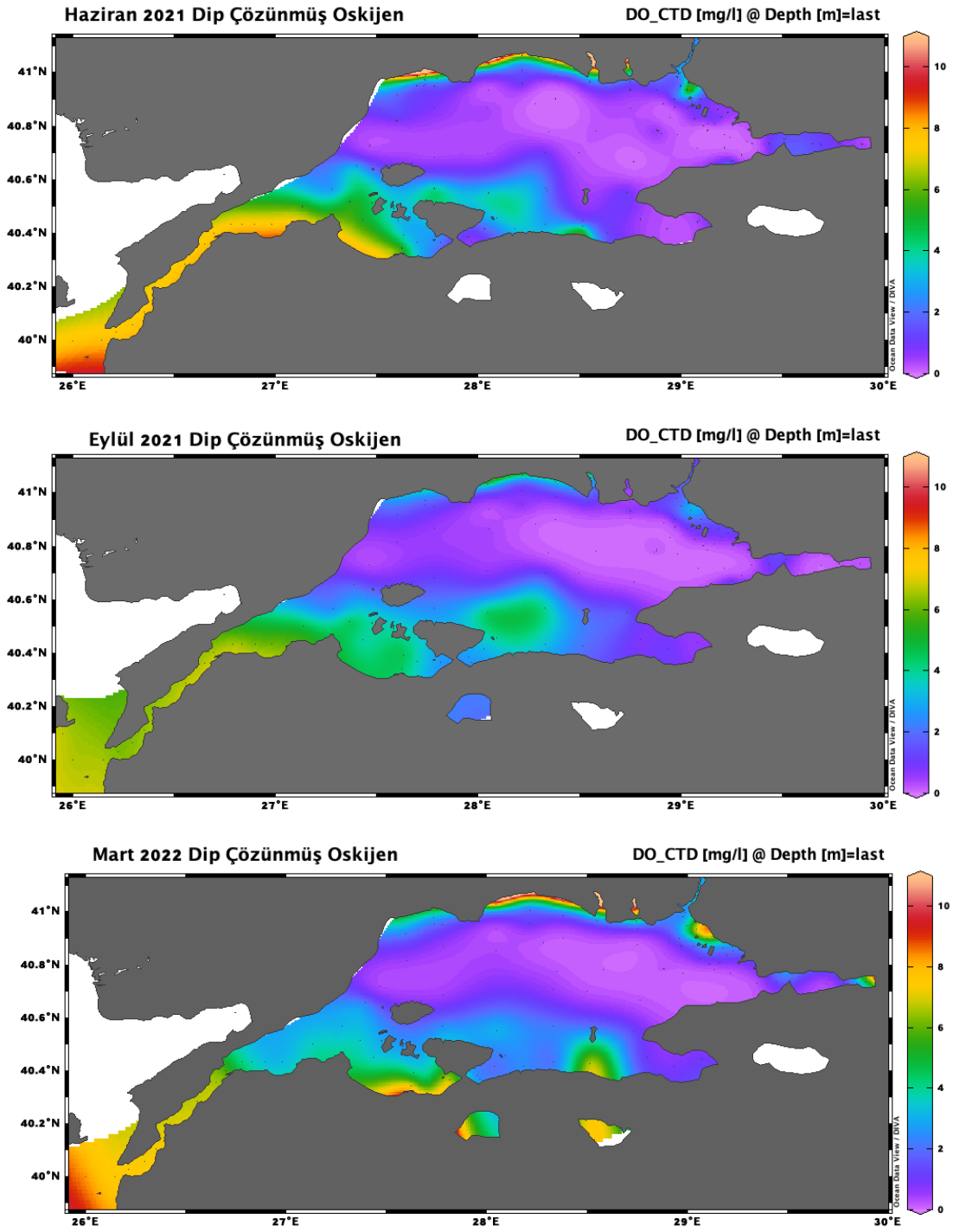


Şekil 34. Haziran- Eylül seferleri sırasında 45-C Çınarcık Çukurunda 0-200m arasında ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonları

Marmara Denizi dip suları Çanakkale Boğazı aracılığı ile Akdeniz'in oksijence doygun suları ile beslenir. İstanbul Boğazı aracılığı 6-7 yıllık bir süreçte terk ederken bu sular, yaklaşık olarak 10 kat inorganik tuzlarca zenginleşir ve taşıdığı oksijenin neredeyse çoğunu (4-6 mg/L) tüketerek (ÇŞB, TÜBİTAK-MAM 2017), kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirir (Polat ve Tuğrul, 1995). Tüm bu değişimlere ve doğal süreçlere tuzluluk ara tabakasının etkisi çok büyüktür. Ara tabaka bir bariyer görevi görerek; atmosferden alt tabakaya oksijen taşınımını engeller, ara tabakada biriken canlı ve cansız askıda katı maddeler ışığın alt tabakaya ulaşmasını kısıtlayarak birincil üretimin yüzey tabaka ile sınırlı kalmasına sebep olur ve alt tabakada oksijen üretimi olmaz, ara tabakada biriken organik madde heterotrof bakteriler tarafından parçalanarak hem oksijen tüketilir hem de organik maddelerin inorganik tuzlara dönüşmesine ve su kolonunda en yüksek konsantrasyonlarına çıkmalarına sebep olur, ara tabakada artan inorganik tuzlar yeni birincil üretime sebep vererek yüzey tabakada uzun süreli alg çoğalmalarını destekler. Bu durum 2021 Haziran ve Eylül aylarında gerçekleştirdiğimiz ölçümlerde de görülmektedir. Akdeniz suyunun Haziran ayında %60 doygunluğunu kaybederek 140µM, Eylül ayında ise %70 doygunluğunu kaybererederek 160µM çözünmüş oksijenini Marmara Denizi'nde kaybettiği hesaplanmıştır (Şekil 35).



Şekil 35. Marmara Denizi Çanakkale Boğazı girişi ve İstanbul Boğazı çıkışı su kolonu oksijen karşılaştırması



Şekil 36. Marmara Denizi Haziran 2021, Eylül 2021 ve Mart 2022 dip çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının (mg/l) dağılım haritaları

Alt tabakada oksijen konsantrasyonları yaklaşık 30 yıldır deniz canlılarının yaşamı için gereken oksijen seviyelerinin altındadır (<2 mg/l), özellikle Marmara Çukurları, İzmit Körfezi ve Gemlik Körfezi dip suları hipoksik koşullarda ve anoksik koşullara doğru gitmektedir (Şekil 36). Bu durum

örnekleme yapılan her üç dönemde de değişmemiştir. Hatta Haziran 2021'den Mart 2022'ye doğru Çanakkale Boğazı Marmara Denizi girişinde Biga'ya doğru genişleyen kısımda oksijenin 8-9 mg/L den 3-4 mg/L düştüğü saptanmıştır. Her ne kadar bu durum, atmosferden oksijen girdisi ve fotosentez ile üretilen oksijen sebebiyle, oksijence zengin üst tabakada oksijen azalmasına sebep olmayacaksa da ışığın ulaşmadığı ara tabaka ve alt tabakada oksijen tüketimini arttırarak oksijen azalmasına ve hipoksik koşulların oluşmasını hızlandırması düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, Eylül ayında gerçekleştirilen seferde müsilaja rastlanmamış fakat belirgin olarak Marmara Denizi üst su kolonunda belirgin bir oksijen azalması tespit edilmiştir.

4.3 Marmara Denizi'nde Müsilaj Sırasında ve Sonrasında Plankton Komünitesi (İP 2)

4.3.1 Fitoplankton çeşitliliği

Fitoplankton çalışmaları kapsamında süreç içinde fitoplanktonun gelişimini net görebilmek için sefer başı ve sonuna ait örnekler tercih edilmiştir. Bir aylık süreç içinde fitoplanktonda tür çeşitliliğinde ve hücre sıklığında farklılıklar oluşmuştur. Haziran başı ve sonuna ait örneklerde tanımlanan türlerin listesi Tablo 2 ve Tablo 3'de aşağıda verilmektedir. Tablolardan da görüleceği üzere ilk kısımda Haziran başlarında 86 sonlarında ise toplamda 90 tür gözlenmiştir. Her iki dönemde de fitoplanktonda baskın grubun diyatomlar olduğu görülmüştür (Şekil 37 ve Şekil 38). Diyatomları sırası ile dinoflagellat ve kokkolitoforidler ve diğerleri izlemiştir. Haziran başında görece küçük diyatomlar haziran sonunda ise büyük boy diyatom (*Cerataulina pelagica*) patlama yapmış gözükmektedir. Haziran başı ve sonu basende mevcut baskın türlerin ilk 20 tanesi aşağıda Tablo 1'de verilmektedir. Listeden de görüleceği üzere her iki dönemde de diyatom türleri baskın olarak bulunmuş ve bunları 4. sırada kokkolitoforid *Emiliania huxleyi* türü izlemiştir. 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 eder. Silikatın ortamda bol bulunduğunda diyatomlar tarafından hızlıca tüketildiği ve ölüm sürecini (post-bloom) takiben yine hücrelerin çökeldiği 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 populasyonun 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 göstermektedir. 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 addedilmemelidir.

Tablo 1. Haziran başı ve sonu basende mevcut baskın türler.

1-11 Haziran arası baskın türler	**27 Haziran-2 Temmuz arası baskın türler**
Skeletonema costatum	*Cerataulina pelagica*
Phaeodactylum sp.	*Cylindrotheca closterium*
Chaetoceros gracilis	*Nitzschia tenuirostris*
Emiliania huxleyi	*Emiliania huxleyi*
Nitzschia tenuirostris	*Alexandrium spp*
Pseudo-nitzschia delicatissima	*Skeletonema costatum*
Phaeodactylum sp.	*Leptocylindrus danicus*
Dactyliosolen fragilissimus	*Chaetoceros gracilis*
Thalassiosira sp.	*Nitzschia longissima*
Cylindrotheca closterium	*Gymnodinium sp1*
Alexandrium spp	*Phaeodactylum tricornutum*
Leptocylindrus minimus	*Gyrodinium sp*
Nitzschia longissima	*Leptocylindrus minimus*
Gymnodinium sp1	*Pseudo-nitzschia delicatissima*
Dinobryon sp.	*Oxytoxum longum*
Gyrodinium sp	*Proboscia alata forma gracillima*
Proboscia alata forma gracillima	*Dinobryon sp.*
Gymnodinium sp2	*Dactyliosolen fragilissimus*
Heterocapsa pygmaea	*Gymnodinium sp2*
Cerataulina pelagica	*Asterolampra marylandica*

Tablo 2. 1-11 Haziran arası toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri.

Bacillariophyta (Diyatomlar)	*Pseudosolenia calcar-avis*	*Mesoporus globulus*
Amphiprora sp.	*Rhizosolenia imbricata*	*Oxytoxum aceratum*
Asterolampra marylandica	*Rhizosolenia setigera*	*Oxytoxum adriaticum*
Cerataulina pelagica	*Rhizosolenia styliformis*	*Oxytoxum crassum*
Chaetoceros gracilis	*Skeletonema costatum*	*Oxytoxum mediterraneum*
Chaetoceros sp.	*Striatella unipunctata*	*Oxytoxum obliquum*
Coscinodiscus excentricus	*Synedra ulna*	*Oxytoxum sp.*
Coscinodiscus sp.	*Thalassionema nitzschioides*	*Oxytoxum sphaeroideum*
Cylindrotheca closterium	*Thalassiosira polychorda*	*Oxytoxum tenuistriatum*
Dactyliosolen blavyanus	*Thalassiosira rotula*	*Oxytoxum viride*
Dactyliosolen fragilissimus	*Thalassiosira sp.*	*Phaeodactylum sp.*
Dactyliosolen sp.	*Thalassiothrix frauenfeldii*	*Podolampas spinifer*
Diploneis sp.	**Pyrrophyta (Dinoflagellatlar)**	*Pronoctiluca spinifera*
Ditylum brightwellii	*Alexandrium sp.*	*Prorocentrum aporum*
Guinardia flaccida	*Amphidinium sp.*	*Prorocentrum compressum*

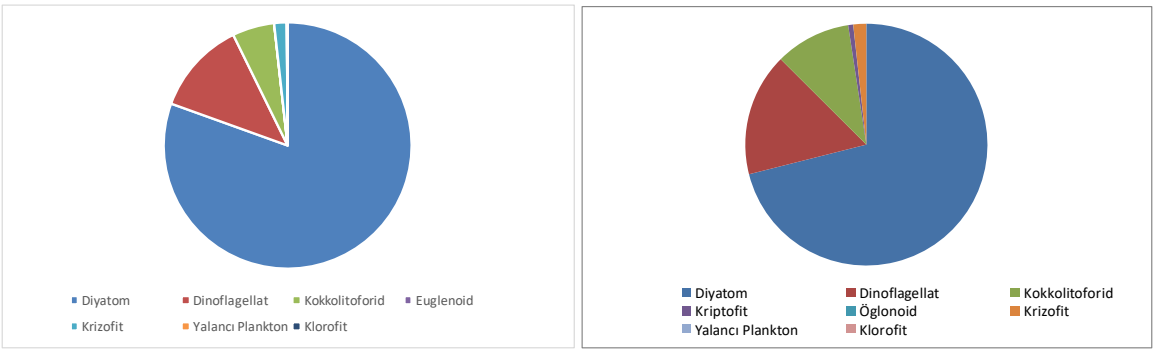
Haslea wawrikae	*Amphidinium sphenoides*	*Prorocentrum lima*
Hantzschia sp.	*Ceratium furca furca*	*Prorocentrum micans*
Lauderia annulata	*Cochlodinium sp.*	*Prorocentrum minimum*
Leptocylindrus danicus	*Corythodinium radiosum*	*Prorocentrum sp.*
Leptocylindrus mediterraneus	*Dinophysis acuta*	*Scrippsiella trochoideum*
Leptocylindrus minimus	*Dinophysis fortii*	*Torodinium teredo*
Licmophora abbreviata	*Dinophysis ovum*	**Prymnesiophyceae**
Nitzschia longissima	*Ebria tripartita*	*Emiliania huxleyi*
Nitzschia sigma	*Gymnodinium sp1.*	**Euglenophyceae**
Nitzschia sp.	*Gymnodinium sp2.*	*Eutreptiella sp.*
Nitzschia tenuirostris	*Gyrodinium lachryma*	**Chrysophyceae**
Phaeodactylum sp.	*Gyrodinium sp*	*Dinobryon sp.*
Pleurosigma normanii	*Gyrodinium spirale*	**Pseudoplankton**
Pleurosigma sp.	*Heterocapsa sp.*	Çam poleni
Proboscia alata f. gracillima	*Heterocapsa niei*	**Chlorophyceae**
Pseudo-nitzschia delicatissima	*Heterocapsa pygmaea*	*Scenedesmus quadricauda*

Tablo 3. 27 Haziran 2 Temmuz arası toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri.

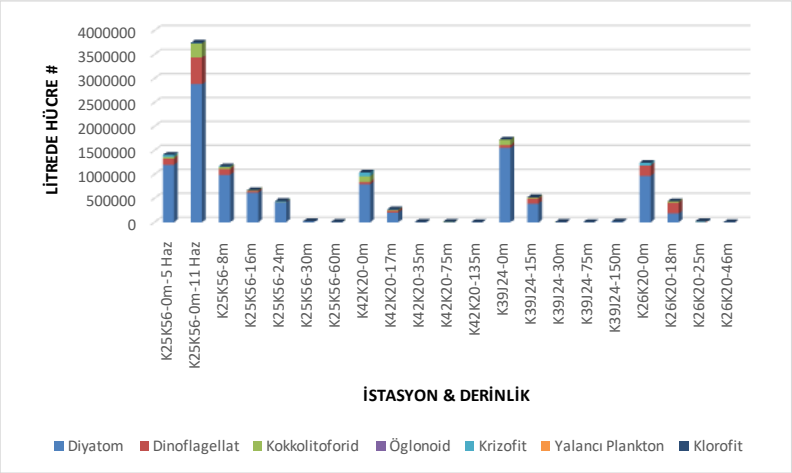
Bacillariophyta (Diyatomlar)	*Skeletonema costatum*	*Oxytoxum sphaeroideum*
Asterolampra marylandica	*Synedra ulna*	*Oxytoxum variabilis*
Cerataulina pelagica	*Thalassionema nitzschioides*	*Oxytoxum viride*
Chaetoceros gracilis	*Thalassiosira decipiens*	*Peridinium mediterraneum*
Chaetoceros peruvianus	*Thalassiosira polychorda*	*Podolampas palmipes*
Chaetoceros sp.	*Thalassiosira* sp.	*Podolampas spinifer*
Coscinodiscus excentricus	*Thalassiothrix frauenfeldii*	*Polykrikos schwartzii*
Cylindrotheca closterium	**Pyrrophyta (Dinoflagellatlar)**	*Pronoctiluca sp.*
Dactyliosolen blavyanus	*Alexandrium spp*	*Prorocentrum compressum*
Dactyliosolen fragilissimus	*Amphidinium sp.*	*Prorocentrum gracile*
Dactyliosolen sp	*Amphidinium sphenoides*	*Prorocentrum minimum*
Ditylum brightwellii	*Ceratium furca furca*	*Prorocentrum shikokuense*
Guinardia flaccida	*Ceratium fusus seta*	*Prorocentrum sp.*
Haslea wawrikae	*Ceratium tripos*	*Pyrophacus horologium*
Lauderia annulata	*Cochlodinium polykrikoides*	*Scrippsiella trochoideum*
Leptocylindrus danicus	*Cochlodinium sp.*	*Torodinium teredo*
Leptocylindrus mediterraneus	*Dinophysis fortii*	**Prymnesiophyceae**
Leptocylindrus minimus	*Dinophysis parva*	*Distephanus sp.*
Licmophora abbreviata	*Dinophysis rotundatum*	*Emiliania huxleyi*
Nitzschia longissima	*Dinophysis sp.*	*Syracosphaera sp.*
Nitzschia sigma	*Gymnodinium* sp1	**Cryptophyceae**
Nitzschia sp.	*Gymnodinium* sp2	*Hillea fusiformis*
Nitzschia tenuirostris	*Gyrodinium lachryma*	**Euglenophyceae**
Phaeodactylum tricornutum	*Gyrodinium fusiforme*	*Eutreptiella sp.*
Pleurosigma normanii	*Gyrodinium sp*	**Chrysophyceae**

Pleurosigma sp.	*Gyrosigma sp.*	*Dinobryon* sp.
Proboscia alata forma *gracillima*	*Heterocapsa* sp.	**Pseudoplankton**
Pseudo-nitzschia delicatissima	*Heterocapsa pygmaea*	Çam Poleni
Pseudosolenia calcar-avis	*Heterocapsa triquetra*	**Chlorophyceae**
Rhizosolenia setigera	*Oxytoxum crassum*	*Scenedesmus quadricauda*
Rhizosolenia cylindrus	*Oxytoxum longum*	

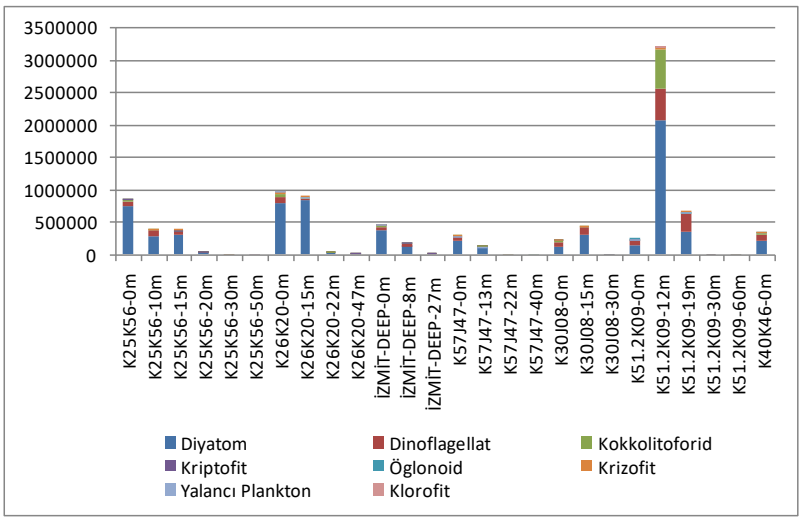
Haziran başı ve sonu arasında gruplar bazında farklılık olarak dinoflagellat ve kokolitoforidlerin toplam sıklığa katkılarının haziran başına oranla sonuna doğru daha da arttığı görülebilir (Şekil 37). Diğer bir husus da kısa zaman süreçlerinde aynı noktada fitoplankton kompozisyonunda büyük farklılıkların oluşabilmesidir. Örneğin Haziran başında aynı istasyonun yüzey suyu fitoplanktonu K25K26 kodlu istasyonda 5 ve 11 Haziran için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Şekil 38'ten de görüleceği üzere 5 Haziran'dan 11 Haziran'a aynı noktada 2 katın üzerinde bir artış vardır (5 Haziran'da toplam hücre sıklığı litrede $1.4x10^6$ hücre iken 11 Haziran'da $3.7x10^6$ hücre seviyesine ulaşmıştır. Buradaki ani değişime en büyük katkıyı diyatom *Skeletonema costatum* türü yapmış olup bir hafta içinde $7.4x10^5$ hücreden $2.14x10^6$ hücre seviyesine ulaşmıştır. Bu tarz oluşumlar Karadeniz (özellikle Tuna girdilerinden etkilenen batı sahanlık suları) ve Marmara için normal olup kısa süreçlerde (2-3 gün) belli türlerin patlamalarını takiben ortamdan çekilmeleri olağandır.



Şekil 37. 1-11 Haziran (sol) ve 27 Haziran-2 Temmuz (sağ) Marmara fitoplanktonu grup dağılımı



Şekil 38. Haziran başında istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı.



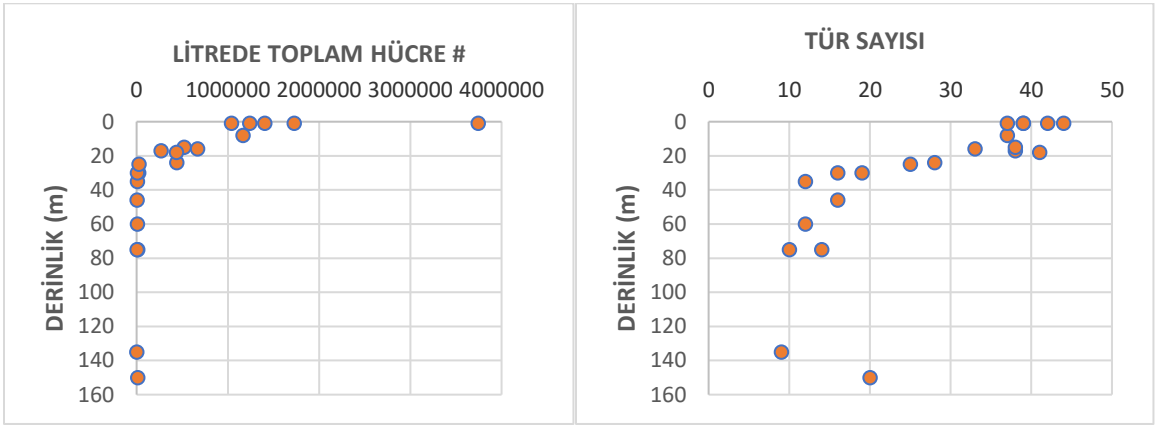
Şekil 39. Haziran sonunda istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı.

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 geçmiştir. Haziran sonunda ise bu durum gözlenmemiş fakat K51.2K09 kodlu istasyonun 12 m derinliğinde hücre sıklığı 3.2×10^6 seviyelerine ulaşmıştır. Derinlikle hücre sıklığı ve tür sayısı değişimlerine bakıldığında Haziran başında populasyon en yoğun olarak yüzey sularında bulunmuş, 20 metre derinliğe doğru göreceli azalmış ve 20 metre altında hemen hemen en düşük seviyelere inmiştir (Şekil 40). Aynı durum derinlikle

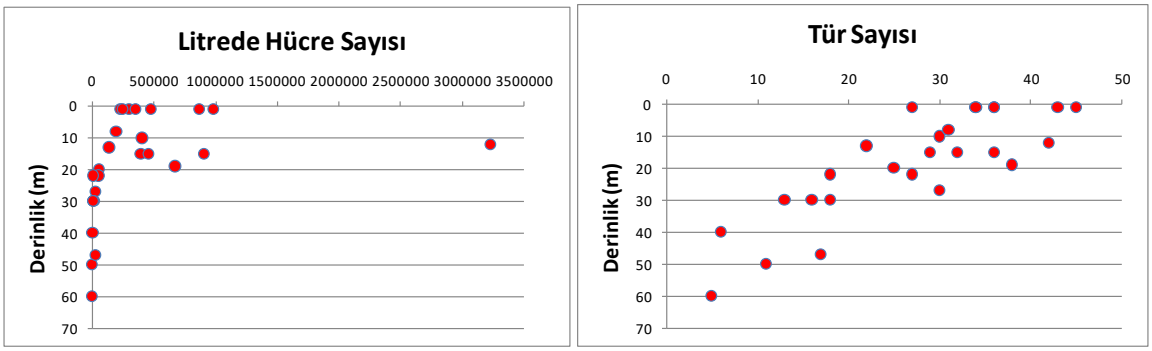
tür sayısında da gözlenmiş, yüzeyden halokline doğru tür sayısında belirgin bir azalma görülmüştür (Şekil 41). Basende 20-160 metre aralığındaki hücre sıklığı yüzey-20 metre aralığındaki hücre sıklığının yaklaşık %5 dir. 20 metre altında gözlenen diyatomların hemen hemen büyük çoğunluğu ölü hücreler olup geriye sadece iskelet yapılarının kaldığı bir durum söz konusudur. Haloklin alt sınırı olarak kabul edebileceğimiz 30 m derinlik ve aşağısında ise çoğunlukla çözülmekte olan diyatom iskeletlerini (frustul) görmekteyiz. Marmara için en büyük tehdit buradan kaynaklanmaktadır. Fitoplankton gelişimi yüzey ve yüzeye yakın çok sığ bir tabakaya indirgenmiş olup hemen altında rejenere prosesler hakim 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. Marmara fitoplanktonu için gerek Haziran başı gerek ise Haziran sonunda yapılan analizlerde haloklin üzeri ve altı populasyon net bir şekilde çizilen dendogram ve mds diyagramlarında ayrışmış olarak görülebilmektedir (

Şekil 42,

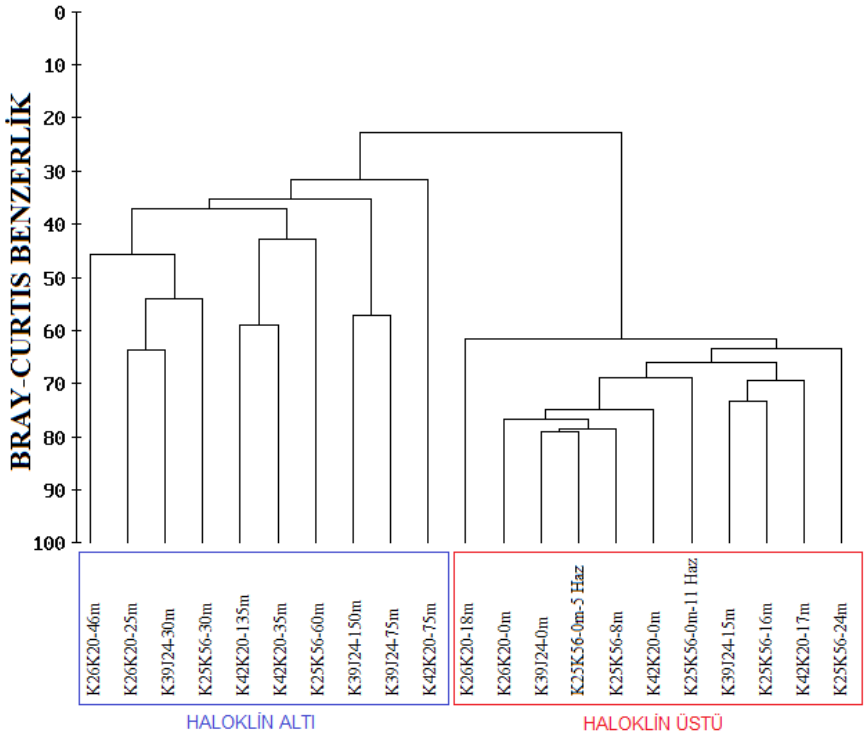
Şekil 43, Şekil 44, Şekil 45).



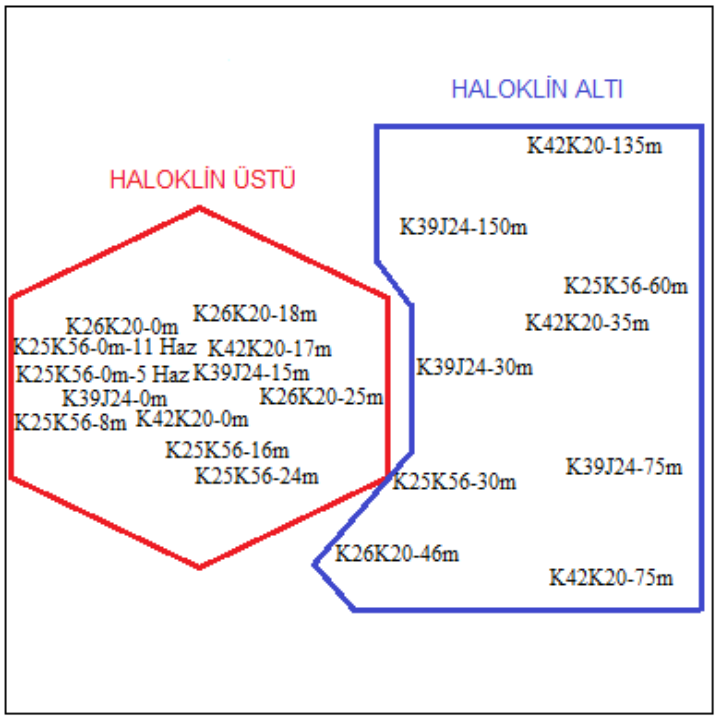
Şekil 40. Haziran başında derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı.



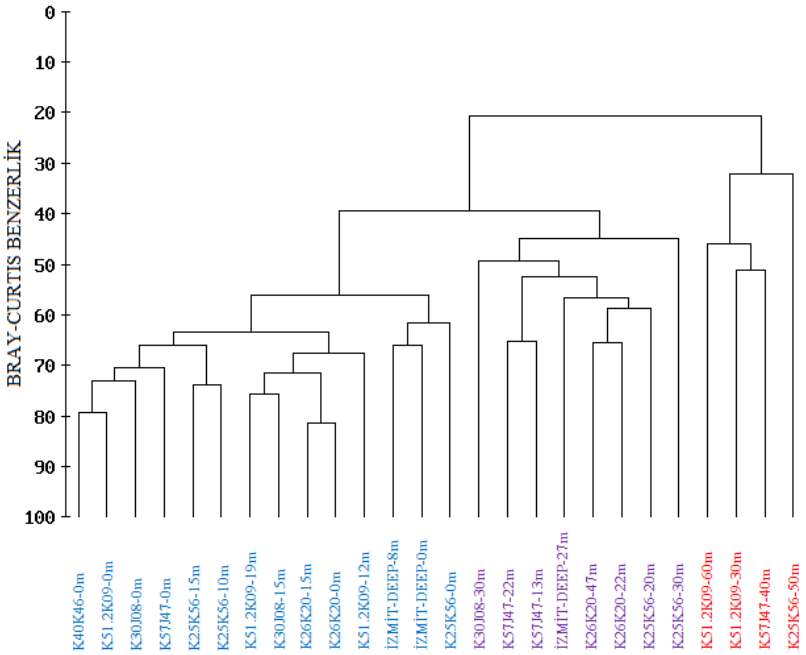
Şekil 41. Haziran sonunda derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı.



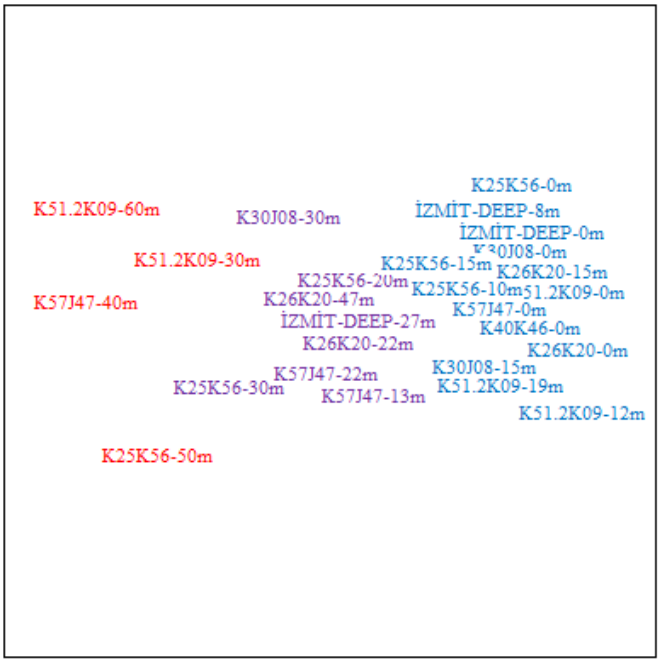
Şekil 42. Haziran başı istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı



Şekil 43. Haziran başı istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı

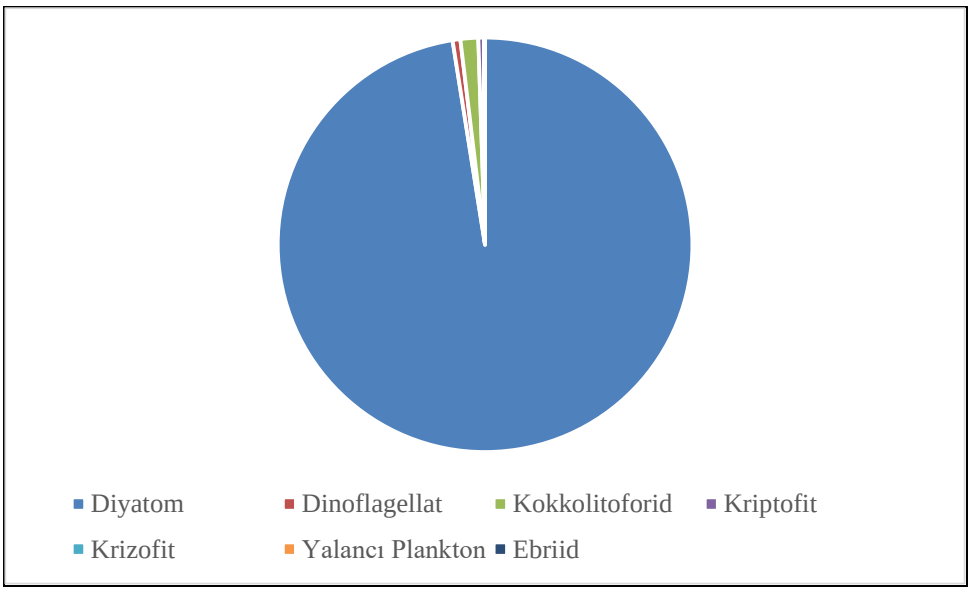


Şekil 44. Haziran sonu istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı

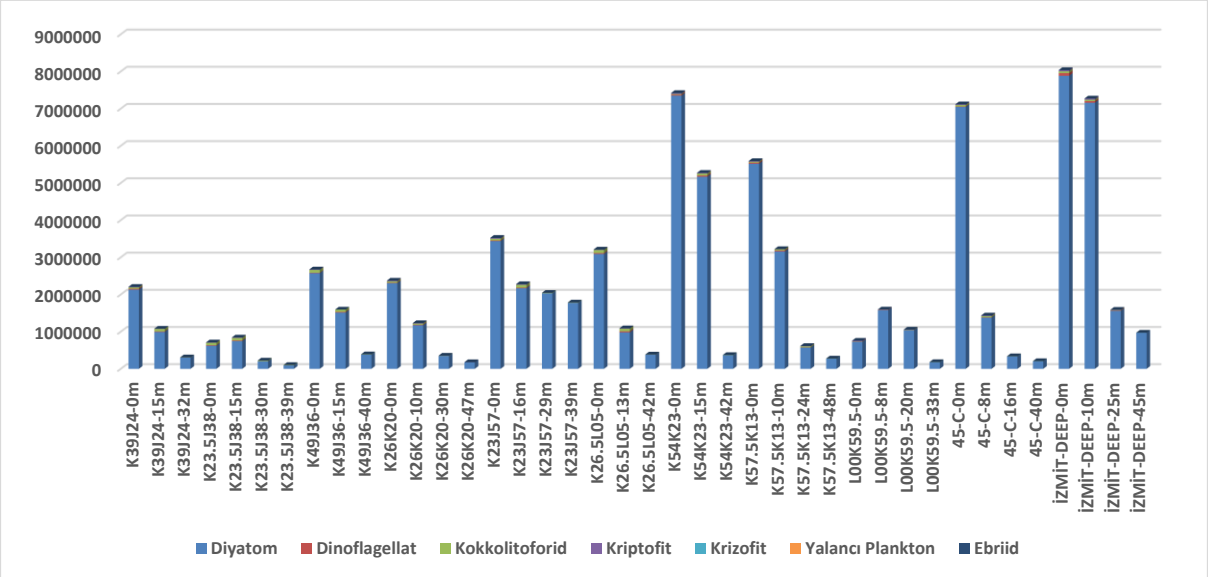


Şekil 45. Haziran sonu istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı

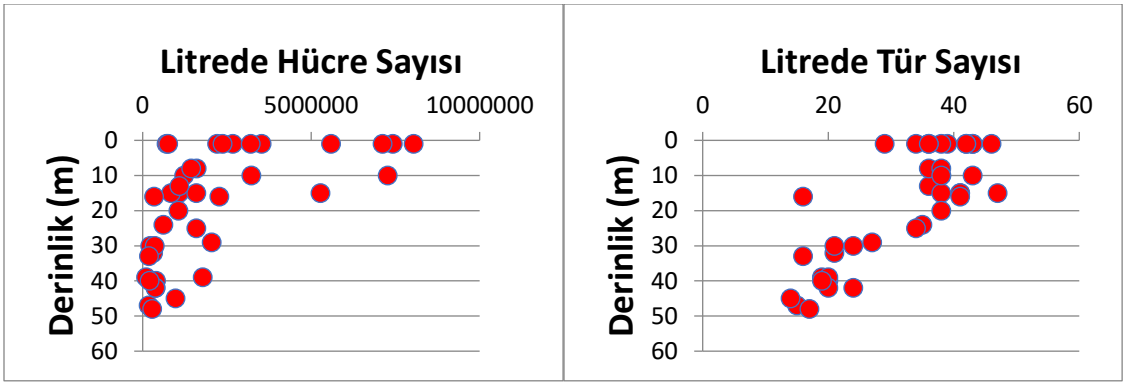
Müsilaj sonrası İlkbahar 2022 döneminde fitoplankton çalışmaları kapsamında toplam solunum deneylerinin de yapıldığı 11 istasyon ve 40 farklı derinlik çalışılmıştır. Alınan su numunelerinde tanımlanan türlerin listesi Tablo 4'de verilmektedir. Bu dönemde 38 diyatom, 43 dinoflagellat, 2 prymnesiofit, birer kriptofit, krizofit ve ebriid olmak üzere toplamda 86 tür gözlenmiştir. Diğer dönemlerde olduğu gibi bu dönemde de fitoplanktonda baskın grubu diyatomlar oluşturmuş ve sırası ile kokkolitoforidler ve dinoflagellatlar izlemiştir (Şekil 46). Bu dönemde küçük diyatomlardan *Skeletonema costatum* patlama yapmış olup basende mevcut baskın türlerin ilk 20 tanesi Tablo 4'da verilmektedir. Listeden de görüleceği üzere bu dönemde de diyatom türleri baskın olarak bulunmuş ve bunları 5. sırada kokkolitoforid *Emiliania huxleyi* türü izlemiştir. Diyatomların baskın olması azot ve fosforun yanı sıra iskelet yapılarının (frustul) oluşabilmesi için yeterli düzeyde silikatın ortamda mevcut olduğuna işaret eder. Basende yüzey ve yüzeye yakın sularda bolca gelişen diyatomun silikat gereksinimini doğal girdiler yanı sıra rejenere silikattan da fazlası ile sağladığı düşünülebilir. Derinlikle hücre sıklığı ve tür sayısı değişimlerine bakıldığında Haziran başında populasyon en yoğun olarak yüzey sularında bulunmuş, 20 metre derinliğe doğru göreceli azalmış ve 20 metre altında hemen hemen en düşük seviyelere inmiştir (Şekil 48). Aynı durum derinlikle tür sayısında da gözlenmiş, yüzeyden halokline doğru tür sayısında belirgin bir azalma görülmüştür (Şekil 48). Diğer dönemlerde de görüldüğü gibi bu dönemde de hücre sıklık profillerine bakıldığında ölen populasyonun çok düşük bir oranının haloklin altına indiği anlaşılmaktadır. 2021 Haziran başı ve sonunda oluşan yapıya benzer şekilde bu dönemde de haloklin üzeri ve altı populasyon net bir şekilde çizilen dendogram ve mds diyagramlarında ayrışmış olarak görülebilmektedir (Şekil 49, Şekil 50). Mart 2022 döneminde derinlikle fitoplankton hücre sıklığı ve tür sayısı ile diğer ortam biyolojik, kimyasal ve fiziksel parametreleri arasında yüksek düzeyde ilişkiler saptanmıştır (EK 1).



Şekil 46. Mart 2022 Marmara fitoplanktonu grup sıklıklarının dağılımı.



Şekil 47. Mart 2022 dönemi istasyonlarda ve farklı derinliklerde fitoplankton gruplarının sıklık dağılımı.



Şekil 48. Mart 2022 dönemi derinlikle litrede hücre sıklığı ve tür sayısı dağılımı.

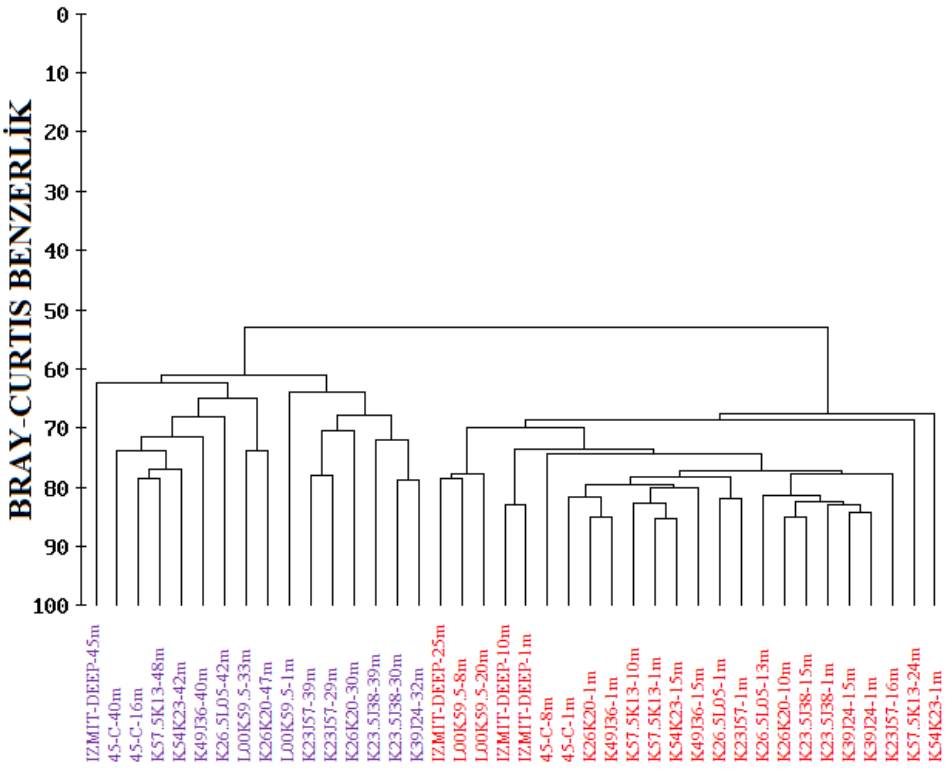
Tablo 4. Mart 2022 dönemi toplanan örneklerde tanımlanan fitoplankton türleri.

Bacillariophyta (Diyatomlar)	**Bacillariophyta (Diyatomlar)**	**Pyrrophyta (Dinoflagellatlar)**
Cerataulina pelagica	*Thalassiosira decipiens*	*Oxytoxum viride*
Chaetoceros affinis	*Thalassiosira polychorda*	*Peridinium cerasus*
Chaetoceros curvisetus	*Thalassiosira nordenskioldii*	*Peridinium crassipes*
Chaetoceros danicus	*Thalassiosira rotula*	*Peridinium depressum*
Chaetoceros decipiens	*Thalassiosira sp*	*Peridinium mediterraneum*
Chaetoceros gracilis	*Thalassiothrix frauenfeldii*	*Peridinium mite*
Chaetoceros subtilis	*Tropidoneis sp*	*Peridinium pellucidum*
Chaetoceros sp.	**Pyrrophyta (Dinoflagellatlar)**	*Peridinium sp*
Coscinodiscus excentricus	*Ceratium contortum karsteni*	*Peridinium steinii*
Coscinodiscus granii	*Ceratium contortum robustum*	*Podolampas palmipes*
Dactyliosolen fragilissimus	*Ceratium declinatum normale*	*Pronoctiluca pelagica*
Dactyliosolen mediterraneus	*Ceratium furca furca*	*Prorocentrum compressum*
Dactyliosolen sp	*Ceratium fusus* var. *seta*	*Prorocentrum dactylus*
Ditylum brightwellii	*Ceratium horridum horridum*	*Prorocentrum micans*
Eucampia cornuta	*Cearatium kofoidi*	*Prorocentrum minimum*
Guinardia flaccida	*Ceratium pentagonum tenerum*	*Prorocentrum sp.*
Lauderia annulata	*Cochlodinium polykrikoides*	*Protoperidinium bipes*
Leptocylindrus danicus	*Cochlodinium pulchellum*	*Pyrophacus horologium*
Leptocylindrus minimus	*Dinophysis fortii*	*Scrippsiella trochoidea*
Licmophora sp	*Dinophysis ovum*	*Torodinium teredo*
Nitzschia longissima	*Dinophysis rotundata*	**Prymnesiophyceae**
Nitzschia sp	*Gonyaulax sp*	*Distephanus speculum var octonarius*

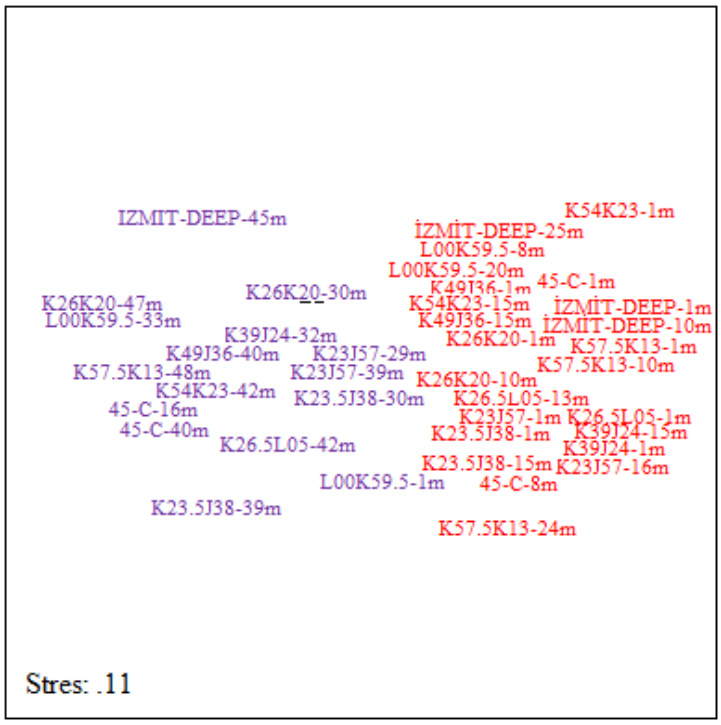
Proboscia alata forma *gracillima*	*Gymnodinium* sp.	*Emiliania huxleyi*
Pseudo-nitzschia delicatissima	*Gyrodinium fusiforme*	**Cryptophyceae**
Pseudosolenia calcar-avis	*Gyrodinium lachryma*	*Hillea fusiformis*
Rhizosolenia delicatula	*Gyrodinium sp.*	**Chrysophyceae**
Rhizosolenia robusta	*Kofoidinium velleloides*	Dinobryon sp.
Rhizosolenia setigera	*Micracanthodinium setiferum*	**Pseudoplankton**
Skeletonema costatum	*Noctiluca scintillans*	Çam poleni
Striatella unipunctata	*Oxytoxum adriaticum*	**Ebriophyceae**
Thalassionema nitzschioides	*Oxytoxum crassum*	*Ebria tripartita*

Tablo 5. Mart 2022 dönemi baskın türler

Skeletonema costatum
Nitzschia longissima
Chaetoceros gracilis
Thalassiosira sp
Emiliania huxleyi
Distephanus speculum var octonarius
Hillea fusiformis
Chaetoceros subtilis
Leptocylindrus minimus
Ceratium furca furca
Prorocentrum minimum
Chaetoceros sp.
Scrippsiella trochoidea
Chaetoceros decipiens
Ebria tripartita
Prorocentrum compressum
Corataulina pelagica
Dactyliosolen fragilissimus
Lauderia annulata
Guinardia flaccida



Şekil 49. Mart 2022 dönemi istasyonlar ve derinlikler arası benzerlik dendogramı.



Şekil 50. Mart 2022 dönemi istasyonlar ve derinlikler arası mds diyagramı

4.3.2 Amplikon dizileme ve metabarkodlama yöntemi ile plankton çeşitliği

Bu bölümde sunulan sonuçlar, proje önerisinde sunulan eşgüdüm planlaması dahilinde "Marmara Denizi'nde Oluşan Müsilajın Kaynağının ve Barındırdığı Organizma Gruplarının 16S Amplikon dizileme ve Metabarkodlama Metotları ile Araştırılması" projesi kapsamında yapılmış olup, sadece eşleşen istasyonların sonuçları özet olarak sunulmuştur (Tablo 6).

45-C istasyonunda müsilaj sırasında 23.06.21 tarihinde 22 metreden yapılan örnekleme, 18S verilerine göre, parasitik dinoflagellat olan Haplozoon grubu en yoğun edilen taksadır. Diğer dinoflagellat grupları da tespit edilmiştir. *Coscinodiscus radiatus*, *Heterosigma akashiwo* ve *Lauderia borealis* tür düzeyinde tespit edilen organizmalardır. Maxillopoda sınıfından kabuklu türleri, mantar grubundan Chytridiomycetes *ve Diplonemida sp.*, alg sınıfından diatomlar tespit edilmiştir. ITS verilerine göre, *Amphorellopsis* cinsine ait türler yoğunlukla tespit edilmiştir. Aynı zamanda, tür düzeyinde *Cutaneotrichosporon debeurmannianum, Candida vespimorsuum* ve *Meira nashicola* tespit edilmiştir. Protist grubu Alveolata ve kitrid mantarları grubu olan Rhizophydiales tespit edilmiştir. *Candida vespimorsuum,* D-glukozamin ve D-arabinozu sindirebilir. Candida türleri patojen mantarlardır. Candida türleri aynı zamanda biyofilm oluşturabilirler. *Amphorellopsis* gibi tintinnin siliatları, su ekosistemlerinde mikrobiyal besin ağı ve planktonik besin zinciri arasında trofik bir bağlantı görevi görür. Maxillopoda türleri, birincil üretim sağlayan fitoplankton ile karidesler, yavru balıklar ve hatta balinalar gibi daha yüksek avcı hayvanlar arasında bağlantı sağlar. Aynı zamanda oligotrofik sularda, heterotrofik bakteri ve pikoplanktonlarla beslenerek ve enerjinin daha yüksek trofik seviyelere aktarılmasını sağlar. Maya-benzeri fungi olan *Meira nashicola* türü potasyum nitrat, sodyum nitrit, l-lisin ve melezitozu asimile edebilir. Chytridiomycetes, saprofit veya parazitik mantarlardır. Rhizophydiales da bir diğer kitrit mantarları grubudur. Mikroparazitik olan bu türler diatomları konağı olarak kullanırlar. Kitrit mantarları, susbrat ve besin ulaşılabilirliğini etkileyerek fitoplankton ve bakteri etkileşimin etkilerler ve böylece bakteriyel aktiviteyi ve topluluk kompozisyonunu değiştirirler.

30.06.21 tarihinde 63 metreden örneklenen K26.5L05 kontrol istasyonunda, 18S verileri dinoflagellat grubu en yoğun grup olarak tespit edilmiştir. *Heterosigma akashiwo* ve *Prorocentrum micans* tür düzeyinde tespit edilen organizmalardır. Çok zincirli solucanlar grubu olan Phyllodocida ile protist *Diplonemida sp*. tespit edilmiştir. ITS verilerine göre, bir diğer protist grubu Alveolata göreceli bolluğu en yüksek taksa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, *Cutaneotrichosporon debeurmannianum* türü ile siliat grubundan olan *Amphorellopsis* ve *Strombidinopsis* cinsleri tespit edilmiştir. Fosfat ve nitrat ilavesi *H. Akashiwo*'nin çoğalmasını desteklediği araştırmalarda gösterilmiştir. Planktonik siliatlar olan *Strombidinopsis* türleri, metazoa, küçük algler ve bakteriler

arasında önemli bir trofik bağlantıdır. Dinoflagellatlar ve diatomlar ile beslenirler. Bir araştırmada, toksik dinoflagellat türü ile beslenen bir *Strombidinopsis* türünün büyüme oranlarının arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, bazı zararlı alg patlamalarının, *Strombidinopsis* türleri tarafından bitirildiği rapor edilmiştir. *Prorocentrum micans,* denizel, red-tide oluşturan miksotrofik dinoflagellattır.

45-C istasyonunda 15.09.21 tarihinde müsilaj sonrası 0 metreden yapılan örneklemede, 18S verilerine göre copepodlardan *Acartia* ve *Oithonidae*, parasitik dinoflagellat *Haplozoon*, siliatlardan *Pseudotontonia* cinslerine ait türler tespit edilmiştir. Tür düzeyinde *Acartia* cinsinden *Acartia clasuii* türü tespit edilmiştir. *Acartia* cinsine ait bir türün besin elementi yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde bulunduğu literatürde belirtilmiştir. Ayrıca, türün yumurtalarının hayatta kalma kapasitesinin hipoksik durumlarda daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, kırmızı gelgitler de dahil olmak üzere kıyıdaki zararlı alg patlamalarının büyümesini de sınırladıkları belirtilmiştir. Bu kopepodlar alg ve fitoplankton ile beslenirken ayrıca besin (azot) ve enerji sirkülasyonunda önemli rol oynarlar. *Oithonidae türleri,* fitoplanktondan madde ve enerjiyi daha büyük zooplankton ve birkaç pelajik ihtiyoplanktona aktarması sebebiyle pelajik besin ağında önemli bir rol oynamaktadır. *Pseudotontonia* türleri daha önceki çalışmalarda derin hipersalin anoksik tabanlarda gözlenmiştir. ITS verilerine göre ise *Cutaneotrichosporon debeurmannianum*, *Eutintinnus rectus*, *Laackmanniella prolongata* türleri ile *Strobilidium* cinsine ait türler yoğunlukla tespit edilmiştir. *Cutaneotrichosporon debeurmannianum* türü biyofilm üretebilir. Nitrat, amonyum sülfat gibi bazı azot bileşiklerini ve sitrik asit gibi bazı karbon bileşiklerini asimile edebilir. Ayrıca üreaz reaksiyonu vardır. *Eutintinnus rectus* gibi eutinnid türler denizel planktonik siliatlardır ve küçük diatomlarla beslenirler. Biyojeokimyasal karbon döngüsü için önemlidirler. *Laackmanniella prolongata* yoğunluğu düşük alanları ve besin yönünden zengin suları domine eder.

Haplozoon grubu, müsilaj sırasında 45C-Haziran istasyonunda hayli yoğun (%22,9) tespit edilmişken, müsilaj sonrası Eylül ayındaki örneklemede yoğunluğunun düştüğü gözlenmiştir (%3,8). Müsilaj sırasında 45C-Haziran istasyonunda %7,5 göreceli bolluğu olan dinofilagellatlar, aynı zamanda örneklenen K26.5L05 kontrol istasyonunda daha yüksek oranda tespit edilmişlerdir (%30,4). Müsilaj sırasında 45C istasyonunda ve kontrol istasyonda *Cutaneotrichosporon debeurmannianum* türünün göreceli bolluğu daha düşük ve yakın değerlerde %7,8 ve %8,9) iken, Eylül ayındaki müsilaj sonrası örneklemede 45C istasyonunda, türün göreceli bolluğu oldukça yüksek bulunmuştur. *Diplonemida sp*. türü, müsilaj sırasında 45C istasyonunda ve K26.5L05 kontrol istasyonda göreceli bollukları düşük ve yakın değerlerde tespit edilmişken, Eylül ayında 45C istasyonunda müsilaj sonrası tespit edilememiştir. Aynı şekilde, *Heterosigma akashiwo* türü hem müsilaj sırasında 45C (%1,2) istasyonunda ve hem de K26.5L05 kontrol istasyonda (%3,8)

tespit edilirken, müsilaj sonrası 45C istasyonunda tespit edilememiştir. Müsilaj sırasında 45C istasyonu ve K26.5L05 kontrol istasyonlarında tespit edilen alveolata gruplarının göreceli bollukları oldukça farklılık göstermektedir. %5,1 göreceli bolluk 45 (Haziran) istasyonu için kaydedilirken, K26.5L05 kontrol istasyonu için bu oran %34,4'tür. Bu istasyonlar arasında tespit edilen bir diğer farklılık da *Amphorellopsis* cinsine ait türlerin göreceli bolluklarıdır. K26.5L05 kontrol örneğinde %7 olarak tespit edilen *Amphorellopsis* türlerinin müsilaj (45C-Haziran) ile arttığı tespit edilmiştir (%20).

Tablo 6. Metabarkodlama yöntemi ile elde edilen tülerin bolluk dereceleri ve ekosistem fonksiyonları

Kodu	**Tarihi**	***Türler**	**Göreceli Bolluk**	**Oksijen kullanımı**	**Ekosistem görevi**
45C (53M)	23.06.21	Haplozoon grubu (parasitik dinoflagellat)	%22,9	Aerobik	
		Amphorellopsis	%20	Heterotrof	Mikrobiyal besin ağı ve planktonik besin zincirini bağlar.
		Cutaneotrichosporon debeurmannianum	%7,8	Fakültatif anaerobik	Azot ve karbon bileşiklerini asimile eder, biyofilm üretir.
		Diğer dinoflagellat	%7,5	Mixotrofik	
		Maxillopoda	%7,0	Heterotrof	Enerji transferi
		Candida vespimorsuum	%5,1	Heterotrof	D-glukozamin ve D-arabinozu sindirebilir, biyofilm oluşturabilir
		Alveolata	%5,1	Ototrof, Heterotrof, Mixotrofik	
		Meira nashicola	%4,6		Potasyum nitrat, sodyum nitrit, melezitoz ve l-lisin asimilasyonu
		Diatomlar	%4,3	Ototrof	Enerji ve besin döngüsü
		Chytridiomycetes	%3,2	Aerobic	Saprofit veya parazit
		Coscinodiscus radiatus	%2	Ototrof	
		Diplonemida sp.	%1,9	Heterotrof	
		Rhizophydiales	%1,7	Heterotrof	Susbrat ve besin ulaşılabilirliğini etkileyerek fitoplankton ve bakteri etkileşimin etkilerler.
		Heterosigma akashiwo	%1,2	Ototrof	Zararlı alg patlamalarına sebep olur ve toksin üretir.
		Lauderia borealis	%1	Ototrof	

Kodu	Tarihi	*Türler	Göreceli Bolluk	Oksijen kullanımı	Ekosistem görevi
45C (22M)	15.09.21	*Acartia*	%44,7	Heterotrof	Nitrogen döngüsü
		Cutaneotrichosporon debeurmannianum	%27,5	Fakültatif anaerobik	Azot ve karbon bileşiklerini asimile eder, biyofilm üretir.
		Eutintinnus rectus	%7,9	Heterotrof	Biyojeokimyasal karbon döngüsü
		Strobilidium	%6.4	Heterotrof, Mixotrofik	
		Haplozoon (Parasitik dinoflagellate)	%3,8	Aerobik	
		Oithonidae	%3,4	Heterotrof	Enerji ve besin aktarımı
		Pseudotontonia	%1,1	Anaerobik	
		Laackmanniella prolongata	%1,04	Heterotrof	
K26.5L05	30.06.21	Alveolata	%34	Ototrof, Heterotrof, Mixotrofik	
		Dinoflagellatlar	%24,3	Mixotrofik	
		Cutaneotrichosporon debeurmannianum	%8.9	Fakültatif anaerobik	Azot ve karbon bileşiklerini asimile eder, biyofilm üretir.
		Amphorellopsis	%7,0	Heterotrof	Mikrobiyal besin ağı ve planktonik besin zincirini bağlar.
		Heterosigma akashiwo	%3,8	Ototrof	Zararlı alg patlamalarına sebep olur ve toksin üretir.
		Prorocentrum micas	%3,0	Mixotrofik	Red-tide oluşturur.
		Phyllodocida	%2,8	Heterotrof	
		Strombidinopsis	%2,3	Heterotrof	metazoa, küçük algler ve bakteriler arasında önemli bir trofik bağlan kurar
		Diplonemida sp.	%1,1	Heterotrof	

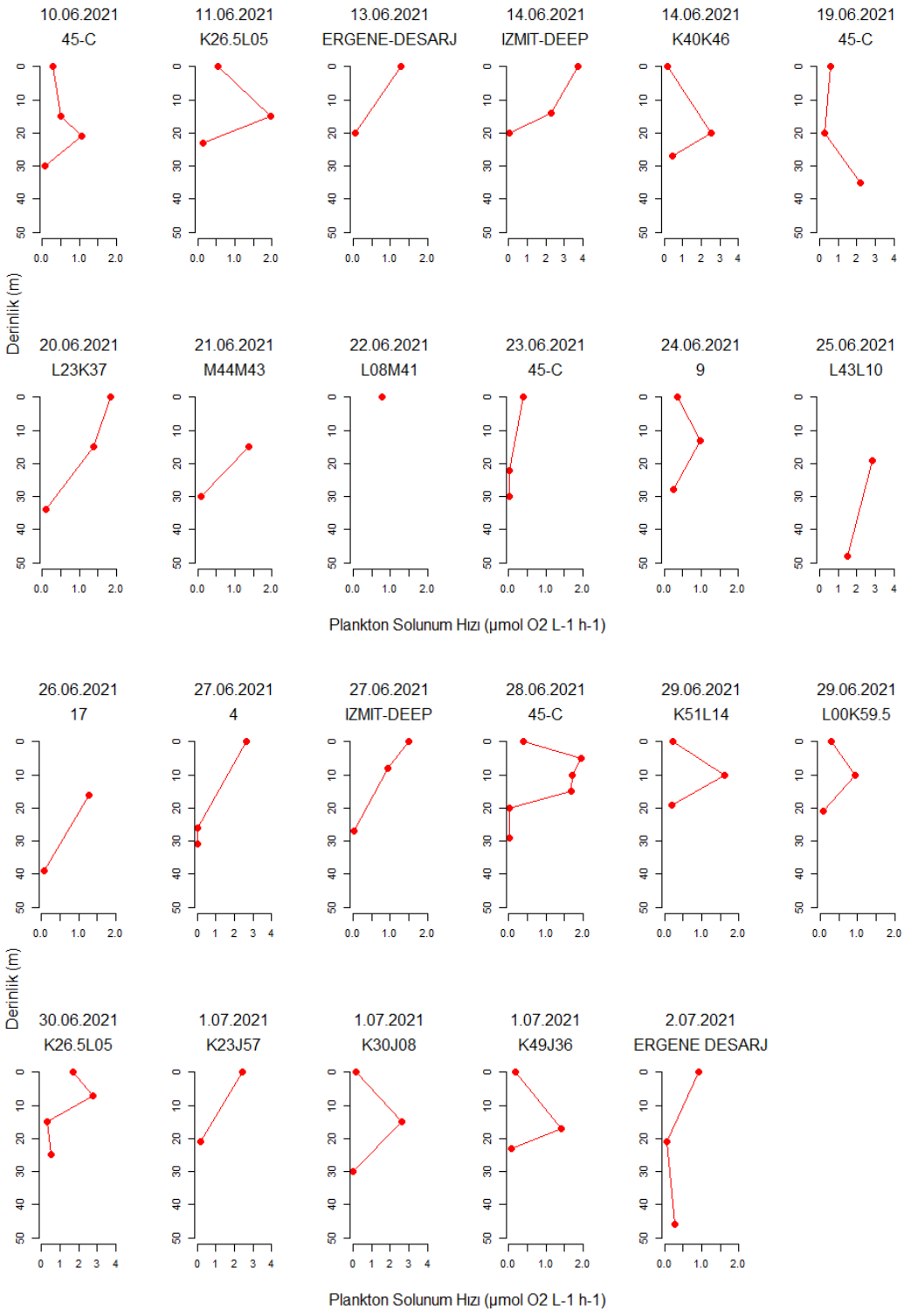
*Bolluğu % 1'in üzerinde olanlar

4.4 Plankton Metabolizması ve Müsilajın Oksijen Üzerine Etkileri

4.4.1 Üst, ara ve alt tabakada oksijen tüketim hızlarının belirlenmesi

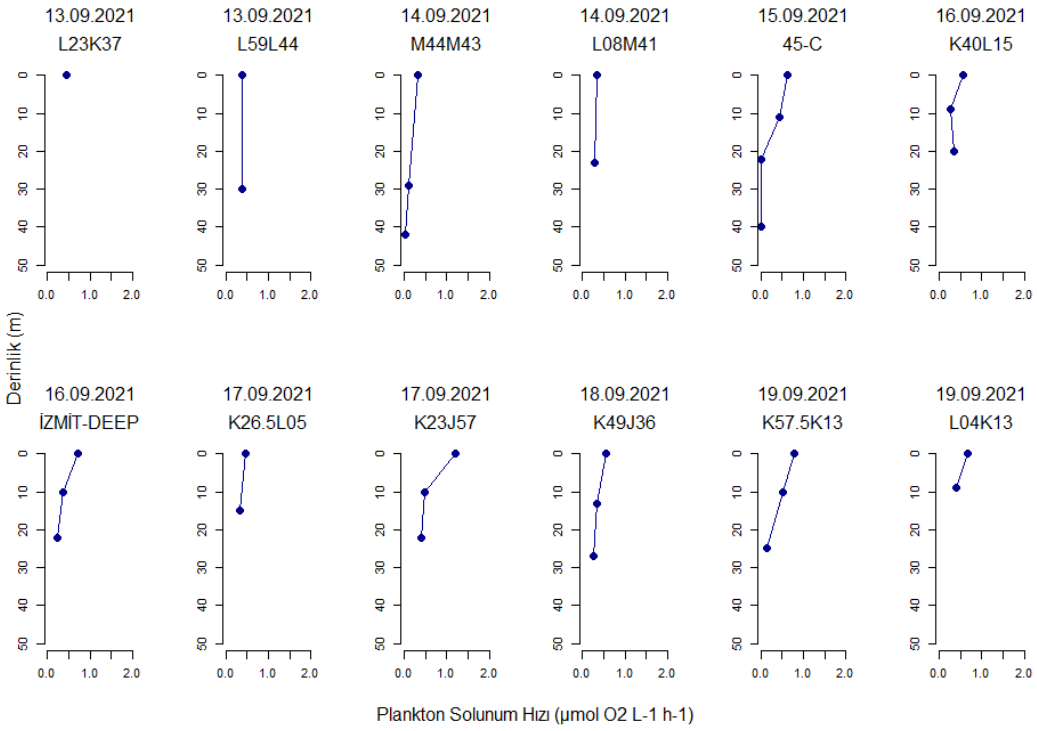
Plankton solunum hızları su kolonunda, istasyonlar arasında ve mevsimsel olarak farklılıklar göstermiştir. 2021 yaz ölçümlerinde değerler 0.01 ile 3.74 µmol O_2 L^{-1} h^{-1} arasında değişim göstermiştir (Şekil 51). Bu dönemde en yüksek plankton solunumu (3.74 µmol O_2 L^{-1} h^{-1}) 14.06.2021 tarihinde IZMIT-DEEP kodlu İzmit Körfezi orta baseninde bulunan istasyonun yüzeyinde bulunmuştur. Diğer görece yüksek değerlere (>2µmol O_2 L^{-1} h^{-1}) K40K46 (Yalova

açıkları), 45-C (Çınarcık çukuru), 4 (Tuzla açıkları), K26.5L05 (Gemlik Körfezi), K23J57 (Bandırma Körfezi) ve K30J08 (Karabiga açıkları), L43L10 (Batı Karadeniz), kodlu istasyonların ilk 20m'sinde karşılaşılmıştır. Düşük solunum hızları genellikle >20m derinliklerinden sonra görülmüştür. Bu dönemde 45-C istasyonunda 4 farklı günde yapılan çalışmalarda, plankton solonum hızlarının derinlik ve büyüklük olarak değiştiği saptanmıştır.



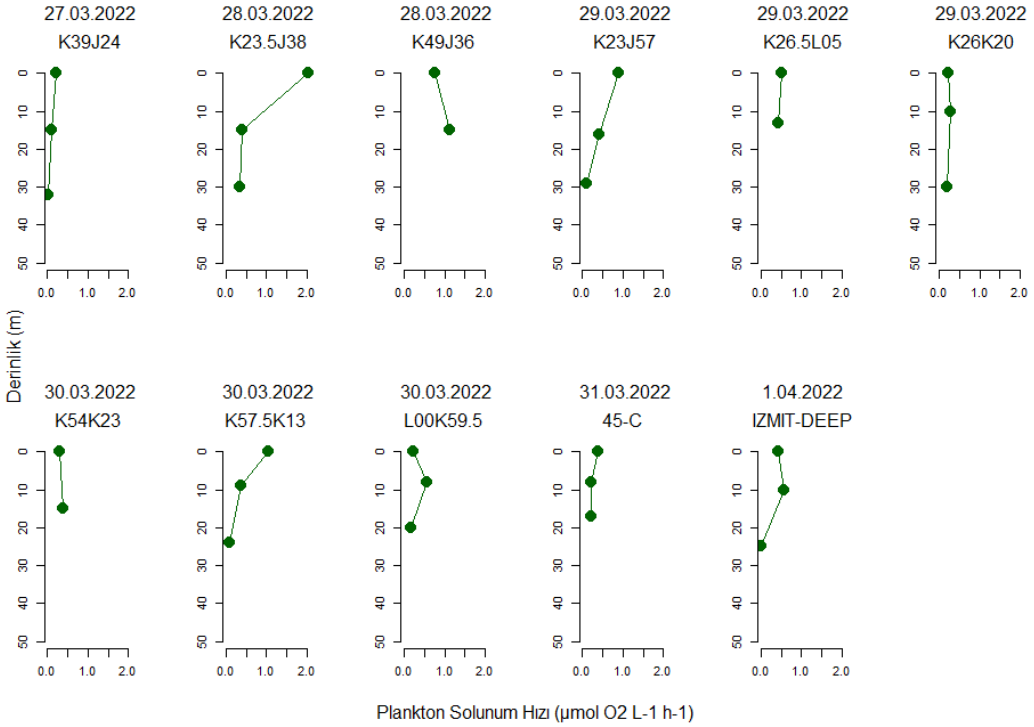
Şekil 51. Marmara Denizi ve Karadeniz Yaz 2021 (müsilaj süreci) su kolonu plankton solunum hızları

Müsilaj sonrası sonbahar döneminde (Eylül 2021) yapılan ölçümlerde plankton solunum hızları 0.01-1.22 µmol O_2 L^{-1} h^{-1} arasında değişmiş olup, en yüksek değere K23J57 (Bandırma Körfezi) istasyonunun yüzeyinde rastlanılmış, ayrıca su kolonunda da ortalamanın üstünde değerler görülmüştür (Şekil 52). Müsilajın olduğu döneme göre plankton solunum hızlarında belirgin düşüşler görülmüş ve Marmara Denizi'nde daha homojen bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Bu dönem görece yüksek değerlere ilk 10m de karşılaşılmıştır.



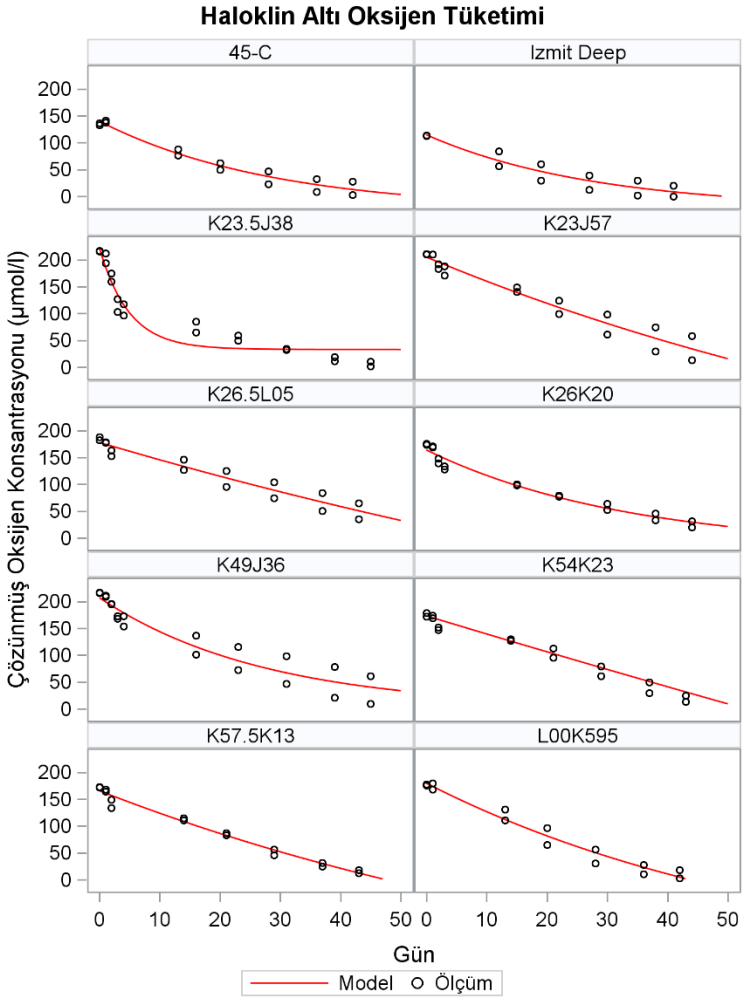
Şekil 52. Marmara Denizi ve Karadeniz Sonbahar 2021 (müsilaj sonrası) su kolonu plankton solunum hızları

Müsilaj sonrası ilkbahar 2022 döneminde yapılan solunum hızları ölçümleri 0.01-2.04 µmol O_2 L^{-1} h^{-1} arasında değişim göstermiştir (Şekil 53). En yüksek değere (2.04 µmol O_2 L^{-1} h^{-1}) K23.5J38 (Erdek Körfezi) istasyonunda rastlanılmıştır. Solonum hızları su kolonunda diğer dönemlere göre daha homojen ve görece düşük gözlemlenmiştir.



Şekil 53. Marmara Denizi İlkbahar 2021 (müsilaj sonrası) su kolonu plankton solunum hızları

Haloklin altı (<30m) oksijen tüketim deneylerindeki oksijen konsantrasyonun 40 günün üzerindeki değişimleri ve veri üzerine uygulanan model yardımı ile tahmin edilen organik karbon miktarları ve oksijen tüketim hızları Şekil 54 ve Tablo 7'da verilmiştir. Deneyler ile hedeflenen organik karbonun tüketilebilirliğini (labile-refractory) hesaplayabildiğimiz değer olan "α", model sonuçlarına 0.204-0.001 gün^{-1} aralığında ortalama olarak 0.038 gün^{-1} olarak hesaplanmıştır. En hızlı parçalanabilen organik karbon (labile) Erdek Körfezi dışındaki K23.5J38 istasyonunda, en zor parçalanabilen (refractory) ise K54K23 isimli Marmara Denizi'nin kuzey orta hattında bulunan istasyonda bulunmuştur. Model ile hesaplanan tüketim hızları 33 ile 385 mg C m^{-3} gün^{-1} aralığında, ortalama 84 mg C m^{-3} gün^{-1} olarak hesaplanmıştır. En hızlı tüketim Erdek Körfezi dışındaki K23.5J38 istasyonunda, en yavaş tüketim ise K26.5L05 Gemlik Körfezi'ndeki istasyonda hesaplanmıştır.



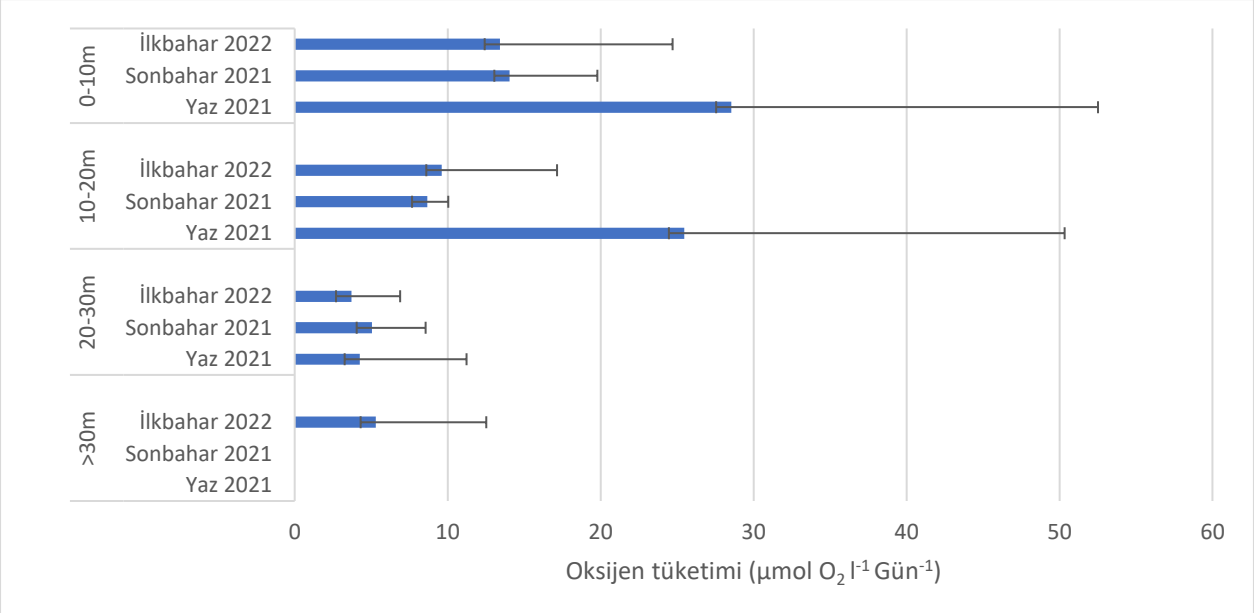
Şekil 54. Haloklin altı (30m) oksijen tüketim deneyleri

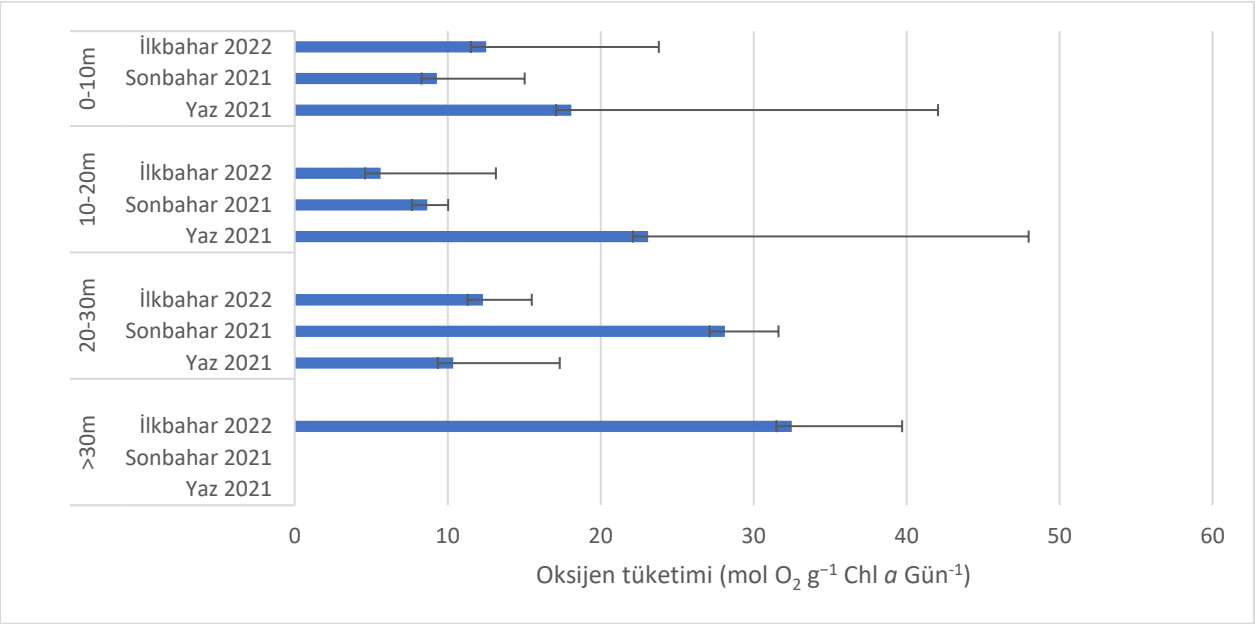
Tablo 7. Haloklin altı istasyonlardaki model sonuçlarına göre organik karbon konsantrasyonu (OC_{bf}) ve tüketim eğimi (α) ve tüketim hızı değerleri

İstasyon	Derinlik (m)	OC_{bf} (µmol l^{-1})	α ($Gün^{-1}$)	Tüketim hızı (mg C m^{-3} $gün^{-1}$)
K23.5J38	39	157	0.204	385
K49J36	40	172	0.036	75
45-C	40	138	0.035	57
L00K595	33	294	0.016	57
K26K20	47	153	0.030	55
Izmit Deep	45	115	0.036	49
K23J57	39	434	0.009	47

K57.5K13	48	361	0.010	44
K54K23	42	2016	0.001	34
K26.5L05	42	505	0.005	33

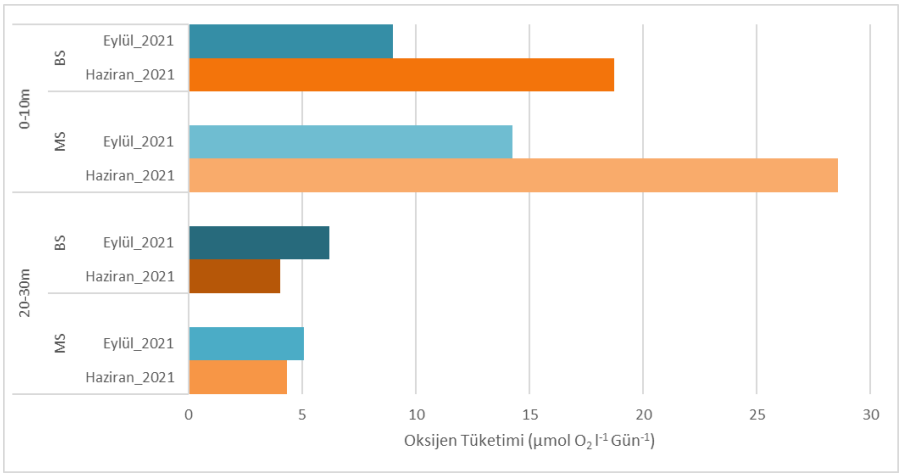
Tüm istasyonlarda oksijen tüketim hızlarının (plankton solunumu) su kolonunda 10'ar metre aralıkla örnekleme dönemlerine göre ortalamaları alınarak karşılaştırma yapıldığında, ilk 20m'de müsilajın görünür olduğu Yaz 2021 döneminde diğer dönemlere göre yaklaşık 2 kat fazla olduğu görülmektedir (Şekil 55). 20-30m'de dönemler arası belirgin bir farklılık saptanamamıştır. İlkbahar 2022 döneminde yapılan haloklin altı ölçümler (>30m) diğer dönemlerdeki 20-30m ölçümleriyle aynı seviyede görülmektedir (~5 µmol O_2 L^{-1} $gün^{-1}$). Klorofil-a normalize edilmiş oksijen tüketim hızlarına bakıldığında, ilk 20m'de Yaz 2021 değerlerinin diğer dönemlerden 1.5-3 kat fazla olduğu saptanmıştır (Şekil 55). Haloklin alt tabakası olan 20-30m'de Sonbahar 2021 oksijen tüketimleri diğer dönemlere göre yüksek bulunmuştur. Genel olarak klorofil-a normalize oksijen tüketimi derinlikle artmış, en yüksek değeri ortalaması 32.5 mol O_2 g^{-1} Chl a $Gün^{-1}$ haloklin altında tespit edilmiştir.





Şekil 55.Marmara Denizi ölçüm yapılan tüm dönemlerde su kolonunda tabakalara (0-10m:Yüzey, 10-20m: Haloklin üst tabakası, 20-30m: Haloklin alt tabakası, >30: Haloklin altı)göre ortalama alınmış günlük oksijen tüketimi (üstte), günlük klorofil-a normalize edilmiş oksijen tüketimi (altta). Hata barları tabakalardaki örneklerin ortalamasının standart hatasını göstermektedir.

Marmara Denizi ve Karadeniz'de Haziran 2021 ve Eylül 2021'de ölçülen oksijen tüketim değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 56), Marmara Denizi yüzey tabakasında her iki dönemde 1.5 kat fazla oksijen tüketimi görülmektedir. 20-30 m derinlikte ise çok belirgin tüketim farkları tespit edilememiştir.



Şekil 56. Marmara Denizi (MS) ve Karadeniz (BS) Haziran 2021 – Eylül 2021 su kolonunda tabakalara göre ortalama alınmış oksijen tüketimleri karşılaştırması

4.4.2 Işıklı tabakada C^{14} yöntemi ile birincil üretim hızlarının belirlenmesi

Müsilaj dönemi (Yaz 2021) ve sonrası (Mart 2022) yapılan C14 yöntemi ile birincil üretim hızlarının sonuçları Tablo 8'da sunulmuştur. Yaz 2021'de 5 istasyonda belirlenen doygunluğa ulaşmış fotosentez hızları (P_{max}) 1.35 ile 8.97 mg C m^{-3} h^{-1} aralığında değişmiş, en yüksek değer 4 isimli Yalova açıklarındaki istasyonda, en düşük değer ise K30J08 isimli Çanakkale Boğazı girişi Biga açıklarında ölçülmüştür. İlkbahar 2022 döneminde ise bu değerler 2.55 ile 10.22 mg C m^{-3} h^{-1} arasında değişim göstermiş, en yüksek değere İZMİT-DEEP kodlu, İzmit Körfezi orta basende bulunan istasyonda, en düşük değer ise K23.5J38 kodlu, Erdek Körfezi'nin girişinde bulunan istasyonda ölçülmüştür. Müsilaj döneminde Klorofil-*a* normalize edilmiş doygun fotosentez hızı (P^B_m) ise 0.95 ile 8.76 g C g^{-1} Chl h^{-1} arasında değişmiş, en yüksek değer yine 4 kodlu Yalova açıklarındaki istasyonda, en düşük değer ise Ergene-Desarj kodlu Ergene nehrinden yapılan derin deşarjın olduğu noktada ölçülmüştür. Müsilaj sonrası İlkbahar 2022 döneminde ise bu değerler 1.62 ile 18.31 g C g^{-1} Chl h^{-1} arasında değişmiş, en yüksek değer K23J57 kodlu Bandırma Körfezi'nde bulunan istasyonda, en düşük değer ise 45-C kodlu Çınarcık Çıkurunda bulunan istasyonda ölçülmüştür. Fitoplanktonun ışıktan yararlanma kapasitesinin bir göstergesi olan fotosentez-ışık ilişkisinin başlangıç eğrisi (α^B) müsilaj döneminde 1.34 ile 12.94 g C g^{-1} Chl foton mol^{-1} m^2 arasında değişimiş, en yüksek değere yine 4 kodlu Yalova açıklarındaki istasyonda, en düşük değere ise ERGENE-DESARJ kodlu istasyonda rastlanılmıştır. İlkbahar 2022 döneminde ise bu değerler 3.95 ile 43.25 g C g^{-1} Chl foton mol^{-1} m^2 arasında değişmiş düşük ve yüksek değerler fotosentez hızıyla paralellik göstermiştir.

Tablo 8. Fotosentez ışık ilişkisi ile hesaplanmış fotosentetik parametrelerin istasyonlardaki sonuçları

İstasyon	Örnekleme Tarihi	Klorofil-a (mg m^3)	P_{max} (mg C m^{-3} h^{-1})	P^B_m (g C g^{-1} Chl h^{-1})	α^B (g C g^{-1} Chl foton mol^{-1} m^2)
4	27.06.2021	1.1	8.97	8.76	12.94
K51L14	29.06.2021	1.5	5.13	3.58	5.12
K26.5L05	30.06.2021	2.4	3.84	1.65	2.68
K30J08	1.07.2021	1.1	1.35	1.23	1.96
ERGENE-DESARJ	2.07.2021	2.3	2.18	0.95	1.34
K23.5J38	28.03.2022	0.9	2.55	2.83	5.97
K23J57	29.03.2022	0.5	9.42	18.31	43.25
K26K20	29.03.2022	1.0	8.71	8.78	24.00
K57.5K13	30.03.2022	1.1	7.07	6.36	21.48

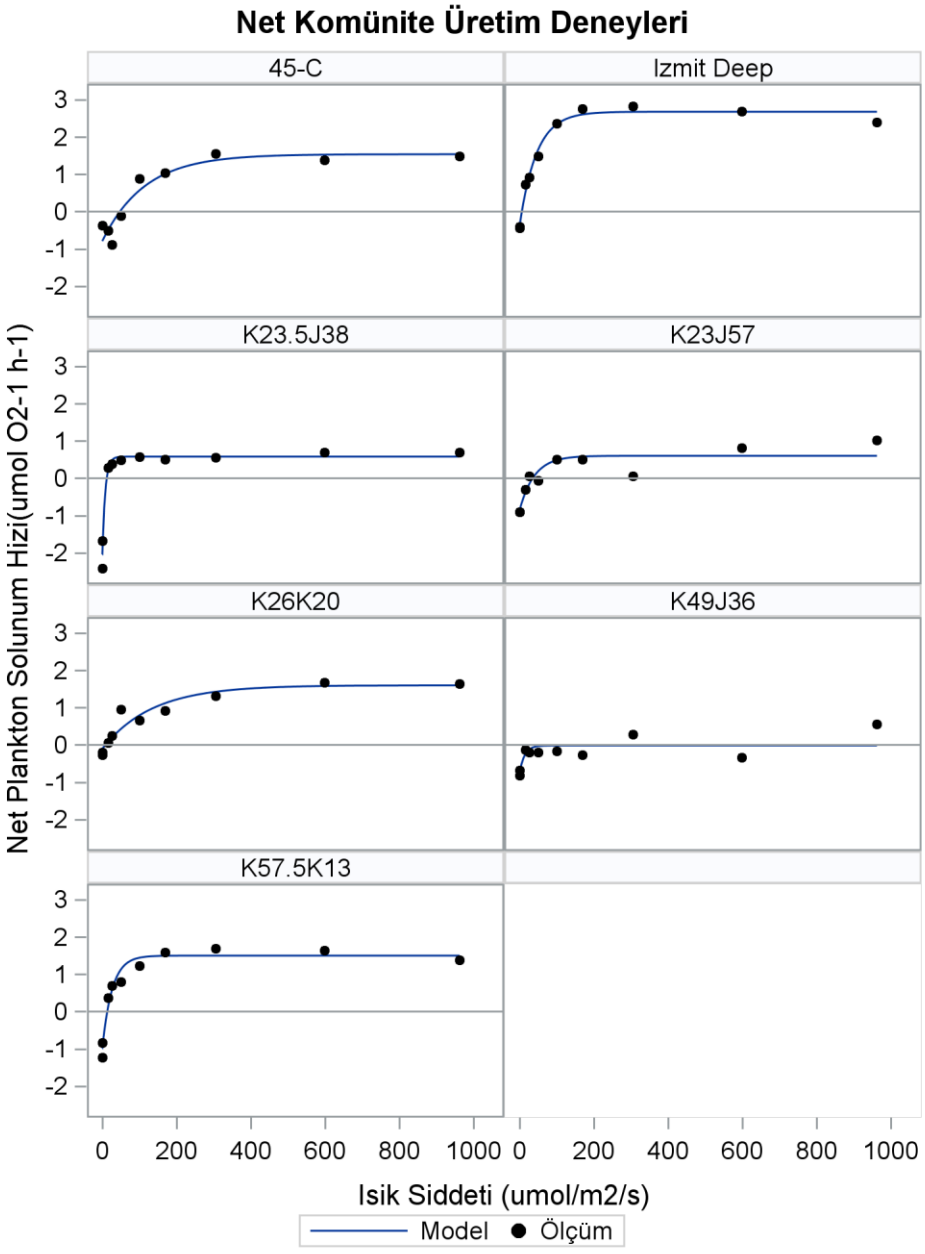
45-C	31.03.2022	5.1	8.07	1.62	3.95
IZMIT-DEEP	1.04.2022	5.9	10.22	1.76	4.06

4.4.3 Işıklı tabakada O_2 yöntemi ile net komünite üretim hızlarının belirlenmesi

Sadece ilkbahar 2022 döneminde ölçümü yapılabilen net komünite üretim hızları -0.02 ile 2.68 µmol O_2 l^{-1} h^{-1} arasında değişmiş, negatif değer K49J36 kodlu Tekirdağ Çukurunda bulunan istasyonda, en yüksek değer ise İzmit Körfezi'nde ölçülmüştür. Klorofil normalize edilmiş net komünite hızları ise -0.01 ile 1.58 mol O_2 g^{-1} Chl *a* h^{-1} arasında değişmiştir. Fotosentez-ışık ilişkisinin başlangıç eğrisi (α^B) 1.11 ile 101.80 mol O_2 g^{-1} Chl h^{-1} mol^{-1} m^2 arasında değişmiş, en yüksek değere K23.5J38 kodlu Erdek Körfezi girişindeki istasyonda, en düşük değere ise 45-C kodlu, Çınarcık Çukurunda bulunan istasyonda ölçülmüştür.

Tablo 9. Fotosentez ışık ilişkisi ile hesaplanmış net komünite üretim hızları parametrelerin istasyonlardaki sonuçları

İstasyon	Örnekleme Tarihi	Klorofil-a (mg m^3)	NCP_m (µmol O_2 l^{-1} h^{-1})	NCP_m^B (mol O_2 g^{-1} Chl *a* h^{-1})	α^B (mol O_2 g^{-1} Chl h^{-1} mol^{-1} m^2)
K23.5J38	28.03.2022	0.9	0.58	0.63	101.80
K49J36	28.03.2022	2.5	-0.02	-0.01	5.99
K23J57	29.03.2022	0.5	0.60	1.13	19.24
K26K20	29.03.2022	1.0	1.60	1.58	3.50
K57.5K13	30.03.2022	1.1	1.50	1.32	23.05
45-C	31.03.2022	5.1	1.54	0.30	1.11
Izmit Deep	1.04.2022	5.9	2.68	0.46	3.19



Şekil 57. Oksijen yöntemi ile ölçülen net komünite plankton hızlarına uygulanan model ve ışık şiddeti

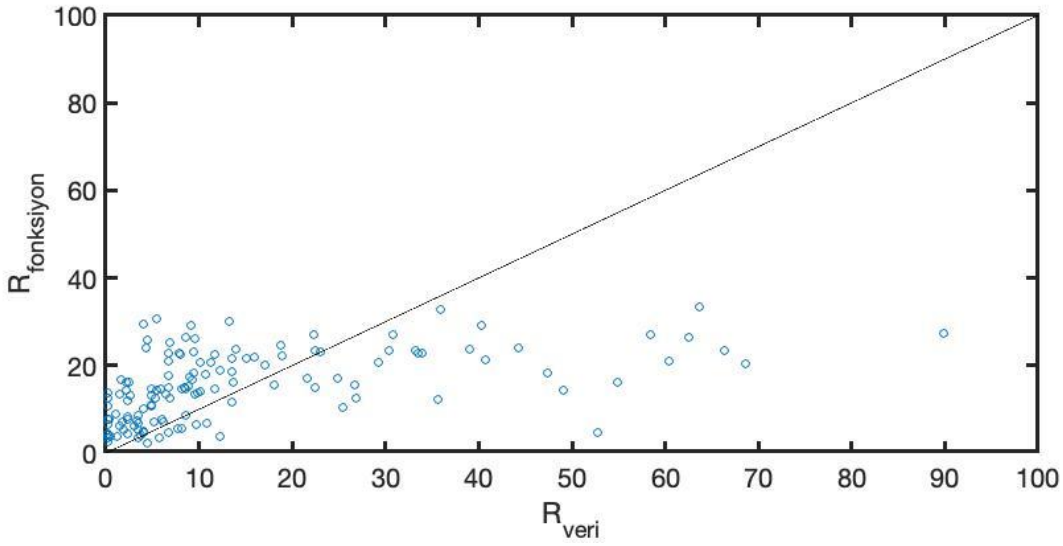
4.4.4 Müsilajın O_2 tüketim hızının belirlenmesi

Haziran 2021'de 45-C kodlu istasyondan 0-30 metre arası zooplankton kepçesinin dikey çekimi ile toplanan müsilaj örneğinde ölçülen oksijen tüketim hızı 12.2 µmol O_2 l^{-1} h^{-1} olarak ölçülmüştür.

4.5 Plankton Solunumunun Parametrize Edilmesi (İP3)

Proje kapsamında, müsilaj dönemi ve sonrası tüm dönemleri kapsayan ölçümü yapılmış tüm veriler bir araya getirilerek, değişkenler arasında istatistiksel ilişkiler araştırılmıştır (EK 1). Plankton solunumu (µmol O_2 l^{-1} $Gün^{-1}$) istatistiksel olarak anlamlı (R^2 değeri (>0.3,<-0.3), p-değeri (<0.05))) ilişkiler deniz suyu sıcaklığı, çözünmüş oksijen, azot, aktif klorofil-a, POC ve DOC ile bulunmuştur. Genetik Algoritma ile yapılan parametre tahmini sonucu R fonksiyonunun verilere en yakın olan formunun aşağıdaki gibi olduğu hesaplanmıştır:

$$R = 0.0046\ DOW^{1.0964}\ T^{0.7946}$$



Şekil 58. Regresyon analizi sonucu günlük plankton solunum hızı (R_{veri}) ve model ile tahmin edilen plankton solunum hızı ($R_{fonksiyon}$) karşılaştırması. Verilen çizgi 1:1 noktalarını temsil etmektedir.

Verideki solunum hızı değerleri ile fonksiyonun tahmin ettiği değerlerin karşılaştırması Şekil 58'de gösterilmiştir. Burada fonksiyonun verideki değerleri $15 < R_{\text{veri}} < 40$ aralığında iyi tahmin ettiği, R_{veri} değerlerinin 15'den az olması durumunda yüksek tahmin ettiği ve yüksek R_{veri} değerlerinde ise düşük tahmin ettiği görülmektedir.

5 TARTIŞMA

Marmara Denizi'nde 2021 İlkbahar-yaz aylarında meydana gelen müsilaj olayı sırasında ve sonrasında gerçekleştirilmiş bu çalışma, plankton metabolizması ve müsilajın oksijen bütçesine etkilerini anlamımız açısından kalitatif ve kantitatif bilgiler toplamamıza ve analiz etmemize fırsat vermiştir. Ayrıca farklı zamanlarda haftalarca süren Marmara Denizi'nde gerçekleştirilen oşinografik çalışmalar ile, müsilaj Eylül 2021 ve Mart 2022'de su kolonunda tespit edilememiştir. Müsilajı oluşturan nedenler ve oluşumundan sonra Marmara Denizi'ne etkilerini inceleyebilmek için bu çalışma müsilaj sırası ve sonrası olarak planlanmıştır.

Marmara Denizi'nde yapılan ölçümlere göre 80'li yıllarda kendini göstermeye başlayan besin tuzu aşırı artışı (Polat vd., 1998) günümüzde de görülmektedir. Yukarıda verilmiş sonuçlardan görüleceği üzere Marmara Denizi genelinde uzun süredir devam eden besin tuzu fazlalığı hem müsilaj döneminde hem de sonraki dönemlerde devam etmektedir. Besin tuzlarının yüzey sularındaki dağılımları fitoplankton fotosentezi, yağışlar, Karadeniz girdisi ve kıyısal girdi gibi değişkenlere bağlı olarak örnekleme dönemlerinde değişim gösterse de, genellikle Marmara'nın doğusunda ve körfezlerde görece yüksek besin tuzları tespit edilmiştir. Besin tuzlarının su kolonundaki dağılımları ise yüzeyden farklı olarak özellikle azot, fosfor ve silikatın derinlikle artışı çok belirgindir ve bu sonuçlar 90'lı yıllarda yapılan besin tuzu ölçümleri ile (Polat vd., 1998; max NO_2+NO_3-N:10.5 µM, max PO_4:1.2 µM) kıyaslandığında benzer seviyelerdedir. Nitrit-nitrat azotunun 300m altındaki sularda oksijenin çok düşük olmasından dolayı denitrifikasyon sonucu azalma eğilimi göstermesi, derin çukurlarda oksijenin tükenmesiyle sonuçlanacak olmasının bir göstergesidir. Müsilajlı ve müsilajsız dönemler arasında besin tuzları açısından belirgin bir farklılık görülmemiştir.

Klorofil-a fitoplankton biyokütlesi göstergesi özelliği ile ötrofikasyon sınıflamasında 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 90'lı yıllarda yapılan çalışmalarda Ocak-Nisan ayları arasında en yüksek değerlerine ulaşarak ~0.5-10 mg/m^3 arasında değişmiş (Polat vd., 1998) ve 2014-2019 yılları arası yine kış-ilkbahar ayları en yüksek değerler ölçülerek 0.25-12.31 mg/m^3 aralığında ölçülmüştür (ÇŞİDB, TUBİTAK-MAM (2021). Haziran 2021 müsilaj dönemi klorofil-a konsantrasyonları geçmiş çalışmaların aksine, yaz dönemini temsilen görece yüksek ölçülmüştür (~4-5 mg/m^3). Klorofil-a'nın

yüksek olduğu derinlikler haloklinin üstü 15-20m civarlarında müsilaj tabakasının yoğun olduğu derinlikle paralellik göstermiştir. Klorofil-a müsilaj sonrası Eylül 2021'de 1-1.5 seviyelerine düşmüş ve müsilaj gözlemlenmemiştir. Mart 2022'de ise müsilaj döneminden daha yüksek konsantrasyonlar görülmüş (>5, max 12 mg/m^3) fakat müsilaja rastlanmamıştır. 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 vd., 2016) örnekleme dönemlerinde de ötrofik özelliklerini korumuştur.

Müsilaj sırasında özellikle fitoplankton gruplarından diyatomlar baskın olarak bulunmuş sırası ile dinoflagellat ve kokkolitoforidler izlemiştir. Müsilaj döneminde Haziran başı ile sonu arasındaki büyük farklılıklardan bir tanesi Haziran başında incelenen istasyonların tamamının yüzey sularında fitoplankton sıklığı fitoplankton patlaması (bloom) adı verilen litrede bir milyon hücre ve üzeri seviyeyi geçmesidir. Bu çalışma göstermiştir ki kısa zaman süreçlerinde aynı noktada fitoplankton kompozisyonunda büyük farklılıklar oluşabilmektedir. Diyatomlardan *Skeletonema costatum* hem müsilaj sırasında hem de Mart 2022'de en baskın tür olarak bulunmuştur. Tüfekçi vd. (2010) 2007-2008 yılları arasında Marmara Denizi'nde oluşan müsilaj sırasında da bu türü baskın olarak bulmuştur. Ayrıca müsilaj sırasında Balkıs-Özdelice vd. (2021) tarafından yapılan üç kıyısal istasyondaki çalışma ile fitoplankton çeşitliliği benzerlik göstermektedir. Bu çalışmada bulunan türler ve baskınlıkları Marmara Denizi'nde uzun süredir mevcuttur (Balkıs ve Taş, 2016). Fitoplanktonun su kolonundaki dağılımında haloklin tabakası çok önemli rol oynamaktadır. Ölen fitoplanktonun çok düşük bir oranının haloklin altına inmesi, ışıklı tabakada gelişen fitoplanktonun ölümünü takiben haloklinin hemen üzerinde (yaklaşık 15-30 m derinlikler arası) biriktiğini ve orada rejenere olduğunu göstermektedir.

Marmara Denizi'nin ekolojik ve biyojeokimyasal yapısında belirleyici olan haloklin tabakası, yarattığı bariyerden kaynaklı olarak çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının su kolonundaki dağılımını etkilemektedir. Işıklı tabakada birincil üretim ve atmosfer kaynaklı oksijen özellikle müsilaj döneminde oksijen doygunluk oranını %100'ün üzerine çıkarmış, fakat 20-25m den sonra haloklin tabakasının üst kısmı olarak niteleyebileceğimiz kısımda fotosentez için gerekli ışığın tükenmesi ile keskin bir oksijen azalması görülmüştür. Su kolonundaki bu oksijen azalması hem Haziran sürecinde hemde Eylül ayına kadar tespit edilmiştir. Özellikle Çınarcık Çukuru'nda yaptığımız 4 Haziran-28Haziran arasındaki 6 ölçümde (Şekil 34) 50 m de ki düşüş dikkat çekicidir. Ayrıca Çanakkale Boğazı girişi ve İstanbul Boğazı çıkışında yaptığımız ölçümler sonucu,

Akdeniz'den oksijence doygun giriş yapan sular, Marmara Denizi'ni terk ederken yaklaşık 150 µM O_2 kaybetmektedir.

Proje süresince yaptığımız oksijen tüketim deneyleri sonucu plankton solunum hızları (0.01 - 3.74 µmol O_2 L^{-1} h^{-1}) literatürdeki diğer çalışmalarla (del Giorgio ve Williams 2005) uyumluluk göstermektedir. Ağustos 2008 yılında Zeri vd. (2014) Marmara Denizi'nde yaptıkları bakteriyel solunum çalışmasında, oksijen tüketimini 0.05 – 0.1 µmol O_2 L^{-1} aralığında bulmuşlardır. Jensen vd. (1990) ötrofik Roskilde Fiyord'unda plankton solunumunu 0.3 to 5.2 µmol O_2 L^{-1} aralığında bulmuş, Mantıkcı (2015) ise Roskilde Fyord ve Great Belt (Danimarka) sularında yaptığı 12 aylık çalışma sonucu 0.06-0.78 µmol O_2 L^{-1} aralığında değişen plankton solunum değeri bulmuştur. Bölgeler ve yıllar arası biyokütle ve trofik durumları göz önünde bulundurarak, daha anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek için klorofil-a normalize değerlere bakıldığında bu çalışmanın yüzey suyu plankton solunum hızları ortalama değerleri 9-18 mol O_2 g^{-1} Chl a $Gün^{-1}$ aralığında olup, Danimarka yüzey sularındaki çalışmalardan (0.72 -10 mol O_2 g^{-1} Chl a $Gün^{-1}$) daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın diğer bir çok çalışmadan ayrı kılan özelliği ise hem müsilaj döneminde yapılmış olması hem de su kolonunu temsilen en az 3 derinlikten ölçüm yapılmasıdır. Özellikle müsilajın görünür olduğu Haziran 2021 döneminde yapılan çalışmalarda 0-20m arası plankton solunum değerlerinin görece yüksek olduğu, bölgesel ve zamansal farklılıkların da görüldüğü tespit edilmiştir. Örneğin 45-C istasyonunda Haziran boyunca 3 farklı zamanda yapılan çalışmada muhtemelen müsilaj yoğunluğuna da bağlı olarak solunum hızları 2 kat değişim göstermiştir (Şekil 51). Müsilaj dönemi ve sonrası yapılan ölçümlerde de önemli farklılıklar mevcuttur. Müsilaj dönemi ve sonrası 0-10 m ve 10-20m arası solonum değerlerinin ortalaması karşılaştırıldığında, müsilaj döneminde solonumun 2-2.5 kat fazla olduğu görülmektedir (Şekil 55). Bu fark klorofil-a normalize edilmiş değerlerde de görülmektedir (Şekil 55). Bu farkın, özellikle Mart 2022 klorofil değerlerinin müsilaj dönemi olan Haziran 2021'den yüksek olduğu da göz önüne alındığında, müsilaj kaynaklı olduğu söylenebilir. Su kolonunda artmış organik karbonu parçalayabilecek bakterilerin çoğalması ile müsilaj döneminde oksijen tüketimleri artmıştır. Bununla birlikte 0-20 m arasında müsilaj sonrası dönemde (Eylül 2021) düşüş gösteren plankton solunumu 20-30m de yaklaşık 2 katına çıkmıştır. Bu durum yaz sürecinde parçalanan ve ayrıştırılan müsilajın çökmesi sonucu artan oksijen tüketimi görüşünü destekleyebilmektedir. Ayrıca Haziran ve Eylül aylarında Karadeniz'de yaptığımız ek ölçümlerle, oksijn tüketimlerini karşılaştırma fırsatı elde ettik. Her ne kadar Marmara Denizi'nin yüzey sularını Karadeniz kökenli sular oluştursa da, tüketim değerleri açısından bakıldığında her iki dönemdeki 1.5 kat fazla tüketim değerleri, Marmara Denizi içerisinde ek bir organik yükün göstergesi olarak yorumlanabilir. 20-30

lerde ise her iki su kütlesinde belirgin bir fark görülmemekle birlikte müsilaj etkisi de bu derinlikte görülememiştir. Bu da bize Marmara Denizi'ndeki müsilajın haloklin altında, uyguladığımız deneysel yöntemler ile, ölçülebilir bir ek bir oksijen tüketimi yaratamadığını göstermektedir.

Bir diğer bir önemli bulgu da, ışığın kaybolduğu ve sadece oksijen tüketiminin yapıldığı 20-30 m derinliklerde Haziran sürecinde yerinde CTD cihazı ile yapılmış oksijen ölçümleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu oksijen tüketim hızları ~5 µmol O_2 L^{-1} $Gün^{-1}$olarak belirlenmiştir. Yerinde ölçümler sonucu hesaplanan bu değer laboratuvarda ölçtüğümüz 20-30m plankton solunum hızları ile ~5 µmol O_2 L^{-1} $Gün^{-1}$ benzer çıkarak, çalışmalarımızın doğruluğunu pekiştirmiştir.

Marmara Denizi alt tabakasında oksijen tüketimlerini tahmin edebilmek için ilk defa yapılan çalışma ile haloklin altı yaklaşık 40m civarı tüketim hızları ortalama 5 µmol O_2 L^{-1} $gün^{-1}$, karbon cinsinden ise 84 mg C m^{-3} $gün^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu oksijen tüketim hızı 20-30m arası her örnekleme döneminde ölçtüğümüz solunum hızları ile benzer çıkmıştır. Klorofil normalize değerlere bakıldığında haloklin altı tüketim hızlarının üstündeki kolondan daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 55). Bunun artan bakteriyel aktiviteden kaynaklandığı söylenebilir, çünkü bu derinliklerde fotosentez yapabilecek canlılar bulunmamaktadır. Hansen ve Bendtsen (2014) Kuzey Denizi-Baltık Denizi geçiş bölgesinde mevsimsel dip suyu solunum hızlarını ölçtükleri çalışmada 2.8 – 28 mg C m^{-3} $gün^{-1}$ arası değerler bulmuşlardır. Bu mevsimsel çalışmada dip suyu sıcaklıkları 4.74 ile 17.8 °C arasında ve tuzluluk değerleri ise 20.7 ile 33.6 arasında değişmiştir. Bizim örnekleme derinliklerimizde ~40m ölçülen sıcaklık değerleri ~15.4 °C ve tuzluluk değerleri ~38'den genel olarak daha düşüktür. Fakat organik maddenin bozunabilir fraksiyonunun kararsızlığını temsil ettiği varsayılan karbon çevirim eğim değeri (turnover rate) "α" Marmara Denizi'nde ortalama 0.038 $gün^{-1}$, Kuzey Denizi-Baltık Denizi'nde 0.035 $gün^{-1}$ ile benzerdir. Marmara Denizi'nde başlangıç tüketim hızlarının Kuzey Denizi-Baltık Denizi'ne göre yüksek olmasını etkileyebilecek etkenler; sıcaklık, tuzluluk, bakteri aktivitesi ve sayısı ve organik madde miktarı olarak sayılabilir. Marmara Denizi'nde sadece ilkbahar 2022'de yapılan bu çalışma her ne kadar tüm mevsimleri ve derinlikleri temsil etmese de, organik karbonun fraksyonunun (labile-refractory) her iki denizde de benzer olması yapılan çalışmaları doğrulamanın yanında, özellikle modelleme çalışmaları için daha fazla veriye sahip olunan Baltık Denizi'nin bir rol model olarak alınabilmesini sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışmaların frekansı ve coğrafik dağılımı arttırılırsa Marmara Denizi için daha güvenilir sonuçlar elde edilebilecektir.

Haziran 2021'de yaptığımız C^{14} birincil üretim deneyi sonuçlarına göre klorofil-a normalize edilmiş doygun fotosentez hızları 0.95 ile 8.76 g C g^{-1} Chl h^{-1}arasında değişirken, Mart 2022'de 1.62 ile

18.31 g C g^{-1} Chl h^{-1} arasında değişmiştir. Yılmaz (2002) 1998 Nisan ayında Marmara Denizi doğu derin baseninde yaptığı çalışmada en yüksek üretim ~ 6. 3 g C g^{-1} Chl h^{-1} değerini bulmuştur. Her ne kadar tek bir ölçüm karşılaştırma için yeterli olmasa da bizim ölçümlerimizin bu aralıklarda olması Marmara Denizi'nde biyokimyasal değişkenlerin yanında bu çevirimleri sağlayan süreçlerde de bir değişiklik olmadığını göstermektedir.

Yine bu proje ile ilk defa Marmara Denizi'nde ölçümü yapılan O_2 yöntemi ile yüzey net komünite üretim hızları -0.02 ile 2.68 µmol O_2 l^{-1} h^{-1} arasında değişmiş, ortalama bu değer 1.2 µmol O_2 l^{-1} h^{-1} hesaplanmıştır. Yüzeyde günlük net oksijen üretimini 12:12h ışık:karanlık prensibine göre teorik olarak hesaplarsak; bu dönem 12 saat karanlıkta ortalama tüketim (0.8 µmol O_2 l^{-1} x 12) = 9.6 µmol O_2 l^{-1} $12h^{-1}$, ışıktaki net üretim ise (1.2 µmol O_2 l^{-1} h^{-1} x 12) = 14.4 µmol O_2 l^{-1} $12h^{-1}$ (14.4-9.6=) 4.8 µmol O_2 l^{-1} $gün^{-1}$ değeri bulunacaktır. Bu değer 12 saat boyunca doygun fotosentezin gerçekleştiği varsayımına göre yapıldığından, olması gerekenden fazla tahmin edilmiştir. 12 saatlik dilimde bu fotosentezin 2/3 ünde bile doygun fotosentez olduğu varsayılsa yüzeyde net üretim 0 olacaktır. Kaldı ki yüzeyden derinlere inildikçe Marmara Denizi'nde 15-20m'lerde %1 e düşen PAR değerleri ile su kolonunda net tüketim yani heterotrofik bir durum mevcuttur. Yani 15-20m içerisinde birincil üretim ile üretilen oksijen veya karbon heterotrofik plankton (zooplankton, bakteri) tarafından tüketilmekte ve haloklin altına bu şartlar altında O_2 veya fotosentezle üretilen çabuk tüketilebilir karbon (labile çözünmüş organik karbon) transferi olmamaktadır. Bu hipotez Zeri vd. (2013) tarafından da çözünmüş organik karbon ve oksijen tüketimi (AOU) arasında zayıf ilişki ile desteklenerek, çözünmüş organik madde transferinin haloklin sebebiyle yapılamadığı ve derin su minerilizasyon süreçlerinin partikül organik madde ile gerçekleştiği belirtilmektedir. Tüm veri ile yapılan istatistiksel analizde günlük plankton solunumunun (yüzey, haloklin ve haloklin altı tüm ölçümler) bu çalışmada POC ve DOC ile istastiksel anlamlı (p<0.05) pozitif ilişki kurduğu görüldü, fakat R^2 değerleri 0.4'ün altında bulunduğu için POC veya DOC oksijen tüketimini %40'ın altında açıklayabilmektedir. Genetik Algoritma ile yapılan parametre tahmini sonucu günlük solunum hızları (R) en yakın çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve sıcaklık ile Şekil 58' de verildiği gibi modellenmiştir. Ekolojinin metabolik kuramının (Brown ve diğ. 2004) temelini oluşturan biyokimyasal reaksiyon hızları, metabolik hızları (Mantıkcı 2021) ve diğer tüm biyolojik aktivite hızları Arrhenius denkleminde verildiği gibi, sıcaklık ile üstel olarak artar. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu ise Marmara Denizi'nde yüzeyden haloklin altına doğru azalmaktadır ve bu durum büyük olasılıkla aerobik bakterilerin dağılımlarını aynı ölçüde etkileyerek plankton solunum hızlarını da etkilemektedir.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile amaçlanan “müsilajın su kolonunda çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını nasıl etkilediği ve etkileyen etmenlerin neler olduğu?” sorularına bilimsel cevaplar aranmıştır. Projenin ana hedefine ulaşmak için, Marmara Denizi’nde müsilaj sırasında ve sonrasında farklı toplam 3 mevsimde su kolonu plankton solunum hızları OPTODE cihazı ile hassas ve yüksek doğrulukta tespit edilmiştir. Bununla birlikte farklı teknikler (O_2-C^{14}) kullanılarak planktonun birincil üretim kapasiteleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Özetle projenin en önemli çıktıları aşağıda sıralanmıştır.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Müsilaj sonrasında (Eylül 2021-Mart 2022) su kolonunda plankton solunumu görece homojen ve düşük ölçülmüştür.
5. Haloklin altında önemli miktarda tüketim hızı tespit edilmiş ve bunun yakıtının ışıklı tabakada üretilen birincil üretimden çok, organik partikül madde olduğu düşünülmketedir.
6. Mart 2022’de toplanan veri ile hesaplamalara istinaden, Marmara Denizi’nin net heterotrofik yani ürettiğinden çok tüketen bir yapıda olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.
7. Sıcaklık, organik madde, azot, fitoplankton yoğunluğu ve çözünmüş oksijen, plankton solunumunu etkileyen en önemli değişkenlerdir.

Marmara Denizi’nde yapılması gereken bilimsel çalışmalara öneri olarak; yüksek frekans ve çözünürlükte sıcak noktalarda ayrıntılı karbon-oksijen bütçe çalışmaları bu projede verilen yöntemler ve ek belirleyici yöntemler de kullanılarak (ör: sediment trap, otomatik oksijen ölçümü) yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Balkis-Ozdelice, N., Durmuş, T., & Balci, M. 2021. A Preliminary Study on the Intense Pelagic and Benthic Mucilage Phenomenon Observed in the Sea of Marmara Neslihan BALKIS-OZDELICE, Turgay DURMUS, Muharrem BALCI A Preliminary Study on the Intense Pelagic and Benthic Mucilage Phenomenon Observed in the Sea of Marmara. International Journal of Environment and Geoinformatics, 8(4), 414–422. https://doi.org/10.30897/ijegeo

Balkıs, N., Taş, S. 2016. Sayfa 326. The Sea of Marmara Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation and Governance. Editörler: Özsoy, E., Çağatay, M.N., Balkıs, N., Balkıs, N., Öztürk, B. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV), Publication No: 42, Istanbul.

Barlow, R.G., Mantoura, R.F.C., Gough, M.A., Fheman, T.W. 1993. "Pigment signatures of the phytoplankton composition in the north-eastern Atlantic during the 1990 spring bloom", Deep-Sea Research II, 40, 459–477.

Beşiktepe, S., Sur, H.İ., Özsoy, E., Latif, M.A., Oğuz, T. and Ünlüata Ü. 1994. Circulation and hydrography of the Marmara Sea. Prog. Oceanography 34: 285- 334.

Brown, J.H., Gillooly, J.F., Allen, A.P., Savage, V.M., West, G.B. 2004. Towarda metabolic theory of ecology. Ecology 85: 1771-1789.

Cauwet G. 1999. Determination of dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DON) by high temperature combustion. In: Grasshoff K, Kremling K, Erhard M (eds) Methods of Seawater Analyses. Wiley-VCH, pp 407–420.

Cho BC., Azam F.1988. Major role of bacteria in biogeo- chemical fluxes in the ocean's interior. Nature 332: 441−443

ÇŞB, TÜBİTAK-MAM. 2017. "Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı 2014-2016: Marmara Denizi Özet Raporu", Tübitak-MAM Matbaası, Kocaeli.

ÇŞİDB, TUBİTAK-MAM. 2021. "Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı 2014-2019 Marmara Denizi Özet Raporu", TÜBİTAK-MAM Matbaası, Kocaeli.

del Giorgio, P.A., Williams, P.J. le B. (Eds.) 2005. Respiration in Aquatic Ecosystems. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198527084.001.0001

Del Negro, P., Crevatin, E., Larato, C., Ferrari, C., Totti, C., Pompei, M., Giani, M., Berto, D., & Fonda Umani, S. 2005. Mucilage microcosms. Science of the Total Environment, 353(1–3), 258–269.

Ediger D., Beken Ç., Yüksek A., Tuğrul S. 2016. Sayfa 723. The Sea of Marmara Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation and Governance. Editörler: Özsoy, E., Çağatay, M.N., Balkıs, N., Balkıs, N., Öztürk, B. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV), Publication No: 42, Istanbul.

Giani, M., Savelli, F., Berto, D., Zangrando, V., Ćosović, B., & Vojvodić, V. 2005. Temporal dynamics of dissolved and particulate organic carbon in the northern Adriatic Sea in relation to the mucilage events. Science of the Total Environment, 353(1–3), 126–138.

Goldberg, David E. 1989.Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley

Grasshoff, K., Erhardt, M., Kremling, K. 1983. Methods of Seawater Analysis, 2nd rev. and extended ed. Weinheim, Deerfield Beach, Florida, Verlag Chemie, Basel, Switzerland.

Hansen, J. L. S., & Bendtsen, J. 2014. Seasonal bottom water respiration in the North Sea–Baltic Sea transition zone: rates, temperature sensitivity and sources of organic material. Marine Ecology Progress Series, 499, 19–34.

Klimant, I., Meyer, V., & Kuhl, M. 1995. Fiber-optic oxygen microsensors, a new tool in aquatic biology. Limnology and Oceanography, 40(6), 1159–1165.

Kovac, N., Bajt, O., Faganeli, J., Sket, B., & Orel, B. 2002. Study of macroaggregate composition using FT-IR and 1H-NMR spectroscopy. Marine Chemistry, 78(4), 205–215.

Kroiss., Helmut, Zessner., Matthias, & Lampert, Cristoph. 2003. Nutrient Management in the Danube Basin and Its Impact on the Black Sea. Journal of Coastal Research, 19(4), 898-906.

Ludwig, W., Dumont, E., Meybeck, M., & Heussner, S. 2009. River discharges of water and nut- rients to the Mediterranean and Black Sea: major drivers for ecosystem changes during past and future decades?. Progress in oceanography, 80(3-4), 199-217.

MacKenzie, L., Sims, I., Beuzenberg, V., & Gillespie, P. 2002. Mass accumulation of mucilage caused by dinoflagellate polysaccharide exudates in Tasman Bay, New Zealand. Harmful Algae, 1(1), 69–83.

Mantıkcı, M. 2021. Denizlerdeki Isınmanın Plankton Solunumu ve Birincil Üretime Etkisi. İklim Değişikliği ve Türkiye Denizleri Üzerine Etkileri. Salihoğlu, B., Öztürk, B. (Ed.) Türk Deniz Araştırmaları Vakfı (TÜDAV) Yayın no: 60, İstanbul, Türkiye.

Mantikci, M. 2015. Significance of plankton respiration for productivity in coastal ecosystems, PhD thesis, Aarhus University, Denmark.

Mantikci, M., Hansen, J. L. S., and Markager, S. 2017. Photosynthesis enhanced dark respiration in three marine phytoplankton species. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 497, 188–196. doi:10.

Mantikci, M., Staehr, P. A., Hansen, J. L. S., & Markager, S. 2020. Patterns of dark respiration in aquatic systems. Marine and Freshwater Research, 71(4), 432.

Mantoura, R.F.C., Llewellyn, C.A. 1983. “The rapid determination of algal chlorophyll and carotenoid pigments and their breakdown products in natural waters by reverse-phase high performance liquid chromatography”, Analytica Chimica Acta, 151, 297–314.

Markager, S., Vincent, W.F., Tang, E.P.Y. 1999. Carbon fixation by phytoplankton in high Arctic lakes: Implications of low temperature for photosynthesis. Limnol. Oceanogr. 44, 597–607.

MARMOD Faz I (Marmara Denizi Bütünleşik Model Sistemi: Faz 1). 2017. ÇŞB, ODTÜ DBE Proje Final Raporu

Oguz, T. 2017. Impacts of a buoyant strait out fl ow on the plankton production characteristics of an adjacent semi-enclosed basin : A case study of the Marmara Sea. Journal of Marine Systems, 173, 90–100.

Penna, N., Capellacci, S., Ricci, F., & Kovac, N. 2003. Characterization of carbohydrates in mucilage samples from the northern Adriatic Sea. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 376(4), 436–439.

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, S. C., Tugrultugrul, S., Oban, Y. C. ¸, Basturk, O., & Salihoglu, I. 1998. Elemental composition of seston and nutrient dynamics in the Sea of Marmara. In Hydrobiologia (Vol. 363).

Polat-Beken Ç., Tüfekçi V., Sözer B., Yıldız E., Mantıkcı M., Atabay H., Telli-Karakoç F., Hocaoğlu S., Ediger D., Tolun L., Olgun A. 2010. Deniz Ortamında Musilaj/mukus Oluşumunu Denetleyen Faktörlerin Laboratuar Koşullarında İncelenmesi. Proje No: 108Y083 TÜBİTAK, ULAKBİM web sitesinden erişilen adres:https://app.trdizin.gov.tr/proje/TVRJd016UTA/deniz-ortaminda-musilaj-mukus-olusumunu-denetleyen-faktorlerin-labaratuvar-kosullarinda-incelenmesi

Pugnetti, A., Armeni, M., Camatti, E., Crevatin, E., Dell'Anno, A., Del Negro, P., Milandri, A., Socal, G., Umani, S. F., & Danovaro, R. 2005. Imbalance between phytoplankton production and bacterial carbon demand in relation to mucilage formation in the Northern Adriatic Sea. Science of the Total Environment, 353(1–3), 162–177.

Smith, E., and Kemp, W. 2003. Planktonic and bacterial respiration along an estuarine gradient: responses to carbon and nutrient enrichment. Aquatic Microbial Ecology 30, 251–261.

Stachowitsch, M., Fanuko, N., & Richter, M. 1990. Mucus Aggregates in the Adriatic Sea: An Overview of Stages and Occurrences. Marine Ecology, 11(4), 327–350.

Steemann Nielsen, E. 1952. The use of radio-active carbon (C14) for measuring organic production in the sea. J. Cons. Int. Explor. Mer., 18(2), 117–140.

Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. A Practical Hand Book of Seawater Analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin 157, 2nd Edition, 310 p.

Tufekçi, V., Balkis, N., Polat Beken, Ç., Ediger, D., & Mantikci, M. 2010. Phytoplankton composition and environmental conditions of a mucilage event in the Sea of Marmara. Turkish Journal of Biology, 34(2), 199–210. https://doi.org/10.3906/biy-0812-1

Uysal, Z. 2000. "Pigments, size and distribution of Synechococcusspp. in the Black Sea". Journal of Marine Systems. 24/3-4. 313-326.

Uysal, Z. 2001. "Chroococcoid Cyanobacteria Synechococcusspp. in the Black Sea: pigments, size, distribution, growth and diurnal variability". Journal of Plankton Research. 23:2, 175-189.

Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A. and 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.

Webb, W.L., Newton, M., Starr, D. 1974. Carbon dioxide exchange of Alnus rubra. Oecologia 17, 281–291. http://dx.doi.org/10.1007/BF00345747.

Yılmaz, A. 2002. Türkiye Denizlerinin Biyojeokşmyası: Dağılımlar ve Dönüşümler. Turkish J. Eng. Env. Sci.26 , 219-235.

Yücel, M., Özkan, K., Fach, B., vd. 2021. Sayfa 249. Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Editörler: Öztürk, İ., Şeker, M. Turkish Academy of Sciences,Ankara.

Zeri, C., Beşiktepe, Ş., Giannakourou, A., Krasakopoulou, E., Tzortziou, M., Tsoliakos, D., Pavlidou, A., Mousdis, G., Pitta, E., Scoullos, M., & Papathanassiou, E. 2014. Chemical properties and fluorescence of DOM in relation to biodegradation in the interconnected Marmara-North Aegean Seas during August 2008. Journal of Marine Systems, 135, 124–136. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.11.019