

İzmit Körfezi'nde Deniz Müsilajı Sorunu: Derleme Çalışması

Marine Mucilage Problem in the Gulf of Izmit: A Review Study

Öğr. Gör. Dr. Çisil GÜLÜMSER GÖKTAŞ

Kocaeli Üniversitesi, Merkez Laboratuvarı, Kocaeli, Türkiye

cisil.goktas@kocaeli.edu.tr

ORCID: 0000-0003-0602-1120

Prof. Dr. Sevil VELİ

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

sevilv@kocaeli.edu.tr

ORCID: 0000-0002-5191-4350

Makale Türü:

DERLEME

Gönderilme Tarihi:

28 Aralık 2025

Kabul Tarihi:

19 Ocak 2026

Öz

Deniz müsilajı, deniz ekosistemlerinde fitoplanktonların aşırı çoğalması sonucu oluşan organik bir yapıdır ve son yıllarda Marmara Denizi başta olmak üzere Türkiye denizlerinde ciddi bir çevre sorunu haline gelmiştir. İzmit Körfezi, coğrafi konumu, yarı kapalı yapısı ve yoğun antropojenik baskılar nedeniyle müsilaj oluşumuna karşı son derece hassas bir ekosistemdir. Bu derleme makalede, İzmit Körfezi özelinde müsilaj oluşumunun bilimsel temelleri, tarihsel gelişimi, çevresel ve sosyo-ekonomik etkileri ile mücadele yöntemleri kapsamlı olarak ele alınmaktadır. 2021 yılında yaşanan büyük müsilaj krizi, bölgenin çevresel kırılganlığını ve acil müdahale gereksinimini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Deniz Kirliliği, Fitoplankton, İzmit Körfezi, Marmara Denizi, Müsilaj.

Abstract

Marine mucilage is an organic structure formed as a result of excessive proliferation of phytoplankton in marine ecosystems and has become a serious environmental problem in Turkish seas, particularly in the Sea of Marmara, in recent years. The Gulf of Izmit is an extremely vulnerable ecosystem to mucilage formation due to its geographical location, semi-enclosed structure, and intense anthropogenic pressures. This review article comprehensively addresses the scientific basis of mucilage formation specific to the Gulf of Izmit, its historical development, environmental and socio-economic impacts, and management approaches. The major mucilage crisis experienced in 2021 revealed the region's environmental fragility and the urgent need for intervention.

Keywords: Gulf of Izmit, Marine Pollution, Mucilage, Phytoplankton, Sea of Marmara.

1. Giriş

Müsilaj, halk arasında “deniz salyası” olarak bilinen, denizlerde fitoplankton olarak adlandırılan mikroskobik bitkisel organizmaların aşırı çoğalması sonucunda ürettikleri yapışkan, jel kıvamında organik bir maddedir (Savun-Hekimoğlu ve Gazioglu, 2021). Bu madde, sırasıyla, “oligomer oluşumu” ve “polimerizasyon ile supramoleküler yapı gelişimi” olmak üzere iki fazlı bir mekanizma ile oluşur; karbonhidratlar, proteinler, lipitler ve Ca, Mg gibi inorganik katyonları içeren kompleks bir karışım halindedir (Mecozzi, Pietroletti, Scarpiniti, Acquistucci ve Conti, 2012). Müsilaj, doğal şartlarda fitoplanktonun stres koşullarına karşı geliştirdiği bir savunma mekanizması olarak ortaya çıkar, ancak belirli çevresel faktörlerin bir araya gelmesiyle kontrol dışı boyutlara ulaşabilir.

Müsilajın oluşumunda rol oynayan fitoplankton türleri arasında diyatomlar ve dinoflagellatlar gibi türler yer almaktadır. Marmara Denizi'ni 2021'de etkisi altına alan yoğun müsilaj oluşumu sürecinde, yüzey tabakasındaki köpüklü müsilajda *Phaeocystis pouchetii* (Prymnesiophyceae) ile *Skeletonema costatum*, *Cylindrotheca closterium*, *Thalassiosira rotula* (Bacillariophyceae) ve *Gonyaulax fragilis* (Dinophyceae) tespit edilmiş; bentik habitatta ise filamentöz müsilaj üreten *Chrysoreinhardia giraudii* ve *Nematochryopsis marina* (Chrysophyceae) türleri belirlenmiştir (Balkis-Özdelice, Durmuş ve Balcı, 2021). Bu mikroorganizmalar uygun çevresel koşullar altında hızla çoğalır ve hücre dışı polisakkarit yapılar salgılayarak müsilaj agregasyonuna neden olurlar (Tufekçi, Balkis, Polat Beken, Ediger ve Mantıkçı, 2010). Salgılanan bu organik madde, deniz suyunda diğer partiküller, bakteriler ve organik atıklarla birleşerek makroskobik boyutlarda görülebilen müsilaj kümelerini meydana getirir. Dünya genelinde müsilaj olayları özellikle Akdeniz havzasında yaygın olarak gözlemlenmekte olup, ilk kayıtlı müsilaj olayı 1729 yılında Adriyatik Denizi'nde belgelenmiştir (Turk, Hagström, Kovač ve Faganeli, 2010).

İzmit Körfezi, Marmara Denizi'nin kuzeydoğusunda yer alan, yaklaşık 50 km uzunluğunda ve ortalama 10 km genişliğindeki yarı kapalı bir deniz ekosistemidir (Telli-Karakoç ve diğerleri, 2002). Karakteristik iki tabakalı sistemi ile bilinmekte olup (Hasanoglu ve Göktaş, 2022), haloklin derinliği tipik olarak 18-25 m arasında değişmektedir (Çokacar ve diğerleri, 2024). Körfez, Kocaeli ili ve çevresinde yaşayan yaklaşık 2 milyon nüfusa ev sahipliği yapmakta ve bölgenin en önemli sanayi merkezlerinden birini barındırmaktadır. Coğrafi konumu itibarıyla İzmit Körfezi, Marmara Denizi ile sınırlı su değişimine sahip olması nedeniyle kirletici maddelerin birikimi açısından yüksek risk taşımaktadır (Ergül, Aksan ve İpşiroğlu, 2018). 1960'lı yıllardan itibaren hızlı sanayileşme ve kentleşme süreçleri, körfezin su kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmıştır. Gebze, Dilovası ve Körfez ilçelerinde yoğunlaşan sanayi tesisleri, organize sanayi bölgeleri ve yerleşim alanlarından kaynaklanan atıklar, körfezin taşıma kapasitesini önemli ölçüde zorlamaktadır.

Bu derleme makalenin temel amacı, İzmit Körfezi'nde yaşanan müsilaj sorununu bilimsel bir perspektiften ele almak, oluşum mekanizmalarını açıklamak ve sürdürülebilir çözüm önerilerini ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında müsilajın biyolojik ve kimyasal temelleri, İzmit Körfezi özelindeki tarihsel gelişimi, çevresel ve sosyo-ekonomik etkileri ile mücadele stratejileri sistematik olarak değerlendirilmektedir.

.....

2. Müsilaj Oluşumunun Bilimsel Temelleri

2.1. Fitoplankton ve Müsilaj Oluşum Mekanizması

Müsilaj oluşumu, deniz ekosistemlerindeki birincil üreticiler olan fitoplanktonun metabolik aktivitelerinin bir sonucudur. Normal koşullarda fitoplankton popülasyonları, besin elementleri, ışık, sıcaklık ve otlayıcı baskısı gibi faktörler tarafından dengelenir. Ancak bu dengenin bozulması durumunda, özellikle besin elementlerinin (azot ve fosfor) aşırı artışı ve uygun fiziksel koşulların bir araya gelmesiyle fitoplankton patlamaları meydana gelir.

Müsilaj oluşumunun aşamaları incelendiğinde sırasıyla hücre dışı polisakkarit salgılama, nano ve mikrojel oluşumu, makroagregat formasyonu, polimerizasyon ve yapısal stabilizasyon, son olarak ise çökme ve bentik birikme olarak değerlendirilebilir. Fitoplanktonun hücre dışı polisakkarit üretimi, müsilajın temel yapı taşı oluşturur (Svetličić ve diğerleri, 2011). Salgılanan heteropolisakkarit fibrilleri, su ortamında birbirleriyle bağ kurmaya başlar. İlk olarak nanojeller, ardından mikrojeller oluşur. Bu süreç kendiliğinden gerçekleşir ve jelleşme polimer zincirleri arasındaki elektrostatik ve Van der Waals etkileşimleriyle sağlanır (Chin, Orellana ve Verdugo, 1998). Polisakkaritler başlangıçta hücrelerin çevresinde koruyucu bir tabaka oluştururken, yüksek fitoplankton yoğunluğunda bu salgılar birleşerek makroskobik agregasyonlar oluşturur. Müsilaj matriksinin yapışkan ve jel benzeri özelliği, içerisinde çok sayıda mikroorganizma, organik partikül ve besin elementini tutabilmesinden kaynaklanır. Mikrojeller zamanla birleşerek daha büyük yapıları oluşturur. Bu aşamada önce deniz karı benzeri yapılar meydana gelir, daha sonra detritus, askıda katı maddeler, mikroplastik partiküller gibi maddeler agregatlara yapışır. Yapı giderek büyüyerek metrelerce uzunluğa ulaşabilir (Ricci, Penna, Capellacci ve Penna, 2014). Müsilaj agregaları ileriki aşamalarda daha kararlı hale gelir. Oksijen seviyeleri düştükçe, agregalar toksik sülfür ve kükürt bileşikleri açısından zenginleşebilir. Örneğin, Gemlik Körfezi'nin 64 m derinliğindeki anoksik sularında hidrojen sülfür (H_2S , $0,1 \mu mol/L$) tespit edilmiştir (Karahan ve diğerleri, 2026). Bu bileşikler polimerizasyon ve vulkanizasyon süreçlerinde rol oynayarak filament oluşumunu etkileyebilir ve yapısal kararlılığı artırabilir, ancak bu mekanizmalar Marmara Denizi müsilajı için henüz detaylı olarak araştırılmamıştır. Zamanla yoğunluğu artan Müsilaj agregaları su kolonunda aşağı doğru hareket eder, deniz tabanına çökerek bentik ekosistemleri örter. Klorofil-a verilerine göre, müsilaj oluşumunun yüzeyden çok derin sularda (~10 m) gerçekleşmiş olabileceği belirtilmiştir (Ergül ve diğerleri, 2021).

İzmit Körfezi'nde yapılan çalışmalarda, müsilaj oluşumunda özellikle Skeletonema, Chaetoceros gibi diyatom türleri ile Prorocentrum ve Noctiluca gibi dinoflagellatların baskın olduğu tespit edilmiştir (Ergül ve diğerleri, 2018; Tufekçi ve diğerleri, 2010). Bu türlerin aşırı çoğalması, körfezin sığ ve durağan su kütlesi özellikleri ile birleştiğinde müsilaj agregasyonları için uygun ortam olmaktadır.

2.2. Çevresel Koşullar ve Tetikleyici Faktörler

2.2.1. Besin Kirliliği ve Ötrofikasyon: Müsilaj oluşumunun en kritik tetikleyicisi, deniz ortamındaki azot ve fosfor konsantrasyonlarının aşırı artışıdır. Bu durum ötrofikasyon olarak adlandırılır ve İzmit Körfezi için en önemli çevresel sorunlardan biridir. İzmit Körfezi özelinde yapılan kapsamlı izleme çalışmaları, 1970'li yıllardan bu yana devam eden ötrofikasyon sürecinin körfez ekosistemini ciddi şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır (Eyüboğlu ve Eyüboğlu, 2020). Marmara havzasındaki evsel atıksu arıtma tesisleri, sanayi tesisleri ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan besin elementleri yüklenmesi, su kütlesindeki azot ve fosfor seviyelerini kritik eşiklerin üzerine çıkarmaktadır.

2007-2008 yıllarında körfezde gözlenen yoğun müsilaj olayları, fitoplankton yoğunluğundaki artışla birlikte değerlendirildiğinde bölge için ciddi bir ötrofikasyon riski oluşturmaktadır (Eyüboğlu ve Eyüboğlu, 2020). Araştırmalar, İzmit Körfezi sularında azot ve fosfor konsantrasyonlarının Marmara Denizi ortalamasının önemli ölçüde üzerinde seyrettiğini göstermektedir. Özellikle körfezin iç kısımlarında ve dere ağızlarına yakın bölgelerde besin element yükü son derece yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum, fitoplankton büyümesi için sınırlayıcı olmaktan çıkan besin elementlerinin, kontrolsüz çoğalmaya zemin hazırlamasına neden olmaktadır. İzmit İç Körfez'de Su Çerçeve Direktifi sınıflandırmasına göre "Kötü Su Kalitesi", orta ve dış körfezde ise "Zayıf Su Kalitesi" olarak değerlendirilen ekolojik durum, evsel ve endüstriyel atıkların besin elementi girdisi üzerindeki baskısının sürdüğünü göstermektedir (Eyüboğlu ve Eyüboğlu, 2020).

Biyofilmler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, besin ve metal stresinin diatom topluluklarında yapısal değişimlere yol açtığını ve özellikle müsilaj tüpü oluşturan Berkeleya türleri ile zikzak koloniler oluşturan türlerin baskın hale geldiğini göstermiştir (Belando, Marín, Aboal, García-Fernández ve Marín-Guirao, 2017). Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak Marmara Denizi'nde gerçekleştirilen araştırmalar, müsilaj kaplı alanlar ile klorofil-a konsantrasyonu arasında güçlü bir korelasyon bulunduğunu ortaya koymuş; Gemlik Körfezi'nde klorofil-a konsantrasyonunda %272'ye varan artışlar tespit edilmiştir (Polat, Sanlı ve Akçay, 2022).

2.2.2. Sıcaklık Artışı ve Fiziksel Koşullar:

Sıcaklık, deniz müsilajı oluşumunda en belirleyici çevresel faktörlerden biridir. Akdeniz'de müsilaj olayları genellikle yaz aylarında, su sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde gözlemlenmektedir. *Ostreopsis cf. ovata* türü üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, 24°C'de en yüksek büyüme oranlarının (0,48 ± 0,05 bölünme/gün) elde edildiğini, 19°C'de ise büyümenin tüm tuzluluk değerlerinde inhibe olduğunu göstermiştir (Carnicer ve diğerleri, 2016). Özellikle dikkat çekici olan bulgu, 28°C'de toksin konsantrasyonlarının 24°C'ye kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek olmasıdır; bu durum, iklim değişikliğinin müsilaj olaylarının yoğunluğunu değil, ancak toksisitesini artırabileceğine işaret etmektedir (Carnicer ve diğerleri, 2016). Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar fitoplanktonun metabolik aktivitesini hızlandırırken, aynı zamanda sudaki oksijen çözünürlüğünü azaltır. İzmit Körfezi'nde özellikle yaz aylarında su sıcaklığının 25°C'nin üzerine çıkması, müsilaj oluşumu için uygun koşullar yaratmaktadır.

İklim değişikliği ve küresel ısınmaya bağlı olarak deniz suyu sıcaklıklarındaki sistematik artış, fitoplankton büyüme sezonunun uzamasına ve müsilaj olaylarının sıklığının artmasına neden olmaktadır. Özellikle, Akdeniz'de müsilaj olaylarının sıklığı ve yayılımı, iklim değişikliği ile doğrudan ilişkilidir. Danovaro ve ark. (2009), Akdeniz'de son 200 yıllık müsilaj kayıtlarını inceleyerek, müsilaj olaylarının sayısının özellikle son 20 yılda neredeyse üstel olarak arttığını ve bu artışın sıcaklık anomalileri ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Spearman korelasyonu $r_s=0.50$, $P<0.003$). Tarihsel analizler, 1920 öncesinde müsilaj olaylarının yalnızca Adriyatik Denizi'nde gözlemlendiğini, ancak 1980'den sonra Ege, Kuzey Adriyatik ve Marmara Denizi gibi farklı bölgelere yayıldığını göstermektedir. Son 60 yıllık sıcaklık anomalileri analizi, 1977'den bu yana pozitif sıcaklık anomalilerinin sürekli olarak devam ettiğini (0.097-0.524°C aralığında) ve bu dönemin müsilaj patlamalarıyla çakıştığını ortaya koymuştur. Özellikle 2006-2007 kışı, son 30 yılın en sıcak kışı olarak kaydedilmiş (önceki ortalama sıcaklıklara göre 2-3°C daha yüksek) ve bu süre zarfında müsilajın kapladığı bölge ve ne kadar kalıcı olduğu, daha önce hiç yaşanmamış boyutlara ulaşmış; Mart 2007'de müsilaj İtalya kıyı şeridinde 2.500 km'den fazla uzunlukta gözlenmiş ve masif agregalar neredeyse kesintisiz olarak beş aydan fazla sürmüştür (Danovaro, Fonda Umani ve Pusceddu, 2009). Adriyatik Denizi'nde müsilaj agregalarının geleneksel olarak Mayıs-Temmuz arasında ortaya çıkıp yaz boyunca (Ağustos'ta zirve yaparak) gelişmesine karşın, son yıllarda (2003, 2006, 2007, 2008) müsilajın çok daha erken (Kasım/Aralık ve Ocak aylarında) görülmeye başlaması, iklim kaynaklı sıcaklık anomalilerinin müsilaj oluşumu ile bağlantısını güçlendirmektedir (Danovaro ve diğerleri, 2009).

Tuzluluğun sıcaklıkla etkileşim halinde müsilaj üreten organizmaların büyümesini etkilediği gösterilmiştir. *Ostreopsis cf. ovata* için 32-38 aralığındaki tuzluluk değerlerinde büyüme gözlemlenmiş, ancak 28°C'de en yüksek büyüme oranları tuzluluk 36'da elde edilmiştir. Tuzluluk 32 ve 38'de büyüme inhibisyonu görülmüştür (Carnicer ve diğerleri, 2016). Bu sonuçlar, kıyıl sularındaki tuzluluk dalgalanmalarının (buharlaştırma, yağış, nehir akışı değişimleri) müsilaj oluşturan organizmaların dinamiklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir.

Kraus ve Supić (2015), yüzey ısı kaybı epizotlarının müsilaj olaylarının dinamiğinde kritik rol oynadığını belirlemiştir. 18 Temmuz 1997'deki yoğun ısı kaybı olayı (yaklaşık 240 W m⁻²), kuzeybatı rüzgârları eşliğinde gerçekleşmiş ve bentik tür *Cylindrotheca closterium*'un sedimentten su kolonuna yükselmesi, halihazırda oluşmuş makroagregatların parçalanması ve fırsatçı türlerin agregatlardan çevredeki suya salınması gibi önemli sonuçlar doğurmuştur. Temmuz sonu ile ağustos ortası arasındaki daha az yoğun ısı kaybı epizotları (30-160 W m⁻²) ise makroagregatların parçalanmasında ve düşük tuzlulukta suların batıdan doğuya taşınmasında etkili olmuş, böylece olayın geniş alanlara yayılmasını sağlamıştır (Kraus ve Supić, 2015). Kömüscü ve arkadaşları (2022), Marmara Denizi'nde 2021 yılında gözlenen yoğun müsilaj oluşumunun, artan deniz yüzeyi sıcaklıkları ve azalan rüzgâr hızlarının yarattığı durağan hidrodinamik koşullarla yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, pozitif deniz yüzey sıcaklığı anomalilerinin ve zayıf rüzgâr rejiminin müsilajın hem oluşumunu hem de kıyıl alanlarda yoğunlaşmasını kolaylaştırdığı vurgulanmaktadır (Kömüscü, Aksoy ve Dogan, 2022).

Kuzey Adriyatik'teki 1997 mukus olayını inceleyen Kraus ve Supić (2015), makroagregatların su kolonunun üst katmanlarında, büyük girdapların merkezi bölgelerinde oluştuğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, oluşum bölgelerinin karakteristik özelliklerini termoklin üzerindeki katmanlarda düşük tuzluluk ve yoğunluk değerleri ile çevresindeki alanlara kıyasla daha belirgin tabakalaşma şeklinde tanımlamıştır. Bu bulgular, müsilaj oluşumunun genellikle aşırı tabakalaşmış su kolonlarının üst katmanlarında başladığını desteklemektedir. İzmit Körfezinin hidrodinamik özellikleri de müsilaj birikiminde kritik rol oynar. Yarı kapalı yapısı ve iki tabakalı su kütlesi nedeniyle körfezde özellikle yaz-sonbahar dönemlerinde ara ve alt tabakalarda çözünmüş oksijen konsantrasyonları kritik seviyelere düşmekte, zaman zaman anoksik koşullar oluşmaktadır (Eyüboğlu ve Eyüboğlu, 2020). Zayıf akıntı rejimi ve durgun su koşulları, oluşan müsilaj agregasyonlarının dağılmasını ve seyrilmesini engellemektedir. Özellikle rüzgârsız ve sakin hava koşullarında, körfez yüzeyinde müsilaj tabakalarının yoğunlaşması gözlenmektedir. Körfezin sığ ve yarı kapalı yapısı, bu durumu daha da şiddetlendirmektedir.

3. İzmit Körfezi'nde Müsilaj Sorununun Tarihi ve Gelişimi

3.1. Geçmiş Müsilaj Olayları

İzmit Körfezi, coğrafi konumu ve antropojenik baskılar nedeniyle müsilaj oluşumlarının sıklıkla gözlemlendiği bölgelerden biri olmaktadır. Tüfekçi ve ark. (2010), Marmara Denizi'nde Ekim 2007-Şubat 2008 döneminde gözlenen müsilaj olayı sırasında yürüttükleri çalışmada, müsilaj üretici türler olan *Gonyaulax fragilis* (maksimum 83.600 hücre/L), *Skeletonema costatum*, *Cylindrotheca closterium* (161.250 hücre/L) ve *Thalassiosira rotula*'yı (131.040 hücre/L) baskın türler olarak tespit etmişlerdir. Çalışmada İzmit Körfezi yüzey sularında Redfield oranına (16) kıyasla oldukça düşük azot-fosfor oranları (N:P = 0.1-14.4) ölçülmüş ve müsilajın yüksek organik karbon içeriğinin (%24 org-C) bu yapının fitoplankton kaynaklı hücre salgılarla ilişkili olduğunu gösterdiği belirtilmiştir (Tüfekçi ve diğerleri, 2010).

2015 yılında İzmit Körfezi'nde (Marmara Denizi) ardışık zararlı dinoflagellat patlamaları gözlenmiştir. Altı farklı örneklem, kızıl jel olaylarını takiben Ergül ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. *Prorocentrum micans* en bol tür olup, 3 Mayıs 2015'te Karamürsel istasyonunda ortalama 18×10^6 birey/L bolluğa ulaşmış ve bu durum yüksek NH_3 ve o-PO_4^{3-} seviyeleriyle eş zamanlı olmuştur. Örnekte ayrıca *P. micans* tarafından üretilen müsilaj agregaları ile kaplı ölü amfipodlar (72 ± 12) birey/L bulunmuştur. En yüksek biyokütle 14 Mayıs'ta Hereke istasyonunda (268 ± 26.0) mg/L olarak kaydedilmiştir (Ergül ve diğerleri, 2018). Antropojenik atıksu deşarjlarının yanı sıra, bilinmeyen kaynaklar ve yeniden askıya çıkma besin maddesi seviyelerinde artışlara neden olmuştur. 6 Kasım 2015'te uzun süreli kuzeydoğu rüzgarlarından (5 gün boyunca 35 km/s) sonra rüzgâr kaynaklı sediment yeniden askıya çıkmasının ardından bir yukarı akım meydana gelmiştir (Ergül ve diğerleri, 2018).

Ergül ve ark. (2021), 2021 yılı müsilaj olayının erken aşamasını incelemek amacıyla Marmara Denizi'nde dört istasyondan Eylül 2020 ve Nisan 2021'de topladıkları örneklerde toplam 83 fitoplankton türü tespit etmişler, müsilaj ile ilişkili türler olarak bilinen *Cylindrotheca closterium*, *Skeletonema costatum* (Nisan 2021'de İzmit istasyonunda 10 m derinlikte 11.200 hücre/L ile en bol tür), *Gonyaulax fragilis*, *Prorocentrum micans*, *Gymnodinium sp.* ve *Gyrodinium sp.* gibi türleri tanımlamışlardır. Marmara Denizi'nde tür sayısının 59'dan 28'e düşmesiyle azalan biyoçeşitliliğe rağmen hücre sayısında artış gözlenmiş (İzmit'te ~12.000'den 42.000 hücre/L'ye, Biga'da ~2.000'den 50.000 hücre/L'ye), TRIX değerleri tüm Marmara istasyonlarında "Kötü" ekolojik kalite göstermiş ve düşük N:P oranları (0.07-0.30) azotun sınırlayıcı besin

madde olduğunu ortaya koymuştur. Müsilaj oluşumları Nisan 2021'de deniz suyu sıcaklığı 15°C 'nin altında ve tuzluluk ~30‰ iken "tül perde şeklinde" başlangıç aşamasında gözlenmiş, klorofil-a verilerine göre müsilaj oluşumunun yüzeyden çok derin sularda (~10 m) gerçekleşmiş olabileceği belirtilmiştir (Ergül ve diğerleri, 2021).

2021 yılı Nisan ayından itibaren Marmara Denizi'nin tamamında görünür hale gelen müsilaj tabakası, İzmit Körfezi'nde özellikle yoğun olarak gözlenmiştir. Gebze Eskişehir bölgesi, Körfez ilçesi ve Başiskele sahilleri müsilaj örtüsü altında kalmış, deniz yüzeyinde kalın tabakalar oluşmuştur. Uydu görüntüleri, körfezin geniş bir kısmının müsilaj tarafından kaplandığını açıkça ortaya koymuştur. Google Earth Engine platformunda Mayıs-Temmuz 2021 döneminde çekilen Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak İzmit Körfezi'ndeki müsilaj kaplı alanların haritalanması için beş farklı su indeksi uygulanmıştır. Sonuçlar, müsilaj oluşumunun 14 Mayıs'ta yaklaşık 6 km² deniz yüzeyini kaplayarak başladığını, 24 Mayıs'ta en yüksek seviyeye ulaştığını (32.12 km²) ve Temmuz sonunda azaldığını göstermiştir. Uygulanan indeksler arasında Ayarlanmış Yüzen Alg İndeksi (AFAI), kısmen bulutlu görüntülerde bile müsilaj haritaları üretmede en başarılı olmuş, bunu Normalize Edilmiş Bulanıklık İndeksi (NDTI) ve Müsilaj İndeksi (MI) izlemiştir. Yeşil kanal kullanan indekslerin uydu görüntülerinden müsilaj bilgisini çıkarmada yetersiz kaldığı belirlenmiştir (Kavzoglu ve Goral, 2022).

Karahan ve ark. (2026), 2021 yılında Marmara Denizi'nde meydana gelen kapsamlı müsilaj olayı sırasında ve sonrasında 24 istasyondan toplanan 39 örnekte 16S, 18S ve ITS bölgelerinin çevresel DNA (eDNA) metabarkodlaması ve in situ fizikokimyasal ölçümler yaparak mikrobiyal toplulukları karakterize etmişlerdir. Bulgular, müsilaj oluşumunun Dinophyceae, diyatamlar, Chytridiomycota ve Polariibacter ve Lentimonas gibi eksopolimer parçalayan bakterileri içeren belirgin bir mikrobiyal topluluk değişimi ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Karahan ve diğerleri, 2026).

3.2. Bölgesel Özelliklerin Müsilaj Oluşumuna Etkisi

İzmit Körfezi'nin yarı kapalı havza yapısı, su sirkülasyonunun sınırlı olmasına ve kirleticilerin körfez içinde birikmesine yol açmaktadır. Marmara Denizi ile olan su değişimi, körfezin batı çıkışındaki dar boğaz bölgesiyle sınırlıdır ve bu durum, körfezin kendini yenileme kapasitesini ciddi şekilde azaltmaktadır (Morkoç ve diğerleri, 2001). Stratifikasyon olarak adlandırılan bu su katmanlaşması, özellikle yaz aylarında belirginleşmekte ve dip sularda oksijen azalmasına neden olmaktadır (Tüfekçi ve diğerleri, 2010).

Körfezin en kritik özelliklerinden biri, çevresinde yoğun sanayi faaliyetlerinin bulunmasıdır. Pendik, Tuzla, Darıca, Gebze, Dilovası, Körfez, Derince, İzmit, Gölcük ve Karamürsel gibi sanayi kentleriyle çevrili olan körfez, Türkiye'nin en yoğun sanayi bölgelerinden birinin merkezinde yer almaktadır (Ergül ve diğerleri, 2018). Körfez çevresinde 35'ten fazla liman ve iskele ile yüzlerce sanayi tesisi bulunmakta ve yılda 12.000-15.000 arası gemi trafiğine ev sahipliği yapmaktadır. Petrokimya tesisleri, gemi inşa sanayi, metal işleme, otomotiv yan sanayi ve tekstil gibi çeşitli sektörlerin yoğunlaşması, körfeze önemli miktarda evsel ve endüstriyel atık yükü getirmektedir (Ergül ve diğerleri, 2021).

Bu yoğun sanayi faaliyetleri ve kentsel yerleşimler, körfeze ciddi miktarda azot ve fosfor yükü taşımaktadır. Geçmişte yapılan çalışmalar, körfeze giren kirletici yükünün önemli bir kısmının yetersiz arıtılmış veya hiç arıtılmamış evsel ve endüstriyel atıksulardan kaynaklandığını göstermiştir. 1999 Marmara Depremi sonrasında yaşanan petrokimya tesisleri yangını ve denize dökülen petrol ürünleri, körfezin ekolojik hassasiyetini gözler önüne sermiştir (Okay ve diğerleri, 2001).

Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, İzmit Körfezi'nin müsilaj oluşumuna son derece elverişli bir ortam sunduğu anlaşılmaktadır. Kapalı havza yapısı, sınırlı su sirkülasyonu, yoğun kirlilik yükü ve iklim değişikliğine bağlı artan su sıcaklıkları, körfezi Marmara Denizi'nin en hassas alanlarından biri haline getirmektedir (Eyüboğlu ve Eyüboğlu, 2020). Bu nedenle, İzmit Körfezi'nde müsilaj sorununun anlaşılması ve çözümlenmesi, yalnızca yerel değil, tüm Marmara Denizi'nin ekolojik sağlığı açısından kritik öneme sahiptir.

3.3. Güncel Durum

2021 yılındaki büyük krizden sonra yapılan yoğun temizlik çalışmalarına rağmen, İzmit Körfezi'nde müsilaj sorunu tamamen ortadan kalkmamıştır. 2024 ve 2025 yıllarında yapılan izleme çalışmaları, körfezin farklı bölgelerinde hala müsilaj oluşumlarının gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Gebze Eskişehir, Başiskele Seymen Sahili ve körfezin iç kesimlerinde düzenli olarak müsilaj tabakaları tespit edilmektedir.

Son dönemde yapılan bilimsel çalışmalar, müsilaj oluşturan organizmaların ve bu organizmaların ihtiyaç duyduğu besin elementlerinin körfez sularında hala yüksek konsantrasyonlarda bulunduğunu göstermektedir (Karahan ve diğerleri, 2026). Bu durum, uygun çevresel koşulların oluşması halinde müsilaj patlamalarının tekrar yaşanabileceğine işaret etmektedir. Bilim insanları, müsilaj tehlikesinin devam ettiğini ve kapsamlı önlemler alınmadığı takdirde sorunun kronik hale gelebileceğini vurgulamaktadır.

4. Çevresel ve Sosyo-Ekonomik Etkiler

4.1. Deniz Ekosistemi Üzerindeki Etkiler

Müsilaj, deniz ekosistemlerinde geniş çaplı tahribata yol açan ciddi bir çevresel sorundur. Bu jelatinöz kütle, su yüzeyini kaplayarak oksijen transferini engellemekte ve deniz canlıları için önemli tehditler oluşturmaktadır (Uflaz, Akyüz, Bolat, Bolat ve Arslan, 2021). Müsilaj agregasyonlarının parçalanması ve mikrobiyal aktivite sonucu oksijen tüketimi hızla artar, bu da hipoksik (düşük oksijen) ve anoksik (oksijensiz) koşulların oluşmasına yol açar. Deniz tabanında yaşayan bentik organizmalar, oksijen yetersizliği nedeniyle yaşamlarını sürdüremez hale gelir. Marmara Denizi'nde yapılan ölçümlerde çözünmüş oksijen seviyeleri 2,39-4,6 mg/L arasında kaydedilmiş olup bu değerler birçok omurgalı ve kabuklu canlı için ölümcül düzeydedir (Karadurmuş ve Sari, 2022). Özellikle 3 mg/L'nin altındaki oksijen seviyeleri hipoksik kabul edilmekte ve deniz organizmaları için ciddi tehlike oluşturmaktadır. Marmara Denizi'nde 2020 ve 2021 yılları arasında yapılan karşılaştırmalı analizler, müsilajın su kalitesi parametreleri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Çözünmüş oksijen ve pH değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiş, pH değerleri tüm örnekleme noktalarında düşüş göstermiş, bu durum deniz kirliliğinin boyutunu yansıtmıştır (Oral, 2023).

Müsilaj, su kolonunun optik özelliklerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Ağustos 2021'de Marmara Denizi'nde ışıklı tabaka derinliği 14-23 metre aralığında sınırlı kalmıştır. Fotosentetik aktif radyasyonun yaklaşık %50'si ilk 5 metrede, %80'i ise 4-9 metre derinlikte sönmülmüştür (Öztürk ve Ediger, 2023). Müsilaj örtüsü, güneş ışığının su kolonuna geçişini engelleyerek fotosentezi olumsuz etkiler. Bu durum, birincil üretimi destekleyen tabakayı daraltarak fitoplankton aktivitesini olumsuz etkilemektedir. Deniz ekosisteminin birincil üretkenliği azalır ve besin zincirinin temeli sarsılır. Dip bitkileri ve algler ışık yetersizliği nedeniyle ölürken, bu durum tüm besin ağını etkiler.

Müsilaj patlamalarının en önemli sonuçlarından biri, deniz organizmalarında oksidatif stres oluşumudur. Çevresel stresörler fizyolojik dengeyi bozduğunda, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi ile antioksidan savunma sistemi arasında dengesizlik oluşabilir ve bu durum lipidlerde, proteinlerde ve DNA'da hücre hasara yol açabilir. Marmara Denizi'nde Eylül 2021-Nisan 2022 döneminde dört deniz ürünü türünde (derin su pembe karidesi, dil balığı, hamsi ve istavrit) yapılan kapsamlı bir çalışmada türler arasında belirgin farklılıklar tespit edilmiştir (Dagsuyu ve diğerleri, 2025). Derin su pembe karidesi en yüksek indirgenmiş

glutatyon (GSH) düzeyi ve en düşük lipit peroksidasyonu (LPO) düzeyi göstermiş olup, bu durum güçlü bir oksidatif stres savunmasına işaret etmektedir. Buna karşın, hamisi ve istavrit gibi pelajik türler azalmış GSH ve yükselmiş LPO düzeyleri ile değişken antioksidan enzim aktiviteleri sergilemiş, bu da çevresel strese karşı daha yüksek hassasiyet gösterdiklerini ortaya koymuştur (Dagsuyu ve diğerleri, 2025).

Müsilaj sadece yüzey sularını değil, deniz tabanını da olumsuz etkilemektedir. Yoğun müsilaj kümeleri 5-30 metre derinliklerde gözlemlenmiş ve bentik organizmaları tehdit etmiştir (Karadurmuş ve Sari, 2022). Kabuklular, yumuşakçalar, makroalgler, deniz kestaneleri ve gorgonlar gibi bentik canlılar üzerinde olumsuz etkiler raporlanmıştır. Çanakkale Boğazı'nda mercan habitatlarının gelişim düzeyi, sağlık durumu ve yaşamı ciddi şekilde tehdit altına girmiştir (Özalp, 2021).

Balıklar ve diğer hareketli deniz canlıları, müsilajdan kaçınmaya çalışsa da geniş alanlarda yayılmış müsilaj tabakaları nedeniyle yaşam alanları daralmaktadır. 2021 yılındaki müsilaj patlaması sırasında Marmara Denizi'nde yaşanan toplu ölümler, olayın şiddetini açıkça ortaya koymuştur. Kapıdağ Yarımadası kıyılarında yapılan araştırmalarda, 18 farklı aileye ait 10.164 ölü birey tespit edilmiştir (Karadurmuş ve Sari, 2022). En çok etkilenen tür, 100 m² başına 3.040 ölü birey yoğunluğuyla *Atherina sp.* (gümüş balığı) olmuştur. Bunu *Engraulis encrasicolus* (hamsi), *Spicara sp.* (isparoz), *Trachurus trachurus* (istavrit) ve *Sardina pilchardus* (sardalya) izlemiştir. Ölen türlerin %93'ünü pelajik türler oluşturmuş, bu durum müsilajın özellikle açık su balıklarını nasıl etkilediğini göstermiştir (Karadurmuş ve Sari, 2022).

Müsilaj sonrası dönemde tür zenginliği %26 (61 türden 45 türe), toplam teleost biyokütlesi ise %22 (1338,2 kg/km²'den 1040,9 kg/km²'ye) oranında azalmıştır. Özellikle pelajik türlerde dramatik düşüşler kaydedilmiş, *Sprattus sprattus* biyokütlesi %99, *Engraulis encrasicolus* %98, *Sardina pilchardus* %87 oranında azalmıştır (Sarı ve Karadurmuş, 2024).

4.2. Balıkçılık ve Denizcilik Faaliyetlerine Etkileri

Müsilaj, balıkçılık faaliyetlerini doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir. Balıkçıların ağlarının tıkanması, av veriminin düşmesi ve ürün kalitesinin bozulması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Yentur, Büyükkateş, Özen ve Altın, 2013). 2007 yılındaki müsilaj olayının ticari balık avında önemli bir düşüşe yol açtığı ve özellikle pelajik türlerden (hamsi, uskumru, sardalya) elde edilen gelirin %90'ın üzerinde azaldığı raporlanmıştır (Keleş, Yılmaz ve Zengin, 2020). İzmit

Körfezi balıkçılığı, müsilaj sorunun en doğrudan etkilediği sektörlerden biridir. Müsilaj agregasyonları balık ağlarına yapışarak avlanma faaliyetlerini neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Balıkçıların ağlarını denize atamamakta, atabilseler bile ağlar müsilaj nedeniyle kullanılamaz hale gelmektedir. 2021 krizi sırasında balıkçıların, müsilaj nedeniyle aylarca denize açılmadıklarını ve ciddi ekonomik kayıplar yaşadıklarını ifade etmişlerdir (Karakulak, Kahraman, Uzer, Gül ve Doğu, 2023). Uzun vadeli resmi av verilerine göre, Marmara Denizi'nde 1967-2016 yılları arasında 22 ticari balık türü kaybolmuş, birim çabadaki av miktarı %90 oranında azalmıştır ve aşırı avcılık baskısı altındaki stoklar, müsilaj felaketinin olası etkileriyle daha da kötüleşme tehdidi altındadır (Sarı ve Karadurmuş, 2024).

Müsilaj, deniz taşımacılığı ve gemi operasyonlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Uflaz ve diğerleri, 2021). Bu etkiler özellikle deniz suyu filtreleri, soğutma sistemleri, balast suyu sistemleri, acil yangın pompaları ve tanker temizlik sistemleri gibi donanımlar üzerinedir. Örneğin, deniz suyu filtresi gözeneklerinde biriken müsilaj, kısa sürede filtreleri tıkayarak deniz suyu akışını azaltmaktadır. Yetersiz deniz suyu akışı, ana makine, jeneratörler, kompresörler ve soğutma damperleri üzerinde termal strese neden olarak makine hasarlarına yol açmaktadır (Uflaz ve diğerleri, 2021). Benzer şekilde, müsilaj parçacıkları soğutma kanallarında ani tıkanmalara neden olarak soğutma rejimini bozmaktadır. Bu durum, ana makine yağlama yağı sıcaklığında ani artışa, yağlama kabiliyetinin azalmasına ve önce türbin yataklarında, ardından kol yataklarında aşınmanın hızlanmasına yol açmaktadır (Uflaz ve diğerleri, 2021). Ayrıca, özellikle kimyasal taşımacılık sektöründe, tank temizlik işlemleri için büyük miktarda suya ihtiyaç duyulmaktadır. Müsilajlı deniz suyunun sterilite sorunu nedeniyle kullanılamaması, operasyonların askıya alınmasına veya yüksek maliyetli tatlı su kullanımına yol açmaktadır (Uflaz ve diğerleri, 2021).

Deniz turizmi ve rekreasyonel aktiviteler de müsilajdan olumsuz etkilenmektedir. Kıyıları kaplayan müsilaj tabakası, plajların kullanılabilirliğini azaltmakta ve estetik açıdan rahatsızlık vermektedir. Marina işletmeleri, yelken kulüpleri ve su sporları merkezleri müşteri kaybı yaşamaktadır. Müsilajın kötü kokusu ve yapışkan yapısı, sahil bölgelerinde yaşayanların ve ziyaretçilerin deneyimini olumsuz etkilemektedir. Sahillerdeki müsilaj birikintileri estetik açıdan rahatsız edici olmasının yanı sıra, denize girmeyi imkânsız hale getirmektedir. Düşük su sirkülasyonuna bağlı olarak oluşabilecek mikrobiyal kontaminasyon riski nedeniyle, müsilajla kaplı alanlarda yüzme önerilmemektedir (Yentur ve diğerleri, 2013).

4.3. Halk Sağlığı Riskleri

Müsilajın insan sağlığı üzerinde doğrudan etkisi olmasa da dolaylı riskler bulunmaktadır. Düşük su sirkülasyonuna bağlı olarak oluşabilecek mikrobiyal kontaminasyon, halk sağlığı açısından endişe kaynağı oluşturmaktadır (Yentur ve diğerleri, 2013). Müsilaj, belirli mikroorganizmaları barındırabilme özelliği sebebiyle hastalık yapıcı bakterilerin daha geniş alanlara ulaşmasına katkıda bulunabilir (Danovaro ve diğerleri, 2009). Özellikle *Vibrio* türü bakteriler müsilaj ortamında çoğalabilir ve bu bakterilerle temas, enfeksiyonlara yol açabilir. Müsilajlı suda yüzme veya müsilaja doğrudan temas, cilt tahrişleri, göz enfeksiyonları ve sindirim sistemi sorunlarına neden olabilir. Ayrıca, müsilaj ortamında yaşayan balık ve diğer deniz ürünlerinin tüketimi de potansiyel sağlık riski oluşturur. Bu organizmalarda birikim gösterebilen toksinler ve patojen mikroorganizmalar, besin zinciri yoluyla insanlara ulaşabilir. Bu nedenle, müsilaj olan bölgelerden avlanan deniz ürünlerinin tüketiminde dikkatli olunması ve sağlık otoritelerinin uyarılarına uyulması önemlidir.

5. Mücadele Yöntemleri ve Uygulanan Stratejiler

5.1. Türkiye'de Uygulanan Müdahale Programları

2021 müsilaj krizi sırasında yapılan su altı araştırmaları, sorunun yalnızca yüzeyle sınırlı olmadığını ortaya koymuştur. Dalgıçların gözlemleri, deniz tabanındaki mercanların, süngerlerin ve diğer bentik organizmaların müsilaj örtüsü altında kalarak zarar gördüğünü ve öldüğünü göstermiştir. Müsilajın 0-30 metre derinlikler arasında yaygın olarak bulunduğu ve tüm Marmara Denizi'ni etkilediği tespit edilmiştir. Bu durum, balıkçılık faaliyetlerini tamamen durma noktasına getirmiş, turizm sektörünü olumsuz etkilemiş ve kıyı yerleşimlerinde kötü koku ve hijyen sorunlarına yol açmıştır.

Krizin boyutunun fark edilmesiyle birlikte, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile Marmara Belediyeler Birliği'nin koordinasyonunda 4 Haziran 2021 tarihinde "Marmara Denizi'nde Müsilaj Problemi ve Çözüm Önerileri Çalıştayı" düzenlenmiş ve 6 Haziran 2021'de 22 maddeden oluşan "Marmara Denizi Eylem Planı" kamuoyuyla paylaşılmıştır. Bu plan kapsamında müsilajın fiziksel yöntemlerle temizlenmesi, atıksu arıtma tesislerinin ileri biyolojik arıtma sistemlerine dönüştürülmesi, deniz kirliliğinin önlenmesi ve bilimsel izleme çalışmalarının yoğunlaştırılması gibi acil önlemler belirlenmiştir. 13 Haziran 2021 tarihli 2021/10 sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile Koordinasyon Kurulu

oluşturulmuş ve çok aktörlü bir mücadele stratejisi benimsenmiştir. Eylem planı kapsamında gerçekleştirilen acil müdahale çalışmaları şunları içermektedir:

- Deniz süpürgeleri ve özel donanımlı gemilerle yüzey temizliği
- MF1000 cihazları ile su sütununda çözünmüş oksijen artırımı (İzmit Körfezi'nde 4 adet, Pendik açıklarında 1 adet)
- Toplanan müsilajın bertaraf edilmesi
- Atıksu arıtma tesislerinin ileri biyolojik arıtma kapasitesine dönüştürülmesi
- Deşarj standartlarının güncellenmesi ve sıkılaştırılması

22 Haziran 2021 tarihinde 2021/13 sayılı Genelge ile Marmara Denizi'ne deşarj yapan atıksu arıtma tesislerinin deşarj standartları güncellenmiş ve daha katı sınır değerler getirilmiştir. Bu düzenlemeler, özellikle azot ve fosfor giderim yükümlülüklerini artırmış, arıtma tesislerinin ileri teknolojilere geçişini zorunlu kılmıştır.

TÜBİTAK ve Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) öncülüğünde yedi farklı başlıkta araştırma grupları oluşturulmuş ve müsilajın oluşum mekanizmaları, oksijen azlığı, biyoçeşitliliğe etkileri ve bertaraf yöntemleri üzerine yoğun bilimsel çalışmalar başlatılmıştır.

5.2. İzmit Körfezi Özelindeki Uygulamalar

İzmit Körfezi'nde müsilaj mücadelesi kapsamında Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (KBB) öncülüğünde yoğun temizlik çalışmaları yürütülmüştür. Deniz süpürgeleri ile yüzeyden toplanan müsilaj miktarı yüzlerce metreküpe ulaşmıştır. Ancak temizlik çalışmalarının sadece geçici bir rahatlama sağladığı, temel nedenlere yönelik kalıcı çözümler üretilmediği takdirde müsilajın tekrar oluştuğu gözlenmiştir. Bu sebeple, yüzey temizliğinin ötesinde, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi deniz tabanındaki kirlilik kaynaklarını ortadan kaldırmaya yönelik kapsamlı bir dip çamuru temizleme projesi başlatmıştır. "Marmara Yeniden" adı verilen bu proje kapsamında, toplam 656 futbol sahası büyüklüğündeki alanda yaklaşık 8,5 milyon ton dip çamurunun denizden çıkarılması hedeflenmiştir. Projenin birinci etabında İzmit Körfezi'ndeki 92 hektarlık alandan 1 milyon metreküp çamur temizlenmiş olup, devam eden ikinci etapta 165 hektarlık alanda 1 milyon 100 bin metreküp çamurun bertaraf edilmesi planlanmıştır (KBB, 2025a). Toplamda 468 hektarlık alanı kapsayan ve 3,8 milyon metreküp dip çamurunun temizlenmesini öngören bu proje,

yıllardır deniz tabanında biriken azot ve fosfor yükünün azaltılması, oksijen seviyesinin artırılması ve biyolojik çeşitliliğin yeniden kazanılması açısından kritik önem taşımaktadır (KBB, 2025b).

Ayrıca, organize sanayi bölgelerindeki arıtma tesislerinin denetimi artırılmış, atıksu deşarj standartlarına uyum zorunlu hale getirilmiştir. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Karadeniz sahil şeridinden İzmit Körfezi'ne uzanan geniş bir alanda ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri kurarak doğal kaynakların korunmasına yönelik önemli adımlar atmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Kocaeli, Avrupa Birliği müktesebatının öngördüğü hedef tarihten çok önce atıksularının tamamını biyolojik olarak arıtır hale gelmiş ve yüzde yüz biyolojik atıksu arıtma oranına ulaşmıştır. Arıtma altyapısındaki dönüşüm rakamlarla da açıkça görülmektedir: 2019 yılında 17 biyolojik ve 6 ileri biyolojik tesis bulunurken, bu sayı 2021 yılında 13 biyolojik ve 9 ileri biyolojik tesise, 2023 yılında ise 2 biyolojik ve 21 ileri biyolojik tesise ulaşmıştır (KBB, 2025c).

Öte yandan, arıtılmış atıksuların geri kazanımı projesi hem su kaynaklarının korunması hem de döngüsel ekonomi anlayışının benimsenmesi açısından önemli bir model oluşturmaktadır. Yıllık 48 milyon metreküp kapasiteye ulaşan geri kazanım suyu tesisleri sayesinde, 2023 yılında sanayi kuruluşları tarafından 15,2 milyon metreküp geri kazanım suyu kullanılmış ve bu miktar kadar içme suyu tasarruf edilmiştir. Türkiye'nin en büyük sanayi kuruluşu olan TÜPRAŞ'ın, daha önce Sapanca Gölü'nden temin ettiği suyu, artık Körfez Atık Su Arıtma Tesis'i'nde inşa edilmiş olan geri kazanım tesisi ile geri kazanılmış suyla karşılaması hem yüzey sularının hem de yeraltı sularının korunmasına doğrudan katkı sağlamaktadır (İSU, 2025a).

Müsilaj riskinin etkin yönetimi için sürekli izleme ve erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi zorunludur. Bu bağlamda İSU tarafından Kocaeli'de kurulan kapsamlı

SCADA sistemleri kritik bir işlev üstlenmektedir. İçme suyu SCADA sistemi aracılığıyla 340 adet tesis, terfi merkezi, depo ve isale hattı anlık olarak izlenmekte; su kalitesi parametreleri, debi değerleri ve olası arızalar merkezi bir noktadan kontrol edilmektedir (İSU, 2025b). Atıksu SCADA sistemi ile ise 55 atıksu terfi merkezi, 14 yağmursuyu terfi merkezi, 16 atıksu arıtma tesisi, 26 adet kanalizasyon kolektör hattı, 4 adet yağmursuyu kolektör hattı ve 25 sanayi tesisi çıkışı dahil olmak üzere toplam 140 noktada atıksuyun miktarı ve kirlilik parametreleri anlık olarak ölçülmektedir. Özellikle organize sanayi bölgelerinde yer alan tesislerin etkin işletilmesi ve sürekli denetlenmesinin kritik öneme sahip olduğu düşünüldüğünde, 28 adet sanayi atık arıtma tesisinin çıkışlarına kurulan online izleme sistemi sayesinde kanala deşarj edilen atıksuların kimyasal kirlilik yükleri 7/24 takip edilmekte, yönetmelikle belirlenen limitler aşıldığında otomatik numune alma sistemi devreye girmekte ve gerekli yaptırımlar uygulanmaktadır. Meteoroloji radar görüntüleri ile entegre çalışan sistem, yağış tahminlerine göre terfi merkezlerinin önceden hazırlanmasını sağlamakta; dere ve kolektör seviyelerinin anlık izlenmesiyle aşırı yağış durumlarında taşma riskleri minimize edilmektedir (İSU, 2025c). Bu tür bir izleme altyapısı, yalnızca kriz yönetimi değil, önleyici çevre yönetimi açısından da temel bir araçtır.

2021 yılından itibaren körfez sularında sürekli izleme programları başlatılmıştır. TÜBİTAK-MAM laboratuvarlarında yapılan analizlerle su kalitesi parametreleri düzenli olarak takip edilmekte, fitoplankton kompozisyonu ve yoğunluğu izlenmektedir. Ayrıca, günümüzde İzmit Körfezi'nde müsilaj oluşumlarının erken tespiti ve izlenmesi için uzaktan algılama teknolojilerinin kullanımı yaygınlaşmakta olup, özellikle su ile ilişkili spektral indeksler ve yapay zeka tabanlı derin öğrenme modellerinin başarılı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur (Yılmaz, Tonbul ve Kavzoglu, 2024). Bu izleme verileri, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve müsilaj riskinin öngörülmesi açısından değerlidir.

6. Sonuç ve Öneriler

İzmit Körfezi'nde gözlenen müsilaj sorunu, tek bir nedene indirgenemeyecek kadar karmaşık ve çok boyutlu bir çevresel problemdir. Bu olgu; uzun yıllar boyunca biriken besin elementi yükleri, körfezin yarı kapalı hidrodinamik yapısı, iklim değişikliği kaynaklı deniz suyu sıcaklık artışları ve meteorolojik durağanlık gibi faktörlerin birlikte etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, İzmit Körfezi'nde müsilaj sorununa yönelik kalıcı çözümler, uzun vadeli, entegre ve disiplinler arası bir yönetim yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede en öncelikli hedef, körfeze ulaşan azot ve fosfor başta olmak üzere besin elementi girdilerinin radikal biçimde azaltılmasıdır. Bu amaçla, tüm kentsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinin ileri biyolojik arıtım (azot-fosfor giderimi) kapasitesine kavuşturulması temel bir gerekliliktir. Kocaeli ili, Marmara Denizi ve İzmit Körfezi'nin karşı karşıya kaldığı çevresel tehditlere karşı çok boyutlu ve bütüncül bir mücadele stratejisi geliştirmiştir. Bu strateji, yalnızca anlık sorunlara müdahale etmekle kalmayıp uzun vadeli sürdürülebilirliği hedefleyen yapısal dönüşümleri de kapsamaktadır. Atıksu arıtma altyapısında gerçekleştirilen iyileştirmeler bu dönüşümün temel ayaklarından birini oluşturmaktadır. 2019 yılında yalnızca 6 adet olan ileri biyolojik arıtma tesisi sayısı 2023 yılında 21'e yükseltilmiştir. Bu gelişme, denize deşarj edilen kirlilik yükünün önemli ölçüde azaltılması anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra, tarımsal alanlarda kontrolsüz gübre ve zirai ilaç kullanımının önlenmesi, evsel atıkların kaynağında azaltılması, katı atık yönetiminin iyileştirilmesi ve yağmur suyu drenaj sistemlerinin kanalizasyon şebekelerinden ayrıştırılması, besin elementi girdilerinin azaltılmasında tamamlayıcı önlemler olarak değerlendirilmelidir.

Müsilaj riskinin etkin yönetimi için sürekli izleme ve erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi zorunludur. Körfez genelinde İSU tarafından kurulan gerçek zamanlı su kalitesi izleme istasyonları (SCADA sistemleri) ile besin tuzları, çözünmüş oksijen, klorofil-a ve bulanıklık gibi parametrelerin düzenli takibi; fitoplankton kompozisyonu ve meteorolojik değişkenlerle entegre edildiğinde, müsilaj oluşumunun önceden öngörülmesine olanak sağlayacaktır. Bu tür bir izleme altyapısı, yalnızca kriz yönetimi değil, önleyici çevre yönetimi açısından da temel bir araçtır.

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek artması ve deniz suyu sıcaklıklarının yükselmeye devam etmesi, müsilaj sorununu gelecekte daha da karmaşık hale getirecektir. Bu nedenle, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin su kalitesi yönetim planlarına entegre edilmesi gerekmektedir. Deniz yüzeyi sıcaklıklarındaki artış ve durağan meteorolojik koşulların müsilaj oluşumunu kolaylaştırıcı rolü göz önünde bulundurulduğunda, iklim senaryolarına dayalı risk analizleri, karar alma süreçlerinin ayrılmaz bir parçası olmalıdır.

Körfez ekosisteminin dayanıklılığının artırılması da uzun vadeli çözümün temel bileşenlerinden biridir. Bentik habitatların iyileştirilmesi, deniz çayıruları gibi kritik ekosistemlerin korunması ve balık stoklarının sürdürülebilir şekilde yönetilmesi, İzmit Körfezi'nin müsilaj gibi baskılara karşı direncini artıracaktır. Ekolojik restorasyon çalışmaları, yalnızca biyolojik çeşitliliği korumakla kalmayıp, körfezin kendi kendini yenileme kapasitesini de güçlendirecektir.

Son olarak, müsilaj sorununun çözümü için politik irade ve tüm paydaşların etkin iş birliği hayati öneme sahiptir. Marmara Denizi Eylem Planı'nın kararlılıkla uygulanması ve düzenli olarak etkinliğinin değerlendirilmesi, İzmit Körfezi için özel koruma alanı statüsünün tartışılması, havza bazlı entegre su yönetimi yaklaşımının benimsenmesi ve kirleticili kaynaklara yönelik caydırıcı yaptırımların uygulanması gerekmektedir. Bilimsel araştırmaların desteklenmesi ve elde edilen verilerin karar alma süreçlerine entegre edilmesi, alınan önlemlerin başarısını artıracaktır. Bunun yanında, kamusal farkındalık programlarının güçlendirilmesi, çevre eğitiminin yaygınlaştırılması ve balıkçılar başta olmak üzere etkilenen kesimler için ekonomik destek ve alternatif geçim olanaklarının geliştirilmesi de sürecin sosyal boyutunu tamamlamaktadır. İzmit Körfezi'nin gelecek nesillere sağlıklı bir ekosistem olarak aktarılabilmesi için bilim temelli, kararlı ve sürdürülebilir adımların gecikmeden atılması; benzer çevresel krizlerin tekrarlanmadığı, ekolojik açıdan dengeli bir gelecek için temel bir gereklilik olarak görülmelidir.

Kaynakça

- Balkis-Özdelice, N., Durmuş, T. ve Balci, M. (2021). 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. doi:10.30897/ijegeo.954787
- Belando, M. D., Marín, A., Aboal, M., García-Fernández, A. J. ve Marín-Guirao, L. (2017). Combined in situ effects of metals and nutrients on marine biofilms: Shifts in the diatom assemblage structure and biological traits. *Science of The Total Environment*, 574, 381-389. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.197
- Carnicer, O., García-Altares, M., Andree, K. B., Tartaglione, L., Dell'Aversano, C., Ciminiello, P., ... Fernández-Tejedor, M. (2016). *Ostreopsis cf. ovata* from western Mediterranean Sea: Physiological responses under different temperature and salinity conditions. *Harmful Algae*, 57, 98-108. doi:10.1016/j.hal.2016.06.002
- Chin, W.-C., Orellana, M. V. ve Verdugo, P. (1998). Spontaneous assembly of marine dissolved organic matter into polymer gels. *Nature*, 391(6667), 568-572. doi:10.1038/35345
- Çokacar, T., Altıok, H., Mutlu, S., Yüksek, A., Ediger, D. ve Partal, F. B. (2024). Alterations of the Physical and Biochemical Structure in the Izmit Bay Following the Blockage Events at the Istanbul Strait. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(12). doi:10.4194/TRJFAS26712
- Dagsuyu, E., Can-Tuncelli, I., Yanardag, R., Erkan, N., Dogruyol, H., Ulusoy, S., ... Ucol, D. (2025). Environmental stress responses to marine mucilage: Oxidative damage in economically important seafood from the Sea of Marmara. *Environmental Pollution*, 374, 126266. doi:10.1016/j.envpol.2025.126266
- Danovaro, R., Fonda Umani, S. ve Pusceddu, A. (2009). Climate Change and the Potential Spreading of Marine Mucilage and Microbial Pathogens in the Mediterranean Sea. *PLoS ONE*, 4(9), e7006. doi:10.1371/journal.pone.0007006
- Ergül, H. A., Aksan, S. ve İpsiroğlu, M. (2018). Assessment of the consecutive harmful dinoflagellate blooms during 2015 in the Izmit Bay (the Marmara Sea). *Acta Oceanologica Sinica*, 37(8), 91-101. doi:10.1007/s13131-018-1191-7
- Ergul, H. A., Balkis-Ozdelice, N., Koral, M., Aksan, S., Durmus, T., Kaya, M., ... Canli, O. (2021). The early stage of mucilage formation in the Marmara Sea during spring 2021. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 27(2), 232-257.
- Eyüboğlu, H. ve Eyüboğlu, Ö. (2020). İzmit Körfezi'nde Çevresel Baskıların Etkileri. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(1), 25-37. doi:10.35229/jaes.649669
- Hasanoglu, S. ve Göktas, R. K. (2022). Fugacity-based analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in Izmit Bay, Turkey: An analytical framework for assessment with limited data. *Marine Pollution Bulletin*, 182. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113990
- İSU, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (Erişim: 26.12.2025a). Kullanılmış Su Geri Dönüşümü. <https://www.isu.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=329>
- İSU, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (Erişim: 26.12.2025b). İçmesuyu SCADA Sistemi. <https://www.isu.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=253>
- İSU, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (Erişim: 26.12.2025c). Atıksu SCADA Sistemi. <https://www.isu.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=37>
- Karadurmuş, U. ve Sari, M. (2022). Marine mucilage in the Sea of Marmara and its effects on the marine ecosystem: Mass deaths. *Turkish Journal of Zoology*, 46(1), 93-102. doi:10.3906/zoo-2108-14
- Karahan, A., Deliceirmak, S., Esti, M., Tezcan-Kalkan, E., Öztürk, E. ve Örek, H. (2026). Microbial and environmental interactions of the 2021 mucilage event in the Sea of Marmara. *Regional Studies in Marine Science*, 93, 104619. doi:10.1016/j.rsma.2025.104619
- Karakulak, F. S., Kahraman, A. E., Uzer, U., Gül, B. ve Doğu, S. (2023). Müsilajın Marmara Denizi Balıkçılığına Etkisi. *Marmara Denizi'nin Müsilaj Sorunu* içinde (ss. 197-220). Istanbul University Press. doi:10.26650/B/LS32.2023.002.09
- Kavzoglu, T. ve Goral, M. (2022). Google Earth Engine for Monitoring Marine Mucilage: Izmit Bay in Spring 2021. *Hydrology*, 9(8), 135. doi:10.3390/hydrology9080135
- Keleş, G., Yılmaz, S. ve Zengin, M. (2020). Possible economic effects of musilage on Sea of Marmara fisheries. *International Journal of Agriculture, Forestry and Life Sciences*, 4(2), 173-177.
- Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (Erişim: 26.12.2025a). İzmit Körfezi Dip Çamuru Temizliği. <https://www.kocaeli.bel.tr/hizmet/izmit-korfezi-dip-camuru-temizligi-90.html>
- Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (Erişim: 26.12.2025b). Bu çalışma ülkemiz adına gurur kaynağı (haber formatı). <https://www.kocaeli.bel.tr/haber/bu-calisma-ulkemiz-adina-gurur-kaynagi-49685.html>
- Kocaeli Büyükşehir Belediyesi (Erişim: 26.12.2025c). Atık Su Arıtma. <https://www.kocaeli.bel.tr/hizmet/atik-su-aritma-220.html>
- Kömüşçü, A. Ü., Aksoy, M. ve Dogan, O. H. (2022). An Analysis of Meteorological Conditions in Relation to Occurrence of the Mucilage Outbreaks in Sea of Marmara, March-June 2021. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(3), 126-145. doi:10.30897/ijegeo.1037842
- Kraus, R. ve Supić, N. (2015). Sea dynamics impacts on the macroaggregates: A case study of the 1997 mucilage event in the northern Adriatic. *Progress in Oceanography*, 138, 249-267. doi:10.1016/j.pocean.2015.06.005
- Mecozzi, M., Pietroletti, M., Scarpiniti, M., Acquistucci, R. ve Conti, M. E. (2012). Monitoring of marine mucilage formation in Italian seas investigated by infrared spectroscopy and independent component analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10), 6025-6036. doi:10.1007/s10661-011-2400-4
- Morkoç, E., Okay, O. S., Tolun, L., Tüfekçi, V., Tüfekçi, H. ve Legoviç, T. (2001). Towards a clean İzmit Bay. *Environment International*, 26(3), 157-161. doi:10.1016/S0160-4120(00)00103-3

- Okay, O., Tolun, L., Telli-Karakoç, F., Tüfekçi, V., Tüfekçi, H. ve Morkoç, E. (2001). İzmit Bay (Turkey) Ecosystem after Marmara Earthquake and Subsequent Refinery Fire: the Long-term Data. *Marine Pollution Bulletin*, 42(5), 361-369. doi:10.1016/S0025-326X(00)00163-6
- Oral, H. V. (2023). Environmental Statistical Analysis on the Impacts of Marine Mucilage on some Seawater Quality Parameters. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(1), 153-160. doi:10.30897/ijegeo.1187859
- Özalp, H. B. (2021). First massive mucilage event observed in deep waters of Çanakkale Strait (Dardanelles), Turkey. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 27(1), 49-66.
- Öztürk, İ. D. ve Ediger, D. (2023). Effects of mucilage on the optical properties of water column in the Sea of Marmara. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 29(1), 73-86.
- Polat, A. B., Sanlı, F. B. ve Akçay, O. (2022). The relationship between mucilage covered areas and chlorophyll-a concentration: The sea of Marmara case. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(3), 673-684.
- Ricci, F., Penna, N., Capellacci, S. ve Penna, A. (2014). Potential environmental factors influencing mucilage formation in the northern Adriatic Sea. *Chemistry and Ecology*, 30(4), 364-375. doi:10.1080/02757540.2013.877004
- Sarı, M. ve Karadurmuş, U. (2024). Post-mucilage status of the teleost fish assemblages in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Zoology*, 48(3), 154-164. doi:10.55730/1300-0179.3170
- Savun-Hekimoğlu, B. ve Gazioğlu, C. (2021). Mucilage Problem in the Semi-Enclosed Seas: Recent Outbreak in the Sea of Marmara. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(4), 402-413. doi:10.30897/ijegeo.955739
- Svetličić, V., Žutić, V., Radić, T. M., Pletikapić, G., Zimmermann, A. H. ve Urbani, R. (2011). Polymer Networks Produced by Marine Diatoms in the Northern Adriatic Sea. *Marine Drugs*, 9(4), 666-679. doi:10.3390/md9040666
- Telli-Karakoç, F., Tolun, L., Henkelmann, B., Klimm, C., Okay, O. ve Schramm, K.-W. (2002). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) distributions in the Bay of Marmara sea: İzmit Bay. *Environmental Pollution*, 119(3), 383-397. doi:10.1016/S0269-7491(01)00341-4
- Tufekçi, V., Balkis, N., Polat Beken, Ç., Ediger, D. ve Mantıkçi, M. (2010). Phytoplankton composition and environmental conditions of a mucilage event in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Biology*, 34(2), 199-210. doi:10.3906/biy-0812-1
- Turk, V., Hagström, Å., Kovač, N. ve Faganeli, J. (2010). Composition and function of mucilage macroaggregates in the northern Adriatic. *Aquatic Microbial Ecology*, 61(3), 279-289. doi:10.3354/ame01447
- Uflaz, E., Akyüz, E., Bolat, F., Bolat, P. ve Arslan, Ö. (2021). Investigation of the effects of mucilage on maritime operation. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 27(2), 140-153.
- Yentur, R. E., Büyükteş, Y., Özen, Ö. ve Altın, A. (2013). The Environmental and Socio-Economical Effects of a Biologic Problem: Mucilage. *Marine Science and Technology Bulletin*, 2(2), 13-15.
- Yılmaz, E. O., Tonbul, H. ve Kavzoglu, T. (2024). Marine mucilage mapping with explained deep learning model using water-related spectral indices: a case study of Dardanelles Strait, Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(1), 51-68. doi:10.1007/s00477-023-02560-8