



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.10.2023
Kabul Tarihi : 21.03.2024

Received Date : 03.10.2023
Accepted Date : 21.03.2024

MARMARA DENİZİ'NDE GÖRÜLEN MÜSİLAJIN ORTADAN KALDIRILMASINA YÖNELİK POLİTİKALARIN SİSTEM DİNAMIĞI İLE İNCELENMESİ

EXAMINING THE POLICIES FOR ELIMINATION OF MUCILAGE IN THE SEA OF MARMARA VIA SYSTEM DYNAMICS

Duygun Fatih DEMİREL^{1*} (ORCID: 0000-0001-8284-428X)
*Eylül Damla GÖNÜL-SEZER*² (ORCID: 0000-0002-9237-0468)

¹ İstanbul Kültür Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
² Yeditepe Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Duygun Fatih DEMİREL, d.demirel@iku.edu.tr

ÖZET

Jeopolitik, ekonomik ve ekolojik açıdan önemli bir yeri olan Marmara Denizi'nde yaşanan kirlilikteki artış son yıllarda farklı çevrelerin dikkatini çekmekle birlikte özellikle 2020-2021 yıllarında yaşanan müsilaj problemi sorunun ciddiyetini ortaya koymuştur. Literatürde iklim değişikliği, topografik yapı, artan nüfus, sanayileşme, tarım aktiviteleri, atıksu arıtma sistemlerinde kullanılan teknolojinin yetersizliği, vb. etmenlerin müsilaj oluşumunu tetiklediği öne sürülmektedir. Müsilaj sorununun çözümüne yönelik çeşitli stratejiler öne sunulmakla birlikte bu stratejilerin ne gibi sonuçlar doğuracağına ilişkin sayısal bir çalışma bulunmamaktadır. Bu amaçla bu makalede Marmara Denizi'nde görülen müsilaj olgusunu modellemek ve sorunu çözmeye yönelik politikaların etkilerini incelemek üzere sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli sunulmaktadır. Önerilen model müsilaja neden olan temel mekanizmalar ile müsilajın ekonomik etkilerini temsil etmekte olup müsilaj problemini ortadan kaldırmaya yönelik çeşitli stratejilerin etkinlik seviyelerini farklı senaryolarla ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre ileri biyolojik arıtma seviyelerinin artırılması, tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler ve bölge nüfus artışına karşı alınacak önlemlerin bir arada uygulanmasının Marmara Denizindeki müsilaj riskini sınırlandıracağı sonucuna varılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Müsilaj, sistem dinamiği, Marmara Denizi, deniz kirliliği

ABSTRACT

The increasing pollution in the Marmara Sea, which is critical in terms of geopolitical, economic, and ecological aspects, attracts the attention of different circles, whereas the mucilage phenomenon of 2020-2021 has revealed the seriousness of the issue. In literature, it is claimed that factors like climate change, topographic structure, increasing population, industrialization, agricultural activities, and insufficient wastewater treatment technologies trigger the mucilage formation. Various strategies are suggested to solve the problem; yet, there is no quantitative study on the consequences of the proposed strategies. Therefore, in this study, a simulation model based on the system dynamics approach is presented to model the mucilage phenomenon in the Marmara Sea and to examine the effects of policies aiming to solve the problem. The proposed model represents the mechanisms mucilage formation and its economic effects; and displays the effectiveness of various strategies to eliminate the problem. According to the findings, it is concluded that combination of the policies of increasing advanced biological treatment levels, measures to be taken for agricultural and farming activities, and the measures to be taken against population growth in the region will limit the risk of mucilage in the Marmara Sea.

ToCite: DEMİREL, D.F., & GÖNÜL-SEZER, E.D., (2024). MARMARA DENİZİ'NDE GÖRÜLEN MÜSİLAJIN ORTADAN KALDIRILMASINA YÖNELİK POLİTİKALARIN SİSTEM DİNAMIĞI İLE İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 364-385.

Keywords: Mucilage, system dynamics, the Marmara Sea, marine pollution

GİRİŞ

Akdeniz ve Karadeniz arasında bir geçiş yolu niteliğinde olan Marmara Denizi Türkiye ve Avrasya için ekolojik, ekonomik ve jeopolitik açıdan oldukça önemli bir yere sahip bir iç denizdir. 2021 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi'ne göre Marmara Denizi'ne kıyısı olan illerde (İstanbul, Kocaeli, Yalova, Bursa, Balıkesir, Çanakkale ve Tekirdağ) 24,2 milyonun üzerinde kişi ikamet etmekte, bu da tüm Türkiye nüfusunun yaklaşık %28,62'sine denk gelmektedir (TÜİK, 2022a). Marmara Denizi'ne komşu iller özellikle İstanbul, Kocaeli ve Bursa başta olmak üzere sanayi, ticaret, finans, hizmet, lojistik ve turizm sektörleri açısından Türkiye'de öncü konumdadır.

Sanayileşmenin ve kıyı boyunca kentleşmenin yoğun olduğu ve nüfusun her geçen gün hızla arttığı bölgede endüstriyel ve tarımsal aktiviteler sonucu ortaya çıkan atıksu ile evsel ve kentsel atıksuların deşarjına bağlı kirlenmeler Marmara Denizi ve havzasındaki diğer su kaynakları üzerinde ciddi boyutlarda olumsuz etkilere sahip olduğu bilinmektedir (Doğan, 2013). Marmara Denizi'ne deşarj edilen atıksuların önemli bir kısmı arıtmadan geçiriliyor olsa da tüm arıtma tesislerinde ileri seviye biyolojik atıksu arıtma yöntemlerinin uygulanmıyor oluşu ve tarım kaynaklı su kirlenmelerine yönelik hiçbir arıtmanın yapılmıyor oluşu Marmara Denizi kimyasal yapısının negatif yönde değişimine yol açmaktadır (Taşdemir, 2002). Marmara Denizi Havzası'nın kirlenmesine ve müsilaaj vakalarına sebep olan temel etkenler İstanbul Boğazı yoluyla Karadeniz'den gelen üst tabaka suyundaki mevcut kirlilik, sanayi kaynaklı atıksular, evsel ve kentsel atıksular ile özellikle Susurluk Nehri ile taşınan tarımsal aktiviteler sonucu ortaya çıkan azot ve fosfor yükü, doğal bitki örtüsü kaynaklı oluşan azot ve fosfor yükleri, balıkçılık faaliyetleri ve deniz taşımacılığı sırasında ortaya çıkan kirlilik olarak sıralanabilir (Öztürk vd., 2021).

Marmara Denizi'nde uzun yıllardır giderek artan kirliliğin deniz ekosistemini olumsuz etkilediği ve bölgede bulunan canlı sağlığını tehdit ettiği tüm çevrelerce bilinmekle birlikte özellikle 2020-2021 yıllarında neredeyse tüm deniz yüzeyini kaplayan ve derinliği yer yer 100 metreye kadar inen yoğun müsilaaj patlaması kamuoyunda büyük yankı uyandırmıştır. Uzmanların tehlikenin boyutuna dikkat çekmesiyle mevcut müsilaaj problemini ortadan kaldırmaya ve gelecekte müsilaajın Marmara Denizi için yeniden tehdit unsuru olmasını önleme amaçlı birçok politika önerilmiş, müsilaaja sebep olan temel mekanizmaların açıklanmasına çalışılmıştır. Bu politikalar arasında müsilaajın deniz yüzeyinden toplanması, ileri atıksu arıtma sistemlerine geçişin hızlandırılması, tarım aktivitelerinden kaynaklı besin maddelerinin denize deşarjının kontrol edilmesi gibi öneriler yer almaktadır (Apak, 2021; Aydın, 2021; Bedük vd., 2021; Yücel vd., 2021; Yümün ve Kam, 2021). Her ne kadar yüzeyde gözlemlenen müsilaaj tabakası 2022 yılı itibarı ile ortadan kalkmış olsa da bazı bilim insanları Marmara Denizi yüzey suyunun altındaki katmanlarda halen müsilaajın yoğun olarak mevcut olduğunu, bu durumun da kısa ya da yakın gelecekte tekrar yoğun ölçekli bir çevre problemine yol açma potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmektedirler. Bu sebeple müsilaaja neden olan mekanizmaların incelenerek müsilaaj oluşumunu engelleyici, mevcut problemi ortadan kaldıracı ve tekrar bir tehdit olarak ortaya çıkmasını önleyici politikaların geliştirilmesi elzemdir. Hali hazırda birçok kamu ve sivil toplum kuruluşu ile bilim çevreleri tarafından bu tarz politikalar ve çözüm önerileri sunulmuş olmakla birlikte önerilen yöntemlerin kısa ve uzun vadeli ekolojik, sosyal ve ekonomik etkilerinin sayısal bir teknikle değerlendirildiği bir çalışma literatürde mevcut değildir.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada bahsi geçen nedenlerle Marmara Denizi'nde meydana gelen müsilaaj problemini ortadan kaldırmaya ve bu problemin gelecekte Marmara Denizi için yeniden tehdit unsuru olmasını önlemeye yönelik stratejilerin kısa ve uzun vadeli etkilerini incelemeye yönelik sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli önerilmektedir. Bu bağlamda önerilen model ile müsilaaj oluşumuna neden olan temel yapıyı oluşturan değişkenler belirlenerek aralarındaki karmaşık ve çok yönlü nedensellikler, ilişkiler ve geri dönüşüm mekanizmaları matematiksel olarak tanımlanmakta ve müsilaajı ortadan kaldırma ya da önleme amaçlı çeşitli stratejilerin bu mekanizmaya kısa ve uzun vadeli etkilerinin neler olacağı incelenmektedir. Çalışma kapsamında bahsi geçen nedensellik ilişkileri önce bir nedensel döngü modeli ile arkasından bu modelden yola çıkılarak elde edilen stok-akış modeli ile temsil edilmektedir. Müsilaaj probleminin çözümüne yönelik politikaların müsilaaj oluşumu üzerindeki olası etkileri de çeşitli senaryolarla incelenmektedir. Sistem dinamiği yaklaşımının benzer çevre problemlerine sebep olan etmenler arasındaki karmaşık döngüsel ilişkilerin ve problemlerin çözümüne yönelik yöntemlerin etkinlik seviyelerinin incelenmesinde sıkça kullanıldığı bilinmekle birlikte müsilaaj probleminin analiz edilmesi ve engellenmesine yönelik politikaların olası

çıktılarının incelenmesine yönelik kullanımına literatürde rastlanılmamaktadır. Ancak sistem dinamiğine dayalı benzetim modelleri tam olarak bu tarz karmaşık ve dinamik problemlerdeki çok boyutlu, doğrusal olmayan ve çok yönlü nedensellik ilişkilerini temsil edebilecek araçlar niteliğindedir.

Bahsi geçen problem ve önerilen çözüm yöntemi de göz önüne alındığında bu çalışma literatüre aşağıda sıralanan katkıları sunmaktadır:

- Müsilaj problemine neden olan karmaşık ve dinamik mekanizmaların matematiksel olarak modellenmesi,
- Mevcut müsilaj problemini yok etmeye ve müsilajın ilerleyen zamanlarda tekrar tehdit edici bir unsur olmasını engellemeye yönelik politikaların etkinlik seviyelerinin analiz edilmesinde karar vericilere yardımcı olabilecek nitelikte bir benzetim modelinin geliştirilmesi,
- Sistem dinamiği yaklaşımının müsilaj probleminin modellenmesinde ilk defa kullanıldığı çalışma olması.

İlerleyen bölümlerde sırası ile Marmara Denizi'ndeki müsilaj sorunu ile müsilaj konusunda literatürdeki mevcut çalışmalar incelenmekte, sistem dinamiği yaklaşımına dayalı önerilen kavramsal model ve stok-akış modeli sunulmaktadır. Model sonuçları mevcut durum için incelenmekte; müsilaj problemini yok etme ve müsilajın gelecekte yeniden ortaya çıkmasını önleme amaçlı çeşitli stratejilerin olası sonuçları farklı senaryolarla analiz edilmektedir. Son olarak elde edilen bulgular irdelenmekte ve çalışma sonuç kısmı ile sonlandırılmaktadır.

MARMARA DENİZİ'NDEKİ MÜSİLAJ SORUNU

Türkiye ve bölge için ekolojik ve sosyoekonomik önemi açık olan Marmara Denizi, İstanbul ve Çanakkale Boğazları ve Ege Denizi'nin kuzey kısımları Kasım 2020'de görülmeye başlayan ve yoğunluğu ile kapladığı alan 2021 İlkbahar aylarında büyük ölçüde artan müsilaj sorunu ile karşı karşıya kalmıştır. Uzun zamandır Marmara Denizi'nin havza alanında görülen yoğun kentsel yapılaşma, aşırı nüfus artışı, hızlı sanayileşme, tarımsal ve evsel atıkların ciddi miktarda artması, Karadeniz'den İstanbul Boğazı yolu ile taşınan kirlilik gibi nedenlerle tehlikeli boyutlarda kirlendiği çeşitli bilimsel çalışmalarda gösterilmiştir (Balci ve Balkis, 2017; Polat ve Tuğrul, 1995). Marmara Denizi'nde zaman zaman çeşitli fitoplankton ve organizmaların sayısında saldırgan boyutta artışlar gözlemlense de (Calizza vd., 2015; Balkis vd., 2013; Isinibilir vd., 2011) Marmara Denizi'nde kayıtlara geçen ilk büyük boyutlu müsilaj olgusu 2007 tarihlidir (Aktan, Dede ve Çiftci, 2008). 2007 yılında başlayan ve 2008 yılında da devam eden müsilaj problemi Çanakkale ve İstanbul Boğazları ve Marmara Denizi kıyılarında oldukça etkili olduğu (Keleş, Yılmaz ve Zengin, 2020; Toklu-Ahçılı, Polat ve Balkis-Ozdelice, 2020; Isinibilir-Okyar, Ustun ve Orun, 2015) özellikle pelajik balıkçılık üzerindeki alarm boyutuna varan olumsuz etkisinin kamuoyu gündemini de sıkça meşgul ettiği görülmüştür (Demirel vd., 2023; Tüfekçi vd., 2010). Yoğun yapısı nedeniyle balıkçılık ve su ürünleri avcılığını engelleyen bu müsilaj olgusunun aynı zamanda Marmara Denizi'nde tür çeşitliliği açısından onarılması güç zararlar verdiği belirtilmiş, Marmara Denizi havzasında tanık olunan yoğun sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı görülmesine karşın aynı seviyede deniz ve su kaynaklarının kirlenmesini engelleyici önlemlerin alınmayışı nedeniyle Marmara Denizi'nin oluşan atık yüklerini kaldıramayacak hale geldiği ifade edilmiştir (Artüz, 2008). Ayrıca. 2007-2008 yılında Marmara Denizi'nde yaşanan müsilaj patlamasında ani sıcaklık değişimleri, rüzgâr hızı ve yağış miktarlarındaki dalgalanmaların da etkili olduğunu bildirilmektedir (Yentur vd., 2013).

Marmara Denizi, Çanakkale Boğazı, Kuzey Ege ve İstanbul Boğazı'nda Kasım 2020'den itibaren tekrar görülmeye başlayan müsilaj, 2021 İlkbahar aylarında giderek yoğunlaşmış, konunun tüm Türkiye kamuoyu gündemine yansısıyla müsilajın deniz içerisinde hangi derinliğe yayıldığı ve içeriğinin ne olduğuna dair bilimsel araştırmalarla birlikte müsilaj sorununa neden olan etmenleri ortadan kaldırmaya ve mevcut müsilaj olgusunu bertaraf etmeye dönük çalışmalar başlatılmıştır. Çeşitli bilim insanları 2022 itibariyle müsilajın deniz yüzeyinde olmasa da yüzey seviyesi altında halen mevcudiyetini koruduğunu dile getirmektedir.

Öztürk vd. (2021) tarafından hazırlanan Marmara Denizi'nde müsilaj sorunu ve çözümüne yönelik görüş ve önerilerin sıralandığı kapsamlı raporda müsilajın oluşumuna neden olan mekanizmal etkenlerin önemli kaynakları olarak evsel atıklar kaynaklı kirlilik, sanayi atıkların oluşturduğu kirlilik, tarımsal atıklardan kaynaklı kirlilik, deniz ulaşım araçlarının sebep olduğu atıklar ve diğer denizler ile su yollarından taşınan kirlilik yükleri gösterilmektedir. Yine aynı raporda müsilaj oluşumunun deniz canlılığının ve balıkçılığın olumsuz etkilenmesi, bölgedeki turizmin darbe alması, deniz araçlarının ve taşımacılığının zarar görmesi gibi ciddi olası sonuçlarından bahsedilmektedir. 2020 verilerine göre Marmara Denizi'ne deşarj edilen günlük yaklaşık 6,9 milyon m³ suyun %53,22'si sadece ön arıtmaya tabi tutulmakta, %42,12'si ileri arıtmadan geçirilmekte, %4,66'sı ise biyolojik arıtmadan geçirilmektedir (Öztürk vd.,

2021). Denize deşarj edilen atık suyun yanı sıra deniz suyu sıcaklığını etkileyen iklimsel faktörlerin de müsilaaj oluşumunda yeri olduğu bilinmektedir (Özalp, 2021).

Savun-Hekimoğlu ve Gazioğlu (2021) řu ana kadar Marmara Denizi'nde gözlemlenen en ciddi müsilaaj sorunuyla karşı karşıya olunduğunu ve müsilaajın artan su sıcaklıkları ile kirlilik, yeterli arıtma faaliyetlerinin yapılmaması, aşırı su ürünleri avcılığı gibi insan kaynaklı faktörlerle ortaya çıkarak deniz yaşamı, turizm ve ekonomiyi tehdit eder hale geldiğini bildirmektedir. Aynı çalışmada ayrıca müsilaaj probleminin dinamiğini bir nedensel döngü diyagramı ile modellemiş, modellerinde de fitoplanktonların artışına sebep olan etmenleri, oksijen konsantrasyonunu etkileyen indikatörler ve müsilaaja bağlı olarak balıkçılık ve turizm sektörleri incelenmiştir. Ancak bu model řu an için sadece açıklama amaçlı kavramsal bir model düzeyinde olup herhangi bir sayısal ilişki matematiksel denkleme dökülmemiştir. Benzer bir kavramsal model Gönül-Sezer ve Demirel (2022) tarafından da önerilmiş, ancak model sayısal analizlerin yapıldığı bir stok-akış modeline çevrilmemiştir.

Marmara Denizi'nde görülen son müsilaaj olayının çözümüne ve tekrar oluşumunun engellenmesine dair de çeşitli öneriler ortaya konulmuştur (Hanedar vd., 2023). Bazı belediyelerin deniz yüzeyinden çeşitli yöntemlerle görülen müsilaajı toplamasının etkin bir çözüm olmadığının, hatta deniz yüzeyinin ışık geçirgenliğinin artmasına paralel olarak fotosentez imkanının da artacağı için müsilaaj oluşumunun daha da tetiklenebileceğinin iddia edildiği çalışmalar da mevcuttur (Aydın, 2021). Mevcut sorunu kısa vadeli olarak ortadan kaldırmaya yönelik çeşitli yararlı bakterilerle müsilaajın bertaraf edilmesi, balıkçılık faaliyetlerinin durdurulması, reaktif oksijen dozajlama gibi önerilerin yanı sıra hiçbir önlem alınmadan geçmiş yıllarda olduğu gibi müsilaajın kendiliğinden kaybolmasının beklenmesi gibi önlemler sıralanmıştır. Ancak bu çözüm önerileri sadece mevcut problemi kısa süreli sonlandırmada etkili olabilir. Uzun vadede müsilaajın tekrar bir tehdit olmasını engellemek adına özellikle fosfor ve azot difüzyonunu kontrol altına alacak atıksu yönetim sistemlerinin etkin derecede kullanılması, mevcut atıksu tesislerinde gerekli iyileştirmelerin yapılması, ileri biyolojik arıtma teknikleri ile Marmara Denizi'ne verilen atıksu miktarının azaltılması, müsilaaj atığının farklı kullanımlarının araştırılması, aktif uydu sistemleri kullanılarak doğrudan gözlem yapılması, Marmara Denizi Havzası'nda yer alan sanayi ve evsel atıksuyun mutlaka ileri arıtmaya tabi tutulması gibi birçok çözüm önerisi sunulmuştur (Apak, 2021; Aydın, 2021; Bedük vd., 2021; Yücel vd., 2021; Yümün ve Kam, 2021).

LİTERATÜRDEKİ MEVCUT ÇALIşMALAR

Danovaro, Fonda ve Pusceddu (2009) müsilaajı deniz suyunun ısınması ve su katmanlarındaki tabakalaşma gibi etkenlerle küçük boyutlu topaklar; kilometrelerce alana yayılabilen ve deniz yüzeyini örten tabakalar, üst su katmanını işgal eden ipliksi ve ağsı oluşumlar ve zaman içerisinde çökerek ve deniz tabanını ve deniz canlıların üzerini örtebilen kalın tabakalar şeklinde tanımlamaktadır (Öztürk, 2021). Müsilaaj olgusu ile ilgili literatürde birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar genel olarak müsilaaja neden olan kimyasal mekanizmalar (Iciglenceki vd., 2021; Liénart vd., 2016; Danovaro, Fonda ve Pusceddu, 2009; Oral, 2023; Tepić, Gařparović ve Ahel, 2009; Jannelli, Fazio ve Ambrosi, 2003), müsilaajı oluşturan organizmaların çeşitleri (Fuksi vd., 2018; Mrokowska ve Krztoń-Maziopa, 2024; Sartoni vd., 2008; Giani vd., 2003) müsilaajın görüldüğu bölgelerdeki topografik özellikler, müsilaajın deniz akıntıları ile ilişkisi, iklim değişimine bağlı deniz tuz seviyesi ve deniz suyu sıcaklık değişimlerinin müsilaaja etkileri (Danovaro, Fonda ve Pusceddu, 2009; Deserti vd., 2005; Kömüşçü vd., 2022) gibi konular üzerine yoğunlaşmaktadır. Müsilaajın deniz ekosistemine etkileri (Daban vd., 2023; Karlson vd., 2021) ve bertaraf edilme yöntemleri de diğer çalışma konuları arasındadır. Müsilaaj patlamasına konu olan yerler ise genel olarak Adriyatik Denizi'nin kuzeyi ve Tiran Denizi'dir.

Marmara Denizi'ni konu alan müsilaaj çalışmaları ise temel olarak, müsilaaj problemine yol ačan faktörlere (Akmaz, 2022; Ayaz, 2022; Kayhan ve Yön Ertuđ, 2022; Kam ve Yümün, 2021, Önce ve Yılmaz, 2024) müsilaajın alg patlamaları ve fitoplankton seviyelerindeki değişimler ile ilişkisi (Erduđan, 2022; Eren, 2021; Polat vd., 2022; Tüfekçi vd., 2010), müsilaajın çeşitli coğrafi bilgi sistemleri ve uydu teknolojileri kullanılarak takibi (Colkesen vd., 2023; Eronat, 2022; Küçük vd., 2022; Kavzođlu vd., 2021, Sefercik vd., 2023) ve deniz suyunun kimyasal yapısının müsilaaj patlaması esnasındaki durumuna (Öztürk ve Ediger, 2023, Yücel vd., 2021) odaklanmaktadır. Müsilaaj probleminin çözümüne yönelik önerilerin sıralandığı çalışmalar ise önerilen yöntemlerin etkilerinin test edilmesi hususunu göz ardı etmekte olup genel olarak konu ile ilgili uzmanların görüşlerine dayanmaktadır. Tüm bunlara ek olarak müsilaajı konu edinen çalışmalarda müsilaaja neden olan etmenler, insan kaynaklı sebepler, iklimsel faktörler ve müsilaaj görülen bölgelerin deniz akıntı yapıları incelense de tüm faktörleri dinamik bir sistem çerçevesinde bir arada inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

ÖNERİLEN SİSTEM DİNAMİĞİ MODELİ

Sistem Dinamiği (SD) klasik kesikli olay benzetimi yaklaşımından farklı olarak zamanın sürekliliğinin esas alındığı ve olaylar arası nedensellik ilişkilerinin döngüsel olarak tanımlandığı bir benzetim yöntemidir. Matematiksel altyapısı ise diferansiyel denklemler üzerinden kurgulanmaktadır. Literatürde SD yaklaşımına çeşitli problemlerin çözümüne yönelik strateji ve politika geliştirmek amacıyla sıkça başvurulduğu görülmektedir. Olaylar veya değişkenler arası dinamik ilişkilerin karşılıklı ya da dolaylı etkileşimlerle ifade edildiği bu yöntem tipik bir veri analizi ile ortaya konulamayacak zamana bağlı karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmaya yaramaktadır. Böylece hem mevcut problemin oluşumunun açıklanması hem de problemlerin çözümüne yönelik planlanan strateji ve politikaların kısa ve uzun vadeli sonuçlarının incelenmesi mümkün kılınmaktadır.

Sistem Dinamiği, modelleme ve analizlerin karmaşık sistem davranışlarını ve etkileşimlerini de içerecek şekilde yapıldığı bir metottur (Sternan, 2000). Bu yaklaşımla model değişkenlerinin zaman içerisindeki davranışlarını incelemek mümkündür. Zamana bağlı bu değişim aslında matematiksel ifadeler sayesinde gözlemlenebilmektedir ve sistem dinamiğinde tüm matematiksel ifadeler temelde diferansiyel denklemler üzerine kurulur. Sistemin uzun yahut kısa vadede değişkenleri sayesinde yaşayacağı değişimler geri besleme döngüleri ve diğer dinamik etkileşimler sayesinde öngörülebilir olmaktadır (Maani ve Cavana, 2007). SD, çevre, sağlık, ekonomik ve sosyal problemlerin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bütüncül bakış açısı sayesinde tek yönlü ilişki tanımları yerine tüm değişkenlerin birbirleriyle ilişkileri tanımlanır ve böylece bir değişken için uygulanacak politikanın veya yaşanacak bir değişimin, diğer değişkenleri ve aralarındaki nasıl değiştireceğini gözleme fırsatı sunmaktadır. Senaryo analizleri ve olası politikaların harmanlanması sonucunda gelecekteki durum hakkında bilgi edinilmesi temel amaçtır. Literatürde atıksu yönetimi (Dianati vd., 2019; Hallas vd., 2020; Demirel vd., 2022), katı atık bertarafı (Dianati vd., 2021), geri dönüşüm uygulamalarının etkilerinin analiz edilmesi (Liu vd., 2020; Xiao vd., 2020), sürdürülebilir çevre planlaması (Zhang vd., 2022; Luo vd., 2023), çevre kirliliğine yönelik engelleyici politikaların sonuçlarının incelenmesi (Yi vd., 2023), çevreci enerji sistemlerine yönelik uygulamaların etkinliklerinin araştırılması (Liu vd., 2019) gibi birçok çevre modellemesi konularında SD yaklaşımına başvurulduğu görülmektedir.

SD yaklaşımı, ekonomik, teknik, sosyo-ekonomik, sosyolojik ve biyolojik tüm sistemler için uygulanması oldukça esnek bir modelleme sunması ve kısa/uzun vadede sistemin farklı bakış açıları ile izlenebilmesini sağladığı için bu çalışma kapsamında uygulanacak yöntem olarak seçilmiştir. SD modelinin oluşturulmasında Stella 9.2.1 yazılımı kullanılmıştır. Çözüm yöntemini içeren akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.



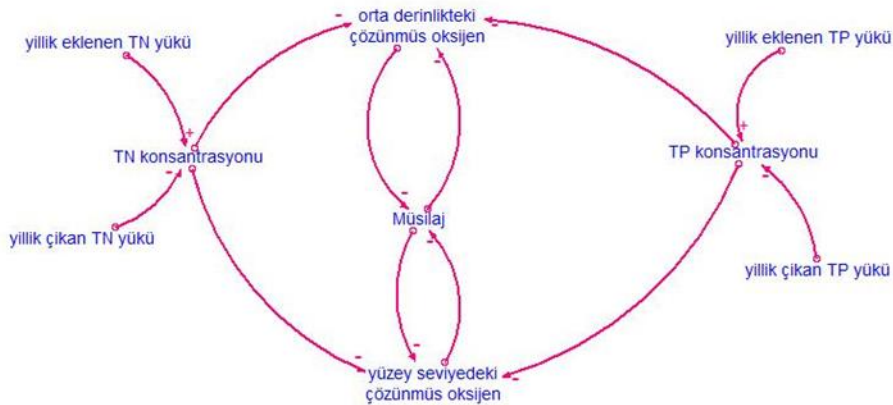
Şekil 1. Çalışma Kapsamında Önerilen Yöntemin Akışı

Kavramsal Modelin Kurulması

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi Marmara Bölgesi yoğun sanayileşmenin görüldüğü bir bölgedir. Bu durum da yeni iş olanaklarının ortaya çıkmasına yol açmakta, dolayısıyla da bölge nüfusunun giderek artmasına sebep olmaktadır. Nüfus artış nedeniyle yeni ihtiyaçlar doğmakta ve yine bu ihtiyaçların karşılanması amacıyla yeni kuruluşlar açılmakta ya da var olan kuruluşlar büyümektedir. Sanayileşme ve nüfus artışı da atıksu üretiminin artmasına yol açmaktadır. Bölgede yer alan atıksu arıtma tesisleri genel olarak ince ve kaba ayırıştırma işlemleri gerçekleştirilmekte, bu ayırıştırma işlemlerini takiben atıksular derin deniz deşarjı yöntemiyle Marmara Denizi'ne bırakılmaktadır (Burak, Bilge ve Ülker, 2022). Literatürde yer alan birçok araştırma, bahsi geçen "derin deşarj" atıksu bertaraf yöntemi ile Marmara Denizi ekosisteminin taşıyabileceği besin yükünden fazlasının deniz tabanına bırakıldığını ortaya koymuştur (Savun-Hekimoğlu ve Gazioğlu, 2021; Taş, Kuş ve Yılmaz, 2020; Çardak, Altuğ ve Türetken, 2015; Okuş vd., 2002). Bu çalışmalar neticesinde müsilaj oluşumuna neden olan en ciddi etkenin başında atık suların ileri seviyede arıtılmaması neticesinde yoğun besin içeriğine sahip olmaları gösterilebilir. Fazla miktarda besin taşıyan deniz suyundaki plankton seviyelerinde gözlenen ciddi artışlar da deniz bitki örtüsünü negatif doğrultuda etkilemektedir.

Deniz bitki örtüsüne ilişkin yaşanacak olumsuz durumlar iki ana sonucu doğurmaktadır: (i) deniz bitki örtüsündeki azalmaya bağlı olarak deniz canlılarının uygun yumurtlama alanlarını kaybetmesi ya da yumurtaların elverişsiz şartlar altında yeni bir canlıyı oluşturacak kadar olgunlaşmaması; (ii) bitki örtüsü miktarının azalmasına bağlı deniz suyundaki oksijen seviyesinin düşmesi ve bunun sonucu olarak deniz canlılarının yaşamının tehlikeye girmesi. Burada deniz canlılarının ölüm hızında oluşabilecek bir artış deniz suyunda tortulaşma hızını da ivmelendirecek; bu durumun neticesinde de deniz suyundaki oksijen seviyesi düşme eğilimi kazanacak ve müsilaj oluşumuna uygun koşullar meydana gelecektir.

Yukarıda verilen problem tanımına bağlı olarak bir kavramsal model oluşturulmuştur. Şekil 2'de görünen bu kavramsal modele göre, atık su miktarı üzerindeki toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP), yıllık eklenen TN yükü ve yıllık eklenen TP yükü olarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra yıllık çıkan TN yükü ve yıllık çıkan TP yükleri, Marmara Denizi'nin bir içdeniz olması dolayısıyla bağlantılı olduğu Akdeniz ve Karadeniz'e dağılan yükleri temsil etmektedir. Sene boyunca yaşanan TN ve TP yükü değişimleri sonucunda oluşan Marmara Denizi'ndeki TN ve TP konsantrasyonu bu değişkenlere bağlı olarak karakterize edilmiştir. Artan TN ve TP konsantrasyonu, yüzey ve orta derinlikteki çözünmüş oksijen seviyesini düşürmektedir. Oksijen seviyesinin azalması sonucunda müsilaj oluşumuna uygun bir ortam sağlamaktadır. Müsilaj oluşması durumunda ise denizin orta derinlik ve yüzeyindeki oksijen miktarı daha da düşecektir. Bir başka deyişle, müsilaj ve denizdeki çözünmüş oksijen seviyesi birbirini tetikleyerek belirlenen yöndeki değişimi körükleyen bir ilişki içine girecektir. Sistem dinamiği benzetim modelinde Marmara Denizi TN ve TP seviyeleri 'TN konsantrasyonu' ve 'TP konsantrasyonu' adı verilen stok değişkenleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 2. Müsilaj Sorunu Kavramsal Modeli

Stok-Akış Diyagramının Oluşturulması

SD benzetim modelinin kurulumu için temel yapı taşları ayrık olay benzetiminde kullanılanlardan farklıdır. Ayrık olay benzetimi süreçlerin sırası üzerine kurulu ve temelini kuyruk teorisinden alan bir yöntemdir. Daha çok operasyonel seviyede problemler için uygundur. SD ise sistemik düşüncenin bir uygulama alanıdır ve problem tanımı


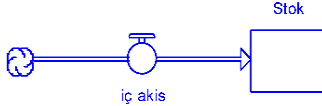




içerisinde yer alan unsurların arasındaki nedenselliğin üzerine kurulur. Dolayısıyla Tablo 1’de verilen temel yapı taşlarına eklenecek verilerin istatistiksel ön koşullara uyma zorunluluğu bulunmamaktadır.

Stok-Akış diyagramlarının oluşturulmasında öncelikle değişkenlerin hangi elemana karşılık geldiği belirlenmelidir. Ardından stok-akış diyagramının çizilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda gerekli tüm göstergeler eklenerek model oluşturulur. Matematiksel denklemler stok, akış ve dönüştürücüler yardımıyla tanımlanır. Temel bir stok-akış diyagramı ile elde edilen matematiksel ilişki Denklem (1) ile açıklanabilir (Forrester, 1961):

$$Stok(t) = stok(t - 1) + \int_{t-1}^t [İçAkış - DışAkış]dt \quad (1)$$

Burada $(t-1)$, başlangıç zamanıdır ve $t-(t-1)$, veri toplama için geçen zaman aralığıdır. Bu, bir stok değişkeninin mevcut değerinin, önceki veya başlangıç değeri ve bu zaman aralığında karşılık gelen stok değişkeninin akışlarındaki net değişim ile ilişkili olduğu anlamına gelir.

Tablo 1. SD Yönteminin Yapı Taşları ve Anlamları

SD Yönteminin Yapı Taşları	Anlamı
	Stoklar birikimi simgeler. Bu birikim para, insan, iş gücü, enerji vb. birimlerde olabilir. Sistemin mevcut durumunu korur ve gösterirler.
	Akışlar, giriş ve çıkışlar olarak yorumlanabilir. Girişler, stok değişkenine belirli bir süre içinde, dış akışla stok değişkeninden bazı "malzemeleri" azaltır (tahliye eden) ya da içe akışla stok değişkenine yeni "malzeme" ekler (biriktirir). Akışlar tek yönlü yani sadece dışa ve sadece içe akış olarak gösterilebilir. Bunun yanı sıra çift yönlü akış, tek akış değişken üzerinde gösterilebilmektedir. Uygun matematiksel ilişki kurulduğunda iki yönü de tek akış değişkeni üzerinden ifade etmek mümkündür.
	
	
	Dönüştürücüler küçük dairelerle temsil edilir. Bunlar, stok ve akışlar arasındaki matematiksel ilişkileri ifade etmekte yardımcıdır.
	Konnektörler düz oklarla belirtilir. Oktaki nokta, aktarılan bilgilerin kaynağını belirtir. "+", ilişki içindeki değişkenlerden birindeki değişimin diğerinde de aynı yönlü etki yarattığını, "-“ ise değişkenlerden birindeki değişimin diğerinde zıt yönde etki yarattığını anlatır.

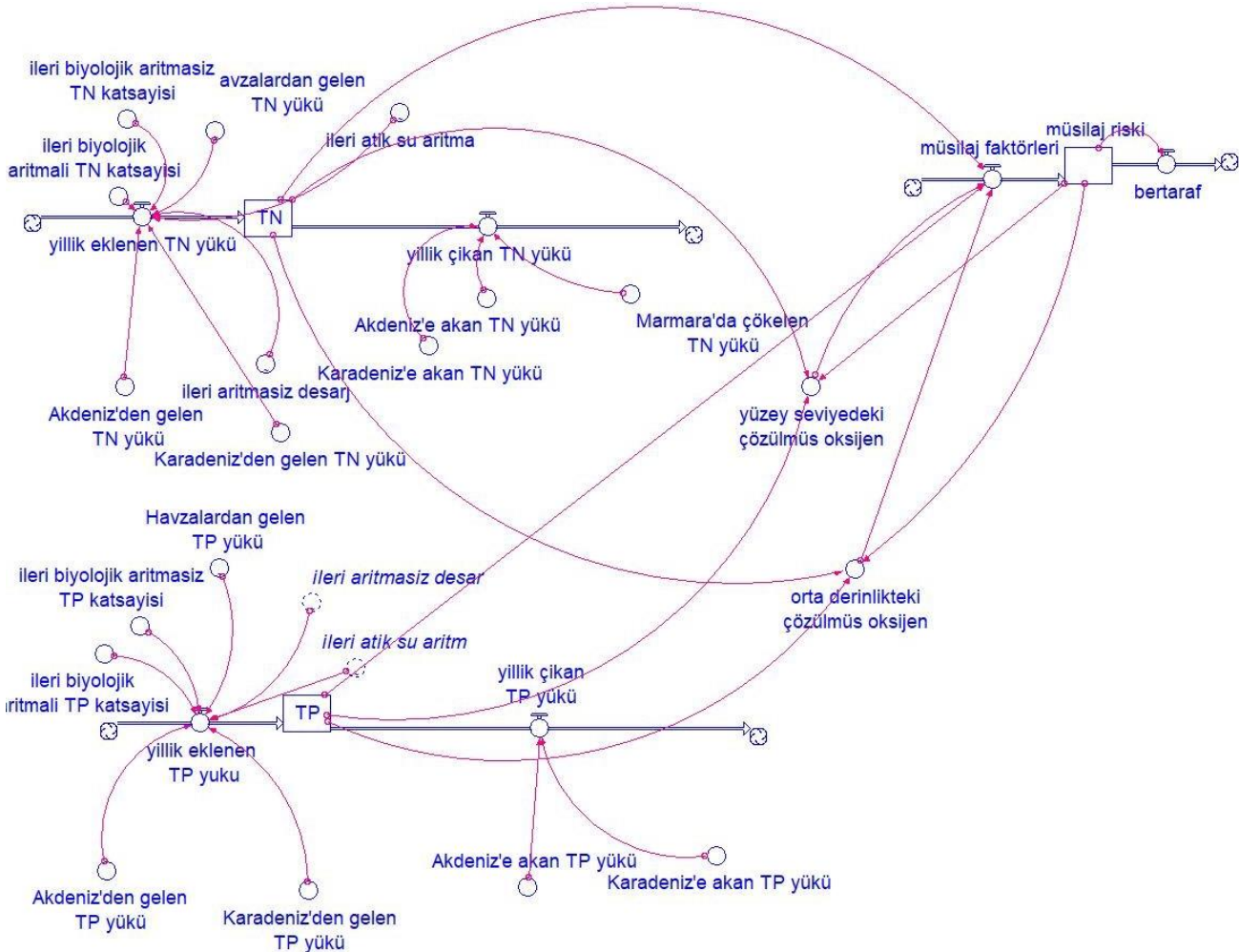
Literatüre göre organik kirleticiler, atıksular ile taşınmakta olan toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) şeklinde tanımlanmaktadır (Ak ve Top, 2022). Şekil 3’te görüldüğü üzere, sistem dinamiği benzetim modelinde Marmara Denizi TN ve TP yükü ‘TN konsantrasyonu’ ve ‘TP konsantrasyonu’ adı verilen stok değişkenleri ile temsil edilmektedir.

Marmara Denizi azot dinamiğinin gözlemlenebilmesi için oluşturulan ‘TN konsantrasyonu’ adlı değişken ‘yıllık eklenen TN yükü’ iç akış ve ‘yıllık çıkan TN yükü’ dış akış değişkenlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Yıl içerisinde eklenen TN yüküne etki eden faktörler sadece ‘ileri biyolojik atık su’ ve ‘ileri arıtmasız deşarj’ ile sınırlı değildir. Bu iki temel faktörün yanı sıra hayvancılık, bitkisel üretim ve arazi örtüsünden kaynaklanan azot oluşumu ‘havzalardan gelen TN yükü’ isimli değişken ile temsil edilmektedir. Bunların yanı sıra, Marmara Denizi’nin bir iç deniz olması dolayısıyla Akdeniz ve Karadeniz ile bağlantısı bulunmaktadır. Bu bağlantı nedeniyle Marmara Denizi’ne ‘Akdeniz’den taşınan TN yükü’, ‘Karadeniz’den taşınan TN yükü’ de hesaba katılmaktadır. ‘Yıllık çıkan TN yükü’ ise denizdeki akıntı nedeniyle ‘Karadeniz’e akan TN yükü’ ve ‘Akdeniz’e akan TN yükü’ yanı sıra azotun Marmara Deniz’inin dibine çökmesi sonucu oluşan ve ‘Marmara’ya çökelen TN yükü’ olarak ifade edilen bir değişken de ‘yıllık çıkan TN yükü’ ile ilişkilendirilmiştir.

TP dinamiği, temelde TN dinamik modeline benzer değişkenlerin fosfor için değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Yine hayvancılık, bitkisel üretim ve arazi örtüsü kaynaklı fosfor oluşumu ‘havzalardan gelen TP yükü’ değişkeni altında hesaplanmaktadır ve ‘Akdeniz’den gelen TP yükü’ ile ‘Karadeniz’den gelen TP yükü’ ve atıksu bertarafı

sonucu ortaya çıkan TP yükü düşünülerek 'yıllık eklenen TP yükü' iç akış değişkeni elde edilmiştir. 'Yıllık çıkan TP yükü' dış akışında ise sadece 'Akdeniz'e akan TP yükü' ve 'Karadeniz'e akan TP yükü' kullanılarak yıllık çıkan TP yükü hesaplanmıştır. Buradaki fark fosforun azot gibi dibe çökmeyişinden kaynaklanmaktadır.

TN ve TP konsantrasyonu hem yüzey seviyedeki hem de orta derinlikteki çözülmüş oksijen seviyesini etkilemektedir. Denizde biriken organik kirleticilerin yarattığı oksijenden yoksun ortam müsilajın oluşumuna neden olan faktörlerdir. Bu nedenle tüm ilgili değişkenler, müsilaj faktörleri adı verilen akış değişkenini etkilemekte ve kurulan modele göre üç seviyede müsilaj oluşumu incelenmektedir. Bu seviyeler sırasıyla 0, 1 ve 2'dir. Müsilaj riski 0 değerini aldığıında bu göz ardı edilebilecek kadar düşük bir olasılıkla müsilaj oluşabileceğini temsil ederken, müsilaj riskinin 1 değerini alması kontrollerin artırılmasına, müsilaj riskinin 2 değerini alması müsilaj sorunu ile karşı karşıya kalınma olasılığının çok yüksek olduğuna işaret etmektedir. Herhangi bir önlem alınmadığı koşulun canlandırıldığı Şekil 2'de yer alan bertaraf akış değişkeni ise bir önceki dönemde müsilaj riskinin değerini çıkararak müsilaj riski değerini geçmiş zamanın etkisini arındırarak inceleme şansı vermektedir. Modeldeki geri besleme sistemi de Marmara Denizi'ndeki TP ve TN konsantrasyonunun orta derinlik ve yüzeydeki çözülmüş oksijene etki ederken. Aynı şekilde yüzey ve orta derinlikteki oksijen seviyesi de denizdeki TN ve TP konsantrasyonuna ve dolayısıyla müsilaj oluşumuna etki göstermektedir. Model farklı senaryolar için denenmeden evvel temel tutarlılık ve geçerlilik testleri olan birim tutarlılığı, matematik model ile kavramsal modelin örtüşmesi ve ekstrem durumlar için test edilmiştir. Ardından mevcut durumun model üzerinde gösterilme ve irdelenme aşamasına geçilmiştir.

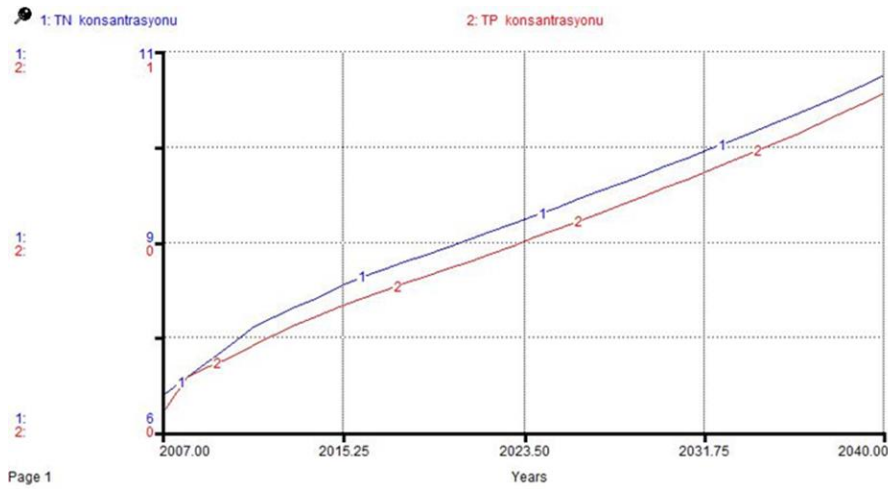


Şekil 3. Müsilaj Sorunu Stok-Akış Diyagramı

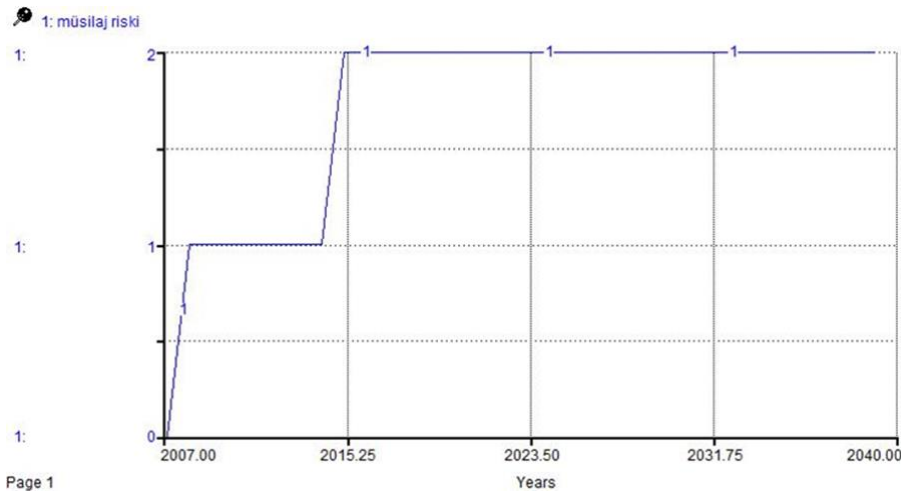
Sistem dinamiği yaklaşımına dayalı benzetim modelinde yer alan değişkenlere ilişkin matematiksel ilişkilerin ortaya konması ve değişkenlere ait verilerin elde edilmesinde TÜİK 2022 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (TÜİK, 2022a), TÜİK Bölgesel Hesaplar: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (TÜİK, 2022b), Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021), Marmara Denizi ile ilişkili Atıksu Altyapı Durumu ve Deniz Deşarjları Raporu (Marmara Belediyeler Birliği, 2021a), Marmara Denizi Eylem Planı Bilim ve Teknik Kurulu

İhtiyaçlar ve Çözüm Önerileri Raporu (Marmara Belediyeler Birliği, 2021b), ve TÜBA'nın müsilaj ile ilgili raporlarından (Öztürk vd., 2021; TÜBA, 2021) yararlanılmıştır. Modelde yer alan değişkenlere ilişkin verilerin temin edildikleri kaynaklar Ek A'da verilmiştir.

2007-2021 yılları arasındaki gerçek verilerden yola çıkılarak, TN ve TP konsantrasyonuna etki eden faktörlerin aynı trend ile artması sonucunda Marmara Denizi'nde görülecek TN ve TP konsantrasyonu 2040 yılına kadar benzetim modeli tarafından hesaplanmıştır. Şekil 4 bahsi geçen bu baz senaryoya göre bu değişkenlerin 2007-2040 yılları arasında davranışlarını grafiksel olarak göstermektedir. Buna göre 2007 yılında 6,5 mg/litre civarındaki TN konsantrasyonunun 2040'a kadar herhangi bir önlem alınmaması ve bölge büyüme hızına bağlı besin değeri yüksek atıksu miktarının artışı sonucunda 10,68 mg/litre civarına ulaşması beklenmektedir. Marmara Denizi'ndeki TP konsantrasyon değişimi ise 2007 yılı için 0,14 mg/litreden simülasyon zamanı sonu olan 2040 yılında 0,72 mg/litre seviyesine taşınması beklenmelidir. Bu TN ve TP konsantrasyonunun müsilaj riskine yaratacağı etki ise Şekil 5'te görülmektedir. Aslında karşı karşıya kalınmasa da benzetim modeline göre 2015 sonrası yıllar, müsilaj riskinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Herhangi bir önlem alınmadan aynı atık üretimi trendi takip edildiğinde ortaya çıkan sonuç, müsilaj riski ile aslında her sene karşı karşıya olunduğudur.



Şekil 4. Baz Senaryoya Göre Marmara Denizi TN TP Konsantrasyonu



Şekil 5. Müsilaj Riski için 2007-2040 Yılları Arası Baz Senaryo Sonucu

Yapısal Geçerlilik

Modelin iç tutarlılığının ve problem tanımında yer verilen değişkenlerin problemin temsili için yeterliliğinin irdelendiği süreç yapısal geçerlilik (Stermann, 2010). Bu benzetim modelinde yapısal geçerliliğin sınanması için modelde yer verilen değişkenlerin birim tutarlılıkları kullanılan benzetim modeli üzerinde otomatik olarak kontrol edilmiştir. Bu benzetim modelinin temsili STELLA 9.1.12'de yapılmıştır. Ayrıca birim tutarlılığının otomatik kontrolünde bir sorun çıkmaması için kullanılmış kukla değişken

bulunup bulunmadığı da kontrol edilmiştir. Ardından, problem tanımı esnasında ve literatür taraması boyunca incelenen makaleler tekrar gözden geçirilmiş ve modelde temsiline atlanması kritik olabilecek yeni bir değişkene rastlanmamıştır.

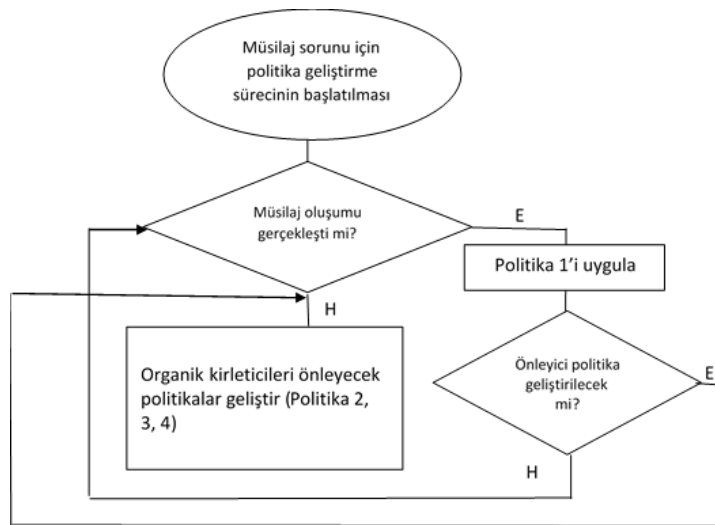
Davranışsal Geçerlilik

Çalışma kapsamında davranışsal geçerliliğin sınanması için model sonuçları ile gerçek sonuçlar karşılaştırılmış, davranış reproduksiyonu adı verilen yöntemle model geçerliliği analiz edilmiştir. Yani SD modeli içerisinde yer alan en temel iki değişken TN ve TP değerleri 2007-2021 yılları arası için baz senaryo model sonuçları gerçek sonuçları ile kıyaslanarak davranışsal geçerlilik test edilmiştir. Karşılaştırmanın istatistiksel analizi için Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata (OMYH) sonuçları Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. TN ve TP için Ortalama Mutlak Yüzdesel Hatalar

Yıl	Mutlak Yüzdesel Hata	
	TN (%)	TP(%)
2007	0,0002	0,005
2008	0,02	0,04
2009	0,00	0,32
2010	0,03	0,07
2011	0,07	0,73
2012	0,07	0,61
2013	0,09	0,57
2014	0,05	0,44
2015	0,08	0,70
2016	0,09	0,55
2017	0,09	0,66
2018	0,09	0,60
2019	0,07	0,53
2020	0,07	0,65
2021	0,14	0,56
Ortalama	0,06	0,50

Tablo 2’de elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hata değerlerine bakıldığında hataların yüzde 5’ten küçük olmasından dolayı değerlendirmeye alınan tüm değişkenler açısından davranışın reproduksiyonunun sağlandığı söylenebilir. Tablo 2’de verilen yüzdesel farkların anlamlı olup olmadıkları bağımlı örneklem t-testi ile de test edilmiştir. Gerçek TN verileri ile benzetim sonuçlarının kıyaslandığı testte p -değeri 0,493; gerçek TP verileri ile benzetim sonuçlarının kıyaslandığı testte ise p -değeri 0,416 olup test sonuçlarına göre model davranışın reproduksiyonunu istatistiksel olarak da sağlamaktadır. Bir sonraki aşamada müsilaj sorunu için model farklı politikalar yaratılarak incelenmiş ve birtakım çıkarımlar yapılmıştır.



Şekil 6. Önleyici Politikaların Uygulanmasına İlişkin Akış Şeması

POLİTİKALARIN İNCELENMESİ

Bu çalışma kapsamında müsilaj probleminin çözümü için incelenecek politikalar, müsilajın görüldüğü esnada alınan önlem ve müsilajın oluşmasını önlemek amaçlı olarak ikiye ayrılmıştır. Görüldüğü esnada alınacak önlem başlığı altında yüzeydeki müsilajın toplanması (Politika 1) incelenmiştir. Önlem amaçlı politikalar başlığı altında ise ileri biyolojik arıtma oranlarının artırılması (Politika 2), havzalardan gelen TN ve TP yükünü yaratan tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler (Politika 3) ve bölge nüfus artışına karşı yapılacak önlemlerdir (Politika 4). Bu politikaların uygulanması süreci Şekil 6'da verilen akışta gösterilmiştir. Önlem amaçlı politikaların hem ayrı ayrı hem de birlikte uygulandığındaki etkileri bu makale kapsamında incelenmiştir.

Politika 1: Yüzeydeki Müsilajın Toplanması

Müsilaj oluşumu gerçekleştiikten sonra ilgili birimlerce deniz yüzeyini kaplayan müsilajın toplanmasının orta derinlikteki oksijen seviyesine direkt etkisi bulunmamaktadır. Bu eylemin yüzey seviyedeki tortulaşmayı azaltmak açısından gerçekleştirildiği değerlendirilebilir. Bu politika modele yüzey seviyedeki oksijende bir artış ile empoze edilmiştir. Başka bir deyişle, model parametrik bir değişime maruz kalmıştır. Bu politikanın benzetim modeline empoze edilmesinin ardından ortaya çıkan sonuçlara bakıldığında, yüzeydeki müsilajın toplanmasının müsilaj oluşum riski üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Ancak oluşan müsilajın toplanması tortulaşmayı düşüreceği için Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonunu az seviyede düşüreceği tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de karşılaştırılmış olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,121; TP kıyaslamasında ise 0,135 olarak hesaplanmıştır. Yani, yüzeydeki müsilajın toplanmasının TN ve TP konsantrasyonunun azaltılmasında anlamlı derecede olumlu bir katkı sağlamadığı görülmektedir.

Politika 2: İleri Biyolojik Arıtmanın Arttırılması

İleri biyolojik arıtmanın arttırılması ve buna bağlı olarak ileri arıtmasız deşarjın azalmasının sağlandığı politikanın 2022 yılında geliştirilip ile uygulamaya konmuş olduğu ve arıtma tesislerinin yapım aşamasının da göz önünde bulundurulduğu kurgulanmış ve benzetim modeline empoze edilmiştir. Bu değişimin uygulanması modelde zaten halihazırda var olan ileri atık su arıtma değişkeninin zamana bağlı parametre değişimi ile meydana getirilmiştir. Burada toplam atık suyunun ileri arıtma tesis kapasitelerinin artması sayesinde 2025 yılı itibarıyla 2040 yılına kadar aşamalı olarak tüm atık sularının ileri biyolojik arıtma tesislerine yönlendirilmesi üzerine kurgulanmıştır. Yani yıllar içerisinde ileri biyolojik arıtma yüzdesi 42'den yüzde yüze yükselirken, ileri arıtmasız deşarj 2040 yılına dek devreye giren ileri arıtma katkısı kadar azaltılarak 2040'ta sifıra ulaşmıştır. Baz senaryodan elde edilen sonuçlar Politika 2 sonuçları ile karşılaştırıldığında TN konsantrasyonunun 2040 için 10,68 mg/litreden ancak 10,37 mg/litreye düştüğü, TP konsantrasyonunun ise 0,72 mg/litreden 0,67 mg/litre mertebesine gerilediği görülmüştür. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de test edilmiş olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,118, TP kıyaslamasında ise 0,129 olarak hesaplanmıştır. Yani, ileri biyolojik arıtma seviyesinin artırılmasının TN ve TP konsantrasyonunun azaltılmasında beklenen seviyede olumlu bir katkı sağlamadığı görülmektedir.

Politika 3: Tarım ve Hayvancılık Aktiviteleri için Alınacak Önlemler

Tarım ve hayvancılık faaliyetleri sonucu, bu faaliyetlerin yapıldığı alanlardan akarsu yatakları yoluyla denize taşınmakta olan TN ve TP yüklerinin azaltılmasına yönelik faaliyetlerin etkisi çalışmadaki üçüncü politika kapsamında incelenmiştir. Bu politika 2022 yılından sonra yürürlüğe konacağı kurgulanan bir dizi önlemin 2040 yılına dek bahsi geçen faaliyetler nedeniyle denize taşınan TN ve TP yüklerini %20 oranında azaltacağı öngörülerek kurgulanmıştır. Baz senaryodan farklı olarak, bu politika modele parametrik bir değişim olarak empoze edilmiş ve 'ramp' fonksiyonunun belirlenen kurgu için yıllık eklenen TN ve TP yükü değişkenleri üzerinden ilgili değişim yapılmıştır. Model sonuçlarından elde edilen bulgulara göre Politika 3'ün, Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonunda kısmi azalma yönünde bir etkisi olduğu gözlenmektedir. Alınacak önlemler sonucunda Marmara Denizi'nde TN ve TP konsantrasyonunun düşeceği gözlemlenmiş olması olumlu bir sonuç olsa da karşılaşılabilecek müsilaj riskini tamamen ortadan kaldıramadığı tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de test edilmiş olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,095; TP kıyaslamasında ise 0,096 olarak hesaplanmış, mevcut durum ile Politika 3'ün uygulanması durumu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Diğer bir deyişle, Politika 3 kapsamında tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınması önerilen önlemler belli bir ölçüde iyileşmeye yol açsa da tek başına yetersiz kalmaktadır.

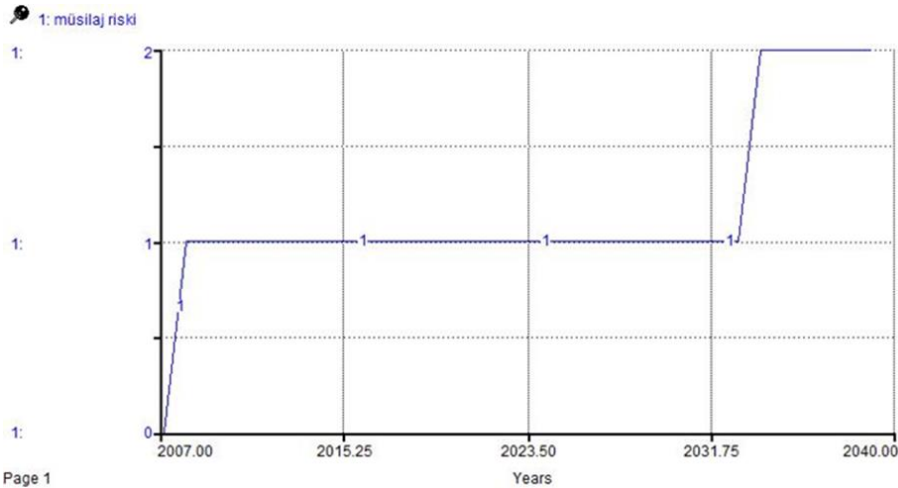
Politika 4: Bölge Nüfus Artışına Karşı Alınacak Önlemler

Politika 2 ve 3 ile yapılan değişimlere rağmen sonuçlara bakıldığında müsilaj riskinin hala yüksek seviyede seyrettiği görülmektedir. Bu durumda kök nedenlerden biri sayılabilecek bölge nüfusunun planlanması yeni bir politika olarak

söz konusu olabilir. 2010'lu yılların başında yürürlüğe girip ardından zaman içerisinde bölge büyüme hızını düşüren bir faktörün konulmasının nasıl bir sonuç yaratacağı bu politikada tartışılmıştır. Modelde nüfusla ilişkili olan atık su yüküne uygulanan değişim sonucu nüfusun büyüme hızı yerine atık su üretim hızına etki edilecek ve böylece Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonu ve bu konsantrasyonlara bağlı müsilaj oluşum riski incelenmiştir. Bu değişim hem ileri artımsız hem de ileri artımalı atık su üzerinde direkt olarak yıllara bağlı artış hızının azaltılması ile tanımlanmıştır. İnceleme sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Baz Senaryo ve Politika 4'ün Karşılaştırması

Yıl	TN konsantrasyonu (mg/l)		TP konsantrasyonu (mg/l)	
	Baz Senaryo	Politika 4	Baz Senaryo	Politika 4
2007	6,50	6,50	0,14	0,14
2012	7,50	6,51	0,28	0,14
2017	8,13	6,55	0,36	0,14
2022	8,63	6,75	0,43	0,17
2027	9,16	7,16	0,50	0,22
2032	9,71	7,71	0,58	0,30
2037	10,29	8,31	0,67	0,38
2040	10,68	8,68	0,72	0,43

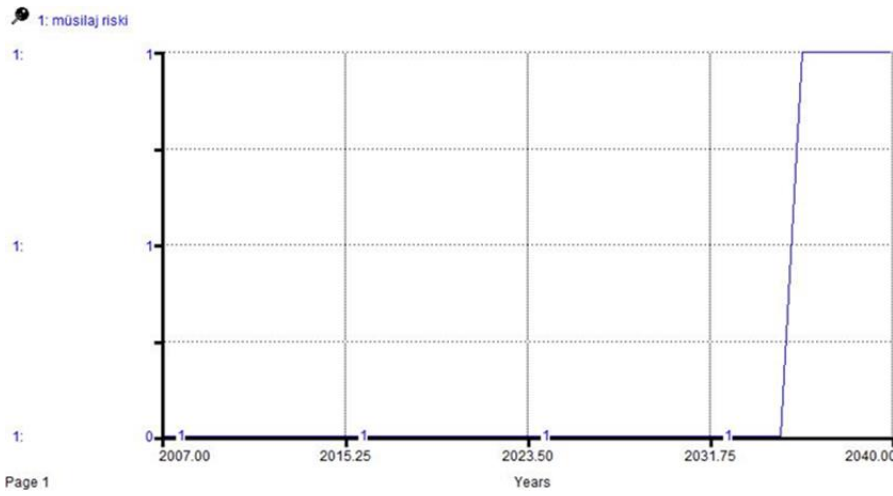


Şekil 7. Bölgedeki Nüfus Artışına Karşın Yapıldığı Varsayılan Önlemlerin Müsilaj Riskine Etkisi

Nüfusun kontrollü artışının 2010'lu yılların benimsenmiş ve uygulamaya konulmuş olduğu bu politikada yukarıda incelenen diğer politikalardan çok daha yüksek bir performans elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, baz senaryoya göre oluşacak TN ve TP yükleri Politika 4'ün uygulanması sonucunda elde edilecek yüklerle bağımlı örneklem t -testleri kullanılarak karşılaştırılmış; p -değeri TN kıyaslamasında 0,000, TP kıyaslamasında ise 0,001 olarak hesaplanmıştır. Yani Politika 4'ün uygulanması sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bir iyileşme elde edilmektedir. Bu iyileşmenin müsilaj riski açısından değerlendirilmesi Şekil 6'da temsil edilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, 2010'lu yılların başında bölge nüfusunun kontrollü artışı sağlanmış olması durumunda, müsilaj riskinin yüksek seviyeye geleceği yıl 2030'ların sonuna sarkması söz konusu olacaktır. Burada atlanmaması gereken nokta, politika 4 uygulamasında diğer politikaların göz ardı edildiğidir. Şayet politika 2 ve politika 3 nüfus artışını engelleyici politikalarla eşgüdümlü olarak karar vericiler tarafından uygulamaya geçirilirse müsilaj görünme riskinin yüksek seviyeye geçişi ötelenebilir ve/veya kontrol edilebilir olacaktır.

Yukarıda sıralanan tüm politikaların bir arada uygulandığı bir yöntemin izlenmesi durumu incelediğinde ise, müsilaj riskinin zamana bağlı değişimi Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, ileri atık su artıma politikaları ve nüfus artışındaki değişim bir kombinasyon olarak düşünülüp bu yönde bir politika kurulması durumunda, müsilaj riski 2031 yılı sonrasında orta seviyeye yükselmekte ancak kritik seviyeye benzetim modeli süresince çıkmamaktadır. Bu sebeple politikaların ayrı ayrı uygulanmasından ziyade bir arada ele alınmasının Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskini azaltacağı söylenebilir. Ayrıca tüm politikaların bir arada uygulanması ile benzetim ufku boyunca TN

konsantrasyonunda ortalama %14,85, TP konsantrasyonunda ise ortalama %65,23 oranında iyileşme gözlenmektedir. Bu iyileşmelerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları bağımlı örneklem *t*-testleri kullanılarak analiz edilmiş, baz senaryo ile bu karma senaryodan elde edilen TN ve TP yüklerinin kıyaslanmasında *p*-değerleri 0,000 bulunmuştur. Bu sonuç tüm politikaların bir arada uygulanmasının müsilaj riskine etki eden TN ve TP konsantrasyonlarında anlamlı bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır. Ancak Politika 4'ün uygulanabilirlik açısından zorluğu düşünüldüğünde karar vericilerin müsilaj riskini azaltmaya yönelik başka bir çözüm yolu geliştirmesinin gerekli olduğu sonucuna varılabilir. Bu sebeple Politika 4'ün yer almadığı; Politika 1, Politika 2 ve Politika 3'ü bir arada uygulandığı yeni bir strateji modele empoze edilmiş ve bu karma politikanın benzetim ufku boyunca TN konsantrasyonunda ortalama %4,00, TP konsantrasyonunda ise ortalama %43,19 oranında iyileşmeye yol açtığı görülmüştür. Politika 1-2-3'ün bir arada uygulanmasından elde edilen TN ve TP yükleri baz senaryo ile bağımlı örneklem *t*-testleri kullanılarak kıyaslandığında, her iki yük için yapılan testte de *p*-değeri 0,000 bulunmuştur. Yani yüzeydeki müsilajın toplanması, ileri biyolojik arıtma oranlarının artırılması ve tarım ve hayvancılık faaliyetleri nedeniyle havzalardan denize boşalan sudaki TN ve TP yüklerinin azaltılması eylemleri bir arada uygulanması gelecek yıllarda müsilaj riskinin anlamlı seviyede azalmasına ve kontrol edilmesinin mümkün kılınmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 8. Tüm Politikaların Bir Arada Uygulanmasının Müsilaj Riskine Etkisi

SONUÇ

Bu çalışmada 2020-2021 yıllarında Marmara Denizi'nde gözlemlenen yoğun müsilaj patlamasına neden olan karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiler ile geri dönüşüm mekanizmalarının incelenmesi amacıyla sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli önerilmektedir. Bilindiği kadarıyla müsilaj konusunu sistem dinamiği yaklaşımı ile inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir.

Önerilen modelin mevcut durum için çalıştırılmasıyla, 2040 yılına kadar Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskinin ciddiyeti açıkça ortaya konulmuştur. Marmara Denizi'nin ekolojik önemini yanı sıra bölge ve Türkiye ekonomisi için adeta kritik bir konumda olması benzetim modelinden elde edilen ciddi müsilaj riskinin ne denli tehlikeli boyutta olduğunu gözler önüne sermektedir. Baz senaryoya göre çalıştırılan benzetim modeli TN ve TP konsantrasyonlarının benzetimin ilk yılı olan 2007 de dahil olmak üzere kabul edilebilir seviyenin üzerinde olduğunu ve sürekli arttığını göstermektedir. Müsilaj risk seviyesi de 2015 yılından itibaren benzetimin son yılı olan 2040'a kadar alarm verici seviyededir.

Mevcut durumun devam etmesi halinde ortaya çıkacak ciddi çevresel ve sosyoekonomik problemlerin önüne geçmek için çeşitli kurumların önlemler alması kaçınılmazdır. Sorunun çözümü için bilim insanlarınca önerilen, ancak kısa ve uzun vadeli etkilerinin tam olarak ne olduğu konusunda ciddi bir bilimsel çalışmanın olmadığı politikalardan yüzeydeki müsilajın toplanması (Politika 1), ileri biyolojik arıtma seviyelerinin artırılması (Politika 2), tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler (Politika 3) ve bölge nüfus artışına karşı alınacak önlemler (Politika 4) önerilen model üzerinde denenmiş ve Politika 4 dışında bu politikaların TN ve TP konsantrasyonlarını tek başına anlamlı seviyede azaltmaktan uzak oldukları tespit edilmiştir. Ancak Politika 4'ün uygulanmasının güç olduğu açıktır. Bu durumda bahsi geçen politikaların bir arada kullanılmasının Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskini düşürebileceği kanısına varılabilir. Bu sebeple tüm politikaların bir arada uygulandığı bir senaryo da denenmiş ve bu

senaryo neticesinde Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskinin sınırlandırıldığı görülmüştür. Ayrıca yine Politika 4'ün uygulanmasındaki güçlükler düşünülerek Politika 1-2-3'ten oluşan karma bir politika da modele empoze edilmiş, bu karma politikanın da müsilaj riskini sınırlamada istatistiksel olarak etkili olacağı ortaya konmuştur. Her ne kadar böyle bir sonuç elde edilmişse de politikalarda sıralanan bu önlemlerin her biri kendi içinde yüksek maliyetlere ve hatta bölgede sosyo-ekonomik değişimlere neden olabilecek niteliktedir. Bu durumda politikaların bir arada uygulanmasının güçlüğü de ortaya konulmaktadır. Bu açıdan bakıldığında karar vericilerin müsilajı bertaraf edici ya da gelecek yıllarda Marmara Denizi'ni tekrar tehdit edici bir unsur olarak karşımıza çıkmasını önleyici politikaları uygularken dikkatli olmaları gerektiği sonucu ortaya konulmaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen sayısal bulgular neticesinde karar verici organlar tarafından Marmara Denizi Havzası'ndaki nüfus yoğunluğunu azaltmak adına başka bölgelere yapılacak ekonomik ve sosyal yatırımların teşvik edilmesi, atıksu arıtma aktivitelerinin tamamının ileri teknolojinin kullanıldığı yöntemlerle değiştirilmesi ve tarım ve hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklı su deşarjlarının da kontrol edilmesine yönelik düzenlemelerin yapılmasının önemi ortaya konmaktadır. Bu doğrultuda resmi kurumlar tarafından kamuyu bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmesi, nüfus, sanayi ve diğer iş kollarının başka bölgelere homojen bir şekilde yeniden dağıtılması için teşvik programları oluşturulması, çevre kanunu ve denetim yönetmeliklerinde ilgili yasal düzenlemelerin yapılarak atıksu deşarj içeriklerinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi elzemdir. Ayrıca denetim ve gözlem faaliyetlerinin şeffaflaştırılarak halkın ve sivil toplum kuruluşlarının da sürece dahil edilmesinin müsilaj riskinin önlenmesine yönelik adımların atılması ve takip edilerek uygulanabilmesinde etkili olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada klorofil-a değerlerindeki değişimlerin ve sıcaklık anomalilerine ilişkin verilerin tüm Marmara Denizi'ni yansıtacak ortak bir matematiksel ifade ile gösterilememesi nedeni ile bu değişkenler önerilen SD modeline entegre edilmemiştir. Her ne kadar bu iki değişkenin müsilaj formasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu literatürde belirtilmişse de çalışma kapsamında önerilen model mevcut haliyle de davranışın reproduksiyonunu sağlamak konusunda yeterlidir. Ayrıca önerilen modelin müsilaj oluşumuna etki eden temel değişkenleri bütüncül bir yaklaşımla genelleştirmesi söz konusudur. Bu durum model değişkenlerinin zamana göre davranışlarını etkileyen alt faktörlere model içerisinde doğrudan yer verilmemesine neden olmuştur. Ancak bahsi geçen alt faktörlerin modelde yer alması gerek veri temininin ve değişkenler arasındaki nedensellik ilişkilerinin matematiksel olarak ifade edilmesinde yaratacağı güçlükler, gerekse modelin karmaşıklığı üzerinde yol açacağı negatif etkiler nedeniyle neredeyse imkansızdır. Benzer şekilde literatürde yer alan çevre modellemelerinde de ilgili problemler genelleştirilerek irdelenmekte, detaylı nedensellikler göz ardı edilmektedir.

Gelecek çalışmalarda endüstrileşme ve nüfus dinamiklerinin detaylandırılarak incelenmesinin yanı sıra müsilaj riskinin bölge üzerinde oluşturabileceği sosyoekonomik değişimler ile kısa ve uzun vadeli sonuçlarının analiz edilmesi konularına yer verilebilir. Bu hususta, sistem dinamiğine dayalı benzetim yöntemleri kullanılabileceği gibi zaman serisi analizleri, çeşitli ekonometrik modeller, nedensellik testlerine dayalı yaklaşımlar vb. diğer tekniklere başvurulabilir. Ayrıca, denize deşarj edilen sulardaki TN-TP yüklerini azaltmaya yönelik inovatif atıksu arıtma teknolojilerine yatırım yapılması, havzalardan denize dökülen sulardaki besin içeriklerinin kontrol edecek yeni sistemlerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetleri de gelecek çalışma konuları arasındadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma BAP2201 kodlu proje kapsamında İstanbul Kültür Üniversitesi Teknoloji ve Proje Destek Birimi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ak, M., & Top, İ. (2022). İkincil arıtılmış kentsel atıksulardaki azot ve fosforun toprak-akifer arıtma sistemi kullanılarak giderilmesinde toprak tiplerinin etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(6), 929-936. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.99491>
- Akmaz, H. (2022, Mart) Küresel İklim Değişikliğinin Müsilaja Etkisi. In BCCS2022- (Bio) Climate Change Symposium 2022, Erzurum, Türkiye.
- Aktan, Y., Dede, A., & Çiftci, P. S. (2008). Mucilage event associated with diatoms and dinoflagellates in Sea of Marmara, Turkey. *Harmful Algae News*, 36, 1-27.

Apak, R. (2021). Deniz Müsilajının Oluşumu, Önlenmesi ve Olası Değerlendirilmesi. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Artüz, M. L. Marmara Denizi genelinde gözlemlenen karışık alg patlaması sonucunda oluşan musilaj agregat konusunda rapor. (2008). https://docplayer.biz.tr/2054734-Marmara-denizi-genelinde-gozlemlenen-karisik-alg-patlamasi-sonucunda-olusan-musilaj-agregat-konusunda-rapor.html#download_tab_content. Son erişim tarihi 16.07.2023.

Ayaz, Ç. E. (2022). Müsilaj sorununun idari boyutu: İstanbul Büyükşehir Belediyesi ile İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi özelinde bir inceleme. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*, 12(1), 176-204. <https://doi.org/10.18074/ckuiibfd.989631>

Aydın, M. E. (2021). Marmara Denizinde Müsilaj Oluşumu, Muhtemel Sebepleri ve Öneriler. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Balci, M., & Balkis, N. (2017). Assessment of phytoplankton and environmental variables for water quality and trophic state classification in the Gemlik Gulf, Marmara Sea (Turkey). *Marine Pollution Bulletin*, 115, 172-189. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.007>

Balkis, N., Sivri, N., Fraim, N. L., Balci, M., Durmuş, T., & Sukatar, A. (2013). Excessive growth of *Cladophora laetevirens* (Dillwyn) Kutzing and enteric bacteria in mats in the Southwestern Istanbul coast, Sea of Marmara. *IUFS Journal of Biology*, 72(2), 43-50.

Bedük, F., Aydın, S., Aydın, M. E., & Bahadır, M. (2021). Müsilaj Benzeri Çevre Felaketlerini Önlemede Pasif Biofilm Örnekleyiciler Kullanarak Kirlilik Yükünün Azaltılması. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Burak, S., Bilge, A. H., & Ülker, D. (2022). Assessment and simulation of water transfer for the megacity Istanbul. *Physical Geography*, 43(6), 784-808. <https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1904698>

Calizza, E., Aktan, Y., Costantini, M. L., & Rossi L. (2015). Stable isotope variations in benthic primary producers along the Bosphorus (Turkey): A preliminary study. *Marine Pollution Bulletin*, 97, 535-538. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.016>

Colkesen, I., Kavzoglu, T., Sefercik, U. G., & Ozturk, M. Y. (2023) Automated mucilage extraction index (AMED): a novel spectral water index for identifying marine mucilage formations from Sentinel-2 imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 44(1), 105-141. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2158049>

Çardak, M., Altuğ, G., & Türetken, P. S. (2015). Variations of Culturable and Metabolically Active Bacteria in a Stratified Water Column: The Example of Istanbul and Çanakkale Straits, Turkey. *International Journal of Environmental Research*, 9(4), 1333-1340. <https://doi.org/10.22059/IJER.2015.1025>

Daban, İ. B., Şen, Y., Ayaz, A., Altınağaç, U., Öztekin, A., Özekinci, U., İşmen, A., Çakır, F., Yüksek, A., Demirkıran, T., Ayaz, O., Uğur, G. E., & Selçuk, B. B. (2023). Postmucilage biodiversity of shallow water fish assemblages: A case study in the Marmara Sea, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*: 47(4), 191-201. <https://doi.org/10.55730/1300-0179.3132>

Danovaro, R., Fonda Umani, S., & Pusceddu, A. (2009). Climate Change and the Potential Spreading of Marine Mucilage and Microbial Pathogens in the Mediterranean Sea. *PLoS ONE*, 4(9), e7006. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007006>

Demirel, D. F., Gönül-Sezer, E. D., & Pehlivan, S. A. (2022). Analyzing the wastewater treatment facility location/network design problem via system dynamics: Antalya, Turkey case. *Journal of Environmental Management*, 320, 115814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115814>

Demirel N., Yildiz T., Ulman A., Zengin M., Akoglu E., Saygu I., Ertor Akyazi P., Gül G., Bedikoğlu D., & Yılmaz I. N. (2023). Status of the Sea of Marmara ecosystem and its fishery resources: Mucilage episodes and recommendations for sustainable fisheries. In M. Albay (Ed.), Mucilage Problem in the Sea of Marmara. İstanbul: İstanbul University.

- Deserti, M., Cacciamani, C., Chiggiato, J., Rinaldi, A., & Ferrari, C. R. (2005). Relationships between northern Adriatic Sea mucilage events and climate variability. *Science of the Total Environment*, 353, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.009>
- Dianati, K., Schäfer, L., Milner, J., Gómez-Sanabria, A., Gitau, H., Hale, J., Langmaack, H., Kiesewetter, G., Muindi, K., Mberu, B., Zimmermann, N., Michie, S., Wilkinson, P., & Davies, M. (2021). A system dynamics-based scenario analysis of residential solid waste management in Kisumu, Kenya. *Science of The Total Environment*, 777, 146200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146200>
- Dianati, K., Zimmermann, N., Milner, J., Muindi, K., Ezech, A., Chege, M., Mberu, B., Kyobutungi, C., Fletcher, H., Wilkinson, P., & Davies, M. (2019). Household air pollution in Nairobi's slums: A long-term policy evaluation using participatory system dynamics. *Science of The Total Environment*, 660, 1108-1134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.430>
- Doğan, K. (2013). Marmara Denizi Kirliliğinin Balıkçılığa Etkisi, Marmara Denizi Balıkçılığının Ekonomiye Yansımaları. In A. C. Kahraman (ed.), *Derdimiz, Değerimiz, Denizimiz Marmara*, İstanbul: T.C. Marmara Belediyeler Birliği Yayını 79.
- Erdüğan, H. (2022). Müsilajın Çanakkale Boğazı Makro Alglerine Etkisi. *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries*, 5, 33-37. <https://doi.org/10.46384/jmsf.1121163>
- Eren, Z. (2021). Zararlı Alg Patlaması ve Marmara Denizindeki Müsilaj Problemi İlişkisi. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 3(2), 203-213. <https://doi.org/10.53472/jenas.985310>
- Eronat, A. H. (2022). Denizlerde Müsilaj Olayının Tespitine Yönelik Optik Tanımlayıcı Motifin Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 953-958. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247223>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge Massachusetts: MIT Press.
- Fuksi, T., Tomašových, A., Gallmetzer, I., Haselmair, A., & Zuschin, M. (2018). 20th century increase in body size of a hypoxia-tolerant bivalve documented by sediment cores from the northern Adriatic Sea (Gulf of Trieste). *Marine Pollution Bulletin*, 135, 361-375. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.004>
- Giani, M., Berto, D., Zangrando, V., Castelli, S., Sist, P., & Urbani, R. (2003). Chemical characterization of different typologies of mucilaginous aggregates in the Northern Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 353, 232-246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.027>
- Gönül-Sezer E. D., & Demirel, D. F. (2022). Examining the Effects of Mucilage in the Marmara Sea on Fisheries, Tourism, and Maritime Transportation via the System Dynamics Approach. In A. Vaseashta, G. Duca, S. Travin (Eds.), *Handbook of Research on Water Sciences and Society*. Hershey PA, USA: IGI Global.
- Hallas, J. F., Mackowiak, C. L., & Wilkie, A. C. (2020). Mitigating rural WWTP impacts: System dynamics modeling of downstream nutrient outputs. *Science of The Total Environment*, 744, 140809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140809>
- Hanedar, A., Gunes, Y., Avsar, E., Tanik, A., Musaoglu, N., Pasaoglu, M. E., Gorgun, E., Ece, P., Ayaz, H., Akgun, B. E., Yazgi, H. S., Ecer, M., Birpınar, M. E. (2023). Improving the Environmental Auditing System in Türkiye: Lessons-Learnt From Mucilage Event in The Sea of Marmara. *Environmental Engineering and Management Journal*. 22(3), 485-495. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.038>
- Iciglenceki, I., Paliaga, P., Budisa, A., Cankovic, M., Dautovic, J., Djakovac, T., Dutour-Sikiric, M., Kraus, R., Kuzat, N., Lucic, D., Pfannkuchen, D. M., Njire, J., Pasaric, Z., & Supic, N. (2021). Dissolved organic carbon accumulation during a bloom of invasive gelatinous zooplankton Mnemiopsis leidyi in the northern Adriatic Sea; case of the anomalous summer in 2017. *Journal of Marine Systems*, 222, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103599>
- Inisibilir, M., Svetlichny, L., Hubareva, E., Yilmaz, I. N., Ustun, F., Belmonte, G., & Toklu-Alicli, B. (2011). Adaptability and vulnerability of zooplankton species in the adjacent regions of the Black and Marmara Seas. *Journal of Marine Systems*, 84, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.08.002>
- Inisibilir-Okyar, M., Ustun, F., & Orun, D. A. (2015). Changes in abundance and community structure of the zooplankton population during the 2008 mucilage event in the northeastern Marmara Sea. *Turkish Journal of Zoology*, 39, 28-38. <https://doi.org/10.3906/zoo-1308-11>

- Jannelli, A., Fazio, R., & Ambrosi, D. (2003). A 3D mathematical model for the prediction of mucilage dynamics. *Computers & Fluids*, 32, 47-57. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(01\)00100-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(01)00100-1).
- Kam, E., & Yümün, Z. Ü. (2021) Marmara Denizi'nde Müsilaj Sorunu ve Çözüm Yöntemleri. Marmara Denizi'nin Ekolojisi (pp. 163-183) Ankara: Tüba Basın Yayın, 2021
- Karlson, B., Andersen, P., Arneborg, L., Cembella, A., Eikrem, W., John, U., West, J. J., Klemm, K., Kobos, J., Lehtinen, S., Lundholm, N., Mazur-Marzec, H., Naustvoll, L., Poelman, M., Provoost, P., De Rijcke, M., & Suikkanen, S. (2021). Harmful algal blooms and their effects in coastal seas of Northern Europe". *Harmful Algae*, 102, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.101989>
- Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ., Sefercik, U. G., & Öztürk, M. Y. (2021). Marmara Denizi'ndeki Müsilaj Oluşumlarının Çok Zamanlı Optik ve Termal Uydu Görüntülerinden Makine Öğrenme Algoritması İle Tespiti ve Analizi. *Harita Dergisi*, 166, 1-9.
- Kayhan, F. E., & Yön Ertuğ, N. D. (2022). Müsilaj Sorunu ve Karakterizasyonu. *Voice of Nature*, 5(9), 4-16.
- Keleş, G., Yılmaz, S., & 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.
- Kömüşçü, A. Ü., Aksoy, M., & 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. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1037842>
- Küçük, S., Abacı, B., Dede, M., Yüksel, S. E., & Yılmaz, M. (2022, Mayıs). Analysis and Detection of Mucilage Bloom from Multispectral Satellite Images. In 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Türkiye.
- Liéart, C., Susperregui, N., Rouaud, V., Cavalheiro, J., David, V., Del Amo, Y., Duran, R., Lauga, B., Monperrus, M., Pigot, T., Bichon, B., Charlier, K., & Savoye, N. (2016). Dynamics of particulate organic matter in a coastal system characterized by the occurrence of marine mucilage – A stable isotope study. *Journal of Sea*, 116, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2016.08.001>
- Liu, J., Liu, Y., & Wang, X. (2020). An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in Guangzhou. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 37237–37259. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07107-5>
- Liu, P., Lin, B., Wu, X., & Zhou, H. (2019). Bridging energy performance gaps of green office buildings via more targeted operations management: A system dynamics approach. *Journal of Environmental Management*, 238, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.111>
- Luo, X., Liu, C., & Zhao, H. (2023). Driving factors and emission reduction scenarios analysis of CO2 emissions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and surrounding cities based on LMDI and system dynamics. *Science of The Total Environment*, 870, 161966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161966>
- Maani, K. E., & Cavana, R. Y. (2007). *Systems Thinking, System Dynamics: Understanding Change and Complexity*. Auckland, NZ: Prentice Hall.
- Marmara Belediyeler Birliği. Marmara Denizi Eylem Planı Bilim ve Teknik Kurulu İhtiyaçlar ve Çözüm Önerileri Raporu. (2021b). <https://marmara.gov.tr/wp-content/uploads/2022/06/MBB-Marmara-Denizi-Bilim-ve-Teknik-Kurulu-I%CC%87htiyac%CC%A7lar-ve-C%CC%A7o%CC%88zu%CC%88m-O%CC%88nerileri-Raporu.pdf>. Son erişim tarihi: 10.06.2022.
- Marmara Belediyeler Birliği. Marmara Denizi ile ilişkili Atıksu Altyapı Durumu ve Deniz Deşarjları. (2021a) <https://marmara.gov.tr/wp-content/uploads/2022/06/MBB-Marmara-Denizi-Atıksu-Altyapi-Durumu-ve-Deniz-Des%CC%A7arjları-Raporu.pdf>. Son erişim tarihi 10.06.2022.
- Mrokowska, M. M., & Krztoń-Maziopa, A. (2024). Settling of microplastics in mucus-rich water column: The role of biologically modified rheology of seawater. *Science of The Total Environment*, 912, 168767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168767>
- Okuş, E., Aslan-Yılmaz, A., Yüksek, A., Taş, S., & Tüfekçi, V. (2002). Nutrient distribution in the Bosphorus and surrounding areas. *Water science and technology*, 46(8), 59-66. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0145>

- 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. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1187859>
- Önce, M., & Yılmaz, S. (2024). Tekirdağ ile İstanbul Arası Marmara Denizi'nde Müsilaj Tehlikesinin Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 53, 25-31. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10493728>
- Özalp, H. B. (2021). First massive mucilage event observed in deep waters of Çanakkale Strait (Dardanelles), Turkey. *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*, 27(1), 49-66.
- Öztürk, İ., Yanalak, M., Arslan, Ö., Koyuncu, İ., Dülekürge, E., Erşahin, M. E., & Türken, T. Marmara Denizi'nde Deniz Salyası Sorunu İle İlgili Görüş Ve Öneriler. (2021). [https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/deniz-salyas%C4%B1-\(musilaj\)-itu_rapor.pdf?sfvrsn=54235df0_2](https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/deniz-salyas%C4%B1-(musilaj)-itu_rapor.pdf?sfvrsn=54235df0_2).
- Öztürk, İ. D., & 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.
- Öztürk, M. 2021. Deniz salyası Marmara Denizi'ni tehdit ediyor. <https://www.indyturk.com/node/359086/t%C3%BCrki%C3%87yeden-sesler/deniz-salyas%C4%B1-marmara-denizini-tehdit- ediyor. Son erişim tarihi 17 Mart 2022>.
- Polat, A. B., Balık Sanlı, F., & 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. <https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00079>
- Polat, S. C., & Tuğrul, S. (1995). Nutrient and organic carbon exchanges between the Black and Marmara Seas through the Bosphorus Strait. *Continental Shelf Research*, 9-15(8), 1115-1132. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)00064-T](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)00064-T)
- Sartoni, G., Urbani, R., Sist, P., Berto, D., Nuccio, C., & Giani M. (2008). Benthic mucilaginous aggregates in the Mediterranean Sea: Origin, chemical composition and polysaccharide characterization. *Marine Chemistry*, 111, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.05.005>
- Savun-Hekimoğlu, B., & Gazioğlu, C. (2021). Mucilage Problem in the Semi-Enclosed Seas: Recent Outbreak in the Sea of Marmara. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(4), 402-413. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.955739>
- Sefercik, U. G., Colkesen, I., Kavzoglu, T., Ozdogan, N., & Ozturk M. Y. (2023). Assessing the Physical and Chemical Characteristics of Marine Mucilage Utilizing In-Situ and Remote Sensing Data (Sentinel-1, -2, -3). *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00254-y>
- Sterman, J. (2010). Business dynamics. Irwin/McGraw-Hill c2000.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024. (2021). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/marmara-den-z--butunles-k-stratej-k-plani-20211124094432.pdf>. Son erişim tarihi 01.04.2022.
- Taş, S., Kus, D., & Yılmaz, I. N. (2020). Temporal variations in phytoplankton composition in the northeastern Sea of Marmara: potentially toxic species and mucilage event. *Mediterranean Marine Science*, 21(3), 668-683. <https://doi.org/10.12681/mms.22562>
- Taşdemir, Y. (2002). Marmara Denizi: Kirleticiler ve Çevre Açısından Alınabilecek Tedbirler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 39-45. <https://doi:10.17482/uujfe.37301>
- Tepić, N., Gašparović, B., & Ahel, M. (2009). Multivariate statistical analysis of the distribution patterns of carbohydrates and surface-active substances in the northern Adriatic Sea. *Marine Chemistry*, 114, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.03.005>
- Toklu-Alıçlı, B., Polat, S., & Balkis-Ozdelice, N. (2020). Temporal variations in the abundance of picoplanktonic Synechococcus (Cyanobacteria) during a mucilage event in the Gulfs of Bandırma and Erdek. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 233. 106513. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106513>
- TÜBA. Müsilaj- Deniz Salyası Değerlendirme Raporu. (2021). <http://tuba.gov.tr/tr/haberler/akademi-den- haberler/tuba-musilaj-deniz-salyasidegerlen-dirme-raporu>. Son erişim tarihi: 10.06.2022.

Tüfekçi, V., Balkıs, N., Beken, Ç. P., Ediger, D., & Mantıkçı, M. (2010). Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Biology*, 34(2), 199-210. <https://doi.org/10.3906/biy-0812-1>

TÜİK. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2021. (2022a). <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>. Son erişim tarihi 01.04.2022.

TÜİK. Bölgesel Hesaplar: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, Değer (2009 Bazlı). (2022b) <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=116&locale=tr>. Son erişim tarihi 01.04.2022.

Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121366>

Yentur, R. G., Buyukates, Y., Ozen, O., & Altin, A. (2013). The environmental and socio-economical effects of a biologic problem: Mucilage. *Marine Science and Technology Bulletin*, 2(2), 13-15.

Yılmaz, A. (2002). Türkiye Denizlerinin Biyojeokimyası: Dağılımlar ve Dönüşümler. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, 219-235.

Yi, Y., Wu, J., Zuliani, F., Lavagnolo, M. C., & Manzardo, A. (2023). Integration of life cycle assessment and system dynamics modeling for environmental scenario analysis: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 903, 166545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166545>

Yücel, M., Özkan, K., Fach, B., Örek, H., Mantıkçı, M., Tezcan, D., Akçay, İ., Özhan, K., Arkın, S., Tuğrul, S., & Salihoğlu, B. (2021). Marmara Denizi'nin Geçirdiği Biyojeokimyasal Değişimler Bağlamında 2021 Müsilaj Patlaması, Güncel Baskılar ve Çözüm Önerileri. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), *Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri*. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Yümün, Z. Ü, & Kam, E. (2021). Marmara Denizi'nde Müsilaj Sorunu ve Çözüm Yöntemleri. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), *Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri*. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Zhang, L., Du, Q., Zhou, D., & Zhou, P. (2022). How does the photovoltaic industry contribute to China's carbon neutrality goal? Analysis of a system dynamics simulation. *Science of The Total Environment*, 808, 151868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151868>

EK-A

Model değişkenlerine ilişkin verilerin temin edildikleri kaynaklar Tablo 4'te özetlenmektedir:

Tablo 4. Değişkenlere İlişkin Veri Kaynakları

Değişken	Değişken Türü	Birimi	Veri Kaynağı
ileri biyolojik aritmasız TN katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
ileri biyolojik aritmalı TN katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
havzalardan gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Marmara Belediyeler Birliği, 2021a, 2021b; Yılmaz, 2002
Akdeniz'den gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'den gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
ileri aritmasız desarj	Dönüştürücü	m ³ /yıl	(T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021)
ileri atıksız arıtma	Dönüştürücü	m ³ /yıl	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
Karadeniz'e akan TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Akdeniz'e akan TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Marmara'da çökelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
ileri biyolojik aritmasız TP katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
ileri biyolojik aritmalı TP katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
havzalardan gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Marmara Belediyeler Birliği, 2021a, 2021b; Yılmaz, 2002
Akdeniz'den gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'den gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'e akan TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Akdeniz'e akan TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
yüzey seviyedeki çözülmüş oksijen	Dönüştürücü	mg/L	Artüz, 2008
orta derinlikteki çözülmüş oksijen	Dönüştürücü	mg/L	Artüz, 2008
TN konsantrasyonu	Stok	mg/L	Öztürk, 2021
TP konsantrasyonu	Stok	mg/L	Öztürk, 2021
Müsilaj riski	Stok	-	-

EK-B

Stella 9.2.1 yazılımında oluşturulan SD modeli denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\text{müsilaj_riski}(t) = \text{müsilaj_riski}(t - dt) + (\text{müsilaj_faktörleri} - \text{bertaraf}) * dt$$

$$\text{INIT müsilaj_riski} = 0$$

INFLOWS:

$$\text{müsilaj_faktörleri} = \text{IF TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND } 0.03 < \text{TP_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} < 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} < 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND } 0.03 < \text{TP_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} < 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} < 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND } 0.03 < \text{TP_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} < 6 \text{ AND orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey_seviyedeki_çözülmüş_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta_derinlikteki_çözülmüş_oksijen} < 2$$

```
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND 3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen>2
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen>6 AND
0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND TP__konsantrasyonu<0.03 AND 3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND
0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2
THEN 0
ELSE IF (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND
yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (0.034<TN__konsantrasyonu<3.4 AND
TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR
(TN__konsantrasyonu>3.4 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND
3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND
TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND 0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2) THEN 2 ELSE 1
OUTFLOWS:
bertaraf = HISTORY(müsilaj_riski,TIME)
TN__konsantrasyonu(t) = TN__konsantrasyonu(t - dt) + (yillik_eklenen_TN_yükü - yillik_çikan_TN_yükü) * dt
INIT TN__konsantrasyonu = 6.499820943
INFLOWS:
yillik_eklenen_TN_yükü =
((ileri_biyolojik_aritmalı_TN_katsayisi/1000000*ileri_atik_su_aritma*1000+ileri_biyolojik_aritmasız_TN_katsayisi/1000000*ileri_aritması
z_desarj*1000+havzalardan_gelen_TN_yükü+Akdeniz'den_gelen_TN_yükü+Karadeniz'den_gelen_TN_yükü)*1000000/(3378*10^12))
OUTFLOWS:
yillik_çikan_TN_yükü =
(Akdeniz'e_akan_TN_yükü+Karadeniz'e_akan_TN_yükü+Marmara'da_çökelen_TN_yükü)*1000000/(3378*10^12)
TP__konsantrasyonu(t) = TP__konsantrasyonu(t - dt) + (yillik_eklenen_TP_yuku - yillik_çikan_TP_yükü) * dt
INIT TP__konsantrasyonu = 0.140690778
INFLOWS:
yillik_eklenen_TP_yuku =
((ileri_biyolojik_aritmalı_TP_katsayisi/1000000*ileri_atik_su_aritma*1000+ileri_biyolojik_aritmasız_TP_katsayisi/1000000*ileri_aritması
z_desarj*1000+Havzalardan_gelen_TP_yükü+Akdeniz'den_gelen_TP_yükü+Karadeniz'den_gelen_TP_yükü)*1000000/(3378*10^12))
OUTFLOWS:
yillik_çikan_TP_yükü = (Akdeniz'e_akan_TP_yükü+Karadeniz'e_akan_TP_yükü)*1000000/(3378*10^12)
Akdeniz'den_gelen_TN_yükü = 7100000
Akdeniz'den_gelen_TP_yükü = 1900000
Akdeniz'e_akan_TN_yükü = 18400000
Akdeniz'e_akan_TP_yükü = 9600000
ileri_biyolojik_aritmalı_TN_katsayisi = 15
ileri_biyolojik_aritmalı_TP_katsayisi = 2
ileri_biyolojik_aritmasız_TN_katsayisi = 71.87751973
ileri_biyolojik_aritmasız_TP_katsayisi = 12.24226539
Karadeniz'den_gelen_TN_yükü = 18250000
Karadeniz'den_gelen_TP_yükü = 4015000
Karadeniz'e_akan_TN_yükü = 44500000
Karadeniz'e_akan_TP_yükü = 8212500
Marmara'da_çökelen_TN_yükü = 19500000
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen = IF 0.133476776946542+0.00223293966967472*TN__konsantrasyonu-
0.101588310852624*TP__konsantrasyonu >=0 AND müsilaj_riski>=0 THEN
(0.133476776946542+0.00223293966967472*TN__konsantrasyonu-0.101588310852624*TP__konsantrasyonu) ELSE 0.00001
yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen = IF 2.76287935411283+0.112177093290657*TN__konsantrasyonu-
1.91515542622579*TP__konsantrasyonu >= 0 AND müsilaj_riski>=0 THEN
2.76287935411283+0.112177093290657*TN__konsantrasyonu-1.91515542622579*TP__konsantrasyonu ELSE 0.00001
havzalardan_gelen_TN_yükü = GRAPH(TIME)
(2007, 7.1e+008), (2008, 7.4e+008), (2009, 6.6e+008), (2010, 7.5e+008), (2011, 4.7e+008), (2012, 4.6e+008), (2013, 4.2e+008), (2014,
4.6e+008), (2015, 3.7e+008), (2016, 3.5e+008), (2017, 3.3e+008), (2018, 3e+008), (2019, 3.1e+008), (2020, 3e+008), (2021, 3.3e+008),
(2022, 3.3e+008), (2023, 3.2e+008), (2024, 3.2e+008), (2025, 3.2e+008), (2026, 3.2e+008), (2027, 3.2e+008), (2028, 3.1e+008), (2029,
3.1e+008), (2030, 3.1e+008), (2031, 3.1e+008), (2032, 3.1e+008), (2033, 3e+008), (2034, 3e+008), (2035, 3e+008), (2036, 3e+008), (2037,
3e+008), (2038, 2.9e+008), (2039, 2.9e+008), (2040, 2.9e+008)
Havzalardan_gelen_TP_yükü = GRAPH(TIME)
(2007, 1.9e+008), (2008, 7.2e+007), (2009, 6e+007), (2010, 6.8e+007), (2011, 7e+007), (2012, 6.5e+007), (2013, 5.7e+007), (2014,
5.7e+007), (2015, 5e+007), (2016, 4.9e+007), (2017, 4.6e+007), (2018, 4.2e+007), (2019, 4.3e+007), (2020, 4.2e+007), (2021, 4.8e+007),
(2022, 4.7e+007), (2023, 4.7e+007), (2024, 4.7e+007), (2025, 4.7e+007), (2026, 4.6e+007), (2027, 4.6e+007), (2028, 4.6e+007), (2029,
4.6e+007), (2030, 4.5e+007), (2031, 4.5e+007), (2032, 4.5e+007), (2033, 4.5e+007), (2034, 4.4e+007), (2035, 4.4e+007), (2036, 4.4e+007),
(2037, 4.4e+007), (2038, 4.4e+007), (2039, 4.3e+007), (2040, 4.3e+007)
ileri_aritmasız_desarj = GRAPH(TIME)
(2007, 7.5e+008), (2008, 7.6e+008), (2009, 7.7e+008), (2010, 7.9e+008), (2011, 8.2e+008), (2012, 8.3e+008), (2013, 8.5e+008), (2014,
8.7e+008), (2015, 8.9e+008), (2016, 9.1e+008), (2017, 9.4e+008), (2018, 9.6e+008), (2019, 9.9e+008), (2020, 1e+009), (2021, 1e+009),
(2022, 1.1e+009), (2023, 1.1e+009), (2024, 1.1e+009), (2025, 1.2e+009), (2026, 1.2e+009), (2027, 1.3e+009), (2028, 1.3e+009), (2029,
```

1.4e+009), (2030, 1.4e+009), (2031, 1.5e+009), (2032, 1.6e+009), (2033, 1.7e+009), (2034, 1.8e+009), (2035, 1.9e+009), (2036, 2e+009), (2037, 2.2e+009), (2038, 2.4e+009), (2039, 2.6e+009), (2040, 2.8e+009)
ileri_atik_su_aritma = GRAPH(TIME)
(2007, 5.4e+008), (2008, 5.5e+008), (2009, 5.6e+008), (2010, 5.8e+008), (2011, 5.9e+008), (2012, 6.1e+008), (2013, 6.2e+008), (2014, 6.3e+008), (2015, 6.5e+008), (2016, 6.7e+008), (2017, 6.8e+008), (2018, 7e+008), (2019, 7.2e+008), (2020, 7.4e+008), (2021, 7.6e+008), (2022, 7.8e+008), (2023, 8e+008), (2024, 8.3e+008), (2025, 8.6e+008), (2026, 8.9e+008), (2027, 9.2e+008), (2028, 9.6e+008), (2029, 1e+009), (2030, 1e+009), (2031, 1.1e+009), (2032, 1.2e+009), (2033, 1.2e+009), (2034, 1.3e+009), (2035, 1.4e+009), (2036, 1.5e+009), (2037, 1.6e+009), (2038, 1.7e+009), (2039, 1.9e+009), (2040, 2.1e+009)