

ARAŞTIRMA MAKALESİ

İstanbul Boğazı'nda Petrol Kirliliği Yayılımının Modellenmesi

Şehriban SAÇU¹, Olgay ŞEN², Tarkan ERDİK³, İzzet ÖZTÜRK⁴

Yazışma yazarı:
Şehriban SAÇU,
sacus@itu.edu.tr

Referans:

Saçu, Ş., Şen, O., Erdik, T., ve Öztürk, İ., (2023), İstanbul Boğazı'nda Petrol Kirliliği Yayılımının Modellenmesi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 24, (1) 17–24.

Makale Gönderimi : 07 KASIM 2022
Online Kabul : 28 ŞUBAT 2023
Online Basım : 09 MART 2023

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID: 0000-0001-9404-8424

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0003-2545-3746

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-4003-5510

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-8274-5326

Özet İstanbul Boğazı, Karadeniz ve Marmara Denizi'ni birbirine bağlayan doğal bir su yoludur. Boğaz, Karadeniz ülkelerinin açık denizlere erişimini sağlayan tek deniz yoludur. Bu nedenle, Boğaz'da oldukça yoğun bir gemi trafiği söz konusudur. Yılda ortalama 50.000 araç Boğaz'dan geçmekte olup bunun beşte birini tehlikeli yük taşıyan kargo gemileri oluşturmaktadır. Yakın geçmişte Boğaz'da birkaç gemi kazası meydana gelmiş ve dökülen petrol deniz ekosistemleri, kıyı yapıları ve sosyo-ekonomik hayatta olumsuz etkilere yol açmıştır. Tanker kazalarından meydana gelebilecek zararları minimize etmek için, acil müdahale planlarının hazırlanması ve etkin bir şekilde uygulanması önem taşımaktadır. Bu çalışmamızda 3-boyutlu hidrodinamik model ve taşıyım modeli kullanılarak, İstanbul Boğazı kuzey girişinden denize verilen petrol hidrokarbonu kirleticisinin Boğaz'daki yayılımı simüle edilmiştir. Bu kapsamda hafif ham petrol (API 35) ve ağır petrol (API 12) olmak üzere farklı özellikteki iki petrol ürününün modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonuçları, İstanbul Boğazı kuzey girişinden ani noktasal kaynak olarak deşarj edilen petrol hidrokarbonlarının her iki kıyı boyunca Boğaz'daki ekosistem, su kalitesi ve kıyı yapılarını önemli derecede etkileme potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul Boğazı, petrol kirlilik modeli, hidrodinamik

Oil Spill Modeling In The Bosphorus

Abstract. The Bosphorus is a natural waterway that connects the Black Sea and the Marmara Sea. It is the only maritime route, providing passage for Black Sea countries to open seas. Thus, it has a heavy maritime traffic, transmitting about 50.000 vessels per year where one-fifth carry dangerous and hazardous cargo. Besides vessel traffic, it has a distinguished geometry and hydrodynamics which make shipping more difficult. In the past, several large oil spill accidents occurred and resulted in damages to the marine ecosystem and socio-economics life in Istanbul metropolitan city. In this study, we performed a 3D hydrodynamic model and coupled it with a particle tracking model to simulate oil spill trajectories. The simulations were carried for two types of oil representing different characteristics as light fuel oil (API 35) and heavy crude oil (API 12). Simulation results reveal that an oil spill event that would take place in the northern Bosphorus could affect coasts along both sides of the Bosphorus and damage water quality, ecosystem, and coastal structures.

Keywords: Bosphorus, oil spill modeling, hydrodynamics

1. Giriş

Petrol tankeri kazaları hem sucul yaşam hem de kıyı topluluklarının sosyo-ekonomik yaşamı üzerinde olumsuz sonuçları dolayısıyla en riskli ve tehlikeli kirlenici kaynakları arasında yer almaktadır. Çevresel restorasyonun uzun yıllar sürebileceği ve etkilenen bölgelerde sosyo-ekonomik faaliyetlerin ciddi oranda olumsuz etkileneceği göz önünde bulundurulduğunda, petrol kirliliği oluşumunu ve olumsuz etkilerini en aza indirecek stratejiler geliştirmek büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, acil müdahale planları, kaza anında etkin müdahale (petrol akışının ve yayılımının kontrol altına alınması ve temizlenmesi) yapılması açısından son derece önemlidir (Fingas, 2016).

Sayısal modeller, petrolün bozunma süreçleri ve yayılımını tahmin ederek karar verici makamların müdahale planları için önemli bir bilgi kaynağı sağlamaktadır. Petrol kirliliği yayılımının tahmini için çeşitli farklı modeller (GNOME, OILMAP, OSCAR, SIMAP, MEDSLIK, Delft3D-PART, vb.) kullanılmaktadır. Bu modeller çevresel koşulları (akıntılar, rüzgâr, dalgalar, sıcaklık vb.) ve dökülen ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini kullanarak, petrolün yayılımını ve bozunumunu tahmin ederler. Bu modeller petrolün fiziksel ve kimyasal davranışları ile ilgili bazı kabullere dayandığı için tahminlerde bazı belirsizlikler söz konusudur. Aynı zamanda girdi olarak kullanılan veriler de tahminlerdeki belirsizliğin bir diğer nedenini oluşturmaktadır. Bu belirsizlik problemiyle başa çıkabilmek için probabilistik veya stokastik yaklaşımlar kullanılabilmektedir. Stokastik veya probabilistik yaklaşımlar daha çok planlama çalışmalarında kullanılmaktadır. Belirli bir olay için ise yaşanan olaya ait petrol damlacıklarının yörüngeleri tahmin edilerek, petrol yayılımının nasıl engellenebileceği/giderilebileceği konusunda yardımcı bilgi sağlanmaktadır. Bu metod literatürde deterministik yaklaşım olarak anılmaktadır (Abascal vd., 2010; Goldman vd., 2015; Al Shami vd., 2017; Nelson ve Grubestic, 2017; Amir-Heidari vd., 2019; Amir-Heidari ve Raie, 2018; Chiri vd., 2020).

İstanbul Boğazı, Karadeniz'i Marmara Denizi'ne dolayısıyla Akdeniz'e bağlayan dar ve uzun bir su yoludur. Karadeniz ülkelerini açık denizlere bağlayan tek deniz yolu olması nedeniyle yoğun bir deniz trafiğine sahiptir. Resmi kayıtlara göre (Türkiye Cumhuriyeti Denizcilik Genel Müdürlüğü, 2017) İstanbul Boğazı'ndan yılda 50.000 gemi geçmektedir ve bunların beşte biri tehlikeli yük taşıyan tankerlerdir (Şekil 1). İstanbul Boğazı'nın karmaşık geometrisi ve hidrodinamik koşulları, yoğun deniz trafiği Boğaz'da gemilerin seyirini zorlaştırmaktadır. Boğaz'da meydana gelen ortalama deniz kazası sayısı 2004-2014 yılları arasında 24 iken son beş yılda 16'ya düşmüştür. Son yıllarda kaza sayısı azalsa da geçmişte meydana gelen kazalar neticesinde deniz ekosistemine ciddi zararlar veren beş büyük petrol sızıntısı yaşanmıştır. M/T Independenta tankeri ile M/V Evriali gemisi arasında gerçekleşen çarpışma, Boğaz'daki en büyük ve dünyada ise en büyük 13. kazadır. Yaklaşık 93.800 ton ham petrol Boğaz'a dökülerek haftalarca yanmış ve sucul yaşama zarar vermiştir, bunun yanı sıra kaza 43 mürettebatın da ölümüne neden olmuştur (Öztürk ve diğerleri 2001; Birpınar ve diğerleri, 2009). Bu tür kazalarda etkin ve doğru müdahale yapılması, olumsuz etkilerin azaltılması bakımından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Boğaz'daki mekânsal ve zamansal akıntı hızlarını elde etmek için Delft3D-Flow yazılımı kullanılarak 3 boyutlu bir hidrodinamik model yapılandırılmıştır. Elde edilen akıntı hızları, petrol yayılım modeline girdi teşkil etmiştir. Petrol yayılım modelinin çıktıları kullanılarak deterministik bir yaklaşımla

Boğaz'da meydana gelecek bir kaza sonucu sızan petrolün nasıl yayılım göstereceği hesaplanmıştır. Petrol yayılımı iki petrol tipi için modellenmiştir, böylelikle petrol özelliklerinin yayılım üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

2. Veri ve Çalışma Alanı

İstanbul Boğazı, Karadeniz girişinde yaklaşık 3,6 km, Marmara Denizi çıkışında ise 3,2 km genişliğe sahiptir. En dar kısımda ise 0,7 km genişliğindedir. Boğaz'da su derinliği 30 m ile 110 m arasında değişmektedir. Boğaz, kanal şeklindeki ve genişliğindeki ani değişikliklerin yanı sıra karmaşık batimetrisi ile de kendine özgü geometrik özellikler sergilemektedir. Boğaz'daki ilk dönüş 3,6 km genişliği ile Boğaz'ın en geniş bölgesi olan Çayırbaşı ile Beykoz limanı arasındadır. İkinci dönüş Yeniköy ve İncirköy kıyıları arasında yer alır ve yaklaşık 2,2 km genişliğe sahiptir. Bu dönüşten sonra ise Boğaz daralır ve Kandilli ile Bebek arasında keskin bir dönüşle en dar kesite ulaşır. Boğaz, Marmara Denizi çıkışına yakın ani bir açıklıkla sona ermektedir (Şekil 2).

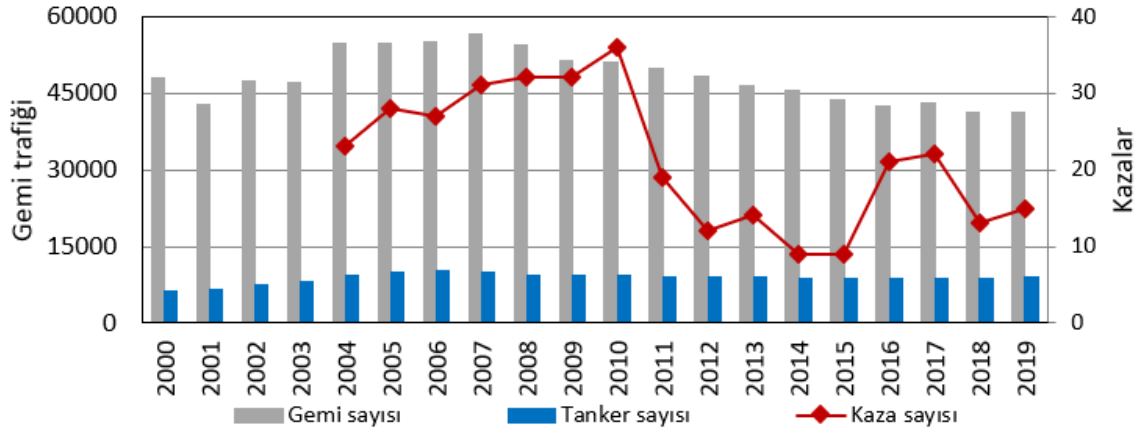
İstanbul Boğazı iki tabakalı bir akım yapısına sahiptir. Alt tabakada, yüksek yoğunluklu ve sıcak Akdeniz suları Karadeniz'e taşınırken, üst tabakada ise daha düşük yoğunluklu ve soğuk Karadeniz suları Marmara Denizi'ne ve oradan Ege Denizi'ne taşınmaktadır. Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki yaklaşık 20 cm olan su seviyesi farkı, güneye doğru akan bir üst tabaka akıntısı oluşumuna sebebiyet vermektedir. Kuzeye doğru olan alt tabaka akıntısı ise Marmara Denizi'ndeki su yoğunluğunun daha yüksek olmasından (büyük ölçüde yüksek tuzluluk nedeniyle) kaynaklanmaktadır. Üst katmanın tuzluluğu Boğaz'ın Karadeniz girişinde 18 ppt iken, Marmara Denizi çıkışında alt ve üst tabaka arasında meydana gelen karışmadan ötürü 23-25 ppt değerlerine çıkmaktadır. Alt tabaka tuzluluğu Marmara Denizi girişinde yaklaşık 38 ppt iken Karadeniz çıkışında 33 ppt değerine düşmektedir. Boğaz'daki iki tabakalı akım yapısı, şiddetli meteorolojik koşullar altında değişkenlik gösterebilmektedir. Genellikle Ekim ve Nisan ayları arasında meydana gelen şiddetli güneyli rüzgarlar üst tabaka akımını yavaşlatmakta, bloke etmekte hatta tersine çevirebilmektedir. Aynı dönemlerde meydana gelen şiddetli kuzeyden esen rüzgarlar ise üst tabaka akımını hızlandırmaktadır. Rüzgârın esme süresi ve şiddetine göre alt tabaka akımı bloke olabilmekte hatta akım yönü tersine dönebilmektedir (Oğuz vd. 1990; Özsoy vd., 1998; Oğuz, 2005; Stanev vd., 2017; Erdik vd., 2018; Erdik vd., 2019; Saçu vd., 2020a; Saçu vd., 2020b).

3. Yöntem

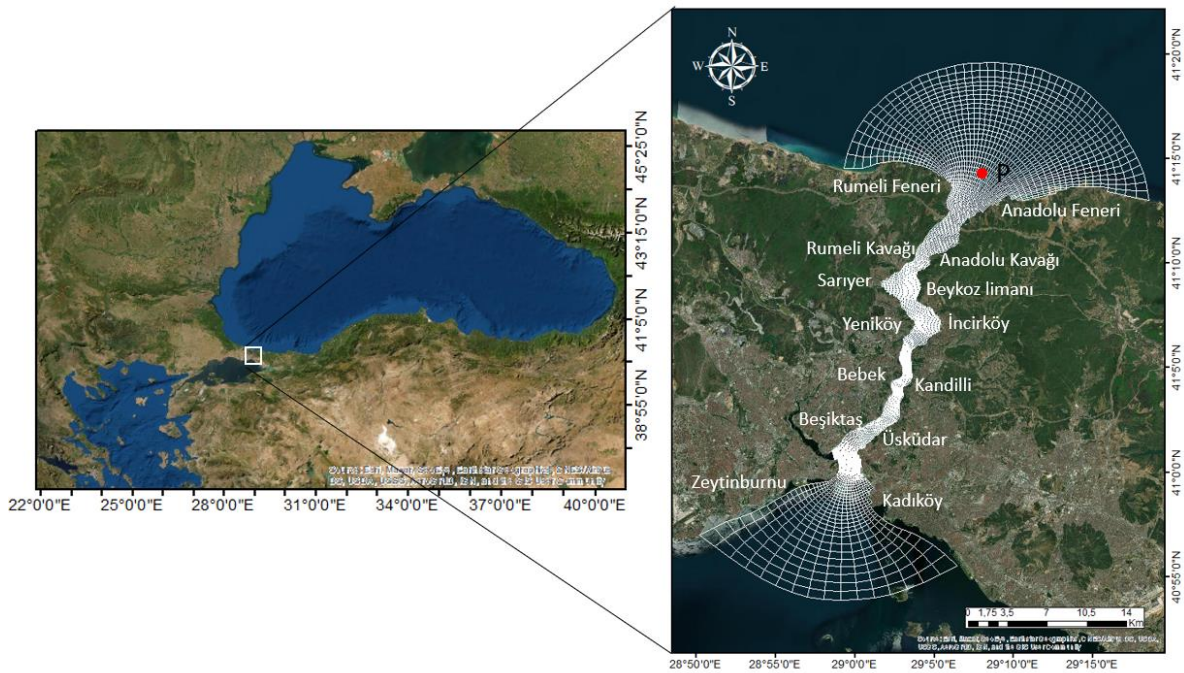
3.1. Hidrodinamik model

Bu çalışmada, hidrodinamik simülasyonlar Delft3D-Flow yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delft3D-Flow nehirler, halicler, göller, lagünler, sığ denizler ve kıyı bölgeleri için 3-boyutlu çözümler sağlamak üzere geliştirilmiştir. Model sıkıştırılmaz serbest yüzeysel akımlar için 3 boyutlu Navier Stokes denklemlerinden türetilen sığ su denklemlerini çözmektedir (Deltares, 2013a).

Model alanı, 40.85-41.30 Kuzey enlemleri ve 28.08-29.31 Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Model hesap ağı yatayda eğrisel yapıda olup 7317 elemandan oluşmaktadır. Yatayda hesap ağı çözünürlüğü Boğaz içerisinde 40 m ile 100 m arasında değişmektedir. Hesap ağı düşeyde z-grid yapısında olup 20 tabakadan oluşmaktadır. (Şekil 2). Modelde açık sınır koşulu için, saatlik su seviyesi ölçümleri ve aylık tuzluluk ve sıcaklık ölçümleri tanımlanmıştır. Meteorolojik girdi olarak ise saatlik rüzgâr ölçümleri kullanılmıştır (Saçu vd., 2021).



Şekil 1. İstanbul Boğazı'ndan yıllara göre geçen gemi trafiği sayısı ve gerçekleşen kaza sayıları (kırmızı çizgi). Gri sütunlar toplam gemi sayısını, maviler ise tanker sayısını göstermektedir (Türkiye Cumhuriyeti Denizcilik Genel Müdürlüğü, 2017).



Şekil 2: İstanbul Boğazı'nın plan görüntüsü. Yakınlaştırılmış görüntüdeki beyaz çizgiler hesaplama elemanlarını, kırmızı nokta ise petrol yayılımı simülasyonlarında kullanılan kaza noktasını göstermektedir.

3.2. Petrol yayılım modeli

Petrol yayılımını simüle edebilmek amacıyla Delft3D-Part modeli kullanılmıştır. Model, petrol damlacıklarının taşınımını ve buharlaşma, dispersiyon, emülsifikasyon, kıyıya veya deniz tabanına yapışma gibi bozulma süreçlerini (weathering process) hesaplar (Deltares, 2013b). Model Lagrange parçacık izleme (Lagrangian particle tracking) metodunu uygulamaktadır. Petrol damlacıkları küçük parçacıklara ayrılarak bunların hareketi ve davranışı hesaplanmaktadır. Simülasyonlar toplamda 5000 ton petrolün beş saat boyunca sürekli olarak denize verildiği (yayıldığı) bir kaza senaryosu için gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda 24 saatlik bir süre boyunca parçacık yörüngeleri ve bozulma süreçleri her 10 dakikada bir hesaplanmıştır. Dökülen petrol miktarının kaç adet Lagrange parçacığına ayrılacağını belirlemek için hassasiyet çalışması yapılmıştır. Petrol miktarı farklı sayılarda parçacıklara bölünerek (10, 100, 500 ve 1000 adet) simülasyonlar çalıştırılmıştır. Çıkan sonuçlar neticesinde 100 adetten fazla sayıda parçacık kullanımının yörünge ve bozulma süreçlerinde herhangi bir farklılığa yol açmadığı saptanmıştır. Bu nedenle hesaplamalarda dökülen petrolün 100 adet parçacığa bölünmesinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır.

Dökülen petrol miktarı 100 Lagrange parçacığına ayrılmıştır.

Parçacık sayısının belirlenmesi hassasiyet çalışması sonucunda kararlaştırılmıştır. Farklı sayılarda parçacıklar kullanılarak (10, 100, 500 ve 1000 gibi) yapılan simülasyonlarda 100'den fazla sayıda parçacık kullanımının sonuçlarda herhangi bir farklılığa yol açmadığı görülmüştür.

3.3. Senaryolar

Hidrodinamik model, Boğaz'ın sürekli olarak iki katmanlı bir akış yapısına sahip olduğu Temmuz 2005 ayı için çalıştırılmıştır. Modelin akıntı hızları, Boğaz'ın güney çıkışına yakın bir noktada ölçülen saatlik akıntı hızları ile kalibre edilmiştir (Saçu vd., 2021). Temmuz dönemindeki akım yapısı, bloke akım, tek yönlü akım durumlarının görüldüğü kış aylarına göre daha kararlı bir yapı sergilemektedir. Petrol yayılımı büyük ölçüde üst tabakadaki yüzeye yakın akıntı hızlarından etkilenecektir. Dolayısıyla yüzeye yakın akıntı hızlarında meydana gelecek değişikliklerin petrol yayılımını önemli ölçüde etkilemesi beklenir. Bu nedenle yüzey akıntı hızlarında değişkenliğin görece daha az olduğu ve tipik iki tabakalı akım yapısının görüldüğü temmuz ayındaki bir gün için petrol yayılımı senaryoları çalıştırılmıştır. Şekil 3'te senaryoların çalıştırılacağı gün için, akıntı hızı vektörleri verilmiştir. Boğaz'ın kuzey girişi yakınlarında hız 0,25 m/s iken güney çıkışta bu hız

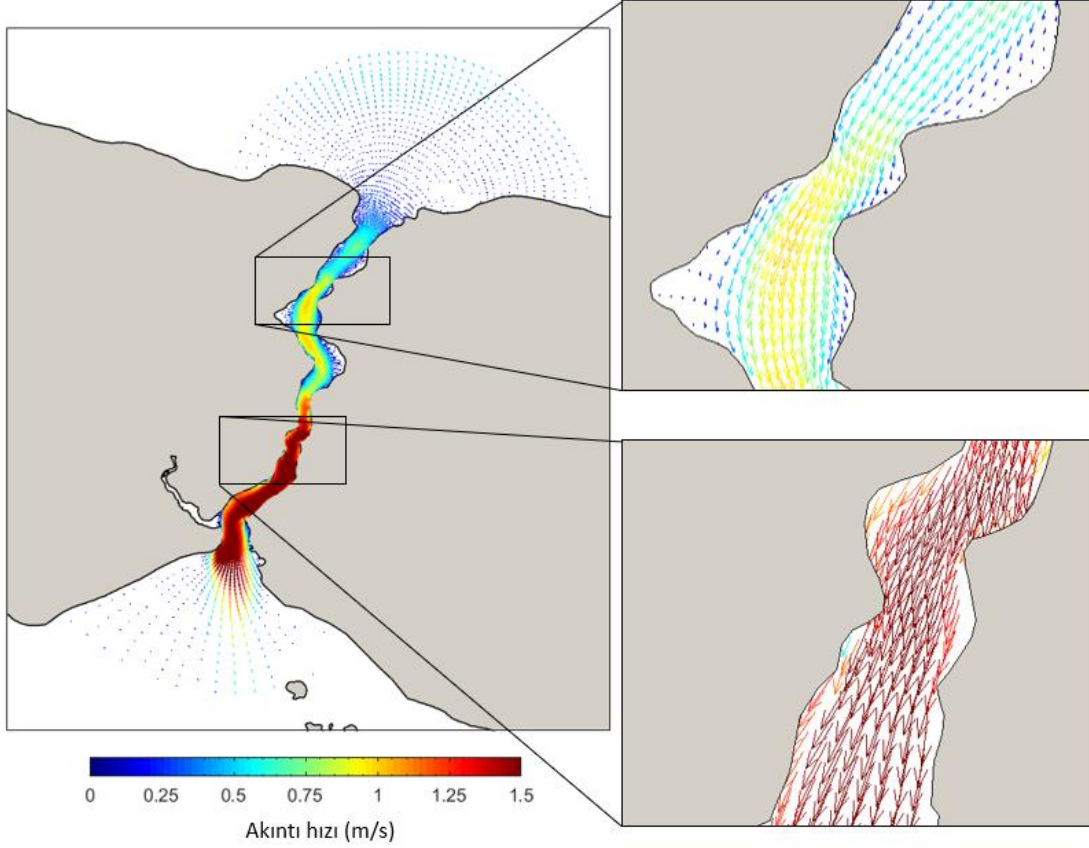
Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

1,60 m/s değerine kadar yükselmektedir. Bu tarihteki rüzgâr ise ortalama 6 m/s hızla kuzeyden esmektedir. Akıntı hızlarının oldukça yüksek olması, rüzgârın petrol yayılımı üzerindeki etkisini önemli derecede düşürmektedir.

Petrol yayılımı simülasyonlarında kullanılmak üzere iki farklı tip petrol seçilmiştir. Bunlar; (a) hafif petrol (light crude oil, API 35), (b) ağır petroldür (heavy fuel oil, API 12). Ham petrolün viskozitesi 50 mPa.s olup, buharlaşma oranı ise 0,4 L/gün'dür. Ağır petrolün

ise akışkanlığı az olup viskozitesi 1500 mPa.s, buharlaşma oranı ise 0,05 L/gün'dür. Ağır petrol için ayrıca, modelin kıyı ve deniz tabanına yapışabilme özelliği aktif hale getirilmiştir.

Kaza noktası (yeri) olarak Boğaz'ın kuzey çıkışına yakın bir nokta seçilmiştir (Şekil 2'de kırmızı nokta ile gösterilen yer), böylelikle petrolün akıntı etkisiyle Boğaz boyunca gerçekleşecek yayılımı belirlenebilecektir.



Şekil 3: Hidrodinamik model akıntı hızları.

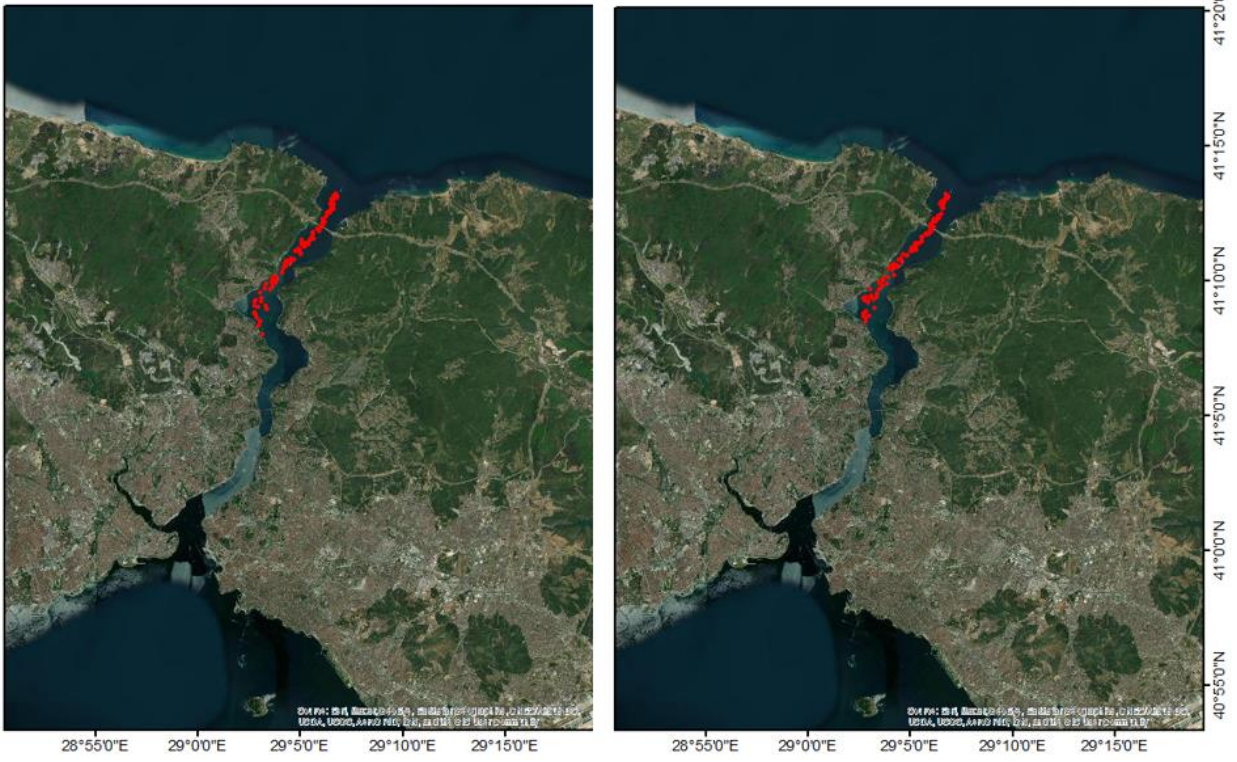
4. Sonuçlar

İstanbul Boğazı'nda meydana gelebilecek bir petrol kirliliği 3 boyutlu hidrodinamik modelden elde edilen akıntı hızlarına göre simüle edilmiş ve su yüzeyine dökülen petrolün 24 saatlik bir süre boyunca yapacağı hareket gözlemlenmiştir. Sonuçlar kazadan 6, 12, 18 ve 24 saat sonraki petrol damlacıklarının yayılımını vermektedir (Şekil 4, 5, 6, ve 7).

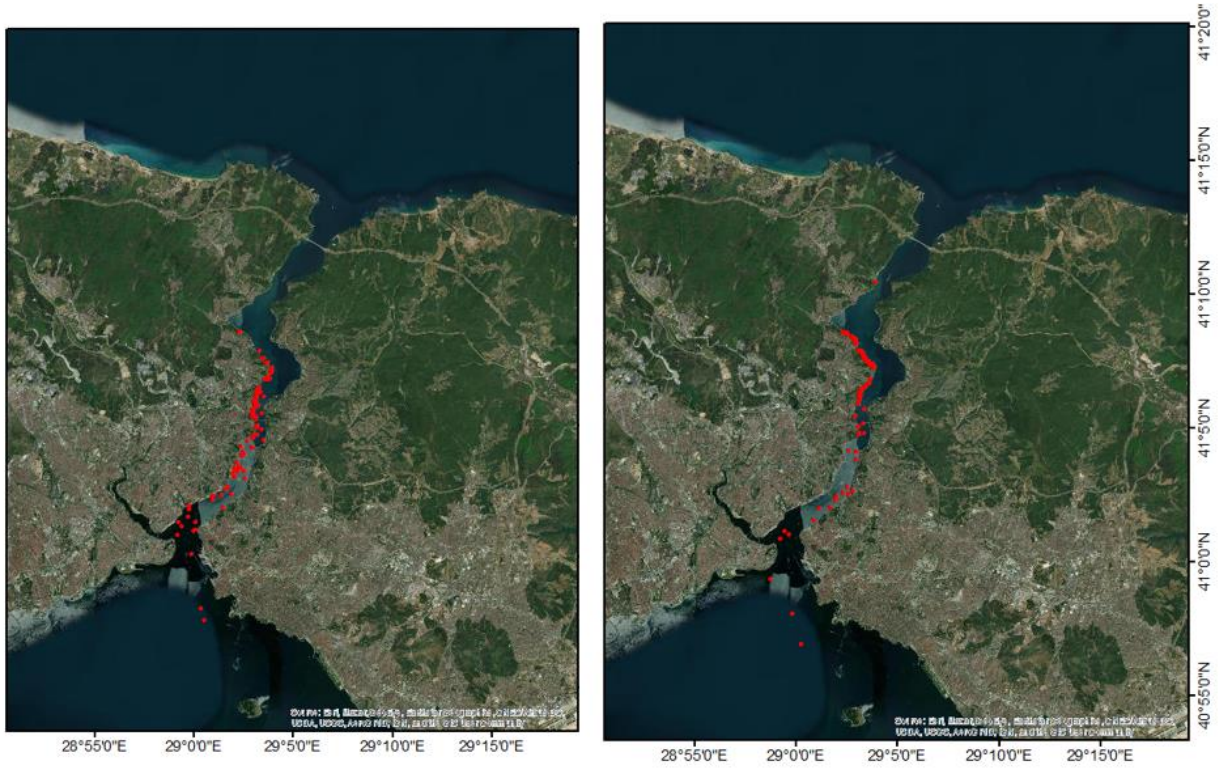
Simülasyon sonuçlarına göre, 6 saat sonunda petrol damlacıkları Boğaz'ın kuzey girişinden güneye doğru yayılım göstermiştir. Her iki petrol tipinde de kirlilik batı kıyıları boyunca yayılım gösterip Sarıyer kıyılarına kadar ulaşmıştır (Şekil 4). Boğaz'ın güney kısımlarında kuzeye göre akıntı hızlarının daha yüksek olması yayılımın hız kazanmasına sebebiyet verecektir. Bu nedenle ilk 6 saatlik sürede bariyerlerin kullanılması, kirliliğin uzun bir kıyı şeridi boyunca yayılmasını engellemek açısından oldukça önemlidir. Kazadan 12 saat sonra, kirlilik Boğaz'ın güney çıkışına kadar varmaktadır. Hafif petrol olması durumunda batı kıyıları kirlenmeye devam etmektedir, ağır petrolda ise doğu kıyıları da kirliliğe maruz kalmaktadır. Ağır petrolün yapışkanlık özelliğinin fazla olması nedeniyle, petrol damlacıklarının bir kısmı Sarıyer kıyılarında kalmaya devam etmiştir (Şekil 5). Kazadan 18 saat sonra, hafif petrolün büyük bir kısmı Boğaz'ın güney çıkışına varmış ve Marmara Denizi'ne doğru yayılım göstermiştir. Ağır

petrol ise kıyılara yapışma özelliği nedeniyle daha az yayılım göstermiştir. Kirliliğin önemli bir kısmı Sarıyer ve Bebek kıyıları arasında kalmıştır. Az miktarda kirlilik ise Üsküdar ve Beşiktaş kıyılarına ulaşmıştır. Geri kalan damlacıklar ise Marmara Denizi'ne doğru ilerlemiştir. Kazadan 24 saat sonra hafif petrolün tamamına yakını Marmara Denizi'ne yayılmıştır. Ağır petrolün ise önemli bir miktarı kıyılarda kalmaya devam etmiş, geri kalan az bir kısmı da Marmara Denizi'ne ulaşmıştır.

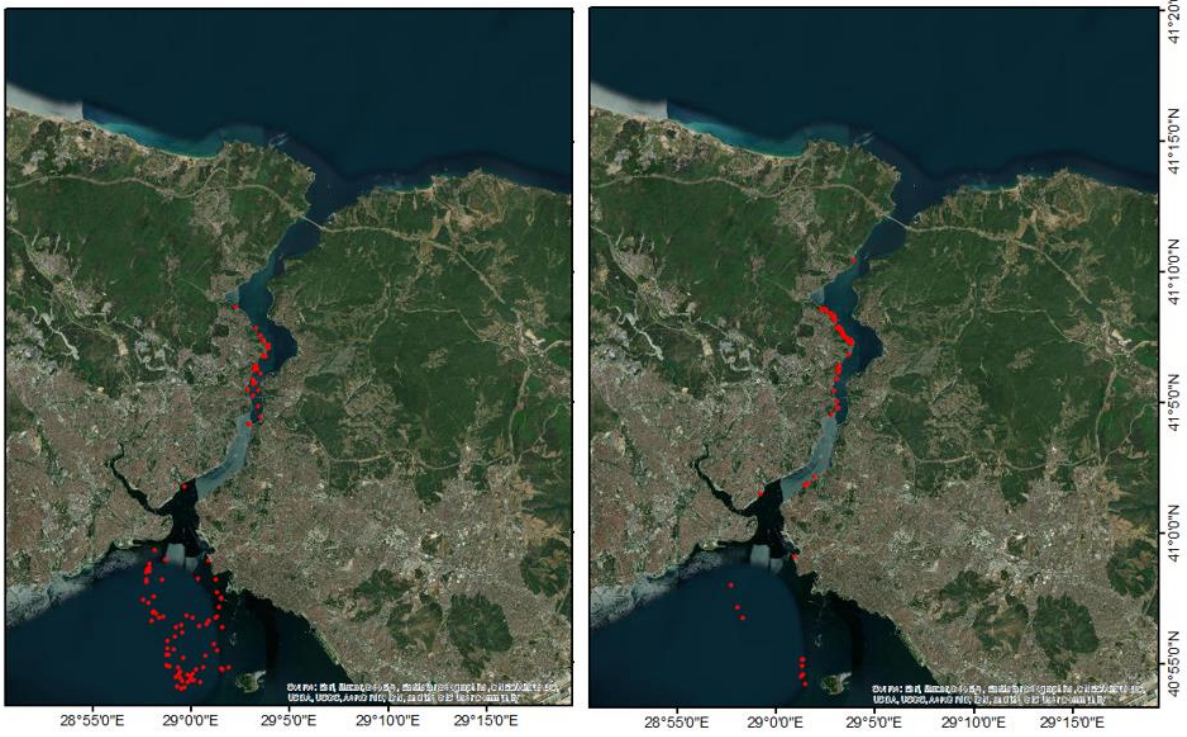
Simülasyonlardan elde edilen bozulma süreçleri Şekil 8'de verilmiştir. İki petrol için oldukça farklı fiziksel özelliklerin kullanılması bozulma süreçlerinde de büyük farklılıklar görülmesine yol açmıştır. Kazadan 6 saat sonra bütün petrolün dökülmesiyle beraber yüzen petrol toplam petrol miktarına eşit olmuştur. Sonrasında yüzen petrol miktarı iki tip için de azalmış ve 24 saatin sonunda yaklaşık %0 değerine düşmüştür. Hafif petrolda dökülen kirliliğin yaklaşık %20 kadarı buharlaşmıştır. Kalan kısmı ise model alanının dışına (Marmara Denizi'ne) yayılmıştır. Bu nedenle Şekil 8a'da model alanı içerisindeki toplam kirlilik yüzdesi buharlaşmadan bağımsız olarak azalmaya devam etmiştir. Ağır petrolda ise düşük buharlaşma özelliği nedeniyle buharlaşma miktarı 24 saatin sonunda ancak %2 gibi oldukça küçük bir değere ulaşabilmiştir. Ağır petrolda dökülen petrolün büyük bir kısmı (yaklaşık %80) kıyılara yapışmıştır, yaklaşık %20 kadarı da Marmara Denizi'ne ulaşmıştır.



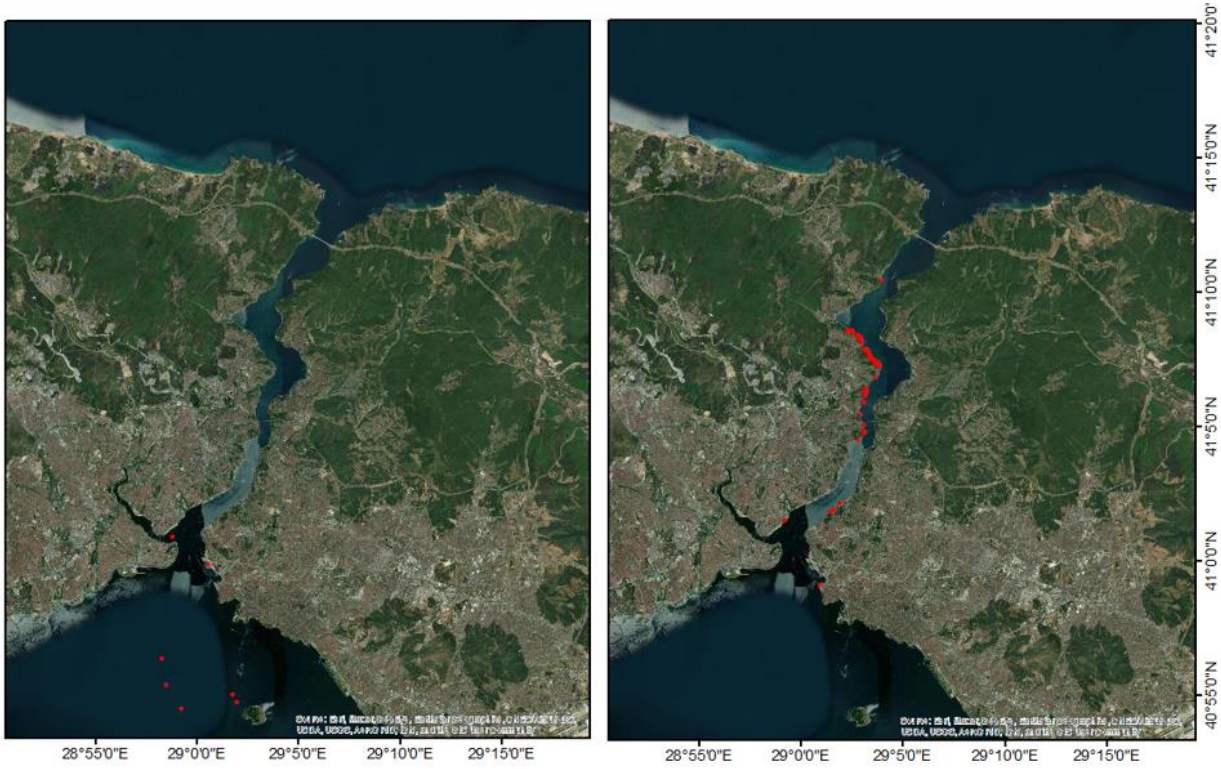
Şekil 4: Kaza başlangıcından 6 saat sonra hafif petrol (sol) ve ağır petrol (sağ) damlacıklarının yayılımı.



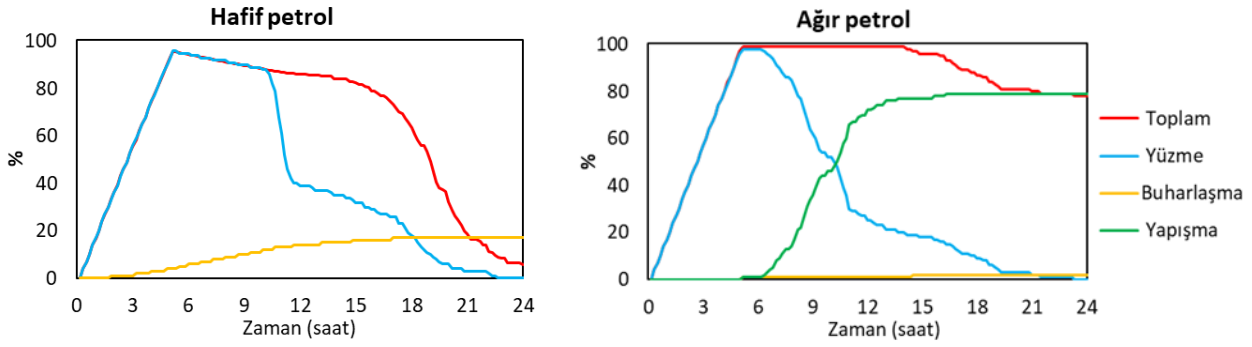
Şekil 5: Kaza başlangıcından 12 saat sonra hafif petrol (sol) ve ağır petrol (sağ) damlacıklarının yayılımı.



Şekil 6: Kaza başlangıcından 18 saat sonra hafif petrol (sol) ve ağır petrol (sağ) damlacıklarının yayılımı.



Şekil 7: Kaza başlangıcından 24 saat sonra hafif petrol (sol) ve ağır petrol (sağ) damlacıklarının yayılımı.



Şekil 8: Simülasyonlarda kullanılan hafif petrolün (sol) ve ağır petrolün (b) bozulma süreçlerinin zamanla değişimi. Değerler toplam kütle yüzdesi olarak verilmiştir. Kırmızı çizgi model alanı içerisindeki toplam kütle, mavi çizgi yüzen kütle, sarı çizgi buharlaşma kütle ve yeşil çizgi yapışan kütle temsil etmektedir.

5. Değerlendirme

Bu çalışmada, olası bir gemi kazasında dökülen petrolün İstanbul Boğazı boyunca nasıl bir yayılım gösterebileceği incelenmiştir. Bu amaçla, Boğaz'ın 3 boyutlu bir sayısal hidrodinamik modeli kurulmuştur. Bu modelin çıktıları petrol yayılımını simüle etmek amacıyla bir petrol yayılım modeline aktarılmış ve petrol parçacıklarının yayımları ve bozulma süreçleri simüle edilmiştir. Bunun için farklı özelliklerde iki tip petrol kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, en çok batı kıyıları kirliliğe maruz kalmaktadır. Kazanın başlangıcından sonraki 6 saat içerisinde önlemlerin alınması kirliliğin yayılımını önlemek açısından önemlidir. Yayılım önlenmediği takdirde hafif petrolün büyük bir kısmı Marmara Denizi'ne doğru yayılacaktır. Ağır petrolde ise kirliliğin büyük bir kısmı (%70) Sarıyer ve Bebek arasındaki kıyı şeridinde yapışacak, kalan miktarın ise bir kısmı (%20) Marmara Denizi'ne ulaşacaktır. Bu çalışmanın sonuçları tekil bir senaryo için elde edilmiştir, dolayısıyla meydana gelecek bir kazada petrolün yayılımı daha farklı olabilir. Bunun için çalışmadaki veriler uygun biçimde güncellenerek herhangi bir kaza anında petrolün Boğaz boyunca yayılımı tahmin edilebilir ve böylelikle etkin bir müdahale için alınacak tedbirler daha iyi ve doğru biçimde planlanabilir.

6. Teşekkür ve Bilgi

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

7. Kaynaklar

- Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., & Liste, M. (2010). Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2099-2110.
- Akten, N. (2004). The Bosphorus: Growth of oil shipping and marine casualties. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 10(3), 209-232.
- Al Shami, A., Harik, G., Alameddine, I., Bruschi, D., Garcia, D. A., & El-Fadel, M. (2017). Risk assessment of oil spills along the Mediterranean coast: A sensitivity analysis of the choice of hazard quantification. *Science of the Total Environment*, 574, 234-245.
- Amir-Heidari, P., & Raie, M. (2018). Probabilistic risk assessment of oil spill from offshore oil wells in Persian Gulf. *Marine pollution bulletin*, 136, 291-299.

- Amir-Heidari, P., Arneborg, L., Lindgren, J. F., Lindhe, A., Rosén, L., Raie, M., ... & Hassellöv, I. M. (2019). A state-of-the-art model for spatial and stochastic oil spill risk assessment: A case study of oil spill from a shipwreck. *Environment international*, 126, 309-320.
- Birpınar, M. E., Talu, G. F., & Gönençgil, B. (2009). Environmental effects of maritime traffic on the Istanbul Strait. *Environmental monitoring and assessment*, 152(1), 13-23.
- Chiri, H., Abascal, A. J., & Castanedo, S. (2020). Deep oil spill hazard assessment based on spatio-temporal met-ocean patterns. *Marine pollution bulletin*, 154, 111123.
- Deltares, D. (2013a). *Delft3D-FLOW user manual*.
- Deltares, D. (2013b). *Delft3D-PART user manual*.
- Erdik, T., Şen, O., & Öztürk, İ. (2019). 3D numerical modeling of exchange flows in golden horn estuary. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 145(5), 04019018.
- Erdik, T., Şen, O., Erdik, J. D., & Öztürk, İ. (2018). Long-term 3D hydrodynamic modeling and water surface statistics in Marmara Sea. *Marine Geodesy*, 41(2), 126-143.
- Fingas, M. (2016). *Oil spill science and technology*. Gulf professional publishing.
- Goldman, R., Biton, E., Brokovich, E., Kark, S., & Levin, N. (2015). Oil spill contamination probability in the southeastern Levantine basin. *Marine pollution bulletin*, 91(1), 347-356.
- Nelson, J. R., & Grubestic, T. H. (2017). A repeated sampling method for oil spill impact uncertainty and interpolation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 420-430.
- Oguz, T. (2005). Hydraulic adjustments of the Bosphorus exchange flow. *Geophysical research letters*, 32(6).
- Oguz, T., Özsoy, E., Latif, M. A., Sur, H. I., & Ünlüata, Ü. (1990). Modeling of hydraulically controlled exchange flow in the Bosphorus Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 20(7), 945-965.
- Ozsoy, E., Latif, M. A., Besiktepe, S. T., Cetin, N., Gregg, M. C., Belokopytov, V., ... & Diaconu, V. (1998). The Bosphorus Strait: exchange fluxes, currents and sea-level changes.

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

- Öztürk, B., Öztürk, A. A., & Algan, N. (2001). Ship originated pollution in the Turkish Straits System. In Proc. Int. Symp. on Regional Seas, Tudav Publication, İstanbul (pp. 86-94).
- Türkiye Cumhuriyeti Denizcilik Genel Müdürlüğü, 2017. <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr> (Erişim 6 Mayıs 2021).
- Saçu, Ş., Erdik, T., Stanev, E. V., Şen, O., Erdik, J. D., & Öztürk, İ. (2020). Hydrodynamics of Canal İstanbul and its impact in the northern Sea of Marmara under extreme conditions. *Ocean Dynamics*, 70(6), 745-758.
- Saçu, Ş., Erdik, T., & Şen, O. (2020b). Salinity Distribution at Canal İstanbul and Its Possible Impacts on the Northern Marmara Sea. *China Ocean Engineering*, 34(6), 881-888.
- Saçu, Ş., Şen, O., & Erdik, T. (2021). A stochastic assessment for oil contamination probability: A case study of the Bosphorus. *Ocean Engineering*, 231, 109064.
- Stanev, E. V., Grashorn, S., & Zhang, Y. J. (2017). Cascading ocean basins: numerical simulations of the circulation and interbasin exchange in the Azov-Black-Marmara-Mediterranean Seas system. *Ocean Dynamics*, 67(8), 1003-1025.