

MİKROPLASTİKLERİN DALGA VE AKINTI ETKİSİNDE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

R. İlayda TAN *

Alınma: 24.04.2024; düzeltme: 10.07.2024; kabul: 03.11.2024

Öz: Deniz ortamında bulunan plastik kalıntıları Dünya çapında büyük bir çevre sorunudur. Ayrıca, okyanuslardaki MP'lerin dağılımı haritalandırıldığında bu plastik atıkların çoğunun deniz ortamına karadan girdiği tahmin edilmektedir. MP'lerin nasıl taşındığının ve deniz ortamında nasıl tutulduğunun incelenmesi, kaynaklarının belirlenmesi ve deniz plastiklerinin küresel envanterinin saptanması çok önemlidir. Böylece plastik kirleticilerin azaltımı ve buna yönelik stratejilerin belirlenmesi için önemli bilgiler elde edilebilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar deniz ortamında meydana gelen hidrodinamik etkilerin yanı sıra MP'lerin farklı fiziksel özelliklerinin de (özgül kütle ve şekil vb.) taşınım üzerinde oldukça etkili olduğu tespit etmiştir. Bu durumu tarif etmek üzere partikülün şekil faktörü ya da partikül Dean sayısını (Ω_p) gibi boyutsuz parametreler kullanılmıştır. Bu derlemede, MP'lerin deniz ortamında davranışları ile tutulmasında etkili mekanizmalar ve MP taşınımında etkili olan dalga akıntı etkisi üzerine yapılan çalışmaların irdelenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikroplastik, Deniz ortamı, Dalga, Akıntı

Investigation of Microplastic Behavior under Wave and Current Effect

Abstract: Microplastics (MPs) in marine environment is a major environmental problem around the world. In addition, their distribution in the ocean is poorly mapped, and most of the plastic waste is estimated to have entered the ocean from land. Investigation of how MP particles are transported or trapped (retention) from coastal and marine sources is crucial to quantify and define the global inventory of marine plastics debris. Thus, critical information may be obtained for mitigation of MPs or policy strategies. Recent studies showed that besides, the influence of hydrodynamic conditions on MP transport behavior the physical properties of MP (specific gravity, shape etc.) are effective parameters. Particle Dean Number (Ω_p) and shape factor are used to identify MP migration. The purpose of this review was to present literature review of MPs transportation under wave and current effects, MPs retention mechanism and MPs behaviors in marine environment.

Keywords: Microplastic, Marine Environment, Wave, Current

* Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Topkapı Kampüsü, 34015, Zeytinburnu-İstanbul, Türkiye.

İletişim Yazarı: R.İlayda TAN (ritankesgin@fsm.edu.tr)

1. GİRİŞ

Dünya’da mikroplastikler (MP) deniz, göl, okyanus gibi su alanlarında çok yüksek miktarda ve oldukça sık görülmektedir. Derin denizlerden kıyı şeritlerine ve hatta arktik soğuk denizlere, mercan resiflerinde tutulmuş ya da hareket halinde, denizde birçok yerde MP’lere rastlanmaktadır (Wieczorek ve diğ., 2018; Peeken ve diğ., 2018; Lamb ve diğ. 2018). MP’ler, Kuzey Kutbu’ndan tropiklere kadar uzanan deniz ekosistemlerinde yaygın olarak bulunmaktadır (Lehtiniemi ve diğ., 2018).

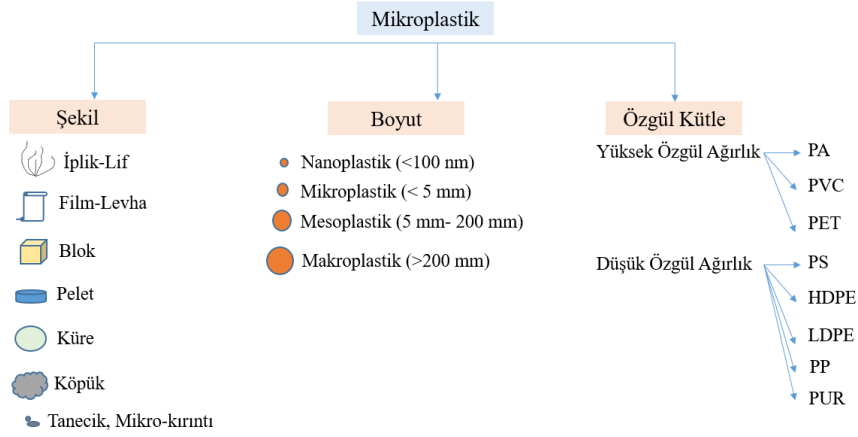
İlk olarak Thompson ve arkadaşları (2004) tarafından kullanılan “Mikroplastik” ifadesi çeşitli araştırmacılar tarafından farklı şekilde tanımlanmıştır (Gregory ve Andray, 2003; Gregory 1996; Gregory 2003). Fendall ve Sewell (2009) MP’lerin 5 mm’den küçük partiküller için kullanılabileceğini ifade etmiştir. Ancak güncel ve geçerli kabul edilen kapsamlı tanımı ile Dünya’da MP’ler, kimyasal katkı maddelerinin veya diğer maddelerin eklenebileceği katı polimerik malzemeler, en az üç boyutu 1 nm’den büyük ve 5.000 μm ’den küçük parçacıklar olarak tanımlanmaktadır (Özkor, 2022; Frias ve Nash, 2019).

Genellikle MP’lerin kimyasal özellikleri ve ham maddeleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu nedenle deniz ortamında bulunan MP’ler deniz tabanında çökelmiş, askıda ya da deniz yüzeyinde yüzer vaziyette bulunabilirler. Genellikle MP partiküllerin özgül kütleleri (ρ_p) üretim amaçlarına göre birbirinden farklılık gösterebilir. Farklı plastiklere ait özgül kütle değerleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Tabloda verilen değerlere göre deniz suyunun özgül kütlelerine (ρ_s) en yakın plastik tipi Polietilen (PE)’dir. Bunun dışında poliamid (PA), polivinil klorürdür (PVC), polietilen tereftalat (PET) gibi MP materyaller sudan daha yüksek özgül kütle ile daha kolay çökelme eğilimindedir. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polipropilen (PP), poliüretan (PUR) gibi düşük özgül kütleli plastikler deniz yüzeyinde yüzerek hareket halinde bulunabilir.

Tablo 1. Farklı plastik çeşitleri ve özgül kütleleri (Rauscher ve diğ., 2013; Auta ve diğ., 2017)

MP Adı	MP Özgül Kütleleri (ρ_p , g/cm ³)
Polietilen (PE)	0,9 – 0,99
Poliamid (PA)	1,02 – 1,15
Polivinil klorür (PVC)	1,10 – 1,42
Polietilen Tereftalat (PET)	1,38 – 1,45
Polistiren (PS)	0,95 – 1,1
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	0,92 – 0,96
Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)	0,89 – 0,93
Polipropilen (PP)	0,85 – 0,95
Polistiren Plastik Köpük (EPS)	0.022-0.05
Poliüretan (PUR)	0,92 – 0,96

Farklı şekil, boyut ve özgül kütlelere sahip MP’ler genel olarak Şekil 1’de verildiği gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 1:

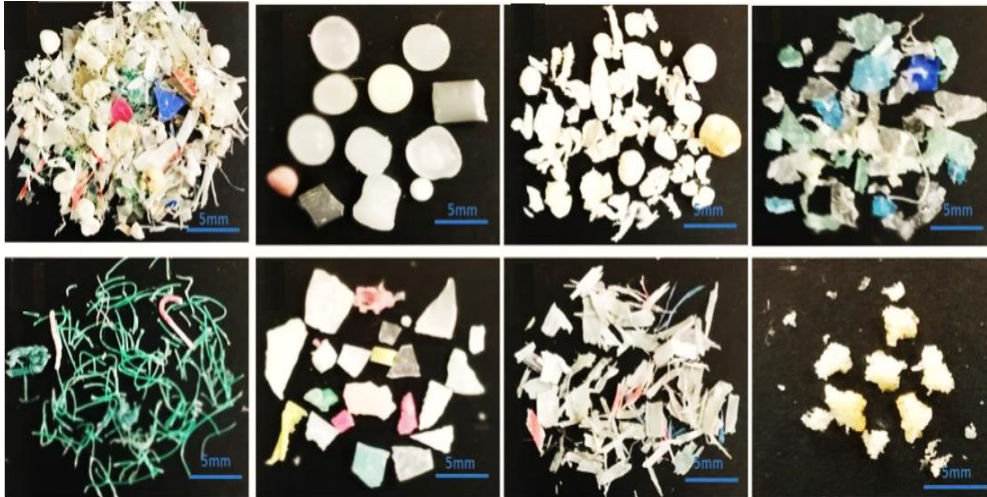
MP'lerin temel karakteristik özellikleri

Şekil 1'de görüldüğü gibi deniz ortamındaki MP boyutu genel olarak tane çapı (D_p) ile verilir. MP'ler, lifler, filmler, parçalar ve küresel şekilli boncuklar olarak çok farklı şekillere sahip olabilir (Şekil 1 ve Şekil 2). Dairesel ya da küresel şekillere sahip olmayan, düzensiz şekillere sahip MP'ler için eş değer küre çapı (EKÇ; D_n) hesaplanarak elde edilen tane çapı ile tariflenmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece MP'ler için önemli başka bir özellik olan ve Corey (1949) tarafından tariflenen çökme hızı (ω_{sp}) belirlenirken EKÇ dikkate alınmaktadır (Kowalski ve diğ., 2016; Khatmullina ve Isachenko, 2017).

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1)$$

Burada; V MP partikülün hacmi'dir.

Deniz ortamında toplanan MP'lere ait fotoğraflar Şekil 2'de verilmiştir. Deniz ortamında bulunabilen MP'ler Şekilde görüldüğü gibi folyo, elyaf, köpük, mikro boncuklar gibi birçok farklı şekil, renk, ebat, özgül ağırlık gibi özelliklere sahip olmaktadır (Klein ve diğ., 2015).



Şekil 2:

Deniz ortamından toplanan MP'lere ait görsel (Li ve diğ., 2022)

MP'lerin deniz ortamında özellikle açık denizlerde sürekli biriktiği tespit etmiştir (Thompson ve diğ., 2004; 2005). Kıyı turizmi, eğlence ve ticari amaçlı yapılan balıkçılık aktiviteleri, gemiler ve denizcilik endüstrileri (örn. su ürünleri yetiştiriciliği, petrol platformları) sonucu bir dizi plastiğin atılması ile deniz ortamına MP'lerin doğrudan girmesine (ve/veya ikincil yani uzun vadeli bozulmanın ardından oluşmasına) sebep olmaktadır. Derraik (2002) tatil bölgelerinde turizm ve eğlence faaliyetleri neticesinde MP'lerin kıyı boyunca ve plajlarda yoğun olarak bulunduğunu ifade etmiştir.

Plastik atıklar 100'ler – 1000'lerce yılda yavaş yavaş bozulduğundan ve deniz suyundaki zararlı kimyasalları kolayca biriktirdiğinden, denizlerde geniş çapta MP birikimi ve kirliliğinin artması ile MP'lerin deniz ortamında taşınımının ve birikiminin (tutulumunun) anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Andray (2011) denizlerde bulunan plastik kirliliğinin %80'inin karasal kökenli plastik atıklardan meydana geldiğini tespit etmiştir.

Bu çalışmada deniz ortamında giderek artan önemli bir kirletici yükü olan MP'lerin dalga ve akıntı etkisinde taşınım mekanizmasının anlaşılması için literatürde yapılan son yıllardaki deneysel ve saha çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca MP'lerin taşınım neticesinde deniz ortamında tutulmasında önemli rol oynayan engeller (resif, yosun vb. betik yapılar) üzerinde yapılan farklı çalışmalar da incelenmiştir. MP taşınımının dalga etkisi altında taşınımını araştıran birçok çalışma akıntı etkisini de aynı anda dikkate almadığı (Kerpen ve diğ., 2020; Guler ve diğ., 2022; Larsen ve diğ., 2023 vb.) gibi akıntı etkisi altında MP taşınım mekanizmasını ortaya koyan birçok deneysel çalışma da dalga etkisini göz ardı etmiştir (de Smith, 2021). Buna göre MP'lerin deniz ortamında dalga ve akıntı etkisinde taşınımı ve bu hareketin son bulunduğu noktada tutulması ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların önemli sonuçları, eksiklikleri ve bu alanda yapılması önem taşıyan ancak literatürde mevcut olmayan kritik noktaları ortaya konulmuştur.

2. MİKROPLASTİK KAYNAKLARI, TAŞINIM MEKANİZMASI ve TUTULMA DAVRANIŞI

Thompson (2006) kıyı ve deniz ortamında bulunan birçok partikülün kıyıya açık denizden de taşındığını belirtmiştir. Ancak Jambeck ve diğ. (2015) deniz ortamında bulunan büyük MP kirliliğinin karadan kaynaklandığını ifade etmiştir. Andray (2011) ise deniz ortamında bulunan MP'lerin çoğunlukla balıkçı ağlarından kaynaklandığını söylemiştir. Schmidt ve diğ. (2017) nehir ile birlikte deniz ortamına taşınan plastiğin toplam MP kirlilik yükünün %80 ile %94'ü arasında olduğunu belirtmiştir. Özkor (2022) deniz ortamında da bulunabilecek MP kirletici kaynakları ve giriş noktalarını Tablo 2'de özetlemiştir.

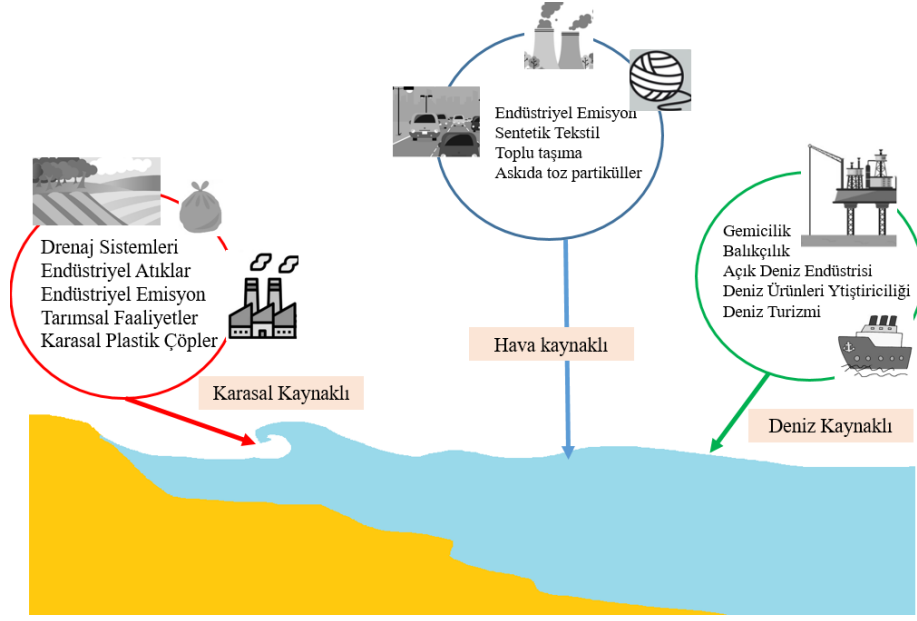
Tablo 2. MP'lerin kaynakları ve giriş noktaları (Özkor, 2022)

Kategori	Kaynak Sektör	Açıklama	Giriş Noktaları
Üreticiler/ Dönüştürücüler	Plastik üreticileri, imalatçıları ve geri dönüştürücüler	Pelet ve parçalar	Nehirler, Kıyı şeridi
Sektörel Tüketiciler	Tarım/Ziraat	Sera örtüleri, saksıları, besin prillleri borular,	Nehirler, Kıyı şeridi
	Balıkçılık	Balıkçılık malzemeleri, paketleme	Nehirler, Kıyı şeridi, Deniz
	Su ürünleri yetiştiriciliği	Şamandıralar, halatlar, ağlar, PVC borular	Nehirler, Kıyı şeridi, deniz
	inşaat	Genişletilmiş polistiren, paketleme	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer
	Karasal toplu taşıma	Peletler, lastikler, lastik tozu	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer

	Denizcilik/ Açık deniz endüstrisi	Boyalar, borular, giysiler, çeşitli, plastik püskürtme, kargo(yük)	Nehirler, deniz
	Turizm sektörü	Tüketim malları, paketlenme, mikro boncuklar, tekstil elyafları	Nehirler, kıyı şeridi, deniz
	Tekstil endüstrisi	Elyaflar	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer
	Spor	Sentetik çim	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer
Bireysel tüketiciler	Yiyecek içecek tek kullanımlık ambalajlama	Konteynerler, plastik torbalar, şişeler, kapaklar, bardaklar, tabaklar, pipetler, kaşıklar vb.	Nehirler ve kıyı şeridi
Makyaj Malzemeleri & Kişisel Bakım Ürünleri	Mikro boncuklar, paketlenme, diş fırçaları vb.	Nehirler, kıyı şeridi, deniz	Nehirler, Kıyı şeridi, deniz
Tekstil ve Giyim	Lifler	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer, deniz	Nehirler, Kıyı şeridi, deniz
Atık Yönetimi	Katı atık	Yönetilmeyen veya kötü yönetilen atık bertarafı	Nehirler, kıyı şeridi, atmosfer
Su ve Atık Su	Mikro boncuklar, parçalar, lifler	Nehirler ve kıyı şeridi	Nehirler, kıyı şeridi

Tabloda görüldüğü gibi nehirler mikro boyuttaki plastikleri karalardan denizlere taşıyan en önemli su kaynaklarıdır. Ayrıca MP'ler yavaş akan nehir yatakları veya suyun akış hızının kesildiği kısımlarda dip tortullara çökerek birikmektedir (Adegok ve diğ., 2023). Nehir yataklarında bu şekilde MP birikmesinin bir nedeni de atık suların arıtılması sırasında çok küçük partiküller halinde bulunan MP'lerin arıtma esnasında tutulamamasıdır. Hatta deşarj sonrası bu MP'ler yüzeysel sulara karışıp suyu ile okyanuslara kadar ilerleyebilmektedir (Citterich ve diğ., 2023). Çağlayan ve Kopuz (2020) kıyı ve nehir vadileri boyunca kontrolsüz veya kaçak boşaltım, kıyı dolgu çalışmaları, yeterli olmayan ve verimsiz atık yönetimi, kanalizasyon, sızıntı suları, kentsel ve sanayi atıksu tesisleri ve limanların da diğer önemli kaynaklar arasında olduğunu belirtmektedir.

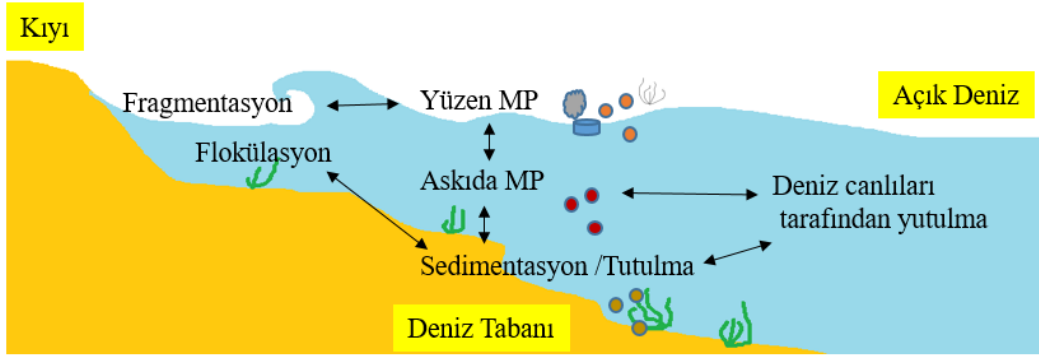
Yang ve diğ. (2022) ile Almeida ve diğ. (2023) yakın zamanda yaptıkları çalışmalarda deniz ortamına giren MP'leri oluşum kaynaklarına, oluşma sebeplerine ve kaynaktan gelen partikülün boyutu gibi farklı sınıflandırmalar ile kategorize etmek istemiştir. Bu çalışmalara benzer bir sınıflandırma Tablo 2'de verilen kaynakların konumu dikkate alınarak Şekil 3'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi denizler farklı kaynaklardan gelen MP'ler için nihai alıcı ortam olmaktadır. Bu ortam MP'lerin taşındığı, biriktiği ve/veya tutulduğu bölgeler olması açısından incelenmesi oldukça önemlidir.



Şekil 3:
Deniz ortamında bulunan MP'lerin kaynaklarının konumuna göre sınıflandırması

MP'ler birincil (doğrudan) ya da ikincil (dolaylı) üretim kaynaklı sınıflandırılabilirler. Buna göre başlangıçta küçük parçacıklar, örneğin giysilerden gelen mikro lifler, mikro boncuklar, vb. ya da başlangıçta daha büyük plastik nesnelere hava olayları, su akımları ve ultraviyole ışınlar etkisiyle degradasyona (mekanik bozulmaya) uğraması sonucu oluşan küçük parçacıklar olarak meydana gelebilir. Oldukça küçük boyutlarda deniz ortamında bulunabilen MP'ler, besin zincirini kapsayan çeşitli deniz organizmaları tarafından kolayca yutulabilmekte ve mikro boyutlarda bu parçacıklar makro boyutlarda canlıların yaşamını tehdit edebilmektedir.

Deniz ortamında MP'ler, ham madde cinsine ve özgül kütlesine göre yüzer halde ya da su içerisinde askıda halde taşınabilir (Kukulka ve diğ., 2012, 2016; Isobe ve diğ., 2014; Enders ve diğ., 2015). Birçok yönden yüzen halde bulunan MP'lerin pasif olarak hareket ettiği düşünülür. Çünkü bu tür kirleticiler daha çok deniz ya da dalga/rüzgâr etkisinin hâkim olduğu yönde ve şiddette sürüklenerek ilerler. Literatürde verilen birçok çalışmada da yüzen plastik kirleticilerin taşınım mekanizması ve deniz ortamında daha yoğunlukla bulunabildiği alanlar tespit edilmiştir (Martinez ve diğ., 2009; Howell ve diğ., 2012; Potemra, 2012; Neumann ve diğ., 2014; Mansui ve diğ., 2015; Liubartseva ve diğ., 2016). MP'lerin deniz ortamında taşınımı ve kaynaktan nihai konumuna kadar takip edebileceği yollar Şekil 4'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi MP'ler askıda katı madde (AKM), sürüntü ya da yüzen halde bulunarak hareket edebilirler. Bu partiküller deniz tabanında yer alan bentik yapılar ile tutulabildiği gibi tutulmayan MP'ler açık denizden kıyı bölgelerine kadar farklı bölgelerde kümelenmiş vaziyette yoğunlukla bulunabilirler. Bu nedenle literatürde yapılan çalışmalar genellikle MP'lerin yoğunlukla bulunabilecekleri bölgeleri tespit etmeyi ve deniz ortamında tutulan partiküllerin tutulma oranlarını ortaya koymayı amaçlamıştır.



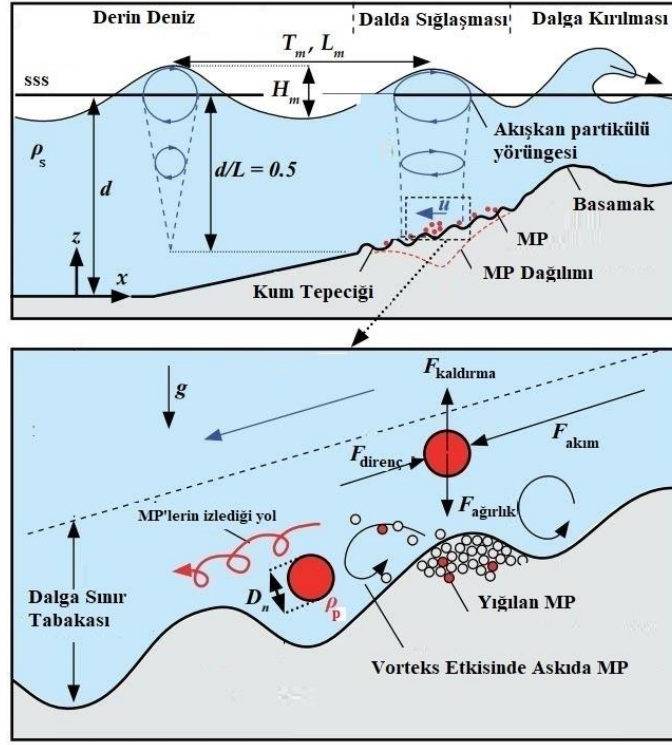
Şekil 4:

Deniz ortamında bulunan MP'lerin taşınım yolu, kaynak ve ulaştıkları nihai konumlarının şematik gösterimi (Zhang,2017'den revize edilmiştir)

Son dönemde yapılan çalışmalar da denizlerde taşınan MP'lerin gel-gitlerin gerçekleştiği düzlüklerde, su basman ormanları, resifler, yosunlar vb. yapılarda tutulduğunu tespit etmiştir (Nor ve Obbard, 2014; Weinstein ve diğ., 2016). Bu bölüm kapsamında hem MP'lerin taşınım mekanizmaları hem de deniz ortamında nasıl tutuldukları irdelenmiştir.

2.1. Mikroplastiklerin Dalga ve Akıntı Etkisinde Taşınımı

Derin sudan sığ suya doğru ilerleyen asimetrik yapıya sahip dalgalar sığlaşma ve kırılma etkilerine maruz kalarak Stokes drift etkisini meydana getirmektedir (Dean ve Dalrymple, 1984). Derin denizden (derin su) kıyıya doğru ilerleyen dalga; su derinliğinin (d), dalga boyuna (L) oranı $0,5$ 'den küçük olmaya başladığı noktadan sonra tabanı hissederek sığ su şartlarına geçer (Stokes, 1847). Şekil 5'de üstte verilen görselde derin denizden kıyıya doğru ilerleyen dalga, sığlaşma ve kırılma gibi dalga transformasyonlara uğramaktadır. Dalgaların kırılmaya uğradığı bu bölgede oluşan dalgalardan kaynaklanan yakın kıyı akıntıları, türbülanslı akım ve vorteksler deniz taban malzemesinin hareketine ve taşınımına yol açmaktadır (Nadaoka ve Kondoh, 1982). Taban malzemesinin taşınımı ise askıda ve sürüntü gibi farklı şekillerde olabilir (Horikawa, 1988). Şekil 5'de verilen alttaki görselde daha detaylı görüldüğü gibi dalga etkisinde tabanda meydana gelen hareket ile oluşan kum dalgacıkları (kum tepeleri) etrafında oluşan türbülans ve vorteks (girdap) yapıları sediment taşınımında etkili olduğu gibi MP taşınımında da oldukça etkindir. MP taşınımı ile taban malzemesi taşınımı bire bir aynı mekanizma ve fiziksel özelliklere sahip olmasa da taşınım şekilleri benzerlik göstermektedir. Buna göre bir MP'nin hareketi esnasında partikül üzerinde de etkili kuvvetler; partikülü hareket ettirmeye çalışan, kaldırma kuvveti ($F_{kaldırma}$) ile akımın kuvveti ($F_{akım}$) ve bu kuvvetlere karşı koyan sürüklenme kuvveti (F_{direnc}), partikülün su altındaki ağırlığından dolayı ağırlık kuvveti ($F_{ağırlık}$)'dir (Şekil 5).



Şekil 5:

Dalga etkisinde sığ suda MP taşınımı ve etkili kuvvetlerin şematik görünümü (Alsina, 2020'den revize edildi)

Golf ve Kuroshio gibi deniz akıntıları MP'leri içeren karasal birçok materyali deniz ortamında taşıyan akıntılardır. Rüzgâr akıntılarının hızları genellikle 0,09–0,2 m/s civarında olmasına karşın yüzen MP'ler, Golf ve Kuroshio gibi akıntılar etkisinde yaklaşık hızları 2 km/saat'i aşan değerlere ulaşarak denizde yol katedebilir (Thiel ve Gutow, 2005).

Dalga etkisinde oluşan yüzey akıntıları yüzer halde taşınan MP'lerin taşınım hızı ve taşınım güzergahı üzerinde oldukça etkindir (Breivik ve diğ., 2011; Chubarenko ve diğ., 2016). Batık halde bulunan ve dalga ile taşınan MP'lerin izlediği yol ve taşınım mekanizması yüzer hareket eden MP'lerden farklıdır. Tabanda (batmış halde) ilerleyen MP'lerin taşınım mekanizmasını Alsina ve diğ. (2020) hem yüzen hem de batmış halde hareket eden MP'leri ($D_n=4$ mm -12 mm ve $\rho_p = 0,92 - 1,983$ g/cm³) kullanarak yaptığı çalışmada kıyıya yakın bölgeleri dikkate alarak laboratuvar şartlarında test etmiştir. Çünkü tabanda taşınan MP partiküllerin büyük çoğunluğu açık denizden kıyıya doğru ilerleyen dalga ve bu dalgaların oluşturduğu akıntılar ile taşınarak kıyıda birikmektedir ve denizdeki MP kirliliğinin büyük bölümü kıyı bölgelerinde oluşmaktadır.

Law ve diğ. (2020) Dünya'da rüzgâr ve termohalin döngüsü ile birlikte gözlenen 5 farklı subtropikal akıntının, çevresel açıdan önemli kaygılara yol açabilecek miktarda MP taşınımına sebep olduğunu ifade etmiştir. Rüzgâr etkisinde gelişen Ekman spirali (rüzgâr ve coriolis kuvveti nedeniyle kuzey yarımkürede meydana gelen 45⁰ rüzgâr yönünün sağına yönelen yüzey akıntısı) nedeniyle MP partiküllerin taşınımı ve hangi bölgelerde yoğunlukla bulunabildikleri bazı çalışmalarda sayısal modeller ile de tespit edilmeye çalışılmıştır (Maximenko ve diğ., 2012; Lebreton ve diğ., 2012).

İklim değişiklikleri, okyanus akıntıları ve hava koşulları üzerindeki etkisiyle MP taşınımında da etkilidir. Yükselen deniz seviyeleri ve değişen okyanus akıntıları, MP'lerin daha uzun mesafelere taşınabilmesine ve MP'lerin daha önce bu tür partiküllerden etkilenmemiş bölgelere kadar yayılmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, kasırgalar ve fırtınalar gibi aşırı hava olayları

MP'lerin kara ortamında olduğu gibi deniz ortamında da geniş alanlara dağılmasına neden olabilmekte ve MP'lerin yayılmasını artırabilmektedir (Horton ve diğ., 2023).

Yüzer halde bulunabilecek MP'lerin yüzey akıntıları ile taşınımı kadar batmış halde bulunan MP'lerin akıntı etkisinde taşınımı da önemlidir. Bunun için gel-git akıntılarının yüksek ve düşük değerlerinde MP partiküllerin taşınım prosesi ve taşınım sürelerinin tespit edilmesi gerekir (Almeida ve diğ., 2023) ve böylece akıntı etkisinde MP'lerin deniz ortamındaki farklı engellere tutunarak biriktiği bölgeler de belirlenebilir.

Mikroplastiklerin rüzgarlar vasıtasıyla taşınarak atmosferde uzun süre kalabilir dolayısıyla canlılar üzerinde ciddi zararlara sebebiyet vermektedir (Liu ve ark., 2019). Mikroplastik kullanımı kontrollü bir şekilde ele alınmaz ise mikroplastik soluyan hayvanlar ve dolayısıyla insanlar bu kirliliğe maruz kalacaktır (Prata, 2018). Düzenli depolama alanlarındaki atıklardan rüzgarlar vasıtasıyla havaya saçılan mikroplastik miktarları ciddi boyutta olup bu saçılan mikroplastikler hava ekosistemine ve bütün canlılara zarar vermektedir (Amato-Lourenço ve ark., 2020).

MP'lerin dalga etkisi altında taşınım mekanizması, yoğun olarak gözlemlendiği bölgeler ve taşınım güzergahları üzerinde literatürde kısıtlı bilgi bulunmaktadır. MP'lerin sığ suda ve geçiş bölgesinde daha çok kıyaya doğru ilerleyen ve lineer olmayan ağırlık dalgaları (ve bu dalgaların neden olduğu akıntı) tarafından kontrol edildiği bilinmektedir. Ancak MP'lerin yoğunlukla bulunduğu bölgeleri tespit edebilmek ve taşınım yollarını belirleyebilmek üzere yapılan çalışmalar daha çok bölge bazlı ve saha çalışmaları ile gerçekleştirilebilmiştir. Buna rağmen son zamanlarda MP taşınım mekanizmalarını daha iyi anlayabilmek üzere özellikle dalga ve akıntı etkisi altında taşınımını ortaya koymak için bazı laboratuvar ölçekli çalışmalar yürütülmüştür (bkz. Guler ve diğ., 2022; Larsen ve diğ., 2023). Günümüze kadar dalga ve akıntı etkisine laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalara ait özet Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Dalga ve akıntı etkisinde MP taşınımını inceleyen deneysel çalışmalar

Deney Düzeneği	Kullanılan MP Özellikleri	Deney Koşulları	Ölçülen Değerler	Referans
6.,7m, x0,3m x 0,45m boyutlarında açık kanal	Farklı çaplara sahip ($0,5 < D_n < 4,1$) Disk ve küre şeklinde yüzen ve batık halde hareket eden partikül: $0,92 < \rho_p < 1,983 \text{ g/cm}^3$	Dalga Etkisinde: Düzenli Dalga ($H_0=0,14 \text{ m}$, $T>0,5 \text{ s}$)	MP'lerin dağılımı	Kerpen ve diğ. (2020)
6m uzunluğunda 0,5m genişliğinde dalga-rüzgâr kanalı	Pelet partikül (PE: $\rho_p = 0,92 \text{ g/cm}^3$, PP: $\rho_p = 0,95 \text{ g/cm}^3$, PA: $\rho_p = 1,15 \text{ g/cm}^3$, PVC: $\rho_p = 1,38 \text{ g/cm}^3$)	Dalga ve Rüzgâr Etkisinde: Düzenli Dalga ($H= 0,092 \text{ m}$, $T=1,2 \text{ s}$) Rüzgâr hızı: 6 m/s	MP'lerin dağılımı	Forsberg ve diğ. (2020)
20m x 0,6m x 1m boyutlarında açık kanal	Küre partikül (PE: $\rho_p = 0,975 \text{ g/cm}^3$)	Dalga Etkisinde: ($H_0= 0,119- 0,122 \text{ m}$, $T= 1,2 -2,9 \text{ s}$)	MP'lerin dağılımı	Abolfathi ve diğ. (2020)
Akıntı kanalı (TiDyFLOW)	İki farklı tip partikül ($D_n=2,5 \text{ mm}$ ve $0,5 \text{ mm}$)	Türbülanslı Akım (sistemde yer alan pervaneler ile oluşturan)	MP tutulumu	de Smit ve diğ., (2021)

Tablo 3. (devamı) Dalga ve akıntı etkisinde MP taşınımını inceleyen deneysel çalışmalar

Deney Düzeneği	Kullanılan MP Özellikleri	Deney Koşulları	Ölçülen Değerler	Referans
8m × 0,5m × 0,5m boyutlarında açık kanal	Pelet partikül (PP: $\rho_p = 0,90 \text{ g/cm}^3$, PS: $\rho_p = 1,05 \text{ g/cm}^3$, PA: $\rho_p = 1,14 \text{ g/cm}^3$, PET: $\rho_p = 1,34 \text{ g/cm}^3$)	Akıntı Etkisinde: (V=2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 24 and 30 cm/s)	MP taşınımı MP tutulumu	de los Santos ve diğ. (2021)
28m × 0,6m × 0,8m boyutlarında açık kanal	Küp partikül (PLA: $\rho_p = 1,076\text{--}1,205 \text{ g/cm}^3$) Küre partikül (POM: $\rho_p = 1,062\text{--}1,358 \text{ g/cm}^3$ ve ABS: $\rho_p = 1,062 \text{ g/cm}^3$) Dairesel disk partikül (PLA: $\rho_p = 1,199\text{--}1,207 \text{ g/cm}^3$) Kare disk partikül (PLA: $\rho_p = 1,199\text{--}1,207 \text{ g/cm}^3$)	Dalga Etkisinde: Düzensiz dalga ($H_s = 0,15 \text{ m}$, $T_p = 1,6 \text{ s}$)	MP'lerin dağılımı	Guler ve diğ. (2022)
20m × 0,6m × 0,75m boyutlarında açık kanal	Silindir ve Lif partikül (PVC: $\rho_p = 1,34 \text{ g/cm}^3$) Levha partikül (LDPE: $\rho_p = 0,91 \text{ g/cm}^3$) Silindir partikül (PP: $\rho_p = 0,90 \text{ g/cm}^3$) İplik-lif partikül (Elastan: $\rho_p = 0,90\text{--}1,02 \text{ g/cm}^3$)	Dalga Etkisinde: Düzenli Dalga ($H = 0,18 \text{ m}$ ve $0,1 \text{ m}$, $T = 1,5 \text{ s}$ ve 2 s) ve Düzensiz dalga ($H_s = 0,1 \text{ m}$, $T_p = 1,5 \text{ s}$)	MP çökme hızı, MP'lerin dağılımı	Núñez ve diğ. (2023)
28m × 0,8m × 0,6m açık kanal	Küre partikül (PE: $\rho_p = 0,97 \text{ g/cm}^3$ ve EPS: $\rho_p = 0,055 \text{ g/cm}^3$) Küp partikül (ABS: $\rho_p = 0,665 \text{ g/cm}^3$) Silindir partikül (PE: $\rho_p = 0,907 \text{ g/cm}^3$)	Dalga Etkisinde: Düzensiz dalga ($H_s = 0,15 \text{ m}$, $T_p = 1,6 \text{ s}$)	MP Taşınım hızı	Larsen ve diğ. (2023)
6,5m x 0,3m x 0,45m açık kanal	Farklı şekillere sahip 6 adet partikül ($\Omega_p = 0,36\text{--}162$)	Dalga Etkisinde: Düzensiz dalga ($H_s = 0,06 \text{ m}$, $T_p = 1,0 \text{ s}$)	MP taşınımı MP tutulumu	Kerpen ve diğ. (2023)

Burada; V akımın kesitsel ortalama hızı, H dalga yüksekliği, H_s belirgin dalga yüksekliği, H_0 : açık deniz dalga yüksekliği, T dalga periyodu, T_p pik dalga periyodu, Ω_p Boyutsuz MP Dean sayısı (Denklem 2)'dir.

$$\Omega_p = \frac{H}{T\omega_{sp}} \quad (2)$$

Tablo 3'de verilen deneysel çalışmalarda çoğunlukla PVC, PS, PP ve PE gibi okyanuslarda yüksek oranda tespit edilen MP partiküller kullanılmıştır (Andrady, 2011).

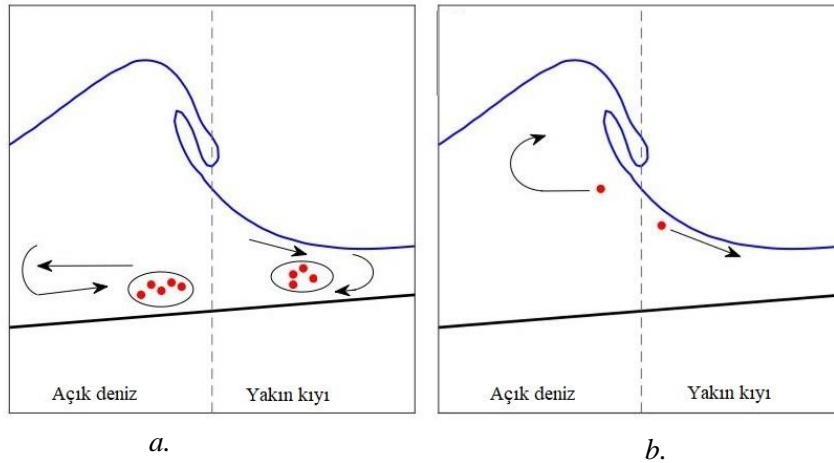
Kıyıya yakın bölgelerde MP'lerin taşınım ve dağılımını araştırmak üzere yapılan çalışmalarda Núñez ve diğ. (2023) yatay bir taban üzerinde MP taşınımını düzenli ve düzensiz dalgalar kullanarak incelemiştir. Yapılan benzer çalışmalarda eğimli sediment taban üzerinde MP taşınımının düzensiz dalga etkisi altında davranışı incelenmiştir (Guler ve diğ., 2022). Yapılan bu çalışmalarda, ölçeklendirme etkileri ile ilgili belirgin sınırlamalar olmasına rağmen, gerçekleştirilen araştırmalar MP taşınım davranışını ve MP'lerin biriktiği bölgeleri etkileyen önemli boyutsuz parametreleri ortaya koymuştur.

Kerpen ve diğ. (2020) özgül kütlesi daha büyük olan partiküllerin daha çok eğimli kıyının daha derin bölgelerinde kaldığını ancak düşük özgül kütleyle sahip MP'lerin kırılma bölgesinde yüzer halde bulunduğu ya da kıyıda biriktiğini belirtmiştir.

Buna göre MP'lerin farklı fiziksel özelliklerinin (özgül kütle ve şekil gibi) taşınım üzerinde etkin olduğu tespit edilmiştir. Bu durumu tarif etmek üzere Núñez ve diğ. (2023) partikülün şekil faktörünü, Guler ve diğ. (2022) ile Larsen ve diğ. (2023) ise partikül Dean sayısını (Ω_p) kullanmıştır.

Sediment taşınımında da kullanılan Dean sayısı Denklem (2)'de verildiği gibi, dalga yüksekliğinin, bir partikülün bir dalga periyodu boyunca çökme hızı ile kat edeceği mesafeye oranı olarak fiziksel olarak tanımlanabilir. Buna göre Dean sayısının daha büyük bir değeri, aynı dalga yüksekliğinde daha küçük bir çökme hızına sahip partikül için daha fazla hareketlilik ile ilişkilendirilebilir.

Forsberg ve diğ. (2020) ve Kerpen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmalarda batık halde bulunan MP partiküller için kıyı bölgelerinin MP'lerin yoğunluklu bulunduğu bölgelerden biri olmadığını belirtmiştir. Guler ve diğ. (2022) bunun sebebinin bu çalışmalarda düz (yatay) taban kullanımından kaynaklanabileceğini söylemiştir. Çünkü eğimli ve hareketli bir taban ile yapılan çalışmalarda dalgaların kırılmaya uğramasıyla kırılma bölgesinde tabanda meydana gelen basamak yapısı ve MP'lerin bulunduğu konum ile taşınım mekanizmasının değiştiği görülmüştür. Örnek olarak kırılma bölgesinde meydana gelen basamak üzerinde kıvrılarak kırılan (plunging) dalganın açık deniz tarafında bulunan partiküller açık denize doğru taşınırken, dalganın kırılma esnasında kıvrıldığı doğrultunun yakın kıyı tarafında bulunan MP'ler yakın kıyıya doğru taşınmaktadır (Şekil 6a). Eğer MP'ler Şekil 6b'de olduğu gibi su kolonunda askıda halde bulunabilecek kadar yüksekte ise partiküller kıvrılan dalganın etkisinde ve kıvrılma doğrultusunda hareket ederek yakın kıyıya doğru taşınmaktadır.



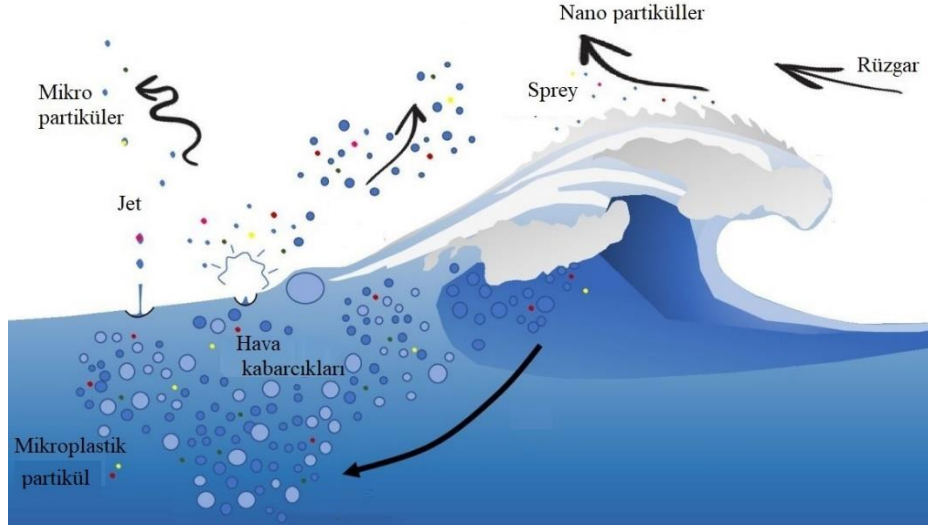
Şekil 6:

Kırılma bölgesinde basamak üzerinde MP taşınımının şematik görünümü (Burada kesikli çizgi kıvrılarak kırılan dalganın (plunging) kıvrıldığı doğrultuyu göstermektedir)

a. Tabana yakın partiküller b. Askıda partiküller (Guler ve diğ.2022'den revize edildi)

Deniz içerisinde mikropplastik hareketini dikkate alan çalışmaların yanı sıra yapılan farklı çalışmalar denizin üzerinde de MP partiküllerine rastlandığını ve burada da MP'lerin taşındığını ifade etmiştir (O'Brien ve diğ., 2023). Özellikle deniz üzerindeki atmosferde tespit edilen MP kaynağının deniz yüzeyinden aerosol şeklinde kopmaların sebep olduğu yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (Trainic ve ark., 2020). Bu partiküllerin deniz üzerinde hareketi ve bulunmasının sebebi ise rüzgar etkisinde saçılımları, deniz spreyi, dalga kırılması ile ortaya çıkan hava kabarcıkları gibi etkenler olarak gösterilmiştir (Allen ve diğ., 2020). Okyanus ve deniz üzerinde

tespit edilen bu MP partiküllerin taşınımı Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7’de görüldüğü gibi MP partiküller dalgaların kırılması ile meydana gelen sıkışmış hava kabarcıkları ile birlikte yüzeye çıkarken bu kabarcıkların patlaması ile tamamen deniz yüzeyine itilebilmektedir. Bu şekilde deniz yüzeyine itilen MP partiküller bundan sonra rüzgarla taşınabilir hale gelmektedir. Hava kabarcıkları patladığında su bırakılan bu boşluğu doldurmaya çalışır ve her yönden gelen su çarpışması, jet olarak bilinen ikincil fırlatma ile daha büyük mikro partiküllerin havaya saçılımına da yol açabilmektedir.



Şekil 7:

Dalga kırılması, deniz spreyi, rüzgar gibi etkiler ile mikro ve nano partikül taşınımının şematik görünümü (Allen ve diğ., 2020’den revize edildi)

MP’lerin dalga etkisinde taşınımını dikkate alan çalışmaların yanı sıra yalnızca akıntı etkisinde taşınımı inceleyen de los Santos ve diğ. (2021) yaptığı çalışmada sadece MP taşınımı incelenmemiş, MP’lerin farklı bentik canlılar tarafından tutulumunu dikkate almıştır. Literatürde gerçek deniz koşullarını yansıtan hem dalga hem de akıntının birlikte dikkate alındığı durum için MP’lerin taşınımını inceleyen herhangi bir araştırma yapılmamıştır.

Literatürde deniz ortamında MP taşınımını araştıran deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal (nümerik) modeller de kullanılmıştır. Çoğunlukla Lagrange ve Euler yaklaşımını kullanan bu modeller daha çok deniz ortamında MP partiküllerin taşınım güzergahını tespit etmeyi amaçlamıştır. Ayrıca okyanus gibi gözlem ya da ölçüm almanın çok daha seyrek yapılabildiği bölgelerde partikül taşınımının olup olmadığı ya da bu tür partiküllerin açık denizlerde birikme potansiyelini belirlenebilmesi açısından da sayısal modellerin kullanımı oldukça önemlidir. Hem küresel ölçekte yapılan sayısal modeller (Mountford ve Morales Maqueda, 2019; Mountford ve Morales Maqueda, 2021; Van Sebille ve diğ., 2015) hem de bölgesel ölçekte oluşturulan modeller (Atwood ve diğ., 2019; Guerrini ve diğ., 2021; Kaandorp ve diğ., 2020), yüzer halde ya da batık halde hareket eden MP’lerin taşınım güzergahlarını ortaya koymuştur.

Asimetrik yapıya sahip dalgalar Stokes drift etkisini meydana getirir ve böylece yüzer halde bulunan MP partiküller kolaylıkla taşınabilir. Stokes drift etkisi ile partiküllerin hareketlerinin tariflenmesinde Lagrange yaklaşımı oldukça kullanışlıdır. Ancak Calvert ve diğ. (2021) yüzer halde bulunan MP’lerin birbirinden çok farklı özgül kütle ve şekillere sahip olması ile birlikte dalga etkisinde taşınımını da farklılık gösterecek şekilde Lagrangian olmayan davranış gösterdiklerini belirtmiştir. Buna göre Calvert ve diğ. (2021) yüzer halde bulunan MP’ler için yatay drift (sürüklenme) hızlarının artan partikül boyutu ile arttığını da ortaya koymuştur.

Fatahi ve diğ. (2021) yapmış oldukları sayısal modelde 3 farklı partikülün (PET: $\rho_p = 1.34 \text{ g/cm}^3$, PUR $\rho_p=1.12 \text{ g/cm}^3$ ve PP $\rho_p=0.9 \text{ g/cm}^3$) farklı şekil ve boyutlarında taşınımı

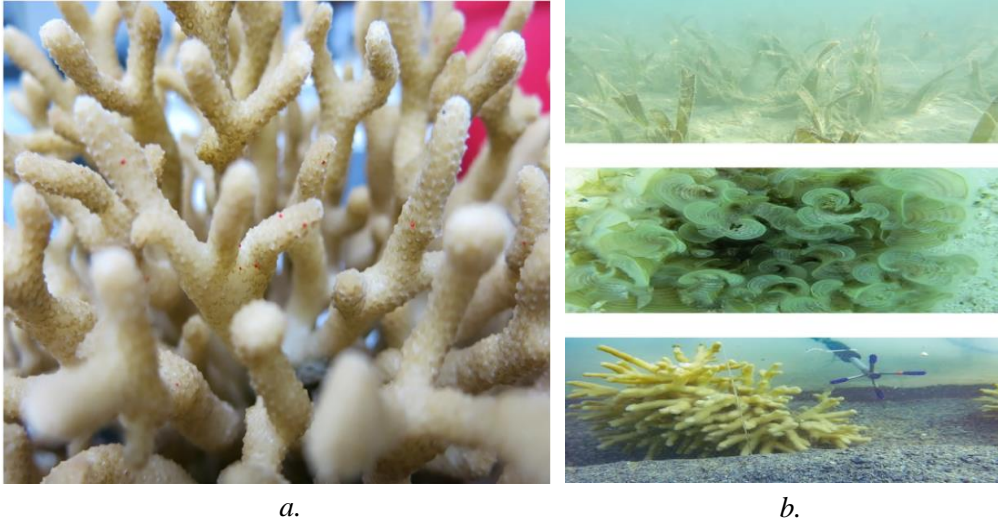
modellemiştir. Buna göre literatürde yapılan deneysel çalışmalara benzer şekilde partiküllerin şekil, boyut ve özgül kütlelerinin taşınım üzerindeki etkisini göstermiştir. Örnek olarak büyük küresel şekle ve daha küçük özgül kütlelere sahip PP partiküllerin, daha büyük özgül kütleyle sahip küresel şekilli olanlara göre daha kolay yüzdüğünü ortaya koymaktadır. Boyutları büyük olan küresel şekilli partiküller ile boyutları küçük olan ancak küresel şekle sahip olmayan partiküllerin taşınım hızının en yüksek olduğu ve kıyıya daha çabuk taşındığını ortaya koymuştur. Ayrıca partiküllerin kıyı boyunca dağılımına bakıldığında MP'lerin şekil ve boyutlarından bağımsız olarak daha küçük özgül kütleyle sahip PP ve daha büyük özgül kütleyle sahip PET ve PUR partiküllere rastlandığını belirtmiştir.

DiBenedetto ve diğ. (2022) yapmış olduğu çalışmada MP partiküllerinin birlikte bir küme halinde salınımı veya tek bir noktadan sürekli olarak MP salınımının yapılması durumunda yatay dispersiyonunun (yayılmının) olacağını ifade etmiştir.

2.2. Deniz Ortamında Mikroplastiklerin Tutulması

Günümüze kadar MP'lerin dalga ve akıntı gibi etkiler ile deniz ortamında taşındıktan sonra bentik bölgede yosun, kaya, resif gibi yapılar etrafında yoğunluklu olarak bulunduğu ya da tutulduğu bilinmesine rağmen bu konu ile ilgili çok az çalışma mevcuttur (Hendriks ve diğ., 2010; Lim ve diğ., 2020). Oysa, MP'lerin deniz ortamında taşınım mekanizmasını ortaya koymak, taşınım yollarını belirleyebilmek ve sonunda ise taşınan bu MP'lerin hangi bölgelerde yoğunlaştığını/kümelendiğini veya hangi mekanizmalar ile tutulduğunu belirlemek çevresel açıdan bu kirliliğin önüne geçilebilmesi için belirleyicidir.

Deniz ortamında batmış halde hareket eden MP'lerin farklı (yosun, kaya, resif gibi) engellere takılarak bu engeller etrafında yoğunlaştığı bilinmektedir. Deniz altında çekilen bir fotoğrafta (Şekil 8a) kırmızı renkte MP'lerin resif üzerine yerleşerek burada tutulduğunu görülmektedir. MP'lerin üzerinde yerleştiği/tutulduğu yapılar deniz ortamındaki farklı tipteki canlı ya da cansız birçok farklı engel şeklinde olabilir. Farklı türde MP tutulumuna katkı sağlayan denizaltı canlılarına örnek Şekil 8b'de verilmiştir.



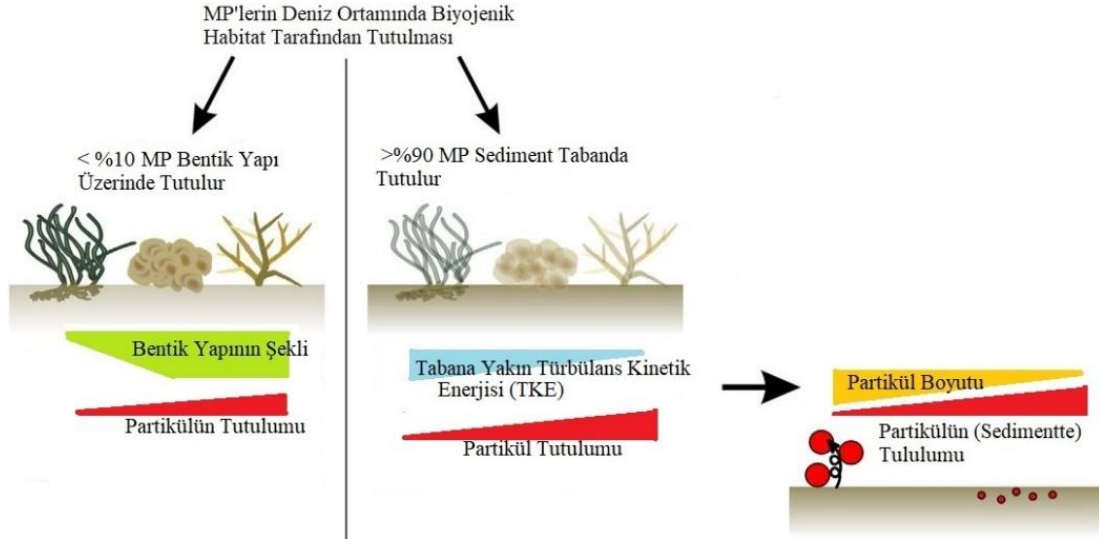
Şekil 8:

Deniz ortamında MP'lerin tutulduğu yosun, mercan vb. bentik canlılar (Smith ve diğ., 2021)
a. *Resif üzerinde tutulmuş MP'lere ait fotoğraf* **b.** *MP tutulumunu sağlayan farklı türden bentik canlı fotoğrafları*

Literatürde sadece dalga etkisinde yosun gibi tabanda bentik yapıların bulunmasından dolayı dalga enerjilerindeki değişim incelenmiştir (bkz. Maza, 2015; Paul 2012). Ancak deniz ortamında

dalga ve akıntı etkisinde yosun gibi yapıların MP tutulumuna etkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcut değildir.

Örnek olarak de Smith ve diğ. (2021)'de iki farklı küre şekilli MP partikül ile çalışarak yosun, makro alg ve resiflerin MP tutulumunu araştırmıştır. Ancak de Smith ve diğ. (2021) yaptıkları bu çalışmada sadece akıntı etkisini dikkate aldıkları bir deney sistemini kullanmıştır. Bunun için deniz ortamından alınmış bentik canlıları tabana yerleştirdikten sonra kanala sabit 0,15 m/s'lik bir akıntı hızı vererek MP'lerin bu ortamda tutulumlarını incelemişlerdir. Buna göre incelenen farklı canlıların MP tutulumunun MP ile yapı arasındaki adezyon kuvvetleri ile deniz canlısının cinsi ve MP özelliklerine bağlı değiştiğini ifade etmiştir. Çalışma bentik yapılarda MP'lerin %10'dan az bir miktarı bu yapılar üzerine yapışarak tutunurken, %90'dan fazla oranda partikülün bu yapı etrafında ve deniz tabanında tutulduğunu hatta MP'lerin partikül boyutu küçüldükçe sediment tabanda gömülerek bulunduğunu (sedimentte tutulduğu) belirtilmiştir (Şekil 9). Şekilde görüldüğü gibi MP'lerin tutulmasında bentik yapının biçimi önemli olacak şekilde, MP'lerin büyük çoğunluğunun (%90'dan fazla) bentik yapı etrafında tabanda olduğudur. Ayrıca bu tutulma tabana yakın türbülanslı kinetik enerji arttıkça ve partikül boyutu arttıkça artmaktadır. de Smith ve diğ. (2021)'in yaptığı bu çalışma bentik yapılarda MP'lerin tutulum mekanizmasını ortaya koyması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 9:

Deniz ortamında biyojenik habitatta MP tutulumunun şematik gösterimi (de Smith ve diğ., 2021'den revize edildi)

de los Santos ve diğ. (2021) yaptıkları benzer bir çalışmada 2 ile 30 cm/s arasında değişen akım hızları için farklı yoğunluklara sahip yosunların MP tutma kapasitelerini karşılaştırmıştır. Yaptıkları bu deneysel çalışma sonucunda azalan akım hızı ve artan yosun yoğunluğu için MP tutulumlarının arttığını ifade etmiştir. Bu çalışma deniz ortamındaki bentik yapının yoğunluğunun MP tutulumunda etkili bir parametre olduğunu belirtmiştir.

Literatürde sadece dalga etkisi altında bentik bir yapı olarak yosunların MP tutulumunu ilk kez Kerpen ve diğ. (2023) eğimli bir sediment taban üzerinde incelemiştir. Buna göre açık bir kanalda eğimli sediment taban üzerine kırılan dalga etkisinde MP dağılımını ölçerek yerleştirdikleri yapay yosun yapılarının farklı yoğunluğunda MP tutulumunu artırdığını belirtmiştir.

3. SONUÇ

Son on yılda MP'lere karşı artan bilimsel ilgi giderek önem kazanmaktadır ve bu araştırmalar MP'ler ile ilgili temel bilgilerimizin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ancak bu veriler ile hala denizlerde önemli bir kirletici olarak bulunan MP'lerin oluşturduğu çevresel sorunlara tam bir çözüm oluşturulamamıştır. Literatürde yapılan birçok çalışma ilgili bölgelerden alınan numunelerin değerlendirilmesi ile saha çalışmalarının yürütülmesinden sağlamaktadır. Bu çalışmalar bize MP kirleticilerin yoğun olarak bulunduğu ya da daha az rastlandıkları bölgeleri tespit etmemizi sağlamasına rağmen MP'lerin deniz ortamında hangi fiziksel prosesler ile taşınımalarını gerçekleştirdikleri, denizde hangi güzergahı izlediği gibi temel soruları yanıtlanamamaktadır.

MP'lerin sahip oldukları fiziksel özellikler (özellikler ve şekil gibi), MP taşınımı ve yoğunluklu olarak buldukları bölgeleri tespit etmek üzere gerçekleştirilen çalışmalarda önemli bir parametre olarak belirlenmiştir. Buna örnek olarak özgül kütlesi daha büyük olan MP partiküllerin daha çok eğimli kıyıların daha derin bölgelerinde kaldığını ancak düşük özgül kütleye sahip MP'lerin kıyılarda yüzer halde bulunduğu ya da kıyıda biriktiği durum gösterilebilir. Ayrıca MP'lerin biriktiği bölgeleri etkileyen önemli bir boyutsuz parametre olarak Dean sayısı dikkate alınabilir. Benzer durum MP partiküllerin deniz ortamında tutulumunun incelenmesinde de ortaya çıkmaktadır. Deniz ortamında MP partiküllerin bentik bölgede yosun, kaya, resif gibi yapılar ile tutulmasının partikül ile yapı arasındaki adezyon kuvvetleri ile deniz canlılarının cinsi ve MP'lerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Deniz ortamında hem dalga hem de akıntının MP'lerin taşınım mekanizması üzerinde oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Bunun için yapılan saha çalışmaları olmasına rağmen taşınım mekanizmasının fiziksel boyutlarını daha iyi anlayabilmek üzere yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca MP taşınımının dalga etkisi altında taşınımını araştıran birçok çalışma akıntı etkisini de aynı anda dikkate almadığı gibi akıntı etkisi altında MP taşınım mekanizmasını ortaya koyan birçok deneysel çalışma da dalga etkisini göz ardı etmiştir. Dolayısı ile deniz ortamında hem dalga hem de akıntı etkisinin birlikte görüldüğü ve MP partiküllerin taşınım mekanizmasında etkin rol oynayan bu iki faktörün birlikte göz önüne alınması gelecekte yapılacak çalışmalar açısından oldukça önemlidir. Ayrıca batık halde taşınan MP'lerin taşınım mekanizmalarının anlaşılması için partiküllerin birbirleri ile etkileşimi ve sürüntü malzemesi veya AKM olarak hareket eden sediment ile etkileşiminin incelenmesi gelecek çalışmalar için ilham kaynağı olabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

R.İlayda TAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerini belirledi, yorumladı, derledi ve makaleyi yazdı.

KAYNAKLAR

1. Abolfathi, S., Cook, S., Yeganeh-Bakhtiary, A., Borzooei, S., Pearson, J. (2020). Microplastics transport and mixing mechanisms in the nearshore region, *Coastal Engineering Proceedings*, 63–63, doi:10.9753/icce.v36v.papers.63.

2. Adegoke, K. A., Adu, F. A., Oyebamiji, A. K., Bamisaye, A., Adigun, R. A., Olasoji, S. O., ve Ogunjinmi, O. E. (2023). Microplastics toxicity, detection, and removal from water/wastewater. *Marine Pollution Bulletin*, 187, doi:10.1016/j.marpolbul.2022.114546.
3. Allen S., Allen D., Moss K., Le Roux G., Phoenix V.R., Sonke J.E. (2020). Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLoS ONE*, 15(5), doi: 10.1371/journal.pone.0232746.
4. Almeida, M.P.d. Gaylarde, C. Pompermayer, F.C. Lima, L.d.S. Delgado, J.d.F. Scott, D. Neves, C.V. Vieira, K.S. Baptista Neto, J.A. Fonseca, E.M. (2023) The complex dynamics of microplastic migration through different aquatic environments: subsidies for a better understanding of its environmental dispersion, *Microplastics*, 62-77, doi: 10.3390/microplastics2010005.
5. Alsina JM, Jongedijk CE, van Sebille E. (2020) Laboratory Measurements of the Wave-Induced Motion of Plastic Particles: Influence of Wave Period, Plastic Size and Plastic Density, *J Geophys Res Oceans*, 125(12): doi:10.1029/2020JC016294.
6. Andrady, A.L. (2011) Microplastics in the marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596-1605, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
7. Atwood, E.C., Falcieri, F.M., Piehl, S., Bochow, M., Matthies, M., Franke, J., Carniel, S., Sclavo, M., Laforsch, C., Siegert, F.(2019) Coastal accumulation of microplastic particles emitted from the Po River, Northern Italy: comparing remote sensing and hydrodynamic modelling with in situ sample collections. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 561–574, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.045.
8. Auta, H.S. Emenike, C.U. Fauziah, S.H. (2017) Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions, *Environ. Int.*, 102, 165–176, doi: 10.1016/j.envint.2017.02.013
9. Breivik, Ø. Allen, A.A. Maisondieu, C. Roth, J.C. (2011) Wind-induced drift of objects at sea: the leeway field method, *Appl. Ocean. Res.*, 33, 100e109, doi:10.48550/arXiv.1111.0750.
10. Calvert, R., McAllister, M.L., Whittaker, C., Raby, A., Borthwick, A.G., Van Den Bremer, T.S. (2021) A mechanism for the increased wave-induced drift of floating marine litter. *J. Fluid Mech.* 915, A73, doi: 10.1017/jfm.2021.72.
11. Chubarenko, I. Bagaev, A. Zobkov, M., Esiukova, E. (2016) On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, 108(1-2), 105-112, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
12. Citterich, F., Lo Giudice, A., ve Azzaro, M. (2023) A plastic world: A review of microplastic pollution in the freshwaters of the Earth's poles. *Science of The Total Environment*, 869, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161847.
13. Corey, A.T. (1949) Influence of shape on the fall velocity of sand grains. Master's thesis. *Colorado Agricultural and Mechanical College*.
14. Coffin S., Brander S., (2020) Microplastics in the environment: from research to regulation, Public Interest Environmental Law Conference, doi: 10.13140/RG.2.2.29504.56320.
15. Çağlayan H. S. ve Kopuz Ü.A. (2020) Mikroplastiklerin deniz çevresinde neden olduğu etkiler, *Doğanın Sesi Dergisi*, (6), 44-56.
16. Dean, R. G. ve Dalrymple, R. A. (1984) *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, ISBN: 0139460381.

17. Derraik, J. (2002) The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), pp.842-852, doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
18. de los Santos C.B., Krång A.S., Infantes, E. (2021) Microplastic retention by marine vegetated canopies: simulations with seagrass meadows in a hydraulic flume. *Environ Pollut.*, 269, 116050, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116050.
19. de Smit, J. C. Anton, A. Martin, C. Roszbach, S. Bouma, T. J. Duarte, C. M. (2021) Habitat-forming species trap microplastics into coastal sediment sinks, *Science of the Total Environment*, 772, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145520>.
20. di Benedetto, M.H., Clark, L.K., Pujara, N. (2022) Enhanced settling and dispersion of inertial particles in surface waves, *J. Fluid Mech.*, vol. 936, A38, doi:10.1017/jfm.2023.671.
21. Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C.A., Nielsen, T.G. (2015) Abundance, size and polymer composition of marine microplastics 10mm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution, *Mar. Pollut. Bull.*, 100, 70e81 doi:10.1016/j.marpolbul.2015.09.027.
22. Fatahi, M., Akdogan, G., Dorfling, C., Van Wyk, P. (2021) Numerical Study of Microplastic Dispersal in Simulated Coastal Waters Using CFD Approach, *Water 13*, 3432, doi: 10.3390/w13233432.
23. Fendall, L.S. Sewell, M.A. (2009) Contributing to marine pollution by washing your face. Microplastics in facial cleansers, *Marine Pollution Bulletin*, 58 (8), 1225–1228, doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025.
24. Frias, J.P.G.L. Nash, R. (2019) Microplastics: Finding a consensus on the definition, *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147, doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
25. Forsberg, P.L., Sous, D., Stocchino, A., Chemin, R., (2020) Behaviour of plastic litter in nearshore waters: first insights from wind and wave laboratory experiments, *Mar. Pollut. Bull.*, 153, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111023.
26. Guerrini, F., Mari, L., Casagrandi, R., 2021. The dynamics of microplastics and associated contaminants: data-driven Lagrangian and Eulerian modelling approaches in the Dean, R. G. ve Dalrymple, R. A. (1984) *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145944
27. Guler, H.G. Larsen, B.E. Quintana, O.bGoral, K.D. Carstensen, S. Christensen, E.D. Kerpen, N.B. Schlurmann, T. Fuhrman, D.R. (2022) Experimental study of non-buoyant microplastic transport beneath breaking irregular waves on a live sediment bed, *Marine Pollution Bulletin*, 181, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113902.
28. Gregory, M.R. (1996) Plastic ‘scrubbers’ in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified, *Marine Pollution Bulletin*, 32, 867–871, doi: 10.1016/S0025-326X(96)00047-1.
29. Gregory, M.R. (2009) Environmental implications of plastic debris in marine settings: entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 2013–2025, doi: 10.1098/rstb.2008.0265.
30. Gregory, M.R. Andrady, A.L. (2003) Plastics in the marine environment. In: Andrady, Anthony.L. (Ed.), *Plastics and the Environment*, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-09520-6, doi: 10.1002/0471721557.ch10.

31. Hendriks, I.E. Sintes, T. Bouma T.J. Duarte, C.M. (2008) Experimental assessment and modeling evaluation of the effects of the seagrass *Posidonia oceanica* on flow and particle trapping. *Marine Ecology Progress Series*, 356, 163–173, doi: 10.3354/meps07316.
32. Horikawa, K. (1988) Nearshore dynamics and coastal processes: theory, measurement, and predictive models, Japan: *University of Tokyo Press*, doi: 10.12691/marine-2-1-4.
33. Horton, A.A., and Barnes, D.K. (2020). Microplastic pollution in a rapidly changing world: Implications for remote and vulnerable marine ecosystems. *Sci. Total Environ.* 738, 140349, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140349.
34. Howell, E.A. Bograd, S.J. Morishige, C. Seki, M.P. Polovina, J.J. (2012) On North Pacific circulation and associated marine debris concentration, *Marine Pollution Bulletin*, 65, 16e22 doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.04.034.
35. Isobe, A. Kako, S. Chang, P.H. Matsuno, T. (2009) Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea shelf. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 26, 1059e1064, doi: 10.3390/jmse10040481.
36. Jambeck, J.R. Geyer, R. Wilcox, C. Siegler, T.R. Perryman, M. Andrady, A., ve diğ. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223): 768–771, doi: 10.1126/science.1260352.
37. Kerpen, N. B. Schlurmann, T. Schendel, A. Gundlach, J. Marquard, D. & Hüpgen, M. (2020) Wave-induced distribution of microplastic in the surf zone, *Frontiers in Marine Science*, 7, 590565, doi: 10.3389/fmars.2020.590565.
38. Kaandorp, M.L.A., Dijkstra, H.A., Van Sebille, E. (2020) Closing the Mediterranean marine floating plastic mass budget: inverse modeling of sources and sinks *Environ. Sci. Technol.*, 54, 11980–11989, doi: 10.1021/acs.est.0c01984.
39. Kerpen N.B., Larsen B.E., Schlurmann T., Paul M., Guler H.G., Goral K.D., Carstensen S., Christensen E.D., Fuhrman D.R. (2024) Microplastic retention in marine vegetation canopies under breaking irregular waves, *Sci Total Environ.*, 912, 169280.
40. Khatmullina, L. Isachenko, I. (2017) Settling velocity of microplastic particles of regular shapes, *Marine Pollution Bulletin*, 114, 871e880.
41. Klein, S. Worch, E. Knepper, T.P. (2015) Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the rhine-main area in Germany. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 6070–6076, doi: 10.1021/acs.est.5b00492.
42. Kowalski, N. Reichardt, A.M. Waniek, J.J. (2016) Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors, *Marine Pollution Bulletin*, 109, 310e319, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.05.064.
43. Kukulka, T. Proskurowski, G. Moret-Ferguson, S. Meyer, D.W. Law, K.L. (2012) The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L07601, doi: 10.1029/2012GL051116.
44. Kukulka, T., Law, K.L., Proskurowski, G., (2016) Evidence for the influence of surface heat fluxes on turbulent mixing of microplastic marine debris, *J. Phys. Oceanogr.*, 46, 809e815, doi: 10.1175/JPO-D-15-0242.1.
45. Larsen, B. E. Al-Obaidi, M. A. A. Guler, H. G. Carstensen, S. Goral, K. D. Christensen, E. D. & Fuhrman, D. R. (2023) Experimental investigation on the nearshore transport of buoyant microplastic particles, *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114610, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.114610.

46. Lamb, J.B. Willis, B.L. Fiorenza, E.A. Couch, C.S. Howard, R. Rader, D.N. True, J.D. Kelly, L.A. Ahmad, A. Jompa, J. Harvell, C.D. (2018) Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*, 359, 460-462, doi: 10.1126/science.aar3320.
47. Law, K.L. Thompson, R.C. (2014) Microplastics in the seas. *Science*, 345, 144-145, doi: 10.1126/science.1254065
48. Lebreton, L.M. Greer, S.D. Borrero, J.C. (2012) Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Mar.. Pollut. Bull.* 64, 653e661.
49. Lehtiniemi, M. Hartikainen, S. Nähkö, P. Engström-Öst, J. Koistinen, A. & Setälä, O. (2018) Size matters more than shape: Ingestion of primary and secondary microplastics by small predator, *Food Webs*, 17, e00097.
50. Li W, Duo J, Wufuer R, Wang S, Pan X. (2022) Characteristics and distribution of microplastics in shoreline sediments of the Yangtze River, main tributaries and lakes in China-From upper reaches to the estuary, *Environ Sci Pollut Res Int.*, 29(32):48453-48464, doi: 10.1007/s11356-021-18284-7.
51. Lim, H.S. Fraser, A. Knights, A.M. (2020) Spatial arrangement of biogenic reefs alters boundary layer characteristics to increase risk of microplastic bioaccumulation., *Environmental Research Letters*, 15, doi: 10.1088/1748-9326/ab83ae.
52. Liubartseva, S. Coppini, G. Lecci, R. Creti, S. (2016) Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 103, 115e127, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.12.031.
53. Mansui, J. Molcard, A. Ourmieres, Y. (2015) Modelling the transport and accumulation of floating marine debris in the Mediterranean basin, *Marine Pollution Bulletin*, 91, 249e257, doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.11.037.
54. Martinez, E. Maamaatuaiahutapu, K. Taillandier, V. (2009) Floating marine debris surface drift: convergence and accumulation toward the South Pacific subtropical gyre, *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1347e1355, doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.022.
55. Maximenko, N. Hafner, J. Niiler, P. (2012) Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters, *Marine Pollution Bulletin*, 65, 51e62, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.04.016.
56. Mountford, A.S., Morales Maqueda, M.A. (2019) Eulerian modeling of the threedimensional distribution of seven popular microplastic types in the global ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 8558–8573, doi: 10.1029/2019JC015050.
57. Mountford, A.S., Morales Maqueda, M.A. (2021) Modeling the accumulation and transport of microplastics by sea ice, *J. Geophys. Res. Oceans*, 126 doi: 10.1029/2020JC016826.
58. Nadaoka, K. Kondoh, T. (1982) Laboratory measurements of velocity field structure in the surf zone by LDV, *Coast. Eng. Jpn.* 25, 125–145, doi: 10.1016/0378-3839(90)90001-D.
59. Neumann, D. Callies, U. Matthies, M. (2014) Marine litter ensemble transport simulations in the southern North Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 86, 219e228, doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.016.
60. Nor, N.H.M. Obbard, J.P. (2014) Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems, *Marine Pollution Bulletin*, 79, 278e283, doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.11.025
61. Núñez, P., Romano, A., García-Alba, J., Besio, G., Medina, R. (2023) Wave-induced crossshore distribution of different densities, shapes, and sizes of plastic debris in coastal

- environments: a laboratory experiment, *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114561, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.114561.
62. O'Brien, S., Rauert, C., Ribeiro, F., Okoffo, E. D., Burrows, S. D., O'Brien, J. W., Wang, X., Wright, S. L., ve Thomas, K. V. (2023). There's something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of The Total Environment*, 874, 162193, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162193.
 63. Peeken, I. Primpke, S. Beyer, B., Gütermann, J., Katlein, C. Krumpfen, T. Bergmann, M., Hehemann, L. & Gerdts, G. (2018) Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Comm.* 9, article no. 1505, doi: 10.1038/s41467-018-03825-5
 64. Potemra, J.T. (2012) Numerical modeling with application to tracking marine debris, *Marine Pollution Bulletin*, 65, 42e50 doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.06.026.
 65. Rauscher, H. Sokull-Kluttgen, B. Stamm, H. (2013) The European Commission's recommendation on the definition of nanomaterial makes an impact, *Nanotoxicology*, 7, 1195–1197, doi: 10.3109/17435390.2012.724724.
 66. Schmidt, C. Krauth, T. and Wagner, S. (2017) Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environ. Sci. Technol.*, 51: 12246–12253, doi: 10.1021/acs.est.7b02368.
 67. Stokes, G. G. (1847) On the theory of oscillatory waves, *Trans. Camb. Philos. Soc.* 8, 441–455.
 68. Yang H, Chen G, Wang J. (2021) Microplastics in the marine environment: sources, fates, impacts and microbial degradation, *Toxics*, 9 (2):41, doi: h10.3390/toxics9020041.
 69. Özkor, B., (2022) Kızılırmak Nehri sularında mikroplastik kirliliğinin araştırılması, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, <http://hdl.handle.net/20.500.11787/7495>.
 70. Thompson, R.C. Olsen, Y. Mitchell, R.P., Davis, A. Rowland, S.J. John, A.W.G. McGonigle, D. Russell, A.E. (2004) Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304, 838, doi: 10.1126/science.1094559.
 71. Thompson, R. Moore, C. Andrady, A. Gregory, M. Takada, H. Weisberg, S. (2005) New directions in plastic debris. *Science*, 310, 1117, doi: 10.1126/science.310.5751.1117b
 72. Thiel, M. Gutow, L. (2005) The ecology of rafting in the marine environment. I. The floating substrata, *Oceanogr. Mar. Biol.* 42, 181e264, doi:10.1201/9780203507810.ch6.
 73. Van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B.D., Van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., Law, K.L. (2015) A global inventory of small floating plastic debris, *Environ. Res. Lett.*, 10, doi:10.1088/1748-9326/10/12/124006
 74. Yang H. Chen G. Wang J. (2021) Microplastics in the Marine Environment: Sources, Fates, Impacts and Microbial Degradation, *Toxics*, 9(2):41, doi: 10.3390/toxics9020041.
 75. Weinstein, J.E. Crocker, B.K. Gray, A.D. (2016) From macroplastic to microplastic: degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat, *Environ. Toxicol. Chem.* 35, doi: 10.1002/etc.3432
 76. Wieczorek, A.M. Morrison, L., Croot, P.L. Allcock, A.L. MacLoughlin, E. Savard, O. Brownlow, H. & Doyle, T.K. (2018) Frequency of microplastics in mesopelagic fishes from the Northwest Atlantic. *Front. Marine Science* 5, art. no. 39, doi:10.3389/fmars.2018.00039.