

## Farklı Ekosistemlerde Mikroplastik Kirlilik: Oluşum, Toksikite ve Riskler

Elif ÇELİK<sup>1\*</sup>, Doğanay YÜKSEL<sup>2</sup>, Özlem TURGAY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 46000, Kahramanmaraş

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 46000, Kahramanmaraş

<sup>3</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 46000, Kahramanmaraş

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8280-8809>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-1926-5573>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-2286-833X>

\*Sorumlu yazar: elifcelik@ksu.edu.tr

### Derleme

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 11.10.2021

Kabul tarihi:09.05.2022

Online Yayınlanma:12.12.2022

#### Anahtar Kelimeler:

Mikroplastik

Toksikoloji

Kalıcı organik kirletici

Kirlilik

Trofik transfer

### ÖZ

Mikroplastikler olarak tanımlanan boyutu 5 mm'den daha küçük olan plastik fragmentleri, çevre üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle küresel düzeyde bir endişe konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikroplastiklerin doğadaki parçalanma özellikleri ve kalıcı organik kirleticileri emme, salma eğilimleri onları meydana getiren polimer türü ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte yüksek yüzey/hacim oranı özellikleri nedeniyle mikroplastikler başta sucul alanlar olmak üzere buldukları ortamdaki organik kirleticilerle kolay şekilde etkileşime girebilmektedirler. Mikroplastiklerin toksik etkilerine ilişkin tutarsız bulgular, mikroplastiklerden kaynaklanan riskleri yorumlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle, mikroplastiklerin deniz ve kara ekosistemlerindeki davranışlarını belirlemek için standart örnekleme yöntemlerine ve kolay, güvenilir analitik tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Mikroplastik kirliliği toplum sağlığı bağlamında değerlendirildiğinde insan maruziyetinin yollarını, olası toksik etkileri ve endişeleri belirlemek önemli bir aşamadır. Bu derleme çalışmasında hava, su ve toprak ortamındaki mikroplastik kirliliği değerlendirilmektedir. Ayrıca mikroplastik kirliliği konusunda Türkiye'de yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

## Microplastic Pollution in Different Ecosystems: Occurrence, Toxicity and Risks

### Review Article

#### Article History:

Received: 11.10.2021

Accepted: 09.05.2022

Published online:12.12.2022

#### Keywords:

Microplastic

Toxicology

Persistent organic pollutant

Pollution

Trophic transfer

### ABSTRACT

Microplastics, plastic fragments under 5 mm in length, are now in the public domain as a growing issue of global concern because of their potential impacts on the environment. Their fragmentation characteristics and tendency to sorb or release persistent organic pollutants (POPs) are determined by the polymer type. The high surface-to-volume ratio of microplastics favors their interaction with organic pollutants present in the surrounding area, particularly in the aqueous area. The inconsistent findings regarding the toxic effects of microplastics point to the need for further studies to interpret risks originating from microplastics. For this reason, standard sampling methodologies and easy, reliable analytical techniques are needed to determine the fate of microplastics in marine and terrestrial ecosystems. Furthermore, in the context of public health, it is crucial to identify the routes of human exposure, the potential toxicological consequences, and concerns. Therefore, this review assesses the microplastic contamination in the air, water and soil environment. Also, studies conducted in Turkey on microplastic pollution are given.

## **1.Giriş**

Plastikler, hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, renk stabilitesi, dayanıklılık, ısı ve elektrik yalıtımı, şeffaflık, estetik cazibe, işleme kolaylığı, kendi kendine yağlama ve ucuza imal edilebilme gibi bir dizi avantaj sunar. Günümüzde, çeşitli avantajlar sunan plastiklere artan bir ilgi vardır (Yurtsever, 2019a). Küresel plastik üretimi 2020'de yaklaşık 367 milyon ton iken, Avrupa'da bu oran yaklaşık 55 milyon tona ulaşmıştır (Plastics Europe, 2021). Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı'nın yayınladığı rapora göre 2021 yılının ilk 11 ayında Türkiye'de yaklaşık 9,3 milyon ton plastik üretilmiştir (PAGEV, 2021). Yıllık plastik üretiminin büyük bir kısmı tek kullanımlık ambalaj malzemeleri ve bir yıl içinde atılan diğer kısa ömürlü ürünlerdir. Bu nedenle, atık yönetimi ve eksik çevre bilinci, ortamdaki plastik atık miktarını etkileyen önemli faktörlerdendir. Plastik malzemelerin temel özelliklerinden biri dayanıklı olmalarıdır; buna rağmen, zamanla çeşitli etkenlere bağlı olarak bozunurlar. Plastikler çevre ekosisteminde biyolojik, termal, mekanik, termo-oksidatif ve güneş ışığı (UV radyasyon) gibi bir dizi farklı etkenlerle bozunabilmektedir. Bunlar arasında oksijen ve güneş ışığı, doğal ortamlarda abiyotik materyal bozunmasının en önemli faktörleri olarak kabul edilmektedir. (Chubarenko ve ark., 2020). Bu bozunmalara bağlı olarak plastikler parçalanmaktadır.

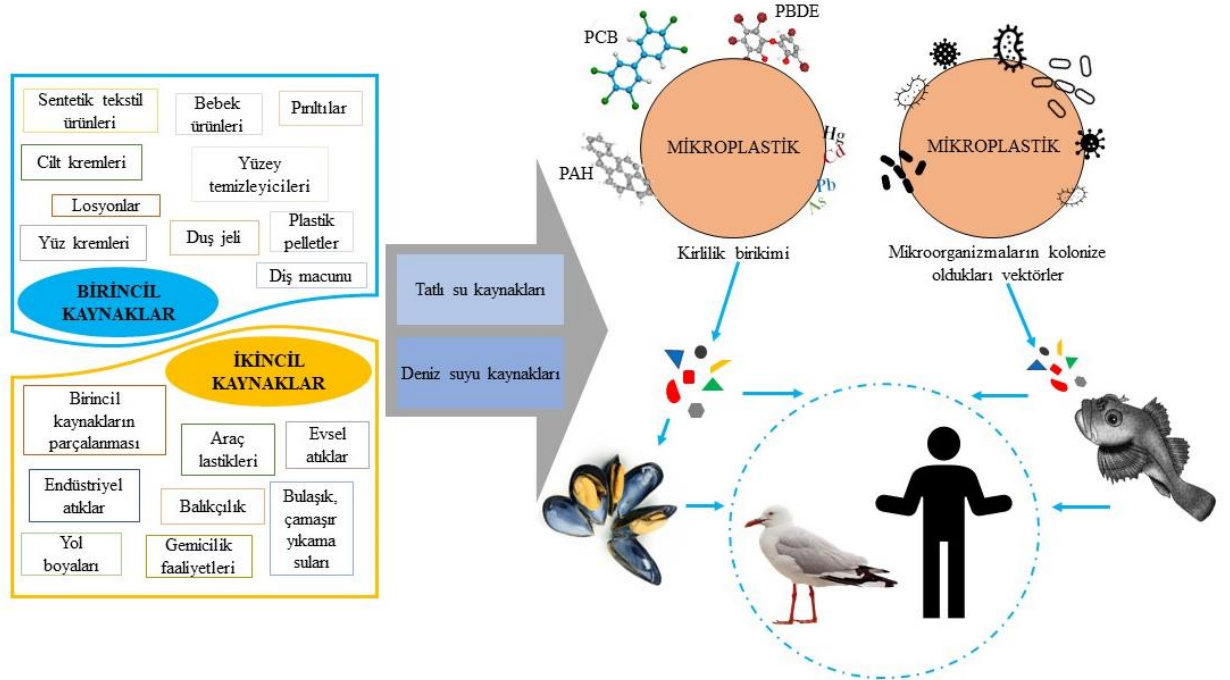
Plastikler farklı alanlarda (tekstil, otomotiv, gıda ve elektronik sektörü vb) kullanımının sağladığı faydalara rağmen önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Mikroplastikler, üretimlerinde kullanılan katkı maddeleri veya buldukları ortamdaki adsorbe ettikleri kalıcı organik kirleticiler nedeniyle kimyasal kirlilik oluşturmada, bununla beraber farklı organizmalar tarafından yutulan mikroplastikler sindirim kanalında fiziksel zedelenmeye sebep olabilmektedir. Bu çalışmanın amacı farklı bölgelerde yapılan güncel çalışmaları değerlendirerek mikroplastikler ile ilgili mevcut duruma ilişkin bir derleme oluşturmaktır. Yapılan derleme çalışmasında, konunun hassasiyeti belirtilerek bu konuda farkındalığın oluşması amaçlanmaktadır.

### *1.1.Mikroplastik oluşumunda etkili faktörler*

Mikroplastikler boyutları 5 mm'den küçük olan plastik parçaları olarak tanımlanabilir (Arthur ve ark., 2009). Mikroplastik kirlilik, derin denizler, adalar ve kutuplar gibi, karadan okyanuslara kadar birçok çeşitli biyotoplarda yaygın bir dağılım gösterir (Lusher ve ark., 2015; Wang ve ark., 2018). Mikroplastikler küçük boyutta üretilmiş olan birincil veya plastiklerin ayrışması-bozunması ile boyutları küçülmüş ikincil plastikler olarak gruplandırılmaktadır (Şekil 1). Birincil mikroplastiklerin okyanuslara küresel salınımının yılda 15 milyon ton olduğu (iyimser bir tahmine göre 0,8 milyon ton/yıl; kötümser bir tahmine göre 25 milyon ton/yıl) tahmin edilmektedir (Boucher ve Friot, 2017). Ayrıca aynı çalışmada okyanuslardaki tüm plastiğin %15 ile %31'inin birincil plastiklerden kaynaklandığı bildirilmektedir. Güneş ışığına ve fiziksel aşınmaya bağlı olarak plastiklerin daha küçük

parçalara bölünmesi sonucu ikincil plastiklerin oluştuğu bildirilmektedir (Lambert ve ark., 2014; Alomar ve ark., 2016; Yurtsever 2019a). Her yıl 4,8 ile 12,7 milyon ton arasında makroplastığın okyanuslara karıştığı tahmin edilmektedir (Boucher ve Friot, 2017). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (European Food Safety Authority, EFSA) verilerine göre sucul alanlardaki ikincil mikroplastik kontaminasyonunun yıllık 68,5-275 bin ton civarında olduğu bildirilmektedir (EFSA, 2016). İkincil mikroplastiklerin oluşumunu inceleyen bir çalışmada, dört malzeme (yüksek yoğunluklu polietilen, yüksek etkili polistiren, naylon 6 ve polipropilen) üzerinde hızlandırılmış iklimlendirme gerçekleştirilmiştir. Deney modelinde yüksek yoğunluklu polietilen ve naylon 6 kaynaklı mikro lifler ortaya çıkarken, yüksek yoğunluklu polistiren ve polipropilende fiziksel parçalanma olmadığı bildirilmiştir (Naik ve ark., 2020).

Biber ve ark., tarafından 2019 yılında yapılan bir çalışmada polietilen, polistren, polietilen teraftalat ve bioten (Biothene) bileşiklerinin 600 günlük maruziyet (gölgede ve güneş ışığı altında ışıktaki karada ve deniz suyu ortamında) süresi içerisinde belirli periyotlarla örnekleme yapılarak bozunumları ve mikroplastik oluşturma potansiyelleri değerlendirilmiştir. Güneş ışığı altında kara ortamında bekletilen tüm örnekler diğer durumlara göre daha hızlı parçalanırken bu bileşikler arasında en hızlı bozunmanın polistren olduğu görülmüştür. Buna ek olarak karadaki parçalanmanın deniz suyuna göre daha hızlı olduğu ve doğrudan ışığın parçalanmayı hızlandırdığı bildirilmiştir.



**Şekil 1.** Birincil ve ikincil mikroplastik kaynaklarının besin zincirine katılması (PAH: polisiklik aromatik hidrokarbon; PCB: poliklorlu bifenil; PBDE: poli bromlu difeniller)

### *1.2. Mikroplastiklerin saptanması ve ölçümü*

Mikroplastiklerin tespit edilmesi ve miktarlarının belirlenmesinin, bu kirleticilerin çevredeki heterojen dağılımları nedeniyle kolay olmadığı ifade edilmektedir. (Cole ve ark., 2011; Akdoğan ve Guven, 2019). Yoğunluğu deniz suyunu aşan plastikler çökerek birikirken (Woodall ve ark., 2014), düşük yoğunluklu plastikler su yüzeyinde (Suaria ve Aliani, 2014) veya su kolonunda asılı halde (Fossi ve ark., 2012) bulunabilirler. Su yüzeyinde kalması beklenen polietilen ve polipropilen gibi parçacıkların çöktürülmesi için tutunabildiği gözlenmiştir (Horton ve ark., 2017).

Mikroplastiklerle ilgili yapılan çalışmalarda yaşanan bir diğer zorluk, çalışmalarda farklı metodolojik yaklaşımların kullanılması olarak gösterilebilir (Rainieri ve Barranco, 2019). Öte yandan farklı sektörlerde çok çeşitli amaçlarla kullanılmalarından ötürü mikroplastiklerin kimyasal yapıları birbirinden farklı olabilir. Bu sebeple çalışmalarda aynı metodolojilerin kullanılması genellikle mümkün olmamaktadır. Bunlara ek olarak literatürde, mikroplastiklerin kaynağını veya taşınımını izlemek için kullanılacak etkili bir yöntem bulunmadığı ifade edilmektedir (Reynaud ve ark.,2022). Genellikle sediment ve karasal alanlarda yapılan ölçümlerde sonuçlar “gram mikroplastik/m<sup>2</sup>”, “adet mikroplastik/m<sup>2</sup> (veya cm<sup>2</sup>)” veya “adet mikroplastik/kg sediment (ıslak veya kuru)” olarak verilirken; sucul alanlarda yapılan örneklemelemlerde “mg mikroplastik/m<sup>3</sup>”, “adet mikroplastik/m<sup>3</sup>” veya “adet mikroplastik/L” olarak; havadan yapılan örneklemelemler “adet mikroplastik/m<sup>3</sup>” olarak ve canlılardan alınan örneklerde ise “adet mikroplastik/organizma” olarak verilmektedir. Birimlerdeki farklılıklar nedeniyle, konu ile ilgili yapılan çalışmalardaki verilerin karşılaştırılması/kıyaslanması zorlaşmaktadır. Bunlara ek olarak yapılan bir çalışmada plastiklerin su sütunu içerisine dikey bir katman olarak dağıldığı, bu nedenle okyanustaki plastik kirliliğinin belirlenmesinde yüzey örneklemesinin yeterli olmayabileceği ifade edilmiştir. Mikroplastik kirliliğini denizlerde doğru bir şekilde ölçmek ve yönetmek için jeofizik bir yaklaşım benimsenmesinin önemi çalışmada üzerinde durulan bir konudur (Kukulka ve ark., 2012). Bununla birlikte, analizi gerçekleştiren laboratuvar personeli kaynaklı kontaminasyon (tokalarda bulunan pırıltılar, sentetik tekstil ürünleri ve kozmetik ürünler gibi birincil mikroplastik vektörleri) nedeniyle hatalı sonuçlar elde edilebilir.

### *1.3. Gıdalardaki mikroplastik kontaminasyonu*

Mikroplastiklerin neden olabileceği kimyasal, fiziksel veya biyolojik toksik etkiler günümüzde tam olarak aydınlatılmamıştır. Bu nedenle gıdaların üretim prosesleri esnasında herhangi bir plastik kontaminasyonuna maruz kalıp kalmadığının veya kontaminasyon söz konusu ise bu bulaşmanın kaynağının belirleneceği çalışmalar son tüketicilerin sağlığı açısından önemli görülmektedir. Konu ile ilgili yapılan bir çalışmada 14 ülkeden temin edilen 159 kaynak suyu, 12 bira örneği ve 12 ticari deniz tuzu örneğinde plastik kontaminasyonu araştırılmıştır. Musluk suyu örneklerinin %81'inde, bira ve tuz markalarının tamamında yabancı parçacık bulunduğu belirtilmiştir (Kosuth ve ark., 2018). Tespit edilen yabancı parçacıkların döküntülerin selülozik olmadığı ve dolayısıyla sentetik/plastik olma

ihtimalinin daha yüksek olduğuna dair destekleyici kanıtların olduğu belirtilmiştir. Dokuz farklı ülkede 11 şişe su markası ile yapılan bir çalışmada incelenen toplam 259 şişenin %93'ünde mikroplastik kontaminasyonu saptanmıştır. Laboratuvar kontaminasyonu hesaba katıldıktan sonra, incelenen şişe sularının litresi başına >100 µm büyüklüğünde ortalama 10,4 mikroplastik parçacık bulunduğu bildirilmektedir. Tespit edilen mikroplastiklerin %54'lük kısmının şişe kapaklarının üretiminde kullanılan yaygın bir plastikte eşleşen polipropilen olduğu görülmüştür. Bu durum kontaminasyonun kısmen ambalajlama ve/veya şişeleme işleminden kaynaklandığını göstermektedir (Mason ve ark., 2018). Tablo 1'de mikroplastik tespit edilen bazı gıdalar, bu gıdalardaki ortalama mikroplastik miktarları ve türleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Mikroplastik kontaminasyonu gözlenen bazı gıdalar

Gıda	Örneklem Bölgesi	Ortalama Miktarı	Boyut Aralığı	Polimer Çeşidi	Referans
<b>Deniz Ürünleri</b>					
Midye ( <i>Mytilus edulis</i> )	Fransa, Belçika, Hollanda kıyıları	0,2-0,5 partikül g <sup>-1</sup>	0,015-1 mm	-	Van Cauwenberghe ve ark., 2015
Midye ( <i>Mytilus edulis</i> )	Çin kıyıları	1,5-7,6 partikül g <sup>-1</sup>	0,033-4,7	CPH, PET, PES	Li ve ark., 2016
Midye ( <i>Mytilus edulis</i> )	Türkiye (Adana, Ankara, Bodrum, İstanbul ve İzmir'de bulunan satıcılar)	0,6 ± 0,1 adet mikroplastik (n=317, % 62,7 fiber, % 37,3 partikül)	1,6 mm (lif formunda ortalama boyut), 1,8 mm (partikül formunda ortalama boyut)	PP, PE	Gündoğdu ve ark., 2020
Derin deniz balığı	Güney Çin denizi	Karın: 1,56 partikül g <sup>-1</sup> Sindirim kanalı: 4,89 partikül g <sup>-1</sup>	<1 mm	CPH, PA, PET	Zhu ve ark., 2019
İnci kefalı	Türkiye, Van Gölü	Sindirim kanalı: 34±13 adet balık <sup>-1</sup>	-	PP, PE	Atici ve ark., 2021
Midye ( <i>Mytilus galloprovincialis</i> ve <i>Ruditapes decussatus</i> )	Türkiye (İzmirKörfezi: Karşıyaka ve Gülbahçe)	8,72 partikül midye <sup>-1</sup>	-	-	Yozukmaz, 2021
<b>Tuz</b>					
Okyanus, deniz ve kaya tuzu	Amerika Birleşik Devletleri	47-806 partikül kg <sup>-1</sup>	0,1-5 mm	-	Kosuth ve ark., 2018
Deniz tuzu	İtalya	1600-8200 partikül kg <sup>-1</sup>	0,004-2,1 mm	-	Renzi ve ark., 2018
Deniz, göl ve kaya tuzu	Türkiye	140-315 partikül kg <sup>-1</sup>	0,3-0,5 (ortalama aralık)	Poliamid polimer türevleri	Yurtsever, 2018
Deniz, göl ve kaya tuzu	Türkiye	8-102 partikül kg <sup>-1</sup>	0,02-5 mm (2,3 mm ortalama)	PE, PP	Gündoğdu, 2018
<b>İçecekler</b>					
İçme Suyu	Almanya	11 partikül L <sup>-1</sup> (karton ambalaj), 118 partikül L <sup>-1</sup> (geri dönüşümlü plastik ambalaj)	0,005-0,1 mm	PET, PE, PA, PP	Schymanski ve ark., 2018
İçme Suyu	Çek Cumhuriyeti	338-628 partikül L <sup>-1</sup> (işlenmiş su), 1473-3605 partikül L <sup>-1</sup>	0,001-0,1 mm	PBA, PE, PET, PMMA, PP, PS, PTT, PVC (ham su)	Van Cauwenberghe ve ark., 2015

				PAAm, PE, PET, PP, PVC (işlenmiş su)	
Bira	Almanya	2-79 adet L <sup>-1</sup> (fiber), 12-109 adet L <sup>-1</sup> (parçacık), 2-66 adet L <sup>-1</sup> (granül)	-	-	Liebezeit ve Liebezeit E., 2014
Bira	Amerika Birleşik Devletleri	0-14,3 partikül L <sup>-1</sup>	0,1-5 mm	-	Kosuth ve ark., 2018
<b>Bal, Şeker</b>					
Bal	Almanya	10-336 adet kg <sup>-1</sup> (fiber), 2-82 adet kg <sup>-1</sup> (parçacık)	0,01-birkaç milimetre	-	Liebezeit ve Liebezeit E., 2015
Bal	İsviçre	32-108 adet kg <sup>-1</sup> (fiber), 8-28 adet kg <sup>-1</sup> (diğer)	-	PET	Mühlschlegel ve ark., 2015
Şeker	Almanya, Fransa, İtalya ve İspanya	217 adet kg <sup>-1</sup> (fiber), 32 adet kg <sup>-1</sup> (fragment)	-	-	Liebezeit ve Liebezeit E., 2013

CPH: cellophane; PET: polietilenterefalat; PES: poliester; PP: polipropilen; PE: polietilen; PA: poliamid; PBA: polibütillakrilat; PMMA: polimetilmetakrilat; PS: polistiren; PTT: politrimetilenterefalat; PVC: polivinil klorür; PAAm: poliakrilamid

#### 1.4. Mikroplastiklerin organizmalar üzerindeki etkileri

Mikroplastiklerin organizmalar üzerindeki etkileri partikül boyutu, kimyasal bileşimi ve absorbe edebileceği kirlilikten kaynaklanabilir. Genellikle 150 µm boyutundan daha büyük olan partiküller absorplanamaz ve bulunduğu bölgede inflammatuar etki gösterebilir. Fakat bu boyuttan daha küçük partiküller sistemik maruziyete neden olabilir. Örneğin; nanoplastiklerin organlara penetre olabileceği (EFSA, 2016) ve boyutları küçüldükçe biyolojik sistemlerle daha fazla etkileşime girebilecekleri ileri sürülmektedir (Reynaud ve ark., 2022). Herhangi bir alt sınır belirtmeksizin 1µm'den küçük mikroplastik partikülleri nanoplastik olarak isimlendirilmektedir (Koelmans ve ark., 2019). Ayrıca nanoplastikler bazı özellikleri bakımından (taşınma, koloidal sistemlerle etkileşim, biyoyarlanım, plastik katkı maddelerinin salınması gibi) mikroplastiklerden farklılık gösteren parçacıklardır (Gigault ve ark., 2021). Mikroplastikler havada asılı kalabildikleri için solunum yolu ile transferleri mümkündür. Buna bağlı olarak organizmanın solunum sisteminde lezyona neden olabildikleri bildirilmiştir (Prata 2018).

Mikroplastikler ile ilgili yapılan çalışmalar ışığında mikroplastiklerin besin zincirine dahil olabileceği öngörülmektedir. Fakat bununla ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Farrell ve Nelson, 2013; Gutow ve ark., 2016). Mikroplastlerin bir trofik seviyeden diğerine sürekli bir şekilde transfer olması durumunda mikroplastiklerin biyolojik dokularda birikeceği bildirilmektedir. Özellikle midye gibi bütün olarak tüketilen deniz canlılarının, mikroplastiklerin insanlara taşınımı açısından bir vektör olabileceği bildirilmektedir (Gedik ve Eryasar, 2020). Yapılan bir çalışmada midyelerin yapısında bulunan işaretli mikroplastiklerin yengeçlere trofik transferi gözlenmiştir. Buna göre ilk 24 saatte yengeç dokularında ve hemolenf sıvısında mikroplastik miktarının arttığı görülmüştür. 24 saat sonunda yengeç hemolenfinde, midye tarafından tutulduğu tahmin edilen mikroküreciklerin %0,28'si tespit edilmiştir (Farrell ve Nelson, 2013). Yengeçlerle yapılan başka bir çalışmada ise yengeçlerin mikroplastığı besin yoluyla veya solungaçları ile alımı incelenmiştir. Diyet yoluyla mikroplastığı

maruz bırakılan yengeçlerin 14 gün sonunda sindirim kanalında mikroplastığe rastlanmamıştır. Öte yandan solungaçları vasıtasıyla mikroplastiklere maruz bırakılan yengeçlerde 21. güne kadar mikroplastiklere rastlanmıştır (Watts ve ark., 2014). Bunların yanı sıra farklı canlılarda mikroplastiklerin trofik transferinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Nelms ve ark. tarafından yapılan çalışmada Kelt Denizi'nde yakalanan Atlantik uskumrularından (*Scomber scombrus*) boz foklara (*Halichoerus grypus*) mikroplastik transferi gözlemlenmiştir (Nelms ve ark., 2018). Batel ve ark. tarafından yapılan çalışmada da 1 µm ile 20 µm arasındaki kadar mikroplastik parçacıklarının artemya larvalarından (*Artemia nauplii*) zebra balığına (*Danio rerio*) aktarıldığı bildirilmiştir (Batel ve ark., 2016). Gutow ve ark. tarafından yapılan çalışmada deniz yosunundan (*Fucus vesiculosus*) deniz salyangozuna (*Littorina littorea*) mikroplastik transferi gözlemlenmiştir. Buna göre deniz yosunlarının mikroplastiklerin trofik transferi için önemli bir basamak olabileceği ifade edilmektedir (Gutow ve ark., 2016). Başka bir çalışmada avdan avcılara mikroplastik geçişinin (midyeden (*Perna perna*), yengeç (*Callinectes ornatus*) ve kirpi balığına (*Spheeroides greeleyi*), ancak 10 günlük maruziyetten sonra gözlemlendiği ve dokularda mikroplastik birikimi ile ilgili kanıt tespit edilemediği belirtilmektedir (Santana ve ark., 2017). Benzer şekilde Grigorakis ve ark. tarafından yapılan çalışmada mikrofilm ve mikroboncuk yapısındaki mikroplastiklerle beslenen Japon balığının (*Carassius auratus*) mikroplastığın %50'lik kısmını beslenmeden sonraki ilk 10 saatte; %90'lık kısmını ise yaklaşık 34 saatte elimine ettiği belirtilmektedir. Bu veriler ışığında, mikroplastiklerin avdaki konsantrasyonunun ve yırtıcıların eliminasyon kapasitesinin mikroplastiklerin trofik transferi açısından önemli olduğu söylenebilir (Grigorakis ve ark., 2017).

Mevcut bilgilere dayanarak, mikroplastiklerin doğal ortamda önemli bir risk oluşturup oluşturmadığına dair kesin bir kanıt olmadığı düşünülmektedir. Farklı polimer türlerinin ve bunlardan kaynaklanabilecek toksisite seviyesinin doğal ortamlardaki çevresel koşullara bağlı olarak ne kadar değiştiği tam olarak bilinmemektedir. (Akdogan ve Guven, 2019). Öte yandan doğada bulunma miktarlarına kıyasla daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içeren deney modellerinin kullanıldığı çalışmalar bazı araştırmacılar tarafından gerçekçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmemektedir. Fakat mikroplastikler kalıcı kirleticilerdir ve konsantrasyonlarının önümüzdeki yıllarda artması beklenmektedir (Duis ve Coors, 2016). Bununla beraber, mikroplastiklerin yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bazı bölgeler zaten mevcuttur. Bunlardan birisi Güney Pasifik Çöp Alanı olarak ifade edilen bölgedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmada 1.6 milyon km<sup>2</sup>'lik bu alanda yaklaşık 79 bin ton ağırlığında toplam 1.8 trilyon plastik parçacığın bulunduğu tahmin edildiği bildirilmektedir (Lebreton ve ark., 2018). Benzer şekilde okyanus girdapları sonucu Kuzey Pasifik Okyanusu'nun doğu kısmında da plastik kirliliğinin yoğun olduğu Kuzey Pasifik Çöp Alanı bulunduğu bildirilmektedir (Egger ve ark., 2020).

## 2. Mikroplastik Kirliliğinin Oluşturduğu Riskler

Mikroplastiklerin üç olası toksik etkisi vardır. Bunlardan birincisi plastik parçacıkların kendilerinden kaynaklanan, ikincisi plastiklerin üretiminde kullanılan katkı maddelerinden kaynaklanan ve üçüncüsü plastikler tarafından bulunduğu çevreden adsorbe edilebilen kalıcı organik kirleticiler gibi kimyasal maddelerden kaynaklanan toksik etkiler olarak sıralanabilir. Mikroplastikler plankton boyutunda olduğu için deniz canlıları tarafından yutulabilmektedir (Farrell ve Nelson, 2013; Naik ve ark., 2020). Mikroplastiklerin fiziksel olarak, sucül canlıların sindirim sistemine dahil olabileceği ve sindirim sisteminin tıkanmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Bu durumun sucül canlılarında beslenme ve enerji asimilasyonunu azaltabileceği (Browne ve ark., 2015) ve buna bağlı olarak canlının gelişmesinde ve doğurganlığında azalma gözlemlenebileceği öngörülmektedir. Mavi midye (*M. edulis*) ile yapılan mikroplastik maruziyeti modellemelerinde polistiren mikrokürelerin (3 ve 10 µm) midyelerin bağırsağında biriktiği ve dolaşım sistemine dahil olduğu belirlenmiştir. (Browne ve ark., 2008). Mavi midyelerle yapılan başka bir çalışmada parçacık boyutunun küçülmesine bağlı olarak mikroplastiklerin dolaşım sistemine taşınabildiği tespit edilmiştir (Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014).

Mikroplastiklerin neden olabileceği toksik etkilerin plastiğin türüne, kimyasal bileşimine, afinitesine bağlı olduğu; bu sebeple mikroplastiklerin miktarı kadar kimyasal yapılarının da değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Küresel olarak üretilen plastiğin yaklaşık %90'ı altı kategoriden birine girmektedir: yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren ve polietilen tereftalat (Kosuth ve ark., 2018). Yapılan çalışmalarda tespit edilen mikroplastiklerin ağırlıklı olarak polietilen, polipropilen ve polistiren esaslı maddelerden oluştuğu belirtilmektedir (Bouwmeester ve ark., 2015). Plastiklerin üretiminde esas polimerin yanı sıra çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Plastiklerin ağırlığının yaklaşık %4'ünü kimyasal katkı maddelerinin oluşturduğu belirtilmektedir (Andrady ve Neal, 2009). Bu katkı maddelerinin plastiklerin yaşam döngüsü içinde bulunduğu çevreye salınabileceği belirtilmiş (Sajiki ve Yonekubo, 2003); dolayısıyla bu kimyasalların canlılar üzerinde toksik etkiler gösterebileceği öne sürülmüştür (Lithner ve ark., 2009). Bu katkı maddeleri plastikleştiriciler (ftalatlar), inert dolgu maddeleri, bromlu alev geciktiriciler (BFR), bisfenol analogları, sürfektanlar, oksidasyonu önleyici maddeler, UV radyasyonuna ve yüksek sıcaklıklara karşı direnç sağlayan maddeler, pigmentler, yağlayıcılar, antistatikler, nanopartiküller veya nanofiberler, biyositler ve kokular olarak sıralanabilir (Andrady ve Neal, 2009; Lambert ve ark., 2014). Avrupa Kimyasal Ajansı (European Chemicals Agency, ECHA) verilerine göre, toplam 1550 potansiyel plastik katkı maddesi olduğu ve endüstri tarafından onaylanmış veya tescil ettirilen 418 katkı maddesi olduğu bildirilmektedir (ECHA, 2019). Plastiklere katılan monomerler ve katkı maddelerindeki risklerden biri de eksik polimerizasyon nedeniyle bu maddelerin matristen göç etmesi olarak değerlendirilebilir. Buna örnek olarak yutulmuş veya solunarak vücuda alınmış parçacıkların yapısından kimyasal madde salınımı olabileceği bildirilmiştir (Cole ve ark., 2011). Migrasyona uğrayan maddelerin ftalatlar ve bisfenol A (BPA) olması



durumunda, endojen hormonlara müdahale ederek endokrin bozucu olarak işlev görebildikleri (Cole ve ark., 2011) ve bazı solunum yolu hastalıklarının patogeneğinde rol oynayabildikleri bildirilmiştir (Ventrice ve ark., 2013; Xie ve ark., 2016). Özellikle küçük çocuk ve bebek gıdaları ile temas eden plastik malzemelerde migrasyon limitinin 60 mg/kg olması yönünde açık bir ifade Türk Gıda Kodeksi'nde (2019) bulunmaktadır. Hamilelik dönemi ve çocukluk çağında BPA maruziyetinin çocukluk çağı astımı ve hırıltılı solunum ile ilişkili olduğu bilinmektedir. (Xie ve ark., 2016). Polikarbonat tüplerden deniz suyuna BPA sızıntısının incelendiği bir çalışmada BPA migrasyonu hızının sıcaklığa ve süreye bağlı olduğu, 20°C gibi düşük sıcaklıklarda bile plastik döküntüden deniz suyuna sızan BPA miktarının önemli seviyelerde olduğu bildirilmiştir (Sajiki ve Yonekubo, 2003). Ayrıca Granby ve ark., tarafından yapılan bir çalışmaya göre mikroplastiklere emdirilen halojenli kontaminantların Avrupa levreklerinde poliklorlu bifenillerin ve bromlu alev geciktiricilerin birikmesini önemli ölçüde yükselttiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada gen ekspresyon sonuçlarına göre mikroplastiklerin bazı kimyasal kirleticilerin olumsuz etkilerini artırabildiği, biyoyararlanımını etkilediği, karaciğerde detoksifikasyonu engellediği veya indüklediği, lipid dağılımını etkilediği tespit edilmiştir (Granby ve ark., 2018).

Mikroplastiklerin üçüncü toksik etkisi plastiklerce absorbe edilen kalıcı organik kirleticilerden (POP) kaynaklanabilir. Bu POP'lar genellikle hidrofobik maddelerdir ve mikroplastiklere olan ilgileri sudan daha yüksektir. Mikroplastiklerin yüksek miktarda POP'u hem yüzeyine hem de iç kısımlarına absorbe edebildikleri bildirilmektedir (Wang ve ark., 2021). Aynı çalışmada mikroplastiklerin poliklorlu dibenzo-p-dioksinler, poliklorlu dibenzo-furanlar, polibromlu difenil eterler, polibromlu dibenzo-p-dioksinler, polibromlu dibenzofuranlar, poliklorlu bifeniller ve polibromlu bifeniller grubuna ait POP'ları absorbe ettikleri bildirilmektedir. Bazı kimyasal kontaminantların mikroplastikler tarafından absorplanarak konsantrasyonlara hale gelebilecekleri çeşitli çalışmalarda tespit edilmiştir (Mato ve ark., 2001; Lee ve ark., 2014; Velzeboer ve ark., 2014). Pelet izleme programı adı altında dünyanın farklı bölgelerinden toplanan plastik peletler ile gerçekleştirilen poliklorlanmış bifenillerin (PCB'ler), polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH'lar), dikloro-difenil-trikloroetan ve metabolitlerinin (DDT'ler), polikromlu difenil eterlerin (PBDE'ler), alkilfenoller ve bisfenol A'nın, konsantrasyonlarını 1 ile 10.000 ng/g arasında değiştiği tespit edilmiştir (Hirai ve ark., 2011). Bu oranlar hidrofobik organik kirleticilerin suda bulunma konsantrasyonlarına göre  $10^6$  kat zenginleştiği şeklinde yorumlanmaktadır (Lohmann, 2017). Mikroplastiklerin iyi adsorbe ettiği bilinen kontaminantlar arasında PCB'ler, PAH'lar, organoklorin pestisitler (örn. DDT, HCH) ve diğer kalıcı organik kirleticiler bulunur (Mato ve ark., 2001). Öte yandan Arthur ve ark., tarafından yayınlanan bir raporda bahsedilen bir raporda bahsedilen kimyasalların açık okyanustaki mevcut seviyeleri göz önüne alındığında, mikroplastiklerin PCB, dioksinler ve DDT gibi POP'ların için önemli bir küresel jeokimyasal rezervuar olmayabileceği belirtilmiştir (Arthur ve ark., 2009). Hirai ve ark., tarafından yapılan çalışmada açık okyanusa göre kentsel plajlardaki plastik parçalarında daha yüksek konsantrasyonlarda POP gözlemlendiği; bu nedenle, bu hidrofobik kirleticilerle ilişkili risklerin,

kentsel plajlarda daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Hirai ve ark., 2011). Diğer taraftan hidrofilik organik kirleticilerin mikroplastiklere ve mikroplastiklerden ortama difüzyonunun oldukça yavaş olduğu; bu nedenle, bu kirleticilerin mikroplastiklerden okyanuslara (veya okyanustan mikroplastiklere) geçişinin oldukça sınırlandığı (Bakir ve ark., 2016) ve herhangi bir yer ve zamanda mevcut POP'lara göre daha az katkı sağlayacağı ifade edilmiştir (Lohmann, 2017). Mikroplastiklerde biriken ve bazı organizmalar tarafından alınan POP'ların deniz canlıları üzerindeki etkisinin net olmadığı, bu konularda bilgi eksikliği olduğu düşünülmektedir. Rainieri ve ark., tarafından yapılan bir çalışmada mikroplastiklerin tek başına test edildiği deney koşullarında zebra balığı üzerindeki etkisi ile PCB, BFR, PFC ve metil civa emdirilmiş mikroplastiklerin doku ve organlardaki etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Mikroplastiklerin ve onlara emdirilmiş kirleticilerin organların homeostazı üzerindeki birleşik etkisinin, kirleticilerin tek aşına gösterdiği etkilerden daha önemli olduğu saptanmıştır. Kirletici emdirilmiş mikroplastiklerle desteklenen yemlerin zebra balıklarının beslenmesindeki en belirgin etkisinin karaciğer üzerinde ortaya çıktığı bildirilmiştir (Rainieri ve ark., 2018). Mikroplastikler POP'ların yanı sıra ağır metalleri de absorbe edebilirler. Nitekim yapılan bir çalışmada in vitro koşullarda mikroplastiklerin ağır metallerin taşınımı için aracılık edebildiği bildirilmiştir. Ayrıca ağır metallerin mikroplastik yüzeyinde tutunmasının pH, temas süresi ve konsantrasyon gibi değişkenlere bağlı olduğu ve mikroplastiklerin yüzeyindeki pürüzlü yapının ağır metallerin tutunmasını kolaylaştırıcı etki gösterdiği belirtilmiştir (Kadızoğlu, 2019). Başka bir çalışmada tatlı sudaki plastiklerin, eser metalleri adsorbe etme eğiliminin yüksek olduğu bildirilmiştir. İçme suyu rezervleri için kaynak teşkil eden tatlı sularda ortaya çıkabilecek buna benzer bir kontaminasyonun gıda zincirine aktarılması potansiyelinin olduğu belirtilmiştir. (Turner ve Holmes, 2015).

Yukarıda sıralanan mikroplastik kaynaklı üç ana toksik etkiye ek olarak mikroplastikler mikroorganizmaları yüzeylerinde taşıyabilir. Mikroplastiklerin, bu mikroorganizmalar için vektör görevi görerek onları uzak mesafeler boyunca taşıyabileceği bildirilmektedir. Mikroorganizma içeren mikroplastikler yutulduğunda mikroorganizmaların bağırsaklarda açığa çıkabileceği ifade edilmektedir (Oberbeckmann ve ark., 2015). McCormick ve ark., (2014) tarafından atıksu arıtma tesisinde yapılan çalışmada arıtılmış suda bulunan mikroplastik miktarı ve mikroplastiklere tutunan mikroorganizmalar araştırılmıştır. Buna göre plastik numunelerde *Pseudomonadaceae* ve *Campylobacteraceae* familyasına ait mikroorganizmaların fazla miktarda bulunduğu bildirilmiştir. *Campylobacteraceae* familyasına ait mikroorganizmaların insan dışkı ve gastrointestinal bozukluklarla ilişkili olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Magana-Arachchi ve Wanigatunge, 2020; Shen ve ark., 2020). *Campylobacter*, dünya çapında bakteriyel gastroenteritin önde gelen nedeni olarak kabul edilmektedir (Backert ve ark., 2017) ve Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, *Campylobacter* enfeksiyonlarından her yıl tahmini olarak 2,2 milyon kişi hayatını kaybetmektedir (WHO, 2014). Mikroplastikler, atmosferdeki mikroorganizmaları taşıyan ve koruyan bir kalkan görevi de görebilir. Mikroorganizmaların; mikroplastiklerin yüzeyine tutunarak, doğrudan insan akciğerine ulaşabileceği,

savunma mekanizmalarını atlatarak, zayıf bölgelerde enfeksiyona neden olabileceği belirtilmektedir (Prata, 2018).

### 2.1. İnsan maruziyeti

Çeşitli boyut ve şekildeki plastik fragmentlerin sucul alanlarda besin zincirine dahil olması, üretim süreçlerinde gıdaların yapısına karışması veya hava ortamından solunması yoluyla insan vücuduna alınabileceği düşünülmektedir. Plastik fragmentlerin insan vücuduna transferlerinin mümkün olup olmadığının anlaşılması amacıyla yürütülen çalışmaların sayısı son yıllarda artmaktadır. Sağlıklı 22 gönüllü bireyin kan örneklerinde poli metil metakrilat, polipropilen, polistiren, poli etilen ve polietilen tereftalat yapıdaki 700 nm'den büyük mikroplastik varlığı araştırılmıştır. Gönüllü bireylerin %77'sinin (22 kişiden 17'si) kanlarında mikroplastik tespit edildiği bildirilmektedir. Kandaki plastik parçacıkların toplam konsantrasyonunun ortalama 1,6 µg/ml olduğu saptanmıştır. Mikroplastik türü olarak incelediğinde en yaygın olarak karşılaşılan mikroplastik çeşidinin PET (%50) olduğu ve onu sırasıyla PS (%36), PE (%23) ve PMMA (%5)' nin izlediği ifade edilmiştir. Ayrıca analiz edilen kan örneklerinin hiçbirinde polipropilen tespit edilemediği bildirilmektedir. Bu çalışma ile insanların plastik partiküllere maruz kalmasının, partiküllerin kan dolaşımına geçmesiyle sonuçlanabileceği hipotezini güçlendirmiştir (Leslie ve ark., 2022).

Ragusa ve ark., (2021) tarafından yapılan çalışmada altı insan plasentası, mikroplastiklerin varlığını değerlendirmek için analiz edilmiştir. Toplamda, 4 plasentada (5 cenin tarafında, 4 anne tarafında ve 3 koryoamniyotik membranda) küresel veya düzensiz şekilli 12 mikroplastik tespit edildiği bildirilmektedir. İki tanesi hariç, bulunan diğer mikroplastikler yaklaşık 10 µm boyutunda olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada kan dolaşımı ile bu boyutlara sahip maddelerin olası bir taşınımının olabileceği vurgulanmıştır (Ragusa ve ark., 2021).

Solunum sistemi veya gastrointestinal sistem epitelleri ile etkileşime giren mikroplastiklerin difüzyon veya hücrel penetrasyon yoluyla dolaşım sistemine ve diğer organlara taşınma ihtimali olduğu değerlendirilmektedir (Prata, 2018). Bununla birlikte, immünolojik tepkinin malzemenin boyut ve şekil gibi çeşitli fiziksel özellikleri ve endojen katkı maddelerinin varlığı, monomerlerin migrasyonu gibi kimyasal faktörlerle ilişkili olduğu görülmektedir (Wright ve Kelly, 2017). Alınan nefesle vücuda giren mikroplastiklerin büyük çoğunluğunun akciğerlerin mukosilyer klirens mekanizmaları sonucu tutularak vücuttan uzaklaştırıldığı bildirilmiştir (Gasperi ve ark., 2018). Fakat bazı mikroplastik parçalarının bu mekanizmayla tutulmadığı belirlenmiştir. Mikroplastik maruziyeti sonucu insanlarda meydana gelebilecek olumsuz etkilerin anlaşılabilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

### 2.2. Hayvan deneyleri ve mikroplastiklerin toksisitesi

Mikroplastiklerin farklı canlılarda yol açabileceği potansiyel olumsuz etkiler bazı *in vitro* çalışmaların konusu olmuştur. Yapılan bir çalışmada, sıçanlar, 90 gün boyunca 3 farklı dozda 0,5 µm polistiren mikroplastiklere maruz bırakılmışlardır. Doksan gün sonunda hayvanların kan ve yumurtalık örnekleri

incelendiğinde mikroplastiklerin bu dokularda fibrozise yol açtığı ve sıçanlarda oksidatif stres yoluyla yumurtalık hücrelerinin apoptozisine (programlı hücre ölümü) neden olduğu tespit edilmiştir. (An ve ark., 2021). Kopepod *Calanus helgolandicus* ile yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre; mikroplastik maruziyetine bağlı olarak, canlının enerji metabolizması ve motor aktiviteleri üzerinde kademeli bir azalma görüldüğü bildirilmektedir. (Isinibilir ve ark., 2020).

Küresel ve düzensiz şekle sahip mikroplastik parçalarının *Cyprinodon variegatus* 'da organ dağılımı, yüzmeye davranışları, gen ekspresyonu ve enzim aktivitelerindeki üzerindeki etkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada her iki tip mikroplastığın de sindirim sisteminde birikerek bağırsak rahatsızlığına neden olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda her iki mikroplastik çeşidi hücrel reaktif oksijen türleri (ROS) oluşmasına neden olmuştur (Choi ve ark., 2018).

İnsan kolon adenokarsinom Caco-2 hücrelerinde yapılan bir çalışmada 0,1 mm ve 5 mm boyutundaki polistiren mikroplastiklerin; hücre canlılığı, hücre içi reaktif oksijen türü seviyeleri, membran bütünlüğü ve akışkanlığı üzerindeki etkileri göz önüne alındığında düşük toksisiteye yol açtıkları bildirilmektedir. Ancak 5 mm boyutundaki polistiren mikroplastiklerin yüksek mitokondriyal depolarizasyona neden olduğu ve her iki boyuttaki polistiren mikroplastiklerin membran ATP bağlayıcı kaset taşıyıcı aktivitesini inhibe ettiği belirtilmiştir (Wu ve ark., 2019).

Mikroplastiklerin toksik etkisi yapılarında bulunan ftalatlardan da kaynaklanabilir. Ftalatların toksik etkisi öncelikle üreme ve solunum sistemleri üzerinde ortaya çıkarken, aynı zamanda karsinogenez (bir hücrenin kanserleşmesi için geçmesi gereken gereken aşamaların tümü) süreçlerinde ve hatta otizm spektrum bozukluklarında rol oynayabildiği bildirilmektedir (Ventrice ve ark., 2013). Plastik ürünlerde yaygın olarak kullanılan PBDE'ler, ftalatlar ve bisfenol A gibi katkı maddelerinin endojen hormonların sentezini taklit edebildikleri, rekabet edebildikleri veya bozabildikleri bildirilmektedir. Bu sebeple bu katkı maddeleri endokrin bozucu kimyasallar olarak bilinmektedir (Cole ve ark., 2011).

Polivinil kloridinin mikroalgler üzerindeki (*Skeletonema costatum*) toksisitesinin araştırıldığı çalışmada mikroplastik parçacıklarının mikroalglerin gelişmesi üzerinde önemli inhibisyon etkisi olduğu, yüksek konsantrasyonlu denemelerde mikroalglerin hem klorofil içeriğinin hem de fotosentetik verimliliğinin azaldığı bildirilmektedir (Zhang ve ark., 2017). Zebra balıklarında (*Danio rerio*) 7 günlük polistiren mikroplastik maruziyetinin neden olduğu toksik etkilerin incelendiği bir çalışmada, 5 µm çaplı mikroplastiklerin balık solungaçlarında, karaciğerde ve bağırsakta; 20 µm çaplı olanların ise balık solungaçlarında ve bağırsakta biriktiği bildirilmektedir. Histopatolojik analiz sonuçlarına göre her iki boyuttaki parçacığın da balık karaciğerinde inflamasyona ve lipid birikimine neden olduğu ve oksidatif stresin indüklediği görülmüştür (Lu ve ark., 2016).

### **3.Mikroplastik Kontaminasyonu**

#### *3.1. Karasal alanlar*

Mikroplastik araştırmalarının çoğunluğu sucul alanlara odaklanmıştır. Her ne kadar tatlı su ve karasal ortamlar, plastiklerin kökenleri ve nakil yolları olarak görülsede bu bölgeler hakkında hala

karşılaştırmalı bilgi eksikliği olduğu düşünülmektedir. Toprağa salınan plastik miktarı, okyanuslara salınımın 4-23 katı olarak tahmin edilmektedir (Horton ve ark., 2017). Genel olarak düşük yoğunluklu polietilenden oluşan ambalaj malzemeleri karasal alanlardaki plastik atıkların büyük kısmını oluşturmaktadır (Barnes ve ark., 2009). Çeşitli ülkelerde üretilen ve dünyadaki eğlence etkinliklerinde, şovlarda ve karnavallarda yaygın olarak kullanılan pırıltıların önemli bir mikroplastik kaynağı olduğu ifade edilmiştir (Yurtsever 2019b). Pırıltıların birçoğu metalize (alüminyum, titanyum, demir veya bizmut) polietilen tereftalattan imal edilmektedir (Yurtsever, 2019a). Ticari pırıltıların boyutları 50 ile 6350 µm arasında değişmektedir ancak en çok tercih edilen boyut 200 µm olarak bildirilmektedir (Blackledge ve Jones, 2007). Bu sebeple, PET pırıltılar çevrede birincil mikroplastik kirliliğinin önemli bir kaynağı olabilir. Bu pırıltılar sadece karasal alanlarda kalmayıp çeşitli şekillerde sucul alanlara da taşınabilir.

### *3.2.Sucul alanlar*

Sucul alanlardaki mikroplastiklerinin çoğunluğu karasal kaynaklardan taşındığı düşünülmektedir (Zhang ve ark., 2017). Sentetik tekstil ürünlerinin ve sentetik kauçuk lastiklerin erozyonunun birincil mikroplastiklerin en önemli kaynaklarından biri olduğu görülmektedir. Okyanuslardaki mikroplastik kirliliğinin %7'sinin bu kirleticilerin rüzgar ile taşınımı sonucu oluştuğu tahmin edilmektedir (Boucher ve Friot, 2017). Sucul alanlarda mikroplastik varlığını inceleyen çalışmalar çoğunlukla mikroplastığe maruz kalan canlıların sindirim sistemine odaklanmaktadır. Bunun sebebi ortamdaki mikroplastiklerin sucul canlılarca yutulması ve besin piramidine dahil olmalarıdır. Yutulan mikroplastiklerin gelişmeyi olumsuz etkilediği, karaciğerde biriktiği ve iltihaplanmaya neden olduğu ve adsorbe kimyasal kirleticilerin birikimi için bir vektör olarak işlev gördüğü gösterilmiştir (Lu ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2017). Bununla birlikte, besin piramidinin daha üst basamaklarında bulunana deniz memelileri gibi canlılarla ilgili daha çok çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Akdogan ve Guven, 2019).

Sucul alanlarda bulunan mikroplastiklerin dağılımı, türü, miktarı ve kaynağı hakkında yeterli veri bulunmamaktadır (Genc ve ark., 2020). Yapılan bir çalışmada her bir yıkama işlemi sırasında yaklaşık 1900 adet elyaf parçacığının yıkama suyuna karışabildiği bildirilmiştir. (Browne ve ark., 2011). Buna göre evsel atıkların sucul ve karasal alanlar için önemli bir plastik kontaminasyonu kaynağı olabileceği görülmektedir.

Dünyanın 19. en büyük gölü olan Hövsgöl Gölünde yapılan bir çalışmada mikroplastik yoğunluğu ortalama 20,435 parçacık/km<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir (Free ve ark., 2014). Araştırmacılar, bölgedeki nispeten sınırlı sanayi faaliyetlerine ve düşük nüfus yoğunluğuna rağmen bu dağ gölünde yüksek oranda mikroplastik bulunmasına dikkat çekerek, atık su yönetiminin bulunmadığı bölgelerdeki tatlı suların yoğun bir şekilde kirlenebileceğine vurgu yapmışlardır. Benzer bir çalışma Erzurum'da 2380 m yükseklikte bulunan bir krater gölünde yapılmıştır (710123'E 440048'N). En yakın yerleşim yerine 3 km uzaklıkta bulunan gölün 5 farklı bölgesinden alınan örneklerde Mikroplastik varlığı tespit edilmiştir (Comaklı ve ark., 2020). Kuzey kutup sularında mikroplastik varlığının araştırıldığı bir

çalışmada ise yüzey örneklerinde yaklaşık  $0,34$  parçacık/ $m^3$  ve yüzey altı örneklerinde ise yaklaşık  $2,68$  parçacık/ $m^3$  tespit edilmiştir (Lusher ve ark., 2015). Kuzey Kutbu'nda tespit edilen mikroplastik kirliliği, buz tabakalarının erimesine bağlı olarak artan denizcilik ve balıkçılık faaliyetleri, okyanus taşımacılığı ile ilişkilendirilmiştir. Bu örnekler ışığında mikroplastik kirliliğinin kısmen insan faaliyetlerinden korunmuş bölgelerde tespit edilmesi plastik atıkların daha iyi yönetilmesi gerekliliğine işaret etmektedir.

### 3.3. Hava ortamı

Mikroplastik kaynakları arasında kentsel girdiler giderek daha fazla incelenirken, atmosferdeki mikroplastik varlığı çoğunlukla ihmal edilmektedir. Ancak mikroplastiklerin düşük yoğunlukları nedeniyle kolayca havada asılı kalabildikleri bildirilmiştir (Abbasi ve ark., 2019). Atmosferdeki mikroplastik miktarı ve bunların taşınımı rüzgar, rüzgar hızı ve yönü, partikül büyüklüğüne bağlı çökme, dikey kirlilik gradyeni gibi koşullardan etkilenebilir (Prata, 2018). Düşük yoğunluklu polimerler (örneğin polietilen) ve daha küçük parçacıkların havada bulunma potansiyelleri daha yüksektir; böylece karasal ve sucul ortamları daha fazla kirletebildikleri belirtilmektedir (Horton ve ark., 2017; Prata 2018). Bu nedenle, insanların atmosferik mikroplastiklere maruziyeti mikroplastığın kaynağına ve meteorolojik - coğrafik faktörlere bağlı olarak değişim göstermektedir.

Bireylerin hava ortamından kaynaklı mikroplastik maruziyetinin mesleki ortamlarda daha yüksek olabileceği öngörülebilir. Yüksek hacimli polimerik malzemelerle çalışan fabrikalardaki yetersiz koşullar, havadaki mikroplastiklerin yüksek konsantrasyonuna kronik maruz kalmayla sonuçlanabilir. Türkiye'de bir tekstil fabrikasında yapılan çalışmaya göre yerde ortalama  $183$  adet/ $cm^2$  mikroplastik life rastlanırken; yerden  $1,8$  m yüksekten alınan numunelerde ortalama  $100$  adet/ $cm^2$  mikroplastik life rastlandığı bildirilmiştir. Fabrikanın  $10$  m uzağında yapılan örneklemede ise tekstil fabrikasında kullanılan lif dokusuyla eşleşen mikroplastiklerin tespit edildiği ifade edilmiştir. (Başaran, 2019). Başka bir çalışmada sentetik tekstil iplik fabrikasında toza maruz kalan işçilerin akciğer kanserine bağlı olarak daha yüksek ölüm oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir (Hours ve ark., 2007).

Paris'te açık ve kapalı alanlarda gerçekleştirilen bir çalışmada boyutu  $50$   $\mu m$  üzerinde olan çok sayıda solunabilir mikroplastik lifleri tespit edilmiştir (Dris ve ark., 2017). Aynı çalışmada kapalı alanlarda açık alanlara kıyasla daha yüksek miktarda mikroplastik liflerine rastlanmıştır. Paris'te yapılan başka bir çalışmada kentsel ve banliyö olmak üzere iki farklı bölgenin hava ortamındaki mikroplastik kirliliği kıyaslanmıştır. Buna göre kentsel alanda tespit edilen lif miktarının günde ortalama  $110 \pm 96$  partikül/ $m^2$ , banliyö bölgesinde ise günde ortalama  $53 \pm 38$  partikül/ $m^2$  olduğu görülmüştür (Dris ve ark., 2016).

### 3.4. Türkiye'de durum

Tatlı su alanında yapılan bir çalışmada Yozgat'ta bulunan Cevdet Dünder Göletinin yüzey sularındaki mikroplastik kirliliği araştırılmıştır (Erdogan, 2020). Çalışmada incelenen beş örneklem noktasında ortalama  $233$  partikül/ $m^3$  mikroplastik kirliliğine rastlanmıştır. Kirliliğin büyük oranda (%56)  $100-250$

µm boyut aralığındaki mikroplastiklerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Fiber formda bulunan mikroplastiklerin %91 oranla mikroplastiklerin baskın formunu oluşturduğu, yaygın mikroplastik polimerlerinin PP (%50) ve PE (%40)'den oluştuğu bildirilmiştir. Van Gölü'nde yürütülen bir çalışmada farklı bölgelerden alınan toplam 101 adet inci kefalinin (*Alburnus tarichi*) mide-bağırsak sisteminde balık başına 8 ile 124 arasında değişen miktarda mikroplastik bulundurduğu tespit edilmiştir. Bu oranın dünyadaki diğer çalışmalarla kıyaslandığında oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir (Atici ve ark., 2021). Fethiye İç Koyu'nda uzun vadeli rüzgar, dalga ve yoğunluk katmanlarına bağlı sirkülasyon desenleri modellenerek mevcut iklim durumu simüle edilmiştir. Bu modeller kullanılarak mikroplastiklerin birikimi ve taşınımı için olası senaryolar oluşturulmuştur. Buna göre, kıyı sirkülasyonunun zayıf olduğu Fethiye İç Körfezi'nin güneybatı kıyı sularında ve Murt Nehri ağzının doğusunda kıyı sularında mikroplastik birikimi beklenmektedir (Genc ve ark., 2020).

İstanbul, Haliç sedimanlarında plastik kirliliğinin belirlenmesi için yapılan çalışmada mevsimsel olarak tortu örnekleme yapılmış ve tortularda bulunan plastik içeriği tespit edilmiştir. Toplam plastik miktarı 566 parçacık/kg ıslak tortu olarak kaydedilmiştir. İlkbaharda 115 (%20,3), yaz aylarında 105 (%18,6), sonbaharda 103 (%18,2) ve kış aylarında 243 (%42,9) parçacık/kg ıslak tortu olarak belirlenmiştir. Plastik boyutlaması sonuçlarına göre 1-2 mm aralığında 118 partikül mikroplastik tespit edilmiştir (Dogruyol ve ark., 2019). İstanbul'da yapılan başka bir çalışmada ise Anadolu yakası Karadeniz sahilindeki plastik kirliliği incelenmiştir. Sayısal olarak en yüksek yoğunluk Riva istasyonunda bulunurken, en düşük yoğunluk Şile Limanı'nda tespit edilmiştir (Şener ve ark., 2019). Karadenizin güneydoğu sahillerinde gerçekleştirilen bir çalışmada ise yüzey suyunda ortalama mikroplastik kirliliği  $1100 \pm 900$  partikül/m<sup>3</sup> ölçülmüştür (Aytan ve ark., 2016). On iki örneklem noktasından izole edilen mikroplastiklerin yaklaşık %49,4'ünün filament, %30,6'sının plastik film ve %20'sinin fragment formda bulunduğu bildirilmiştir. Marmara Denizi'nin yüzey sularındaki mikroplastik dağılımının incelendiği bir çalışmada mikroplastik konsantrasyonlarının komşu bölgelere göre daha yüksek olduğunu bildirmektedir (Tunçer ve ark., 2018).

Eylül 2018'de Ege ve Akdeniz'in kesiştiği Datça Yarımadası'nın kıyı şeridi boyunca uzanan kumsallarda mikroplastik kirliliğinin incelendiği bir çalışmada; hakim rüzgarlara ve yüzey akıntılarına maruz kalan tüm plajlarda mikroplastik fragmentlerin (%72) baskın kategori olduğunu bildirilmektedir. Datça Yarımadası'nda mikroplastik kontaminasyonunun, literatürde bulunan benzer bölgelere ait sonuçlardan daha yüksek olduğu gösterilmiştir ( $1154,4 \pm 700,3$  parçacık/kg kuru ağırlık) (Yabanlı ve ark., 2019). Mersin ve İskenderun körfezinde gerçekleştirilen bir çalışmada ise mikro ve mezoplastik kirliliği araştırılmıştır (Gundogdu ve Cevik, 2017). Yedi örneklem noktasından alınan numunelerde ortalama  $0,376$  plastik kirlilik/m<sup>2</sup> tespit edilmiştir. Her iki körfezde taranan toplam  $4,75$  km<sup>2</sup> alandan izole edilen 1770 adet plastik kirliliğin 1063'ünün plastik fragment, 527'sinin plastik film, 130'unun filament, 47'sinin PE köpük ve 3 tanesinin granül formunda olduğu bildirilmiştir. Kirlilik boyutları 300 µm ile 3 cm aralığında, ortalama kirlilik boyutu 2,9 mm bulunmuştur. Çalışmada aynı zamanda örneklem noktalarının nehir ağzlarına olan uzaklıkları ile bu noktalarda tespit edilen

plastik kirlilik miktarı arasında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde negatif korelasyon ( $r = -0,71$  ve  $p < 0,05$ ) olduğu bildirilmiştir. Bu açıdan mikroplastik kontaminasyonunun yoğun olan noktaların bulunduğu, mikroplastiklerin heterojen dağılımına bağlı olarak örnek alınan bölgeler arasında büyük farklılıklar olacağı öngörülebilir. Mikroplastiklerin oluşturacağı riskler değerlendirilirken bu yoğun kirlilik bulunduran bölgelerin göz önüne alınması gerekmektedir.

Tuz gölünde 2015 ve 2016 yılları arasında yürütülen bir çalışmada farklı 5 bölgeden alınan örneklerde ilk yıl ortalama 72,6 parçacık/200 mg tuz; ikinci yıl ise 84 parçacık/200 mg tuz miktarlarında lif, parçacık ve film şeklinde mikroplastik tespit edilmiştir. Aynı çalışmada alınan su ve hava örneklerinde de mikroplastik tespit edilmiştir (Çatalbaş, 2017). Tuz örneklerinde mikroplastik varlığı ile ilgili başka bir çalışma Yurtsever (2017) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada on farklı markaya ait deniz, göl ve kaya tuzu örneklerinde bulunan mikroplastik kirliliği araştırılmıştır. Kaya, deniz ve göl tuzu örneklerinin 200 gramında sırasıyla ortalama 28, 56 ve 63 adet mikroplastik tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin ağırlıklı olarak poliamid türevleri olduğu ve boyutlarının çoğunlukla 300-500  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada marketlerden temin edilen deniz tuzlarında 16-84 partikül/kg, göl tuzlarında 8-102 partikül/kg, kaya tuzlarında 9-16 partikül/kg aralığında mikroplastik kirliliği saptanmıştır (Gundogdu, 2018). Plastik polimerler içinde ağırlıklı olarak PE (%22,9) ve PP (%19,2) türevleri tespit edilmiştir. Kirliliğe yol açan partiküllerin boyutlarının 20  $\mu\text{m}$  ile 5 mm aralığında değiştiği ve ortalama partikül boyutunun 2,3 mm olduğu bildirilmiştir.

Gundogdu ve ark., (2020)'nin yaptıkları çalışmada Adana, Ankara, Bodrum, İstanbul ve İzmir illerinde olmak üzere 41 farklı noktadan temin edilen toplam 317 adet midye dolmasındaki mikroplastik varlığı araştırılmıştır. Adana'da bir ve Bodrum'da üç satıcıdan temin edilen toplam 28 örnekte mikroplastik varlığına rastlanmamıştır. Tüm örnekler içinde ortalama  $0,6 \pm 0,1$  mikroplastik tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin %62,7'sinin lif (ortalama maksimum boyut:  $1,6 \pm 0,1$  mm), %37,3'ünün partikül (ortalama maksimum çap:  $1,8 \pm 0,1$  mm) formunda olduğu belirtilmiştir. Çalışmada rastgele seçilen 40 örnek raman spektroskopisi ile incelenmiş ve PP, PE ve selülozun baskın mikroplastik türü olduğu belirlenmiştir. İzmir Körfezinde iki farklı midye türü (*Mytilus galloprovincialis* ve *Ruditapes decussatus*) ile yapılan bir çalışmada 60 midye örneğinde toplam 1682 mikroplastik tespit edilmiştir. Buna göre İzmir Körfezinde mikroplastik kirliliği olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Yozukmaz, 2021). Gedik ve Eryasar (2020) tarafından yapılan bir çalışmada Karadeniz, Marmara ve Ege denizlerinde 23 farklı lokasyondan elde edilen midyelerde (*Mytilus galloprovincialis*) mikroplastik varlığı araştırılmıştır. Örneklerin %48'inde mikroplastik tespit edildiği bildirilmektedir. Ayrıca çalışmada elde edilen verilerden yola çıkılarak Türkiye'de midye tüketicilerinin yılda ortalama 1918 adet mikroplastığe maruz kaldıkları tahmin edilmiştir.

Başaran, (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise bir tekstil işletmesinde ortalama 5 adet mikroplastik/L parçacığın arıtma çıkışından kanalizasyona deşarj edildiği bildirilmektedir. Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi'nde yapılan bir çalışmada ise mikroplastik giderim veriminin yaklaşık %92 olduğu fakat bu seviyede bile çıkıştaki mikroplastik miktarının 220,05 parçacık/L olduğu



bildirilmektedir (Bakkaloğlu, 2019). Öte yandan sucul alanlardaki plastik kontaminasyonunun büyük oranda karasal alanlardaki kontrolsüz atıklardan kaynaklandığı bilinmektedir. Bununla birlikte karasal alanlarda depolanan plastik atıklarının ancak küçük bir kısmının geri dönüştürüldüğü bildirilmektedir (UNEP, 2018). Eurostat 2020 verilerine göre Avrupa Birliği ülkelerinden ihraç edilen 15,9 milyon ton plastik çöpün yaklaşık %18'inin Türkiye'ye geldiği bildirilmektedir. Plastiklerin kontrolsüz şekilde çevreye dökülmesi ve/veya yakılması sonucunda toprak, su ve hava kirliliğine neden olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda Greenpeace tarafından yürütülen çalışmada Adana ilinde 5 farklı çöp döküm sahasından (Yüreğir/İncirlik, Çukurova/Karahan-2, Çukurova/Karahan-3, Seyhan/Kuyumcular, Seyhan/Yenidam) toprak, kül, su ve nehir dibi çamur örnekleri incelenmiştir. Karahan-2 ve Karahan-3 lokasyonlarından alınan kül örneklerinde kirlenmemiş toprağa kıyasla 15 kat daha fazla kadmiyum ve 30 kat daha fazla kurşun tespit edildiği bildirilmiştir. Karahan-3 lokasyonundaki kül örneklerinde kontrol toprağına kıyasla 6000 kat fazla Dioksin/Furan tespit edildiği bildirilmektedir. Ayrıca dünya genelinde yasaklanmış olan heksaklorobenzen isimli POP, Karahan-2 ve Karahan-3 lokasyonlarında tespit edilmiştir. Seyhan/Kuyumcular lokasyonundan alınan örneklerde molibden seviyesinin yeraltı suyu kirliliği ile ilgili limitin 18 katı olduğu; kadmiyum miktarının, kontrol örneklerine kıyasla 40 ile 50 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. Ayrıca tespit edilen 16 POP bileşiğinin kontrol örneklerine kıyasla 12 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. Seyhan/Yenidam bölgesinden alınan örneklerde kontrol toprak örneğine kıyasla 1000 kat fazla PCB tespit edildiği bildirilmiştir. İncelenen kül örneklerinde heksaklorobenzen, su örneklerinde ise bütillenmiş hidroksi toluen saptandığı bildirilmektedir. Yüreğir/İncirlik lokasyonunda toprak numunesinde kontrole kıyasla 30.000 kat daha yüksek PCB tespit edildiği ifade edilmektedir. Bu bölgede tespit edilen Dioksin/Furan miktarı kontrole kıyasla 400.000 kat yüksek olduğu bildirilmektedir. İncirlik lokasyonunda bulunan yüzey suyunda iki klorlu organofosfat tespit edilmiştir. Ayrıca bölgenin metaller ve metaloidler açısından en kirli alan olduğu bildirilmektedir.

#### **4. Plastiklerin Degredasyonu ve Geri Dönüşüm Sürecinde Yaşanan Olumsuzluklar**

PET ve diğer plastik polimerler düşük maliyetleri ve kullanım kolaylıkları nedeniyle 1970'li yıllardan itibaren ambalajlama, inşaat ve yapı malzemeleri, otomotiv, elektronik ve tarım sektörlerinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. Plastik polimerlerin en büyük dezavantajı ise büyük ölçüde inert kimyasal yapılarından ötürü doğada parçalanmadan birikmeleridir. Polimerleri oluşturan karbon-karbon iskeletindeki fonksiyonel grupların aktifliğinin düşük olması, polimerlerin yüksek hidrofobik karakteri ve polimer zinciri içindeki grupların düşük mobilitesi gibi nedenlerden ötürü plastikler, mikrobiyal enzimlerin hidrolizine karşı oldukça dayanıklıdır (Taniguchi ve ark., 2019). Öte yandan bitkilerde bulunan kütin tabakasını parçalayan kütinaz enziminin aynı zamanda PET gibi aromatik polyesterler üzerinde hidrolitik aktivite gösterebildiği bilinmektedir. Kütinazın polyesteraz aktivitesi ilk defa 2005 yılında Alman bir araştırmacı grubunun *Thermobifida fusca* kaynaklı kütinaz enzimi ile gerçekleştirdikleri çalışmada bildirilmiştir (Müller ve ark., 2005). Takip eden yıllarda yapılan

çalışmalarda kütinazın polyesterlerin hidrolizinde önemli rol oynadığı ortaya konmuştur (Tokiwa ve Calabia 2007; Zimmermann ve Billig 2011; Baker ve ark., 2012). Bununla birlikte plastiklerin kullanıma girmesinin üzerinden 50 yıldan fazla zaman geçmiştir. PET ve benzeri polimer atıklarının yoğunlaştığı alanlarda bulunan mikroorganizmaların geçen zaman içinde bu polimerleri parçalayacak şekilde uyum sağladıkları düşünülebilir. Bu yaklaşımla 2016 yılında gerçekteşirilen bir çalışmada PET atıklarının bulunduğu 250 farklı noktadan örnekleme yapılarak gelişmek için birincil karbon kaynağı olarak PET kullanabilen mikroorganizmalar araştırılmıştır (Yoshida ve ark., 2016). Örneklemlerden hazırlanan kültür sıvılarının bir tanesinden karbon kaynağı olarak PET kullanan *Ideonella sakaiensis* 201-F6 adı verilen bakteri türü izole edilmiştir. Bakterinin gösterdiği PET hidroliz aktivitesi, benzer şekilde PET hidroliz aktivitesi gösteren *Thermobifida fusca* kaynaklı kütinaz enzimi ile %51 oranında eşleşen bir enzim ile ilişkilendirilmiştir. PETase olarak adlandırılan enzimin PET hidroliz aktivitesinin *Thermobifida fusca* kaynaklı enzime kıyasla 120 kat, *Fusarium solani* kaynaklı enzime kıyasla 88 kat fazla olduğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada günümüze kadar tanımlanmış kütinaz benzeri enzimlerin çeşitli plastik polimerler üzerindeki degradasyon kapasiteleri araştırılmıştır (Tournier ve ark., 2020). Çalışmada yaprak dalı kompostundan izole edilen PET hidroliz enziminin (LCC) 10 saat içinde amorf PET'in %90'ını parçalayarak diğer mikrobiyal kaynaklı enzimlerden en az 33 kat fazla aktivite gösterdiği belirtilmiştir. LCC enziminin stabilitesini koruduğu en yüksek sıcaklığın 84,7°C olduğu belirlenmiş ve bu değerin tüm diğer PET hidroliz enzimlerinden daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Enzim aktivitesinin arttırılması için orijinal LCC enziminin katalitik bölgesinin 209 adet varyantı araştırılmış 2 varyantın PET hidroliz aktivitesinin, 4 varyantın termal stabilitesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dünya genelinde yıllık 380 milyon ton plastik üretilirken bu miktarın ancak %20'den daha azı geri dönüştürülebilmektedir. Yeniden üretim döngüsüne dahil edilemeyen plastiklerin büyük kısmı atık yakma ünitelerinde bertaraf edilirken bir kısmı çöp depolama alanlarında biriktirilmekte önemli bir kısmı da karasal ve sucul alanlara karışmaktadır. Plastik atıkların biyolojik yöntemlerle monomerlerine parçalanması plastiklerin yeniden kullanım döngüsüne dahil edilmeleri sürecinde verimli ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyolojik dönüşüm çalışmaları doğada var olan enzimlerin araştırılması veya benzer enzimlerin moleküler yöntemlerle tasarlanması doğrultusunda ilerlemektedir.

## 5. Sonuç

Son yirmi yılda yoğun bir çalışmanın konusu olan mikroplastikler; düşük yoğunluklu ve kalıcı olmaları nedeniyle sucul ve karasal ortamlarda yaygın olarak gözlenebilmektedir. Sucul alanlarda mikroplastiklerin dağılımı ve etkileri kısmen de olsa daha kapsamlı olarak incelenirken, mikroplastiklerin karasal alanlardaki oluşumları ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri hakkında daha az bilgi bulunmaktadır. Mikroplastik kirliliğinin doğa ve canlılar üzerindeki etkilerini anlamamız için plastik atıklar, mikro/nanoplastikler ve bunlardan kaynaklanabilecek kimyasal kirlilik,

mikrobiyal kontaminasyon bir bütün olarak ele alınmalıdır. Doğrudan kirlilik yaratma potansiyeli olan bazı tek kullanımlık plastiklerin üretiminin ve kullanılmasının önlenmesi veya kısıtlanması ile ilgili düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Biyolojik degradasyona karşı oldukça dayanıklı olan plastik polimerlerin dönüştürülme oranının oldukça düşük olması, atık yönetimi politikalarının eksikliği ile birleştiğinde karasal alanlardaki plastik kirliliği artmaktadır. Bu anlamda plastik polimerlerini parçalayabilen mikroorganizmaların veya rekonbinant enzimlerin geri dönüştürülen plastik miktarının artırılması katkı sağlayabileceği göz önüne alınmalıdır. Yurt dışından ithal edilen plastik çöpü başta olmak üzere plastiklerin ne oranda dönüştürüldüğünün, ne kadarının yakıldığı veya gömüldüğünün etkin bir şekilde izlenmesi gerekmektedir. Mikroplastik kirliliği küresel bir sorundur ve çözümü için uluslararası politikalar izlenmesi gerekmektedir. Mikroplastik maruziyetinin yüksek olduğu sektörlerde çalışan bireyler için maske gibi koruyucu ekipmanların kullanımı zorunlu kılınmalı ve bireyler sağlık riskleri konusunda bilinçlendirilmelidir. Bununla beraber mikroplastik kontaminasyonu yüksek olan kapalı çalışma alanlarındaki havalandırma sistemlerinin tasarımında mikroplastikleri filtreleyebilecek sistemler kullanılmalıdır.

Plastik kirlilik tamamen antropojenik bir kirliliktir. Bu bağlamda, tüketiciler dikkatli ve duyarlı bir tutum sergilemelidir. Benzer şekilde üreticilerin plastik atıklar konusundaki yaklaşımları sorunun çözümünde önemli rol oynayacaktır. Bunlara ek olarak devletler, yasalar ve yaptırımlar yoluyla plastik atık yönetimi için sürdürülebilir stratejiler oluşturmalıdır. Mikroplastikler ile taşınan kimyasal kirleticilerin toksik etkilerinin artabileceği öngörülmektedir. Fakat deneysel modellemelerle elde edilen ampirik kanıtların doğal şartlarda aynı şekilde geçerli olup olmayacağı tam olarak aydınlatılamamıştır.

Çevreye karşı sorumlu davranış, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı, atıkların yeniden kullanımı, atıkların geri dönüştürülerek değerlendirilmesi, ayırma ve bertaraf etme gibi çeşitli eylemler mikroplastik kirliliğinin önlenmesi için oldukça önemlidir. Sürdürülebilir bir çevre için üretim ve tüketimin de sürdürülebilir olması gerekmektedir. Bilinçli tüketim, kaynakların sürdürülebilir kullanımı gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan, belirli bir yaşam kalitesine ulaşmaya ve temel ihtiyaçlar sağlamaya odaklanmaktadır. Bu anlamda artan nüfusun gereksinimlerini karşılamak için çevre ile uyumlu biyobozunur alternatif materyallerin araştırılması ve geliştirilmesi daha sürdürülebilir bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

## Kaynaklar

- Abbasi S., Keshavarzi B., Moore F., Turner A., Kelly FJ., Dominguez AO., Jaafarzadeh N. Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution* 2019; 244: 153-164.
- Alomar C., Estarellas F., Deudero S. Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Marine Environmental Research* 2016; 11: 1–10.
- Akdogan Z., Guven B. Microplastics in the environment: a critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental Pollution* 2019; 254: 113011.
- An R., Wang X., Yang L., Zhang J., Wang N., Xu F., Zhang L. Polystyrene microplastics cause granulosa cells apoptosis and fibrosis in ovary through oxidative stress in rats. *Toxicology* 2021; 449: 152665.
- Andrady AL., Neal MA. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 2009; 364(1526): 1977-1984.
- Arthur C., Baker J., Bamford H. Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris. In *National Oceanic and Atmospheric Administration* 2009.
- Atici AA., Sepil A., Sen F. High levels of microplastic ingestion by commercial, planktivorous *Alburnus tarichi* in Lake Van, Turkey. *Food Additives & Contaminants: Part A* 2021; 38(10): 1767-1777.
- Aytan U., Valente A., Senturk Y., Usta R., Sahin FBE., Mazlum RE., Ağırbaş E. First evaluation of neustonic microplastics in Black Sea waters. *Marine Environmental Research* 2016; 119: 22-30.
- Backert S., Tegtmeier N., Cróinín TO., Boehm M., Heimesaat MM. Human campylobacteriosis. In *Campylobacter*; (Klein, G., Ed.); Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; 1-25.
- Baker PJ., Poultney C., Liu Z., Gross RA., Montclare JK. Identification and comparison of cutinases for synthetic polyester degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2011; 93: 229-240.
- Bakir A., O'Connor IA., Rowland SJ., Hendriks AJ., Thompson RC. Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environmental Pollution* 2016; 219: 56-65.
- Bakkaloğlu E. Atıksu arıtma tesislerinde mikroplastiklerin akıbeti ve taşınımı. *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi* 2019, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Barnes DKA., Galgani F., Thompson RC., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 2009; 364(1526): 1985–1998.
- Başaran T. Tekstil endüstrisi atıksuyunda ve iç ortam havasında mikroplastiklerin incelenmesi. *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi* 2019, Sakarya Üniversitesi, Türkiye.

- Batel A., Linti F., Scherer M., Erdinger L., Braunbeck T. Transfer of benzo[a]pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2016; 35(7): 1656–1666.
- Blackledge RD., Jones EL. All that glitters is gold !. In *Forensic Analysis on the Cutting Edge* 2007; 41: 1–32.
- Biber NFA., Foggo A., Thompson RC. Characterising the deterioration of different plastics in air and seawater. *Marine Pollution Bulletin* 2019; 141(June 2018): 595–602.
- Boucher J., Friot D. *Primary microplastics in the oceans: A Global Evaluation of Sources* 2017.
- Bouwmeester H., Hollman PCH., Peters RJB. Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: experiences from nanotoxicology. *Environmental Science & Technology* 2015; 49(15): 8932–8947.
- Browne Mark A., Dissanayake A., Galloway TS., Lowe DM., Thompson RC. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology* 2008; 42(13): 5026–5031.
- Browne Mark A., Crump P., Niven SJ., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology* 2011; 45(21): 9175–9179.
- Browne Mark A., Underwood AJ., Chapman MG., Williams R., Thompson RC., van Franeker JA. Linking effects of anthropogenic debris to ecological impacts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 2015; 282(1807): 20142929.
- Choi JS., Jung YJ., Hong NH., Hong SH., Park JW. Toxicological effects of irregularly shaped and spherical microplastics in a marine teleost, the Sheepshead Minnow (*Cyprinodon variegatus*). *Marine Pollution Bulletin* 2018; 129(1): 231–240.
- Chubarenko I., Efimova I., Bagaeva M., Bagaev A., Isachenko I. On mechanical fragmentation of single-use plastics in the sea swash zone with different types of bottom sediments: insights from laboratory experiments. *Marine Pollution Bulletin* 2020; 150(September 2019): 110726.
- Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway TS. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin* 2011; 62(12): 2588–2597.
- Çatalbaş F. Tuz gölü tuzlarında mikroplastik varlığının incelenmesi. *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi* 2017, Sakarya Üniversitesi, Türkiye.
- Comaklı E., Bingöl MS., Bilgili, A. Assessment of microplastic pollution in a crater lake at high altitude: a case study in an urban crater Lake in Erzurum, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution* 2020; 231(6): 1-6.
- Doğruyol P., Sener M., Balkaya N. Determination of microplastics and large plastics in the sediments of the Golden Horn Estuary (Halic), Istanbul, Turkey. *Desalination And Water Treatment* 2019; 172(October 2018): 344–350.

- Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment. *Marine Pollution Bulletin* 2016; 104(1–2): 290–293.
- Dris R., Gasperi J., Mirande C., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Tassin B. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 2017; 221: 453–458.
- Duis K., Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe* 2016; 28(1): 1–25.
- ECHA, Plastic additives initiative. Supplementary Information on Scope and Methods [https://echa.europa.eu/documents/10162/17228/plastic\\_additives\\_supplementary\\_en.pdf/79bea2d6-8e45-f38c-a318-7d7e812890a1](https://echa.europa.eu/documents/10162/17228/plastic_additives_supplementary_en.pdf/79bea2d6-8e45-f38c-a318-7d7e812890a1) (Erişim Tarihi 03.02.2022).
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *Efsa Journal* 2016; 14(6): 4501. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>
- Egger M., Sulu-Gambari F., Lebreton L. First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch. *Scientific Reports* 2020; 10(1): 1–10.
- Erdogan S. Microplastic pollution in freshwater ecosystems: a case study from Turkey. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 2020; 37(3): 213-221.
- EUROSTAT. <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211124-1>. (Erişim Tarihi 19.04.2022)
- Farrell P., Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution* 2013; 177: 1–3.
- Free CM., Jensen OP., Mason SA., Eriksen M., Williamson NJ., Boldgiv B. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin* 2014; 85(1): 156–163.
- Fossi MC., Panti C., Guerranti C., Coppola D., Giannetti M., Marsili L., Minutoli R. Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*). *Marine Pollution Bulletin* 2012; 64(11): 2374–2379.
- Gasperi J., Wright SL., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Tassin B. Microplastics in air: Are we breathing it in ?. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2018; 1: 1–5.
- Gedik K., Eryasar AR. Microplastic pollution profile of Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) collected along the Turkish coasts. *Chemosphere* 2020; 260: 127570.
- Genc AN., Vural N., Balas L. Modeling transport of microplastics in enclosed coastal waters: a case study in the Fethiye Inner Bay. *Marine Pollution Bulletin* 2020; 150 (November 2019): 110747.
- Gigault J., El Hadri H., Nguyen B., Grass B., Rowenczyk L., Tufenkji N., Wiesner, M. Nanoplastics are neither microplastics nor engineered nanoparticles. *Nature nanotechnology* 2021; 16(5): 501-507.

- Granby K., Rainieri S., Rasmussen RR., Kotterman MJJ., Sloth JJ., Cederberg TL., Larsen BK. The influence of microplastics and halogenated contaminants in feed on toxicokinetics and gene expression in European Seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Environmental Research* 2018; 164(February): 430–443.
- Greenpeace. Atık oyunları raporu. <https://www.greenpeace.org/turkey/raporlar/rapor-atik-oyunlari-geri-donusumsuz-hayatlar> (Erişim Tarihi 19.04.2022)
- Grigorakis S., Mason SA., Drouillard KG. Determination of the gut retention of plastic microbeads and microfibers in goldfish (*Carassius auratus*). *Chemosphere* 2017; 169: 233–238.
- Gutow L., Eckerlebe A., Giménez L., Saborowski R. Experimental evaluation of seaweeds as a vector for microplastics into marine food webs. *Environmental Science & Technology* 2016; 50(2): 915–923.
- Gundogdu S., Cevik C. Micro- and mesoplastics in northeast levantine coast of Turkey: the preliminary results from surface samples. *Marine Pollution Bulletin* 2017; 118: 341-347.
- Gundogdu S. Contamination of table salts from Turkey with microplastics. *Food Additives & Contaminants: Part A* 2018; 35(5): 1006-1014.
- Gundogdu S., Cevik C., Atas NT. Stuffed with microplastics: microplastic occurrence in traditional stuffed mussels sold in the Turkish Market. *Food Bioscience* 2020; 37: 100715.
- Hirai H., Takada H., Ogata Y., Yamashita R., Mizukawa K., Saha M., Ward MW. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Marine Pollution Bulletin* 2011; 62(8): 1683–1692.
- Horton AA., Walton A., Spurgeon DJ., Lahive E., Svendsen C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment* 2017; 586: 127–141.
- Hours M., Fevotte J., Lafont S., Bergeret A. Cancer mortality in a synthetic spinning plant in Besancon, France. *Occupational and Environmental Medicine* 2007; 64(9): 575–581.
- Isinibilir M., Svetlichny L., Mykitchak T., Türkeri EE., Eryalçın KM., Doğan O., Kideys AE. Microplastic consumption and its effect on respiration rate and motility of *Calanus helgolandicus* from the Marmara Sea. *Frontiers in Marine Science* 2020; 7: 1167.
- Kadızoade G. Mikroplastikler üzerine ağır metal adsorpsiyonu araştırılması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi 2019, Sakarya Üniversitesi, Türkiye.
- Koelmans AA., Nor NHM., Hermsen E., Kooi M., Mintenig SM., De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water: critical review and assessment of data quality. *Water Research* 2019; 155: 410-422.
- Kosuth M., Mason SA., Wattenberg EV. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *Plos One* 2018; 13(4): e0194970.

- Kukulka T., Proskurowski G., Morét-Ferguson S., Meyer DW., Law KL. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris. *Geophysical Research Letters* 2012; 39: L07601.
- Lambert S., Sinclair C., Boxall A. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 2014; In D. M. Whitacre (Ed.): Volume 227.
- Lebreton L., Slat B., Ferrari F., Sainte-Rose B., Aitken J., Marthouse R., Hajbane S., Cunsolo S., Schwarz A., Levivier A., Noble K., Debeljak P., Maral H., Schoeneich-Argent R., Brambini R., Reisser J. Evidence that the great pacific garbage patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* 2018; 8(1): 4666.
- Lee H., Shim WJ., Kwon JH. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals. *Science of the Total Environment* 2014; 470–471: 1545–1552.
- Leslie HA., van Velzen MJM., Brandsma SH., Vethaak AD., Garcia-Vallejo JJ., Lamoree MH. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International* 2022; December 2021:107199.
- Li J., Qu X., Su L., Zhang W., Yang D., Kolandhasamy P., Li D., Shi H. Microplastics in mussels along the Coastal Waters of China. *Environment Pollution* 2016; 214: 177–184.
- Liebezeit G., Liebezeit E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives Contaminants* 2013; 30: 2136–2140.
- Liebezeit G., Liebezeit E. Synthetic particles as contaminants in german beers. *Food Additives Contaminants* 2014; 31: 1574–1578.
- Liebezeit G., Liebezeit E. Origin of synthetic particles in honeys. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 2015; 65: 143–147.
- Lithner D., Damberg J., Dave G., Larsson A. Leachates from plastic consumer products – screening for toxicity with *Daphnia magna*. *Chemosphere* 2009; 74(9): 1195–1200.
- Lohmann R. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans-but should microplastics be considered POPs themselves. *Integrated Environmental Assessment and Management* 2017; 13(3): 460–465.
- Lu Y., Zhang Y., Deng Y., Jiang W., Zhao Y., Geng J., Ding L., Ren H. uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology* 2016; 50(7): 4054–4060.
- Lusher AL., Tirelli V., O'Connor I., Officer R. Microplastics in arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports* 2015; 5(1): 14947.
- Magana-Arachchi DN., Wanigatunge RP. Ubiquitous waterborne pathogens. In *Waterborne Pathogens* 2020; 15–42.
- Mason SA., Welch VG., Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry* 2018; 6 (September).



- Mato Y., Isobe T., Takada H., Kanehiro H., Ohtake C., Kaminuma T. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science & Technology* 2001; 35(2): 318–324.
- McCormick A., Hoellein TJ., Mason SA., Schlupe J., Kelly JJ. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environmental Science & Technology* 2014; 48(20): 11863–11871.
- Mühlschlegel P., Hauk A., Walter U., Sieber R. Lack of evidence for microplastic contamination in honey. *Food Additives Contaminants* 2017; 34: 1982–1989.
- Müller RJ., Schrader H., Profe J., Dresler K., Deckwer WD. Enzymatic degradation of poly(ethylene terephthalate): rapid hydrolysis using a hydrolase from *T. fusca*. *Macromol Rapid Commun* 2005; 26, 1400–1405.
- Naik RA., Rowles LS., Hossain AI., Yen M., Aldossary RM., Apul OG., Saleh NB. Microplastic particle versus fiber generation during photo-transformation in simulated seawater. *Science of The Total Environment* 2020; 736: 139690.
- Nelms SE., Galloway TS., Godley BJ., Jarvis DS., Lindeque PK. Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution* 2018; 238: 999–1007.
- Oberbeckmann S., Löder MGJ., Labrenz M. Marine microplastic-associated biofilms – a review. *Environmental Chemistry* 2015; 12(5): 551.
- PAGEV, Plastik Sektörü 2021 Yılı İlk 11 Aylık Kıyaslama Bilgi Notu.  
<https://pagev.org/upload/files/PLAST%C4%B0K%20SEKT%C3%96R%C3%9C%202021%20YILI%20%C4%B0LK%2011%20AYLIK%20KIYASLAMA%20B%C4%B0LG%C4%B0%20NOTU.pdf>. (Erişim tarihi 14.01.2022)
- Plastics Europe, Plastics-the facts 2021; <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf> (Erişim tarihi 13.01.2022)
- Prata JC. Airborne microplastics: consequences to human health ?. *Environmental Pollution* 2018; 234: 115–126.
- Ragusa A., Svelato A., Santacroce C., Catalano P., Notarstefano V., Carnevali O., Papa F., Rongioletti MCA., Baiocco F., Draghi S., D’Amore E., Rinaldo D., Matta M., Giorgini E. Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 2021; 146: 106274.
- Rainieri S., Conlledo N., Larsen BK., Granby K., Barranco A. Combined effects of microplastics and chemical contaminants on the organ toxicity of zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Research* 2018; 162(January): 135–143.
- Rainieri S., Barranco A. Microplastics, a food safety issue ?. *Trends in Food Science & Technology* 2019; 84(June 2017): 55–57.
- Renzi M., Blaskovic A. Litter and microplastics features in table salts from marine origin: Italian versus croatian brand. *Marine Pollution Bulletin* 2018; 135: 62–68.

- Reynaud S., Aynard, A., Grassl B., Gigault, J. Nanoplastics: From model materials to colloidal fate. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 2022; 57: 101528.
- Santana MFM., Moreira FT., Turra A. Trophic transference of microplastics under a low exposure scenario: insights on the likelihood of particle cascading along marine food-webs. *Marine Pollution Bulletin* 2017; 121(1–2): 154–159.
- Sajiki J., Yonekubo J. Leaching of bisphenol A (BPA) to seawater from polycarbonate plastic and its degradation by reactive oxygen species. *Chemosphere* 2003; 51(1): 55–62.
- Schymanski D., Goldbeck C., Humpf HU., Fürst P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 2018; 129: 154–162.
- Shen W., Sun J., Yao F., Lin K., Yuan Y., Chen Y., Han H., Li Z., Zou J., Jiao X. Microbiome in intestinal lavage fluid may be a better indicator in evaluating the risk of developing colorectal cancer compared with fecal samples. *Translational Oncology* 2020; 13(5): 100772.
- Suaria G., Aliani S. Floating debris in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* 2014; 86(1–2): 494–504.
- Şener M., Doğruyol P., Balkaya N. Microplastic pollution in the Black Sea Coast of the Anatolian Side of Istanbul, Turkey. *Desalination and Water Treatment* 2019; 172 (October 2018): 351–358.
- Taniguchi I., Yoshida S., Hiraga K., Miyamoto K., Kümura Y., Oda K. Biodegradation of PET: Current Status and Application Aspects. *Catalysis* 2019; 9: 4089–4105.
- Tokiwa Y., Calabria BP. Biodegradability and biodegradation of polyesters. *Journal of Polymers and the Environment* 2007; 15: 259–267.
- Tournier V., Topham CM., Gilles A. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature* 2020; 580: 216–219.
- Tunçer S., Artüz OB., Demirkol M., Artüz ML. First report of occurrence, distribution, and composition of microplastics in surface waters of the Sea of Marmara, Turkey. *Marine Pollution Bulletin* 2018; 135(June): 283–289.
- Turner A., Holmes LA. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water. *Environmental Chemistry* 2015; 12(5): 600.
- Türk Gıda Kodeksi Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliği <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191225M1-10.htm> (Erişim Tarihi 04.10.2021).
- UNEP. *Plastics: A Roadmap for Sustainability*. In *Single-use Plastic: A Roadmap for Sustainability*, 2018. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic\\_sustainability.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_sustainability.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Van Cauwenberghe L., Janssen CR. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution* 2014; 193: 65–70.
- Van Cauwenberghe L., Claessens M., Vandegehuchte MB., Janssen CR. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats. *Environmental Pollution* 2015; 199: 10–17.
- Velzeboer I., Kwadijk CJAF., Koelmans AA. Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes. *Environmental Science & Technology* 2014; 48(9): 4869–4876.
- Ventrice P., Ventrice D., Russo E., De Sarro G. Phthalates: European regulation, chemistry, pharmacokinetic and related toxicity. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 2013; 36(1): 88–96.
- Wang J., Zheng L., Li J. A critical review on the sources and instruments of marine microplastics and prospects on the relevant management in China. *Waste Management & Research* 2018; 36(10): 898–911.
- Wang LC., Chun-Te Lin J., Dong CD., Chen CW., Liu TK. The sorption of persistent organic pollutants in microplastics from the coastal environment. *Journal of Hazardous Materials* 2021; 420: 126658.
- Watts AJR., Lewis C., Goodhead RM., Beckett SJ., Moger J., Tyler CR., Galloway TS. Uptake and retention of microplastics by the shore crab *Carcinus maenas*. *Environmental Science & Technology* 2014; 48(15): 8823–8830.
- Woodall LC., Sanchez-Vidal A., Canals M., Paterson GLJ., Coppock R., Sleight V., Calafat A., Rogers AD., Narayanaswamy BE., Thompson RC. The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science* 2014; 1(4): 140317.
- World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/campylobacter> (Erişim Tarihi 11.10.2021).
- Wright SL., Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue?. *Environmental Science & Technology* 2017; 51(12): 6634–6647.
- Wu B., Wu X., Liu S., Wang Z., Chen L. Size-dependent effects of polystyrene microplastics on cytotoxicity and efflux pump inhibition in human caco-2 cells. *Chemosphere* 2019; 221: 333–341.
- Xie MY., Ni H., Zhao DS., Wen LY., Li KS., Yang HH., Wang SS., Zhang H., Su H. Exposure to bisphenol A and the development of asthma: a systematic review of cohort studies. *Reproductive Toxicology* 2016; 65: 224–229.
- Yabanli M., Yozukmaz A., Sener I., Olmez OT. Microplastic pollution at the intersection of the Aegean and Mediterranean Seas: A study of the Datça Peninsula (Turkey). *Marine Pollution Bulletin* 2019; 145(May): 47–55.

- Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaj, H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 2016; 351 (6228): 1196-1199.
- Yozukmaz A. Investigation of microplastics in edible wild mussels from İzmir Bay (Aegean Sea, Western Turkey): A risk assessment for the consumers. *Marine Pollution Bulletin* 2021; 171: 112733.
- Yurtsever M. Abiyotik bir su ürünü olan sofrta tuzunda mikroplastik kirliliği tehlikesi. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 2018; 35(3): 243-249.
- Yurtsever M. Glitters as a source of primary microplastics: an approach to environmental responsibility and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 2019a; 32(3): 459–478.
- Yurtsever M. Tiny, shiny, and colorful microplastics: Are regular glitters a significant source of microplastics?, *Marine Pollution Bulletin* 2019b; 146(July): 678–682.
- Zhang C., Chen X., Wang J., Tan L. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae. *Environmental Pollution* 2017; 220: 1282–1288.
- Zhu L., Wang H., Chen B., Sun X., Qu K., Xia B. Microplastic ingestion in deep-sea fish from the South China Sea. *Science of The Total Environment* 2019; 677: 493–501.
- Zimmermann W., Billig S. Enzymes for the biofunctionalization of poly(ethylene terephthalate). *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology* 2011; 125: 97-120