

Sources, Adsorption and Toxicity of Global Threat Microplastics

Küresel Tehdit Mikroplastiklerin Kaynakları, Adsorpsiyonu ve Toksisitesi

Türk Denizcilik ve Deniz Bilimleri Dergisi

Cilt: 6 Sayı: 2 (2020) 120-136

Esra ÜÇÜNCÜ TUNCA^{1*} 

¹Hacettepe Üniversitesi, Dahili Tıp Bilimleri Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

ABSTRACT

Plastic contamination is highly concerned nowadays and poses an uncertain threat to organisms. The concentrations of nano and microplastics in aquatic and terrestrial ecosystems are increasing rapidly. Limited number of studies in this field; the toxic effects of microplastics, removal efficiency from the environment, synergistic-antagonistic interactions with other

contaminants in the media are insufficient in many issues and it should be supported by new studies. With this review study, it is aimed to provide an overview of the microplastics that have been detected even in freshwater environments and which are among the alarming contaminants.

Keywords: Adsorption, Environmental pollution, Ecotoxicology, Microplastic

Article Info

Received: 05 June 2020

Revised: 29 June 2020

Accepted: 30 June 2020

* (corresponding author)

E-mail: esra.ucuncu@gmail.com

ÖZET

Plastik kontaminasyonu; günümüzde oldukça endişe uyandırmakta ve organizmalar için belirsiz bir tehdit oluşturmaktadır. Nano ve mikroplastiklerin, sucul ve karasal ekosistemlerde konsantrasyonları hızla artmaktadır. Bu alandaki sınırlı sayıdaki çalışmalar; mikroplastiklerin toksik etkileri, ortamdan temizlenebilirliği, ortamlardaki diğer kirleticiler ile sinerjistik-antagonistik etkileşimleri gibi pek çok konuda yetersiz kalmakta ve yeni çalışmalar ile desteklenmesi gerekmektedir. Bu derleme çalışması ile tatlı su ekosistemlerinde dahi tespit edilmiş olan ve endişe uyandıran kirleticiler arasında gösterilen mikroplastikler ile ilgili genel bir bakış sunulması hedeflenmektedir.

Anahtar sözcükler: Adsorpsiyon, Çevre Kirliliği, Ekotoksikoloji, Mikroplastik

1. GİRİŞ

Günümüzde plastiklerin kullanımı; kolaylıkları, dayanıklılık ve düşük maliyetleri gibi yeri dolduramaz özellikleri nedeniyle yaygınlaşmıştır (Monteiro *vd.*, 2018; Yao *vd.*, 2020). Plastik üretimi, özellikle 1950'lerin ortalarından sonra dikkat çekici ölçüde artmış olmakla birlikte (Geyer *vd.*, 2017), Asya dünyadaki en büyük üretici konumundadır (Editorial, 2020).

10 milyon tondan fazla plastik atığın, deniz ekosistemine her yıl çeşitli şekillerde girdiği tahmin edilmektedir (Jambeck *vd.*, 2015; Li *vd.*, 2020a). Artan plastik üretimi ile birlikte; basit paketler, tıbbi ve hastane ürünleri gibi günlük hayatta kullanılan sayısız ürünün geliştirilmesi açısından büyük yarar sağlanmıştır (Andrady ve Neal, 2009). Diğer yandan; yaşam için kolaylık sağlayan çok fonksiyonlu ve önem teşkil eden plastik ürünler, çevreye daha dayanıklı ve potansiyel olarak daha tehlikeli hale gelmiştir (Costa Araújo *vd.*, 2020; Lithner *vd.*, 2011).

Plastikler; yüksek moleküler ağırlıklı organik polimerlerdir ve bazı bozunma ya da parçalanma biçimleriyle küçük parçalara ayrılma eğilimindedir (Dong Y. *vd.*, 2020). Plastiklerin çoğu suda çözünmemekle birlikte; su ortamında bulunan polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polietilen tereftalattan (PET) gibi sentetik polimerlerin birçoğu genellikle abiyotik ve

biyotik parçalanma yollarına ihtiyaç duyabilmektedir (Klein *vd.*, 2018). Ortamdaki plastiğin parçalanması oldukça zor olup, uzun süre atık olarak kalabilmektedir (Yang *vd.*, 2020). Plastiğin sadece % 69,2'si geri dönüştürülebilmekte ve tekrar kullanılabilir. (Dong Y. *vd.*, 2020).

Bununla birlikte, plastik atıklar okyanus dinamikleri ile küresel olarak göç edebilmektedir (Li *vd.*, 2020a; Peeken *vd.*, 2018). Plastik atıkların tüm okyanus döküntülerinin yaklaşık %80 'ini oluşturduğu bilinmektedir (Malafaia *vd.*, 2020). Denizlere karışan plastik atıkların çoğunun (%80) kara kökenli kaynaklardan kaynaklandığı ve tatlı su sistemlerinin plastiğin denize ulaşmasında önemli bir yol olduğu düşünülmektedir (Yang *vd.*, 2020). Plastik atık birikimi küresel bir endişe konusu haline gelmiştir (Liu P. *vd.*, 2020). Bu sebeple; sentetik polimerlerin ekosistemlere girişinin azaltılmasına yönelik yaklaşımların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Mikroplastikler ile ilgili genel bilgilerin verildiği bu derleme çalışmasında; mikroplastik adsorpsiyonu ve toksisitesi ile ilgili çalışmalar da yer almaktadır. Oldukça güncel olan plastik kontaminasyonu konusunda yeni çalışmaların gerekliliği vurgulanmak istenmektedir.

1.1. Mikroplastik Nedir?

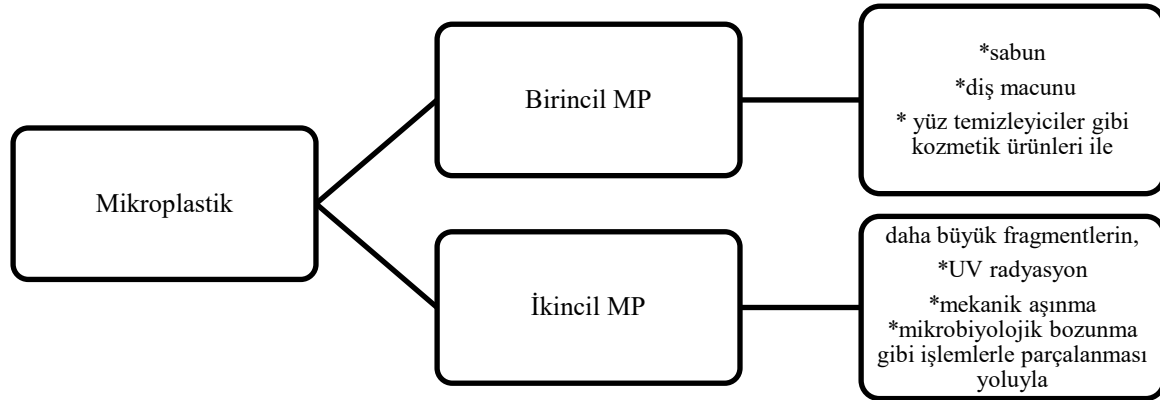
Plastikler; fotodegradasyon, biyodegradasyon, ultraviyole ışık, mikrobiyolojik faaliyetler, dalga hareketleri gibi çeşitli mekanik ya da biyolojik işlemler ile daha küçük partiküllere parçalanabilmektedir (Choi *vd.*, 2019; Dubaish ve Liebezeit, 2013; Li *vd.*, 2020a; Li *vd.*, 2020b). Plastik atıkların parçalanması; kademeli olarak milimetreye ya da mikroplastik adı verilen nanometre parçalarına ayrışması şeklinde olabilmektedir (Li *vd.*, 2020b).

Mikroplastik (MP) kavramı ilk kez Thompson *vd.* (2004) tarafından ortaya atılmış olup (Thompson *vd.*, 2004); büyüklüğü 1 um ila 5 mm arasında değişen sentetik polimer parçacıklar olarak tanımlanmıştır (Frias ve Nash, 2019; Sierra *vd.*, 2020).

Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), poliamid (PA) ve polietilen tereftalat (PET) sucul çevrede ve organizmalarda en sık görülen polimer tiplerindedir (Huang *vd.*, 2020). Bu

polimer tiplerine bağlı olarak mikroplastikler; yüzebilir, nötr olarak yüzdürülebilir veya batabilme özelliğinde olabilmekte; bu durum da MP'lerin yüzeyde, su kolonu boyunca veya sedimentte bulunmalarına sebep olabilmektedir (Anderson *vd.*, 2016; Choi *vd.*, 2019). Güneş ışığına maruz kalma ve mekanik kuvvetler polimerleri değiştirmekte, çevrede kolayca dağılabilen ve sudaki organizmalar üzerinde olumsuz etkilere neden olabilecek birkaç mikrometrelik atıklar oluşabilmektedir (Andrady, 2011; Zocchi ve Sommaruga, 2019).

MP'ler sucul ortamlara direkt girebildiği gibi; daha büyük plastiklerin parçalanması sonucu indirekt olarak da dahil olabilmektedir. Çevredeki MP kaynakları **birincil** (direkt olarak mikroplastikten üretilen) ve **ikincil** (daha büyük fragmentlerin parçalanması sonucu oluşan) olarak sınıflandırılmaktadır (Kazour M. *vd.*, 2019) (Şekil 1).



Şekil 1. Mikroplastik tipleri ve kaynaklarından bazıları

Birincil mikroplastikler: Evsel ve endüstriyel kullanım için mikroskobik boyutta üretilen mikroplastiklerdir. Yüz temizleyiciler, diş macunu, duş jeli (Cole *vd.*, 2011), göz farı, deodorant, fondöten, maskara gibi makyaj ürünleri, bebek ürünleri, saç boyası, güneş kremi, böcek

kovucular içerisinde plastik parçacıklar mevcuttur (Auta *vd.*, 2017; Castañeda *vd.*, 2014; Cole *vd.*, 2011; Duis ve Coors, 2016; Fendall ve Sewell, 2009). Bu tip mikroplastikler kanalizasyon ve atık su sistemleri ile doğaya karışmaktadır.

İkincil mikroplastikler: Deniz ya da karada bulunan büyük plastik atıkların zamanla daha küçük parçalara bölünmesiyle oluşan mikroplastikler sekonder ya da ikincil olarak adlandırılmaktadır. Kimyasal, fiziksel ya da biyolojik süreçler büyük plastik parçaların fragmentasyonuna (parçalanma) sebep olabilmektedir. Özellikle sahillerde, yüksek UV radyasyon, dalgalar ile fiziksel aşınma ya da oksijen mevcudiyeti gibi faktörler (Cole *vd.*, 2011); fragmentasyon ile mikroplastik üretimini daha etkili hale getirmektedir (Auta *vd.*, 2017).

Mikroplastiklerin yüzey özellikleri plastik döküntülerin; dalga hareketi, kum sürtünmesi gibi mekanik bozulmaya (Zbyszewski *vd.*, 2014) veya hidrokarbonu parçalayan mikroorganizmaların etkisiyle biyolojik parçalanmaya (Li *vd.*, 2020a; Zettler *vd.*, 2013) maruz kalıp kalmadığını gösterebilmektedir.

Birincil ve ikincil olarak tanımlanan mikroplastikler, sucul ortamlarda bulunmakta ve bu parçacıkların

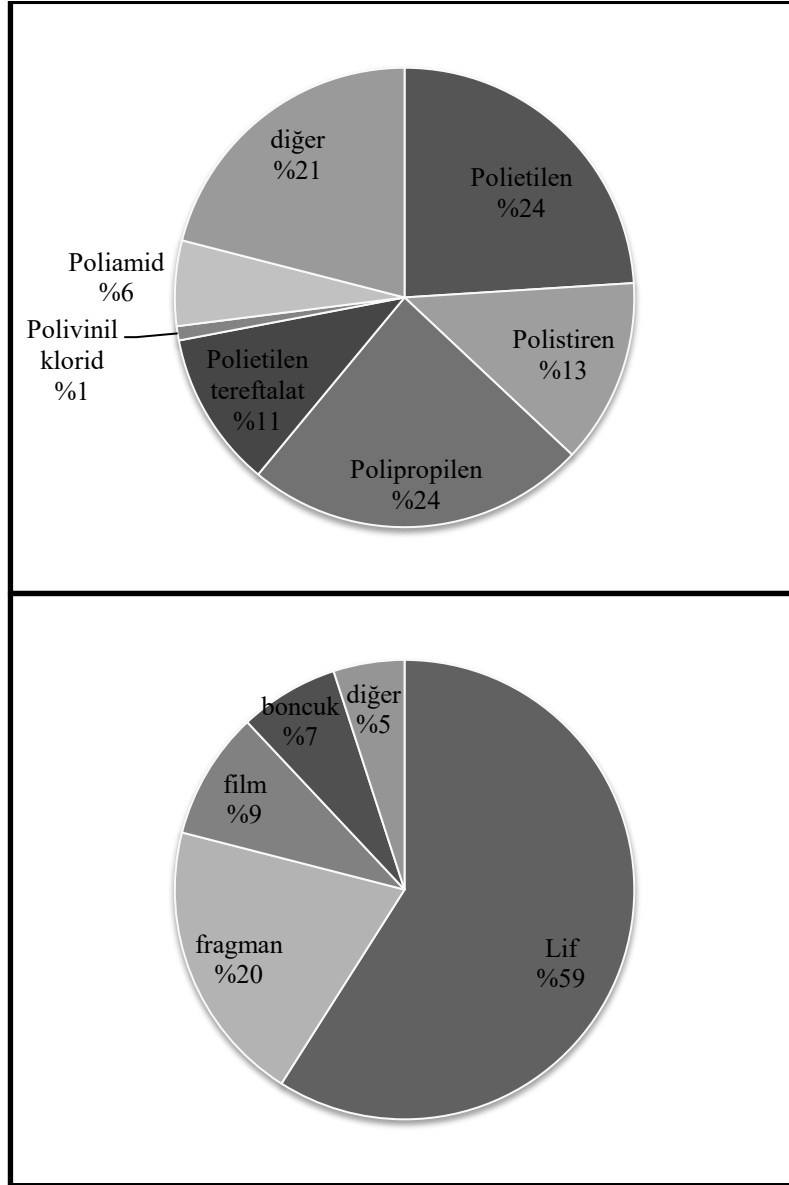
kontaminasyonunun, ortamdaki canlılar ve ekolojik çevre için riskleri ile ilgili endişeler artmaktadır. Özellikle, mikroplastikler (<5 mm) ve nanoplastikler (<100 nm), yüksek yoğunluğa ulaşabilmeleri ve biyota ile etkileşimleri sebebiyle büyük endişe uyandırmaktadır (Editorial, 2020). Her yıl yaklaşık 245 ton mikroplastığın üretildiği ve bu plastiklerin su kütlelerince yutulularak, denizel organizmaların vücutlarına dahil olduğu tahmin edilmektedir (Auta *vd.*, 2017).

2. MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE DAĞILIMI

Plastik endüstrisinde hammadde olarak kullanılan mikroplastikler (<5mm), çevredeki en çok sayıda bulunan plastik döküntülerdendir (Liu P. *vd.*, 2020). Sık kullanılan bazı mikroplastiklerin kaynakları, yoğunlukları, bileşim ve tiplerine göre bulunma yüzdeleri ile bilgiler aşağıda verilmiştir (Tablo 1, Şekil 2).

Tablo 1. Önemli bazı mikroplastiklerin kaynakları ve yoğunlukları (Ngo *vd.*, 2019)

Polimer	Kaynak	Yoğunluk (g/cm ³)
Polietilen	Kişisel bakım ürünleri, su şişeleri, streç film	0.89-0.98
Polisteren	Besin ambalajları, CD kapları, yapı izolasyon malzemeleri, tekstil	0.83-0.92
Polipropilen	Yoğurt kapları, taşıma çantaları, tek kullanımlık sıcak içecek bardakları	1.04-1.1
Polivinil klorid	Elektrik kabloları, su boruları, medikal tüpler	1.16-1.58



Şekil 2. Tatlı sularda tespit edilen mikroplastiklerin tip ve bileşimlerine göre yüzdeleri (Li vd., 2020a)

Polietilen (PE), Polistiren (PS), Polipropilen (PP) ve Polivinil klorid (PVC) günlük yaşantımızda yoğun olarak yer alan bazı önemli mikroplastiklerdendir.

Polietilen: Mikroplastikler; daha çok batma eğiliminde olan (polivinil klorür (PVC) ve polietilen tereftalattan (PET) gibi,...) ve yüzerliliği daha muhtemel olan polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistirenden (PS) oluşmaktadır (Auta vd., 2017). Polietilen mikro tanecikler, genellikle yüz temizleyicilerinde kullanılmaktadır. Pürüzsüzlükleri sebebiyle cilde daha az

zarar vermesinden dolayı ürünlerde tercih edilmektedir (Hu vd., 2019). ABD nüfusunun kişisel bakım ürünleri kaynaklı olarak, yılda yaklaşık 263 ton mikroplastik yaydığı belirlenmiştir (Auta vd., 2017). Yapılan çalışmalar; polietilen mikroplastiklerin, bivalvalarda (Auta vd., 2017; Setälä vd., 2016; Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014); deniz balıklarında (Ferreira vd., 2016); balinalarda (Fossi vd., 2016); deniz kaplumbağalarında (Caron vd., 2016); midyelerde (Avio vd., 2015) ve bunun gibi çoğu canlı tarafından alım (uptake) yapabildiğini göstermektedir.

Polistiren: Yüksek dayanıklılık, iyi şişebilirlik, geniş spesifik yüzey alanı, kararlı kimyasal özellikler, kolay yenilenebilirlik ve düşük maliyet gibi sebeplerden dolayı çok çeşitli ürünler yapmak için yaygın olarak kullanılır. Mevcut deniz ekosisteminde, polistiren parçacıkları en yaygın mikroplastik kirleticilerden biri haline gelmektedir (Dong Y. *vd.*, 2020). Uzun süreli çevresel hava koşullarına maruz kalan polistiren mikroplastiklerin; yüksek özgül yüzey alanı, gözeneklilik ve çevredeki yapay kirleticilerin adsorpsiyonunu kolaylaştırabilen amorf yapı gibi özel yüzey özellikleri olduğu gözlenmiştir (Brennecke *vd.*, 2016; Dong Y. *vd.*, 2020).

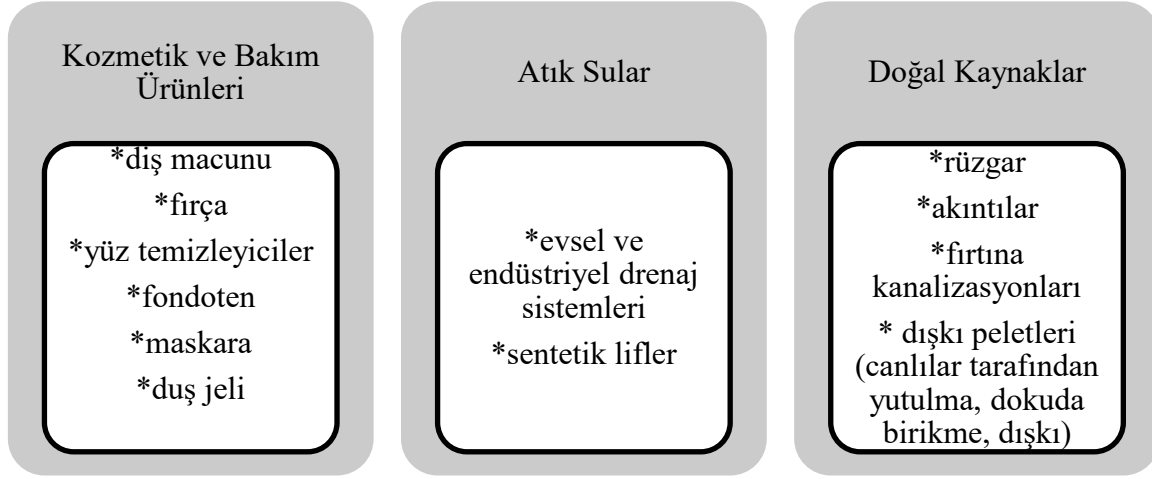
Polipropilen: PE ve PP, yüksek endüstriyel üretim hacimlerine sahip, sentetik plastiklerdendir ve çevresel numunelerde sıklıkla tespit edilmektedir. Bu polimerler, biyolojik olarak parçalanamamakta ve abiyotik bir sürece ihtiyaç duymaktadır.

Polivinil klorid: Günlük hayatta sıklıkla kullanılan plastikler; polimer tiplerine ve çevre-insan sağlığı üzerindeki etkilerine göre derlenmiş; sonuç olarak polivinil kloridin günlük kullanılan polimer tiplerinden en toksik olanı olduğu belirlenmiştir (Editorial, 2020). Kristallik ve yoğunlukları oldukça yüksektir. Bazı denizel türler üzerinde; filtrasyon ve

solunum oranları ile motiliteyi azaltırken, mortaliteyi artırdığı bilinmektedir (Scherer *vd.*, 2018).

3. MİKROPLASTİKLERİN SUCUL SİSTEMLERE GİRİŞ YOLLARI

Günlük yaşantımıza büyük oranda dahil olan plastik kullanımı, ekosistemlerde mikroplastik konsantrasyonlarının artışına sebep olmaktadır. Mikroplastikler, yüzey sularında, sedimentte, kumsallarda, bazı deniz canlılarında (deniz kuşları, balık, kabuklu hayvanlar ...) bulunabilmektedir (Auta *vd.*, 2017; De Witte *vd.*, 2014; Gauque *vd.*, 2015). İlk olarak okyanuslarda yapılan çalışmalarda keşfedilmiş olan mikroplastiklerin, son yıllarda tatlı sularda da biriktikleri belirlenmiştir (Li *vd.*, 2018a; Wang *vd.*, 2020b). Bu kirleticilerin kaynaklarının araştırılması, sucul kirliliğinin önüne geçilmesi açısından önem taşımaktadır. Oldukça güncel olan bu konuda yapılmış çalışmalarda, pek çok MP kaynağı tespit edilmiştir. Özellikle; denizel ortamlara mikroplastik girişinin asıl kaynağının, kara kökenli (yanlış kullanılan ve kaybedilen plastik atıklar, çöp depolama alanlarının boşaltılması gibi) olduğu düşünülmektedir (Kazour M. *vd.*, 2019). Evsel atıklar, yaygın olarak kullanılan kozmetik ve bakım ürünleri de mikroplastik konsantrasyonunu artıran önemli kaynaklar arasındadır (Şekil 3).



Şekil 3. Mikroplastik kaynaklarından bazıları

Mikroplastiklerin sucul sistemlere diğer bir giriş yolu ise; doğal bir süreç olan canlılar tarafından yutulma ve dokularda birikme yoluyla gerçekleşebilmektedir. Cole *vd.* (2016) da zooplankton kullanarak yapmış oldukları çalışmada; MP'nin zooplankton tarafından yutulup vücutlarına aldıkları, dışkıda kapsüle hale getirilen MP'nin daha büyük kopepodlar tarafından yutulabileceği belirlenmiştir (Cole *vd.*, 2016). Bu çalışma, dışkı peletlerinin denizel ortamlarda mikroplastik kaynağı olabileceğini göstermektedir (Auta *vd.*, 2017).

4. MİKROPLASTİK ADSORPSİYONU VE TOKSİSİTESİ

Bugüne kadar, mikroplastikler deniz döküntülerinin her yerde bulunan bir bileşeni haline gelmiştir ve küresel parçacık sayısının % 90'ını oluşturmaktadır (Anderson *vd.*, 2016). Ekosistemlerde konsantrasyonları hızla artan bu partiküllerin; adsorpsiyonları, çevresel

konsantrasyonları, ekotoksisite, dağılımları ve insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Mikroplastiklerin sucul sistemlerde tespiti ve dağılımları ile ilgili yapılan çalışmalarda; İtalya'daki Maggiore Gölü, Iseo Nehri ve Garda Gölü dahil olmak üzere üç subalpin göldeki mikroplastik oranının % 73.7'ye ulaştığı ve bunun %18'inin polistiren olduğu tespit edilmiştir (Sighicelli *vd.*, 2018). Yangtze Nehri haliçindeki yüzey suyunun mikroskobik plastiklerle kirlenme riski araştırılmış ve ortalama mikroplastik konsantrasyonunun 23.1 ± 18.2 n/ 100 L olarak belirlenmiştir (Xu *vd.*, 2018b). Avrupa tarım arazilerindeki kuru kaliteli çamurun mikroplastik içeriği ise ~ 1000-4000/kg'dır (Barnes *vd.*, 2009; Dong Y. *vd.*, 2020). Ekosistemlerde bulunan mikroplastiklerin tespiti ile ilgili bazı çalışmalarda değerlerin yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Bazı tatlı su örneklerindeki mikroplastik konsantrasyonu ve boyutları (Li *vd.*, 2020a).

Ülke	Bölge	Tahmini MP birim· L ⁻¹	Çalışmalardan Ortalama Konsantrasyon	Örnek	Boyut	Referans
İngiltere	Kelvin Nehri	296.5	0.26685 g L ⁻¹	sediment	2.8 mm-11 µ m	(Blair <i>vd.</i> , 2019)
Avrupa	Karpat Havzası	524	0.4716 g L ⁻¹	Sediment ve yüzey suyu	<0.3 mm	(Bordós <i>vd.</i> , 2019)
Belçika	Flaman Nehirleri	17	0.0153 g L ⁻¹	su	<5 mm	(Slootmaekers <i>vd.</i> , 2019)
Kanada	Winnipeg Gölü	1933	1.7397 g L ⁻¹	Yüzey suyu	<5 mm	(Anderson <i>vd.</i> , 2017)
Fransa	Sen Nehri, kentsel alan	0.03	3 partikül/m ³	Nehir suyu	100–5000 µm	(Dris <i>vd.</i> , 2015)
Hindistan	Vembanad Gölü	300	0.27 g L ⁻¹	sediment	0.2 mm – 1 mm	(Sruthy ve Ramasamy, 2017)

Plastikler, mikroplastikler (plastik parçacıklar <0.5mm) ve işlenmiş nano malzemeler (en az bir boyutu <100nm olan imal edilmiş malzemeler) günümüzde yaygın olarak çevresel kirlenmeye neden olmakta ve çevresel kalite, ekosistem ile hayvan ve insan sağlığı üzerinde potansiyel olumsuz etkilere sebep olabilmektedir (Andrady, 2017; Barboza *vd.*, 2018; Chen *vd.*, 2017; Davarpanah ve Guilhermino, 2019; Franzellitti *vd.*, 2019; Giannetto *vd.*, 2018; Horton *vd.*, 2017; Windsor *vd.*, 2018). Mikroplastiklerin dağılımı, ekotoksiteleri, tanımlanması ve kontrolü üzerine yapılan bazı araştırmalar mevcut olmakla birlikte (Auta *vd.*, 2017; Huang *vd.*, 2020; Kogel *vd.*, 2020; Ma *vd.*, 2020; Turner *vd.*, 2020; Wang *vd.*, 2020b) yeterli değildir.

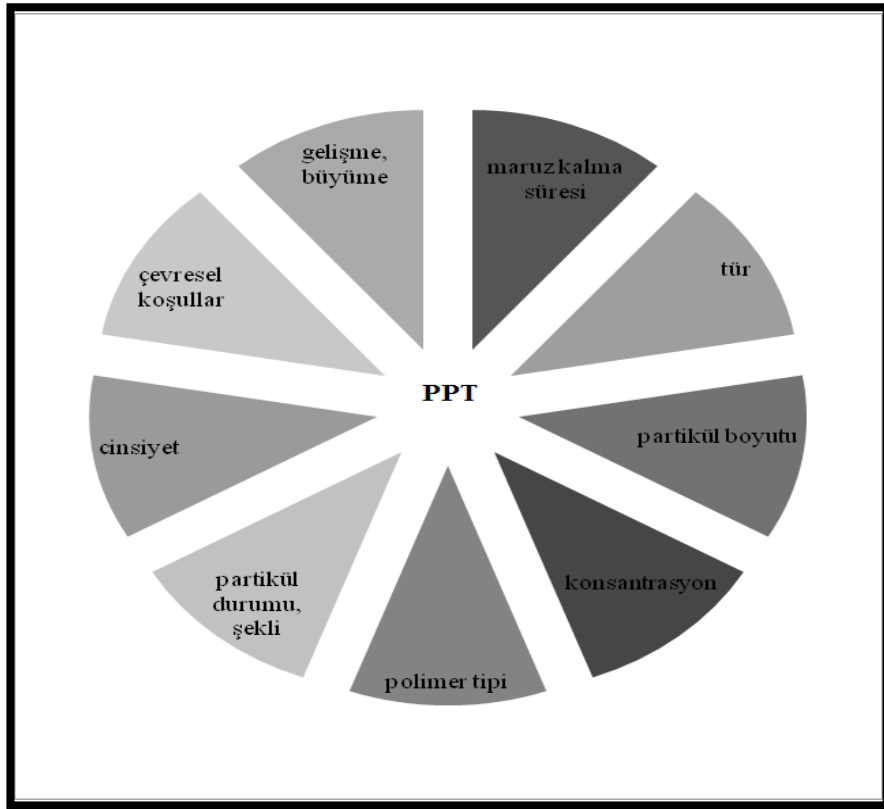
Bununla birlikte mikroplastikler; küçük boyutları, çevredeki yüksek direnç ve sürekliliklerinden dolayı global bir endişe kaynağı olmalarının yanı sıra, "**Truva Atı Etkisi**" olarak da adlandırılan diğer kirleticileri adsorbe etme yeteneğine de sahip olmaları sebebiyle önem taşımakta ve dikkat çekmektedir (Costa Araújo *vd.*, 2020). Özellikle, canlılar için tehlike oluşturan kirleticilerin ortamdan uzaklaştırılmasında MP'lerin katkı

sağlayabilecek olması, üzerinde çalışılması ve geliştirilmesi gereken bir konudur. Polibromlu difenil eter (PBDE)'in polietilen (PE), polipropilen (PP), poliestiren (PS) ve poliamid (PA) mikroplastikleri üzerine adsorpsiyonun araştırıldığı bir çalışmada; sorpsiyon kapasitelerinin farklı kristal yapıları, spesifik yüzey alanı ve yüzey yapısına bağlı olarak PS > PA > PP > PE şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir (Xu *vd.*, 2019). Farklı mikroplastik türlerinin bir antibiyotik olan sülfametoksazol adsorpsiyonunda başarılı olduğu belirlenmiştir (Guo X. *vd.*, 2019). Bununla birlikte, Triklosan (TCS) sorpsiyonunda kullanılan poliestiren (PS) mikroplastiklerinin küçük boyutlarının, daha geniş yüzey alanı sağlaması sebebiyle adsorpsiyon oranlarını arttırdığı da elde edilen bilgiler arasındadır (Li *vd.*, 2019). Tilosin adı verilen antibiyotığın çeşitli plastik türlerince adsorpsiyon kapasitesinin belirlendiği başka bir çalışmada; polivinil kloridin sorpsiyon kapasitesinin polietilen ve poliestirene göre daha yüksek olduğu; pH ve iyonik kuvvetin sorpsiyonu önemli ölçüde etkilediğini tespit edilmiştir (Guo *vd.*, 2018; Li *vd.*, 2019). Poliamidin (PA) ise yüksek iyonik kuvvet koşullarında,

antibiyotikler için en yüksek adsorbsiyon kapasitesi sergilemiştir (Li *vd.*, 2018b; Li *vd.*, 2019). Bu çalışmalar; mikroplastiklerin truva etkisini açıkça göstermekte olup, bu alanda yapılacak yeni çalışmalar ile MP'lerin ortamdaki kirletici unsurların uzaklaştırılmasında kullanılıp kullanılmayacağı, adsorpsiyon kapasiteleri, verimlilikleri ve ekosistemler üzerindeki etkileri hakkında daha fazla bilgi

edinilmelidir.

Literatürdeki pek çok çalışma; MP'lerin canlılar üzerinde negatif etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle; 10 µm'den daha küçük boyuttaki partiküllerin daha toksik olduğu belirlenmiş olup, plastik partikül toksisitesinin (PPT) belirlenmesinde özellikle 9 belirleme faktörü etkisi olduğu düşünülmektedir (Kogel *vd.*, 2020) (Şekil 4).



Şekil 4. Plastik partikül toksisitesi belirleme faktörleri

Mikroplastiklere maruz kalmanın, çeşitli toksik hasarları tetiklediği (yeme alışkanlıklarında bozulmalar, üreme sistemi metabolik bozuklukları dahil); yumuşakçalar (mollusk), kabuklular (crustaceae) ve balıklar kullanılarak yapılan laboratuvar ve saha çalışmaları ile belirlenmiştir (de Sa *vd.*, 2018; Malafaia *vd.*, 2020). Ayrıca; mikroplastiklerin potansiyel olarak sucul organizmaların bağırsaklarını direkt olarak etkileyebildiğini gösteren çalışmalar da mevcuttur (Jin *vd.*, 2018; Lei *vd.*, 2018; Liu P. *vd.*, 2020). Polistiren (PS), polietilen (PE) and polivinil

klorid (PVC) gibi mikroplastikler; midye, balık ve kum kurdunda akut toksisite ve yüksek ölüm oranları gibi olumsuz etkileri indüklemektedir (Browne *vd.*, 2013; Liu P. *vd.*, 2020; Wardrop *vd.*, 2016; Wathsala *vd.*, 2018). Yüksek bir bitki olan *Vicia faba* ve *Lactuca sativa L. var. ramosa* Hort türü kullanılarak yapılan çalışmalarda, mikroplastiklerin bu 2 türün büyümesini inhibe ettiği gözlenmiştir (Gao *vd.*, 2019; Jiang *vd.*, 2019).

Bazı durumlarda, mikroplastikler ortamdaki başka bir toksik maddenin etkisini artırabilmektedir. Mikroplastiklerin diğer

kirleticiler ile sinerjistik ya da antagonistik etkileri hakkında yeterince bilgi olmamakla birlikte yapılan bir çalışmada, Roundup Gran adlı herbisitinin ortamdaki iki mikroplastik ile bağlanması sonucunda *D.magna* ölümlerini arttırdığı belirlenmiştir (Zocchi ve Sommaruga, 2019).

Tatlı su sistemleri; denizel ekosistemlere MP girdi kaynağı olarak gösterilmektedir. Buna rağmen; mikroplastiklerin tatlı su organizmaları üzerindeki etkilerinin konusundaki çalışmaların (özellikle de omurgalılar bazında) yetersiz olduğu düşünülmektedir (Costa Araújo vd., 2020). Tatlı su balık türleri üzerindeki zararlı etkilerin belirlenmesine yönelik yapılan bazı çalışmalarda; zebra balığı (*Danio rerio*) üzerindeki hepatoksisitesi (Lu vd., 2016), zebra balığı kalbinde partikül akümüasyonu (Veneman vd., 2017), bağırsak toksisiteleri (Lei vd., 2018) belirlenmeye çalışılmıştır. *Physalaemus cuvieri* üzerinde polietilen mikroplastiklerin (PE-MP) potansiyel toksikolojik etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada ise, mutagenik etkilerin oluştuğu belirlenmiş olup; solungaç, gastrointestinal sistem, ciğer, kas dokuları ve kanda tespit edilen PE-MP ise, iribaşlar tarafından mikroplastik akümüasyonunu doğrulamaktadır (Costa Araújo vd., 2020). Bu çalışmalar, mikroplastiklerin ekotoksitesisi hakkında bilgi sağlamakta fakat bu alandaki boşluğu doldurmamaktadır (Malafaiya vd., 2020).

Bununla birlikte; endüstride polimerlere farklı renkli alkid reçineler gibi pigmentler eklenebilmektedir (Greenway ve Gerstenberger, 2010). Bu pigmentler sayesinde farklı üretim amaçlarına uygun renkli mikroplastikler üretilmekte; çevrede ve sucul organizmalarda farklı renkteki mikroplastiklere rastlanabilmektedir. Deniz balıkları ile yapılan bir çalışmada tespit edilen mikroplastiklerin beyaz, yeşil, sarı, turuncu, kırmızı, mavi olduğu gözlenmiştir (Chen vd., 2020; Shaw ve Day, 1994; Su vd., 2016; Wang vd., 2017; Zhang vd., 2018b). Renkli mikroplastikler bazı sucul canlılar için tehlike oluşturmaktadır. *Daphnia magna*'nın beslenme yeteneği

üzerinde yapılan bir çalışmada, su pirelerinin renkli mikroplastikleri alglerden ayıramadığını tespit etmişlerdir (Chen vd., 2020). *L. minor*'un polietilen mikroplastik ile etkileşimi çalışıldığı diğer bir çalışmada ise, bir tatlı su amfipodu olan *Gammarus duebeni*'nin kontamine olmuş *L. minor*'dan beslenme yoluyla 10-45µm PE mikroplastığı yutabildiği belirlenmiştir (Mateos-Cardenas vd., 2019).

Elektron mikroskopisi kullanılarak, mikroplastik parçacıklar üzerinde yapılan çalışmalarda parçacık yüzeylerinin çok sayıda kıvrım içeren ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu gözlenmiş ve bu yapıların, kirleticileri adsorbe etmelerini kolaylaştırdığı tespit edilmiştir (Dong Y. vd., 2020; Zhang vd., 2018a). Daha küçük fragmentlerin spesifik yüzey alanlarındaki (SSA) artış da, kirleticilere karşı sorpsiyonu arttırmaktadır (Dastkhood vd., 2017; Zhang vd., 2018a).

Mikroplastikler; yüzey özelliklerini değiştirebilen biyodegradasyon, kimyasal oksidasyon, fiziksel aşınma, UV radyasyon içeren çeşitli ayrışma işlemlerine maruz kalabilmektedir (Andrady, 2011; Liu P. vd., 2020). Bu ayrıştırma işlemleri; polarite, hidrofilitiyi ve MP yüzeyindeki yükleri arttırmamasından dolayı, çevresel kirleticiler için MP sorpsiyonunu etkileyebilmektedir (Liu vd., 2019; Liu P. vd., 2020; Müller vd., 2018; Wang vd., 2020a; Zhang vd., 2018a). Kirletici unsurlarla direkt etkileşim halinde olabilen çevresel bileşenler de (doğal organik maddeler (NOM), tuzluluk, yüklü mineraller gibi), mikroplastiklerin özelliklerini değiştirebilmelerinden dolayı (Chen vd., 2018; Wang vd., 2019); MP sorpsiyon davranışlarını etkileyebilmektedir (Fang vd., 2019; Holmes vd., 2012; Liu P. vd., 2020; Xu vd., 2018a). Bunun yanı sıra; MP'ler patojenleri ve havadaki uçuşan solunum sistemimize girebilen lifli MP'leri de sorbe edebilmekte olup, kalıcı organik kirleticiler (POP) gibi diğer kirleticiler ile ilişkili oldukları bilinmektedir (Editorial, 2020). Çevresel kirleticiler MP üzerinde adsorbe olabilmekte ve böylece organizmalara

transfer olma durumları oluşabilmektedir (Avio *vd.*, 2015; Wardrop *vd.*, 2016).

5. MİKROPLASTİK KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Mikroplastiklerin karakterizasyonunda fiziksel ve kimyasal yöntemler mevcuttur. Fiziksel karakterizasyonda; stereomikroskopik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Sun *vd.*, 2019). Kimyasal karakterizasyonda ise; FT-IR spektroskopisi ve Raman spektroskopisi en yaygın kullanılan iki yöntem olmakla birlikte (Gies *vd.*, 2018; Hu *vd.*, 2019; Lares *vd.*, 2018; Zhang ve Chen, 2020), pahalı ekipmanlar gerektirmeleri ve zaman alıcı bir yöntem olmaları gibi dezavantajlar içermektedir (Hengstmann ve Fischer, 2019; Shim *vd.*, 2016).

5.1. FT-IR (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)

Örneklerin kızılötesi radyasyona maruz bırakılması sonucunda, atomlar arasındaki spesifik kimyasal bağlarla ilişkili piklerin elde edilebildiği bir tekniktir (Sun *vd.*, 2019). Mikroplastik analizinde genellikle tercih edilen bir yöntemdir (Auta *vd.*, 2017; Ivar do Sul ve Costa, 2014; Shim *vd.*, 2016; Xu *vd.*, 2019). >20 µm'den küçük mikroplastikler, µFT-IR görüntülemesi ile karakterize edilebilmektedir (Li *vd.*, 2020a; Mintenig *vd.*, 2019). FT-IR analizi, mikroplastiklerin yüzeyi üzerindeki fonksiyonel grupların belirlenmesine de olanak sağlamaktadır (Xu *vd.*, 2019).

5.2. Raman Spektroskopisi

Mikroplastiklerin tanımlanmasında sıklıkla kullanılan spektroskopi yöntemlerinden biri olan Raman Spektroskopisi, ışığın esnek olmayan saçılımına dayanan titreşimsel bir spektroskopi tekniğidir (Schymanski *vd.*, 2018). Bu teknik, FT-IR spektroskopisi ile tespit edilemeyecek organik veya inorganik dolgu maddeleri ve pigmentleri analiz edebilmeye olanak sağlamaktadır (Hu *vd.*, 2019; Imhof *vd.*, 2016). FT-IR analizine

göre daha iyi uzamsal çözünürlük (<1 µm) gösteren Raman spektroskopisi, numunelerdeki mikrobiyolojik, organik veya inorganik maddelerden kaynaklanan floresan girişimine eğilimlidir (Sun *vd.*, 2019).

5.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SEM; partiküllerin şekil ve boyutlarının gözlenmesinde tercih edilen kantitatif bir yöntemdir. Bu teknik ile; odaklanmış elektron ışınlarıyla yüzeyi tarayarak mikroplastiklerin görüntülerini oluşturmaktadır (Mahon *vd.*, 2017; Sun *vd.*, 2019). SEM-enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) ve çevresel tarama elektron mikroskobu-EDS (ESEM-EDS), mikroplastiklerin yüzey morfolojisini karakterize etmek ve polimerlerin temel bileşimini belirlemek için kullanılabilir (Dubaiş ve Liebezeit, 2013; Eriksen *vd.*, 2013; Sun *vd.*, 2019). Bununla birlikte; SEM-EDS; µFT-IR ve µRaman görüntülemesine göre daha iyi uzamsal çözünürlük sağlayabilmektedir (Li *vd.*, 2020a).

5.4. GC-MS (Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi)

Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) (Pyr-GC-MS de dahil) (Dümichen *vd.*, 2017; Nuelle *vd.*, 2014) ve sıvı kromatografisi (LC) (Elert *vd.*, 2017) gibi teknikler de mikroplastik karakterizasyonunda uygulanabilmektedir (Sun *vd.*, 2019).

Genellikle termoanalitik yöntemlerle uygulanan GC-MS yöntemleri, örneklerde hızlı plastik tespitinde kullanılmaktadır (Sun *vd.*, 2019). Spektroskopik yöntemlere göre daha yıkıcı bir yöntem olan Pyr-GC-MS yönteminde karakterizasyon işlemi, polimerlerin pirolizine dayanmaktadır (Li *vd.*, 2020a; Nuelle *vd.*, 2014). Tanımlamada oldukça hassas ve seçici bir yöntem olmakla birlikte, ekipmanlarının yüksek bakımı gerektirmesi bu yöntemin dezavantajlarından biridir (Li *vd.*, 2020a;

Nuelle vd., 2014).

6. SONUÇLAR

Günümüzde kullanımları oldukça yaygınlaşan plastiklerin, ekosistemlerdeki konsantrasyonları hızla artmakta ve bu durum global bir endişe kaynağı haline gelmektedir. Sucul ve karasal ekosistemlere direkt ya da dolaylı olarak dahil olabilen mikroplastiklerin, pek çok canlı grubu için toksik nitelikte olduğu bilinmektedir. Bu derleme çalışması, mikroplastiklerin tanımı, tipleri, kaynakları, dağılımları ve canlılar üzerindeki toksik etkileri ile ilgili bilgiler içermektedir. Literatür incelendiğinde, oldukça güncel olan bu alanda yeterli çalışma olmadığı görülmektedir. Bu sebeple; bu alanda yapılacak multidisipliner çalışmalar ile mikroplastiklerin ortamdaki uzaklaştırılabilirliği, toksisitesi, sinerjistik-antagonistik etkileşimleri, risk değerlendirme ve modelleme çalışmalarının desteklenmesi; moleküler düzeyde yapılacak sitotoksik çalışmalarla bu alandaki değerlendirilmelerin güçlendirilmesi önem teşkil etmektedir.

AÇIKLAMA BİLDİRİMİ

Yazarlar bu makalede çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

ORCID Numarası

Esra ÜÇÜNCÜ TUNCA:

 <https://orcid.org/0000-0002-9024-8477>

7. KAYNAKLAR

Monteiro, R.C.P., Ivar do Sul, J.A., Costa, M.F., (2018). Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. *Environmental Pollution* 238: 103-110.

Yao, L., Hui, L., Yang, Z., Chen, X., Xiao, A., (2020). Freshwater microplastics pollution: Detecting and visualizing emerging trends based on Citespace II. *Chemosphere* 245: 125627.

Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., (2017). Production use and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3(7): 1-5. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

Editorial, (2020). Plastic pollution in the environment. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 73(103274).

Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Theodore, R.S., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean.

Li, Z., Yi, X., Zhou, H., Chi, T., Li, W., Yang, K., (2020a). Combined effect of polystyrene microplastics and dibutyl phthalate on the microalgae *Chlorella pyrenoidosa*. *Environ. Pollut.* 257: 113604.

Andrady, A.L., Neal, M.A., (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 364(1526): 1977-1984.

Costa Araújo, A.P., Silva de Melob, N.F., Oliveira Juniorc, A.G., Rodriguesa, F.P., Fernandes, T., Andrade Vieiraa, J.E., Rochad, T.L., Malafaia, G., (2020). How much are microplastics harmful to the health of amphibians? A study with pristine polyethylene microplastics and *Physalaemus cuvieri*. *Journal of Hazardous Materials* 382: 121066.

Lithner, D., Larsson, Å., Dave, G., (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of The Total Environment* 409(18): 3309-3324.

Dong, Y., Gao, M., Song, Z.W.Q., (2020). As (III) adsorption onto different-sized polystyrene microplastic particles and its mechanism. *Chemosphere* 239 (124792).

Klein, S., Dimzon, I.K., Eubeler, J., Knepper, T.P., (2018). Analysis, Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment. in: *Freshwater Microplastics : Emerging Environmental Contaminants?*, (Eds.) M. Wagner, S. Lambert, Springer International Publishing. Cham, pp. 51-67.

Yang, H., Xiong, H., Mi, K., Xue, W., Wei, W., Zhang, Y., (2020). Toxicity comparison of nano-sized and micron-sized microplastics to Goldfish *Carassius auratus* Larvae. *J. Hazard. Mater.* 388: 122058.

- Peeken, I., Primpke, S., Beyer, B., Gutermann, J., Katlein, C., Krumpfen, T., Bergmann, M., Hehemann, L., Gerds, G., (2018). Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nat. Commun.* 9(1): 1505.
- Malafaia, G., Martins de Souza, A., Pereira, A.C., Gonçalves, S., Costa Araújo, A.P., Ribeiro, R.X., Rocha, T.L., (2020). Developmental toxicity in zebrafish exposed to polyethylene microplastics under static and semi-static aquatic systems. *Science of the Total Environment* 700 (134867).
- Liu, P., Zhan X., Wu, X., Li, J., Wang H.S.G., (2020). Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks. *Chemosphere* 242 (125193).
- Choi, J.S., Hong, S.H., Park, J.W., (2019). Evaluation of microplastic toxicity in accordance with different sizes and exposure times in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Mar. Environ. Res.* 104838.
- Dubaish, F., Liebezeit, G., (2013). Suspended Microplastics and Black Carbon Particles in the Jade System, Southern North Sea. *Water, Air & Soil Pollution* 224(2).
- Li, C., Busquets, R., Campos, L.C., (2020b). Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Sci. Total Environ.* 707 : 135578.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W., McGonigle, D., Russell, A.E., (2004). Lost at sea: where is all the plastic? *Science* 304(5672): 838.
- Frias, J.P.G.L., Nash, R., (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin* 138: 145-147.
- Sierra, I., Chialanza, M.R., Faccio, R., Carrizo, D., Fornaro, L., Perez-Parada, A., (2020). Identification of microplastics in wastewater samples by means of polarized light optical microscopy. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 27(7) : 7409-7419.
- Huang, Y., Qing, X., Wang, W., Han, G., Wang, J., (2020). Mini-review on current studies of airborne microplastics: Analytical methods, occurrence, sources, fate and potential risk to human beings. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 125: 115821.
- Anderson, J.C., Park, B.J., Palace, V.P., (2016). Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems. *Environmental Pollution Series A Ecological and Biological* 218: 269-280.
- Andrady, A.L., (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62(8): 1596-1605.
- Zocchi, M., Sommaruga, R., (2019). Microplastics modify the toxicity of glyphosate on *Daphnia magna*. *Science of the Total Environment* 697.
- Kazour, M., Terkia, S., Rabhia, K., Jemaab, S., Khalaf, G.R.A., (2019). Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill. *Marine Pollution Bulletin* 146: 608–618.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin* 62(12): 2588-2597.
- 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.
- Castañeda, R.A., Avlijas, S., Simard, M.A., Ricciardi, A., Smith, R. 2014. Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(12), 1767-1771.
- Duis, K., Coors, A., (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ. Sci. Eur.* 28(1): 2.
- 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.
- Zbyszewski, M., Corcoran, P.L., Hockin, A., (2014). Comparison of the distribution and degradation of plastic debris along shorelines of the Great Lakes, North America. *Journal of Great Lakes Research* 40(2): 288-299.
- Zettler, E.R., Mincer, T.J., Amaral-Zettler, L.A., (2013). Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.* 47(13): 7137-7146.
- Ngo, P.L., Pramanik, B.K., Shah, K., Roychand, R., (2019). Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants. *Environmental Pollution* 255: 113326.

- Hu, Y., Gong, M., Wang, J., Bassi, A., (2019). Current research trends on microplastic pollution from wastewater systems: a critical review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 18(2): 207-230.
- Setälä, O., Norkko, J., Lehtiniemi, M., (2016). Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community. *Marine Pollution Bulletin* 102(1): 95-101.
- Van Cauwenberghe, L., Janssen, C.R., (2014). Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution* 193: 65-70.
- Ferreira, P., Fonte, E., Soares, M.E., Carvalho, F., Guilhermino, L., (2016). Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish *Pomatoschistus microps*: Gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquatic Toxicology* 170: 89-103.
- Fossi, M.C., Marsili, L., Bains, M., Giannetti, M., Coppola, D., Guerranti, C., Caliani, I., Minutoli, R., Lauriano, G., Finoia, M.G., Rubegni, F., Panigada, S., Bérubé, M., Urbán Ramírez, J., Panti, C., (2016). Fin whales and microplastics: The Mediterranean Sea and the Sea of Cortez scenarios. *Environmental Pollution* 209: 68-78.
- Caron, A., Thomas, C., Ariel, E., Berry, K., Boyle, S., Motti, C., Brodie, J. 2016. *Extraction and identification of microplastics from sea turtles: method development and preliminary results*, TropWATER, Report No. 15/52.
- Avio, C.G., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d'Errico, G., Pauletto, M., Bargelloni, L., Regoli, F., (2015). Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution* 198: 211-222.
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., Canning-Clode, J., (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178: 189-195.
- Scherer, C., Weber, A., Lambert, S. & Wagner, M. (2018). Interactions of Microplastics with Freshwater Biota. In: "Freshwater Microplastics", (M. Wagner & S. Lambert, Eds.), Springer, pp. 153-180.
- De Witte, B., Devriese, L., Bekaert, K., Hoffman, S., Vandermeersch, G., Cooreman, K., Robbens, J., (2014). Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): Comparison between commercial and wild types. *Marine Pollution Bulletin* 85(1): 146-155.
- Gauquie, J., Devriese, L., Robbens, J., De Witte, B., (2015). A qualitative screening and quantitative measurement of organic contaminants on different types of marine plastic debris. *Chemosphere* 138: 348-356.
- Li, J., Liu, H., Paul Chen, J., (2018a). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research* 137: 362-374.
- Wang, Z., Lin, T., Chen, W., (2020b). Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of the Total Environment* 700: 134520.
- Cole, M., Lindeque, P.K., Fileman, E., Clark, J., Lewis, C., Halsband, C., Galloway, T.S., (2016). Microplastics Alter the Properties and Sinking Rates of Zooplankton Faecal Pellets. *Environ. Sci. Technol.* 50(6): 3239-3246.
- Sighicelli, M., Pietrelli, L., Lecce, F., Iannilli, V., Falconieri, M., Coscia, L., Di Vito, S., Nuglio, S., Zampetti, G., (2018). Microplastic pollution in the surface waters of Italian Subalpine Lakes. *Environmental Pollution* 236: 645-651.
- Xu, P., Peng, G., Su, L., Gao, Y., Gao, L., Li, D., (2018b). Microplastic risk assessment in surface waters: A case study in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin* 133: 647-654.
- Barnes, D.K., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 364(1526): 1985-1998.
- Blair, R.M., Waldron, S., Phoenix, V.R., Gauchotte-Lindsay, C., (2019). Microscopy and elemental analysis characterisation of microplastics in sediment of a freshwater urban river in Scotland, UK. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 26(12): 12491-12504.
- Bordós, G., Urbányi, B., Micsinai, A., Kriszt, B., Palotai, Z., Szabó, I., Hantosi, Z., Szoboszlai, S., (2019). Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe. *Chemosphere* 216: 110-116.
- Slootmaekers, B., Catarci Carteny, C., Belpaire, C., Saverwyns, S., Fremout, W., Blust, R., Bervoets, L., (2019). Microplastic contamination in gudgeons (*Gobio gobio*) from Flemish rivers (Belgium). *Environmental Pollution* 244: 675-684.

- Anderson, P.J., Warrack, S., Langen, V., Challis, J.K., Hanson, M.L., Rennie, M.D., (2017). Microplastic contamination in Lake Winnipeg, Canada. *Environmental Pollution* 225: 223-231.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., Tassin, B., (2015). Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry* 1-9.
- Sruthy, S., Ramasamy, E.V., (2017). Microplastic pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: The first report of microplastics in lake and estuarine sediments in India. *Environmental Pollution* 222: 315-322.
- Andrady, A.L., (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin* 119(1): 12-22.
- Barboza, L.G.A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B., Lundebye, A.K., Guilhermino, L., (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Mar. Pollut. Bull.* 133: 336-348.
- Chen, M., Qin, X., Zeng, G., (2017). Biodiversity change behind wide applications of nanomaterials? *Nano Today* 17: 11-13.
- Davarpanah, E., Guilhermino, L., (2019). Are gold nanoparticles and microplastics mixtures more toxic to the marine microalgae *Tetraselmis chuii* than the substances individually? *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 181: 60-68.
- Franzellitti, S., Canesi, L., Auguste, M., Wathsala, R.H.G.R., Fabbri, E., (2019). Microplastic exposure and effects in aquatic organisms: A physiological perspective. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68: 37-51.
- Giannetto, A., Cappello, T., Oliva, S., Parrino, V., De Marco, G., Fasulo, S., Mauceri, A., Maisano, M., (2018). Copper oxide nanoparticles induce the transcriptional modulation of oxidative stress-related genes in *Arbacia lixula* embryos. *Aquatic Toxicology* 201: 187-197.
- Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C., (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment* 586: 127-141.
- Windsor, R., Cinelli, M., Coles, S.R., (2018). Comparison of tools for the sustainability assessment of nanomaterials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 12: 69-75.
- Kogel, T., BJORoy, O., Toto, B., Bienfait, A.M., Sanden, M., (2020). Micro- and nanoplastic toxicity on aquatic life: Determining factors. *Sci. Total Environ.* 709: 136050.
- Ma, H., Pu, S., Liu, S., Bai, Y., Mandal, S., Xing, B., (2020). Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences. *Environ. Pollut.* 261: 114089.
- Turner, A., Holmes, L., Thompson, R.C., Fisher, A.S., (2020). Metals and marine microplastics: Adsorption from the environment versus addition during manufacture, exemplified with lead. *Water Res.* 173: 115577.
- Xu, X., Jian Y., Xue Y., Hou Q.L.W., (2019). Microplastics in the wastewater treatment plants (WWTPs): Occurrence and removal. *Chemosphere* 235: 1089-1096.
- Guo, X., Chen, C.J.W., (2019). Sorption of sulfamethoxazole onto six types of microplastics. *Chemosphere* 228: 300-308.
- Li, Y., Li, M., Li, Z., Yang, L., Liu, X., (2019). Effects of particle size and solution chemistry on Triclosan sorption on polystyrene microplastic. *Chemosphere* 231: 308-314.
- Guo, X., Pang, J., Chen, S., Jia, H., (2018). Sorption properties of tylosin on four different microplastics. *Chemosphere* 209: 240-245.
- Li, J., Zhang, K., Zhang, H., (2018b). Adsorption of antibiotics on microplastics. *Environmental Pollution* 237: 460-467.
- de Sa, L.C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T.L., Fetter, M.N., (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci. Total Environ.* 645: 1029-1039.
- Jin, Y., Xia, J., Pan, Z., Yang, J., Wang, W., Fu, Z., (2018). Polystyrene microplastics induce microbiota dysbiosis and inflammation in the gut of adult zebrafish. *Environmental Pollution* 235: 322-329.
- Lei, L., Wu, S., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Fu, Z., Shi, H., Raley-Susman, K.M., He, D., (2018). Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Science of The Total Environment* 619-620: 1-8.

- Browne, M.A., Niven, S.J., Galloway, T.S., Rowland, S.J., Thompson, R.C., (2013). Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity. *Curr. Biol.* 23(23): 2388-2392.
- Wardrop, P., Shimeta, J., Nugegoda, D., Morrison, P.D., Miranda, A., Tang, M., Clarke, B.O., (2016). Chemical Pollutants Sorbed to Ingested Microbeads from Personal Care Products Accumulate in Fish. *Environ. Sci. Technol.* 50(7): 4037-4044.
- Wathsala, R.H.G.R., Franzellitti, S., Scaglione, M., Fabbri, E., (2018). Styrene impairs normal embryo development in the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Aquatic Toxicology* 201: 58-65.
- Gao, M., Liu, Y., Song, Z., (2019). Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort). *Chemosphere* 237: 124482.
- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., Klobucar, G., (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. *Environ. Pollut.* 250: 831-838.
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L., Ren, H., (2016). Uptake and Accumulation of Polystyrene Microplastics in Zebrafish (*Danio rerio*) and Toxic Effects in Liver. *Environmental Science & Technology* 50(7): 4054-4060.
- Veneman, W.J., Spaink, H.P., Brun, N.R., Bosker, T., Vijver, M.G., (2017). Pathway analysis of systemic transcriptome responses to injected polystyrene particles in zebrafish larvae. *Aquatic Toxicology* 190: 112-120.
- Greenway, J.A., Gerstenberger, S., (2010). An Evaluation of Lead Contamination in Plastic Toys Collected from Day Care Centers in the Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 85(4): 363-366.
- Chen, Q., Yue Li, Li, B., (2020). Is color a matter of concern during microplastic exposure to *Scenedesmus obliquus* and *Daphnia magna*? *Journal of Hazardous Materials* 383(121224).
- Shaw, D.G., Day, R.H., (1994). Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 28(1): 39-43.
- Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., Shi, H., (2016). Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution* 216: 711-719.
- Wang, W., Ndungu, A.W., Li, Z., Wang, J., (2017). Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of The Total Environment*, 575: 1369-1374.
- Zhang, K., Shi, H., Peng, J., Wang, Y., Xiong, X., Wu, C., Lam, P.K.S., (2018b). Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Science of The Total Environment* 630: 1641-1653.
- Mateos-Cardenas, A., Scott, D.T., Seitmaganbetova, G., Frank, N.A.M.V., John, O., Marcel, A.K.J., (2019). Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Sci. Total Environ.* 689: 413-421.
- Zhang, H., Wang, J., Zhou, B., Zhou, Y., Dai, Z., Zhou, Q., Christie, P., Luo, Y., (2018a). Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: Kinetics, isotherms and influencing factors. *Environmental Pollution* 243: 1550-1557.
- Dastkhooon, M., Ghaedi, M., Asfaram, A., Ahmadi Azghandi, M.H., Purkait, M.K., (2017). Simultaneous removal of dyes onto nanowires adsorbent use of ultrasound assisted adsorption to clean waste water: Chemometrics for modeling and optimization, multicomponent adsorption and kinetic study. *Chemical Engineering Research and Design* 124: 222-237.
- Liu, G., Zhu, Z., Yang, Y., Sun, Y., Yu, F., Ma, J., (2019). Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater. *Environmental Pollution* 246: 26-33.
- Müller, A., Becker, R., Dorgerloh, U., Simon, F.-G., Braun, U., (2018). The effect of polymer aging on the uptake of fuel aromatics and ethers by microplastics. *Environmental Pollution* 240: 639-646.
- Wang, Q., Zhang, Y., Wangjin, X., Wang, Y., Meng, G., Chen, Y., (2020a). The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *J. Environ. Sci. (China)* 87: 272-280.
- Chen, W., Ouyang, Z.-Y., Qian, C., Yu, H.Q., (2018). Induced structural changes of humic acid by exposure of polystyrene microplastics: A spectroscopic insight. *Environmental Pollution* 233: 1-7.

- Wang, F., Yang, W., Cheng, P., Zhang, S., Zhang, S., Jiao, W., Sun, Y., (2019). Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions. *Chemosphere* 235: 1073-1080.
- Fang, S., Yu, W., Li, C., Liu, Y., Qiu, J., Kong, F., (2019). Adsorption behavior of three triazole fungicides on polystyrene microplastics. *Science of The Total Environment* 691: 1119-1126.
- Holmes, L.A., Turner, A., Thompson, R.C., (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution* 160: 42-48.
- Xu, B., Liu, F., Brookes, P.C., Xu, J., (2018a). Microplastics play a minor role in tetracycline sorption in the presence of dissolved organic matter. *Environmental Pollution* 240: 87-94.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C.M., Ni, B.J., (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Res.* 152: 21-37.
- Gies, E.A., LeNoble, J.L., Noël, M., Etemadifar, A., Bishay, F., Hall, E.R., Ross, P.S., (2018). Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada. *Marine Pollution Bulletin* 133: 553-561.
- Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpaa, M., Sillanpaa, M., (2018). Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Res.* 133: 236-246.
- Zhang, Z., Chen, Y., (2020). Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal: A review. *Chemical Engineering Journal* 382: 122955.
- Hengstmann, E., Fischer, E.K., (2019). Nile red staining in microplastic analysis-proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics. *Environ. Monit. Assess.* 191(612).
- Shim, W.J., Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., (2016). Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin* 113: 469-476.
- Ivar do Sul, J.A., Costa, M.F., (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environ. Pollut.* 185: 352-64.
- Mintenig, S.M., Löder, M.G.J., Primpke, S., Gerdt, G., (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of The Total Environment* 648: 631-635.
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., Fürst, P., (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129: 154-162.
- Imhof, H.K., Laforsch, C., Wiesheu, A.C., Schmid, J., Anger, P.M., Niessner, R., Ivleva, N.P., (2016). Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes. *Water Research* 98: 64-74.
- Mahon, A.M., O'Connell, B., Healy, M.G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., Morrison, L., (2017). Microplastics in Sewage Sludge: Effects of Treatment. *Environ. Sci. Technol.* 51(2): 810-818.
- Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., Amato, S., (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 77(1): 177-182.
- Dümichen, E., Eisentraut, P., Bannick, C.G., Barthel, A.-K., Senz, R., Braun, U., (2017). Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method. *Chemosphere* 174: 572-584.
- Nuelle, M.T., Dekiff, J.H., Remy, D., Fries, E., (2014). A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution* 184: 161-169.
- Elert, A.M., Becker, R., Duemichen, E., Eisentraut, P., Falkenhagen, J., Sturm, H., Braun, U., (2017). Comparison of different methods for MP detection: What can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters? *Environmental Pollution* 231: 1256-1264.