



İleri Atıksu Arıtma Metotları İle Mikroplastik Giderim Veriminin Değerlendirilmesi

Ceyhun AKARSU

Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

Geliş/Received: 23.03.2022

Kabul/Accepted: 12.04.2021

Yayın/Published: 30.06.2022

Atf yapmak için: Akarsu, C. (2022), İleri Atıksu Arıtma Metotları İle Mikroplastik Giderim Veriminin Değerlendirilmesi. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 7(2), 207-215.

How to cite: Akarsu, C. (2022), Evaluation of Microplastic Removal Efficiency Via Advanced Wastewater Treatment Methods. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 7(2), 207-215.

*ID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-9941>

***Sorumlu yazar:**

Ceyhun AKARSU
İstanbul Üniversitesi
Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Çevre
Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
✉: ceyhunakarsu@iuc.edu.tr

Öz: Son on yılda, yüzey sularında tespit edilen, mikroplastik olarak da bilinen, mikro boyutlu plastik çöplere yönelik farkındalık artmıştır. Antropojenik kaynaklı bu kirleticiler, kanalizasyon aracılığıyla atıksu arıtma tesislerine taşınmakta devamında ise arıtılmış suların deşarj edildiği noktalardan alıcı ortam ile buluşmaktadır. Bu nedenle atıksu arıtma tesisleri, su ortamındaki mikroplastiklerin birincil kaynağı olarak görülmekte ve mevcut tesislerdeki proseslerin arıtma verimlerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Ancak mikroplastikler günümüz koşullarında tesis tasarım kriterlerinden biri olmadığı için giderim verimleri istenilen seviyelerde olmamakta dolayısıyla alternatif arıtma metotların belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, literatürde ileri atıksu arıtma metotları ile mikroplastik giderim verimliliğinin belirlenmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu derlemede de oldukça yeni olan bu çalışmalarda kullanılan arıtma teknolojileri giderim verimleri üzerinden kıyaslanmış ve giderim mekanizmaları hakkında detaylar verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrokimyasal arıtım, ileri atıksu arıtma teknolojileri, membran filtrasyon, mikroplastik

Evaluation of Microplastic Removal Efficiency Via Advanced Wastewater Treatment Methods

Abstract: Over the past decade, there has been increased awareness of micro-size plastic litter found in the surface water. Microplastics, an anthropogenic pollutant, pass to wastewater treatment plants through sewage and then meet with the receiving environment. For this reason, wastewater treatment plants are seen as the primary source of microplastics in the aquatic environment and studies are carried out to determine the treatment efficiency of processes in existing plants. However, since it is not one of the microplastic facility design criteria, the removal efficiencies are not at the desired levels, so it is necessary to determine alternative treatment methods. In this context, studies are carried out on the determination of microplastic removal efficiency with advanced wastewater treatment methods in the literature. In this review, the treatment technologies used in these studies, which are quite new, are compared on their removal efficiencies and details about the removal mechanisms are given..

***Corresponding author:**

Ceyhun AKARSU
Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of
Engineering, Department of Environmental
Engineering, Istanbul, Türkiye
✉: ceyhunakarsu@iuc.edu.tr

Keywords: Advanced wastewater treatment technologies, electrochemical treatment, membrane filtration, microplastic.

GİRİŞ

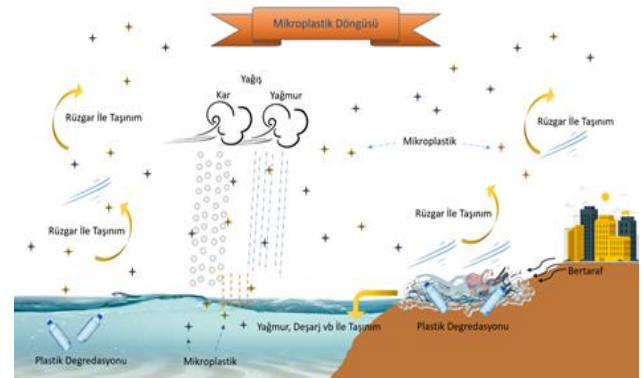
Küresel plastik üretimi yılda yaklaşık 350 milyon ton'dur (PA, 2018). Ancak plastik atıkların yönetimi istenilen seviyede değildir. Ambalaj atıklarında geri kazanım oranları %40'ı bulsa da ortalama geri kazanım oranı %10'u geçmemektedir (EU, 2019; NG, 2021). Dolayısıyla doğru yönetilemeyen plastik atıklar alıcı ortamlarla buluşmaktadır. Plastiklerin okyanuslarda, denizlerde ve diğer su sistemlerinde, karasal topraklarda ve hatta havada bulunduğu tespit edilmiştir (Barnes vd., 2009; Shim ve Thompson, 2015; Gasperi vd., 2018). Özellikle son yıllarda mikroplastik (MP) adı verilen 5 mm'den küçük plastik parçalarının kirlilik seviyeleri oldukça artmıştır (Vuori & Ollikainen, 2022). Yapılan hesaplamalara göre su ortamındaki plastik miktarı milyonlarca tonu geçmektedir (Lebreton vd., 2018).

Mikroplastik kirliliğinin en kritik sonuçlarından biri, ekosisteme dahil olduktan sonra tekrar ortamdan uzaklaştırmanın oldukça zor olmasıdır (Barnes vd., 2009). Mikroplastiklere alıcı ortamlarda, birincil ve ikincil mikroplastikler şeklinde rastlanılmaktadır (Talvitie vd., 2017). Daha çok kişisel bakım ürünlerinde (şampuan, duş jelleri, yüz temizleme jelleri vb.) ve çeşitli sentetik tekstil ürünlerinde kullanılan mikro boyutlardaki plastikler, birincil mikroplastik olarak ifade edilmektedir (Akdogan & Guven, 2019; Liu vd., 2021). Doğada ultraviyole radyasyon, mekanik stres ve biyolojik bozunma gibi çeşitli faktörlerin etkisiyle parçalanma ve ayrışma sonucunda ise, ikincil mikroplastikler oluşmaktadır (Lu vd., 2018; Guo vd., 2020; Liu & Wang, 2020). Mikroplastiklerin bu şekilde sınıflandırılması kaynağının belirlenmesi ve çözüm önerisinin sunulmasına katkı sağlamaktadır (Talvitie vd., 2017). Degradasyona uğrayan ikincil mikroplastikler o kadar ufak olabilmektedirler ki buharlaşma sürecinde havaya karışabilmektedir (Blackburn & Green, 2021). Mikroplastiklerin alıcı ortamlardaki döngüsü Şekil 1'de ifade edilmiştir.

Dünya genelinde modern bir atık yönetim planlaması olmaması nedeniyle mikroplastikler Antartika (Ross vd., 2021), Yağmur Ormanları (Álvarez-Lopezello vd., 2021) ve Everest (Napper vd., 2020) dahil olmak üzere dünyanın herhangi bir noktasına bulunabilmektedir. Her bir örnekleme noktasındaki mikroplastiklerin kaynağı farklılık gösteriyor olsa da genel olarak mikroplastiklerin en önemli kaynağının atıksu arıtma tesisleri olduğu görülmektedir (Akarsu vd., 2020).

Birçok çalışma, atıksuların arıtılması sırasında mikroplastiklerin yüzdesel ifadelerde yüksek olarak değerlendirilebilecek bir verimde giderilebileceğini göstermiştir (Lares vd., 2018; Hidayaturrahman & Lee, 2019; Yang vd., 2021). Yapılan bir araştırmaya göre, MP'lerin konsantrasyonu ham atık su içinde 10.044 MP.L-

¹ iken, atık su arıtmasından sonra 450 MP.L-1'nin altına düşmüştür (Sun vd., 2019). Yine başka bir çalışmada atık su arıtma tesislerinin giriş sularındaki mikroplastik konsantrasyonlarının 10^3 ila 10^8 MP.m⁻³ değerleri arasında değişebildiği ispatlanmıştır (Carr vd., 2016; Murphy vd., 2016; Hidayaturrahman ve Lee, 2019). Atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik giderim verimleri %40 gibi düşük seviyelerde olabileceği gibi %99 gibi oldukça yüksek MP giderim verimine sahip olduğu bildirilmiştir (Magnusson vd., 2014; Leslie vd., 2017). Giderim oranlarındaki bu fark, atıksu kalitesi, MP'lerin boyutu ve yapısal özellikleri, kullanılan arıtma prosesleri gibi birçok değişkenden etkilendiği bilinmektedir.



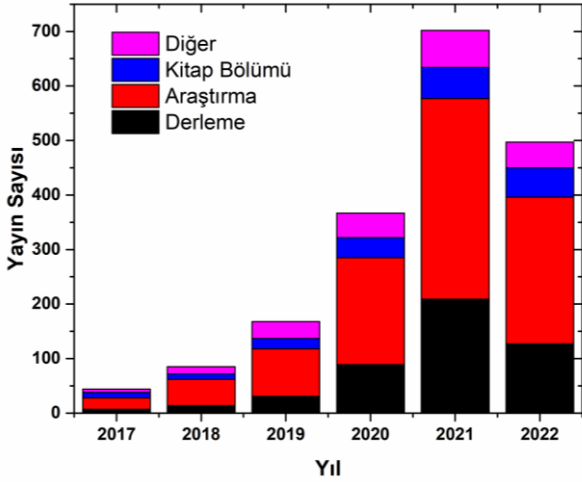
Şekil 1. Alıcı ortamdaki mikroplastik döngüsü.

Figure 1. Microplastic cycle in the environment.

Literatür araştırmalarında, bu değişkenlerin etkisini en aza indirecek alternatif atıksu arıtma prosesinin belirlenmesine yönelik çalışmalara öncelik verilmiştir. Bu derleme çalışmasında da son yıllardaki atıksu arıtma tesislerinde mikroplastiklerin gideriminde kullanılabilecek alternatif arıtma prosesinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar üzerine genel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda daha önce birçok kirleticinin gideriminde kullanılan hem konvansiyonel hem de ileri atıksu arıtma prosesleri ile mikroplastik giderim verimleri incelenmiş, dünya genelinde 21 ülkede 67 farklı arıtma teknolojileri giderim mekanizmaları üzerinden değerlendirilmiştir. Tartışma aşamasında mikroplastik giderim veriminde belirleyici faktörler olan şekil, polimer yapısı ve boyut özelinde uzaklaştırma verim ve mekanizmaları kıyaslanmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen yayınlar, Scencedirect veritabanındaki "mikroplastik", "atıksu arıtma", "giderim" kelimelerinin İngilizce karşılıkları kullanılarak gerçekleştirilen tarama sonucunda tespit edilmiştir. Arama Mart 2022'ye kadar mevcut olan yayınları içermektedir. Şekil 2.'de verildiği üzere mikroplastik giderim metodlarının belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda her yıl bir artış gözlenmiştir. Bununla birlikte tespit edilen her çalışma bu çalışmanın

amacına uygun olmadığı için her bir yayın, başlık, özet ve içeriği göz önünde bulundurularak detaylı şekilde incelenmiştir.



Şekil 2. Mikroplastik giderim çalışmalarının yıllara göre dağılım grafiği.

Figure 2. Distribution of microplastic removal studies .

Atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik bolluğu ve arıtım basamaklarının mikroplastik giderim verimlerine etkisi: Arıtma tesisi giriş suyundaki mikroplastik bolluğundaki farklılıklar, hizmet verilen nüfus, nüfusun ekonomik durumu ve yaşam tarzı, tesis tipi (evsel veya kentsel) gibi karmaşık faktörlerden kaynaklanmaktadır (Okoffo vd., 2019). Mason vd. (2016) gerçekleştirdiği çalışma ile atıksudaki mikroplastik konsantrasyonunun doğrudan nüfus ile orantılı olduğunu doğrulamıştır. Evsel atıksularda mikroplastik konsantrasyonu $0,28 \text{ MP.L}^{-1}$ ile $6,10 \times 10^2 \text{ MP.L}^{-1}$ arasında değişmekte iken bu sayı endüstriyel atıksu da kabul eden kentsel atıksu arıtma tesislerinde giriş suyu için $1,60 \text{ MP.L}^{-1}$ ile $3,14 \times 10^4 \text{ MP.L}^{-1}$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir (Liu vd., 2021).

Bununla birlikte literatürdeki diğer çalışmaların birbiri ile karşılaştırılarak genel değerlendirilmesi arzu edilen doğruluk ve hassasiyette yapılamamaktadır. Örnekleme ve tespit yöntemlerinde uygulama farklılıkları, çalışmaların kısa örnekleme sürecinde sınırlı atıksu numune hacimlerinde gerçekleştiriliyor olması gibi nedenlerden dolayı mikroplastik bolluğunu etkileyecek metodoloji farklılıklarına literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır (Okoffo vd., 2019). Benzer bir şekilde meteorolojik koşullar da belirleyici faktör olarak belirlenmiş, Almanya’da gerçekleştirilen bir çalışmada yağışlı günlerde mikroplastik konsantrasyonu 5900 MP.m^{-3} bulunmuşken yağışsız havada bu sayısının 3000 MP.m^{-3} ’e düştüğü tespit edilmiştir (Wolff vd., 2018). Bu sorunlardan dolayı atıksu arıtma tesislerinde mikroplastiklerin akıbetini araştırma ve proses kıyaslama çalışmalarında çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Ancak, her çalışmada atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış noktalarından

örnek alma ve analiz basamakları tutarlılık gösterdiği için giderim verimleri üzerinden kıyaslama yapılması mümkün olmaktadır.

Bu kapsamda Tablo 1.’de atıksu arıtma tesisi giderim verimi tespit çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmaların tamamında arıtma tesislerinin giriş sularından alınan örneklerde mikroplastik varlığı raporlanmıştır. Konvansiyonel arıtma tesislerinin, mikroplastikleri etkili bir şekilde giderebildiği görülsede, tesislerin yüksek debi işletiyor olmasından dolayı günlük mikroplastik deşarjları da yüksek çıkmaktadır. Lee & Kim, (2018)’in Kore’de gerçekleştirdiği çalışmada her bir tesisin yılda dört milyardan fazla mikroplastik deşarj ettiği iddia edilmiştir. Benzer bir şekilde Amerika’da atıksu arıtma deşarj sularının günde 500 milyon ile 1 milyar adet mikroplastikğin alıcı ortama verildiği hesaplanmıştır (Conley vd., 2019).

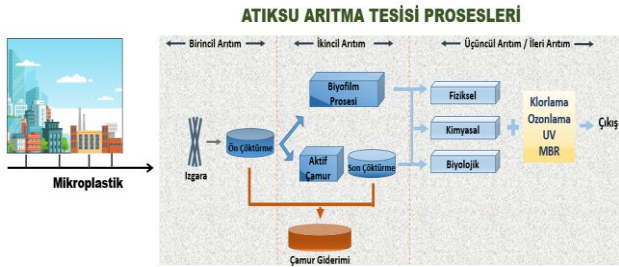
Bununla birlikte uygulanan arıtım basamaklarında deşarj sularındaki mikroplastik konsantrasyonuna doğrudan etkisi bulunmaktadır. Örneğin, Birincil ve ikincil arıtım uygulayan atıksu arıtma tesisi çıkış sularındaki mikroplastik konsantrasyonu 9×10^{-4} ile 447 MP.L^{-1} aralığında iken üçüncül arıtım yapan tesislerde bu sayı 0 ile 51 MP.L^{-1} aralığında değişmektedir (Wagner vd., 2018). Dolayısıyla arıtım basamaklarını ifade eden prosesler ve bunların mikroplastik giderim verimlerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar önem arz etmektedir.

Birincil Arıtım: Atıksu arıtma tesislerinde birincil arıtım basamağında çoğunlukla ızgaralar, kum tutucular ve ön çöktürme tanklarından bir veya birkaçı kullanılmaktadır. Aslında bu üç prosesin aynı anda kullanıldığı takdirde atıksuda ihtiva eden mikroplastikleri %98’e ulaşan oranlarda giderilebildiği ispatlanmıştır (Talvitie vd., 2017; Yang vd., 2021). Bununla birlikte partikül şekil, boyut ve yoğunluğu giderim verimini belirleyici faktör görevindedir. Örneğin ipliksi bir şekle sahip mikroplastik parçası ızgaraların arasından kolaylıkla geçebilmektedir. Yine kum tutucular genellikle partikül yoğunluğu $1,5 \text{ g.ml}^{-1}$ ’e kadar olan partiküllerin gideriminde yüksek verim göstermektedir. Ancak bazı mikroplastiklerin yoğunluğu $2,3 \text{ g.ml}^{-1}$ ’e varan değerlere çıkmaktadır. Dolayısıyla PTFE gibi mikroplastiklerin giderimi mümkün olmayabilmektedir. Ön çöktürme tanklarında ise yine yoğunluk faktörü devreye girmektedir. Bilindiği üzere bu tanklarda yoğunluğu $1,1 \text{ g.ml}^{-1}$ ’den küçük ve $1,5 \text{ g.ml}^{-1}$ ’den büyük partiküllerin uzaklaştırılması gerçekleştirilmektedir. Ancak birçok mikroplastikğin yoğunluğu bu aralıktadır. Dolayısıyla atıksu arıtma tesislerinde en sık rastlanılan polipropilen ve polietilen gibi mikroplastiklerin ön çöktürme tankında giderilmesi çoğunlukla mümkün olmamaktadır.

İkincil Arıtım: Günümüz arıtım süreçlerinde ikincil arıtımda kirleticilerin mikroorganizmalar aracılığıyla parçalanması sonucu giderimi sağlanmaktadır.

Bilindiği üzere plastiklerin kısa süre içerisinde biyodegradasyonu mümkün olmamakta, bu nedenle atıksu arıtma tesislerinden ancak mikororganizmaların hücre dışı salgısı ile tutulabilmektedir. Dolayısıyla ikincil arıtım sürecinde mikroplastik giderimi birincil arıtıma kıyasla oldukça düşük kalmakta, verim %2 ile %55 oranlarında değişmektedir (Carr vd., 2016; Lv vd., 2019).

Üçüncül Arıtım: Her arıtma tesisinde yer almasa da üçüncül arıtım, ikincil arıtmadan çıkan atıksulardan organik ve inorganik maddeler ile birlikte azot ve fosforun daha fazla uzaklaştırılması amacıyla işletilmektedir. Üçüncül arıtım prosesinde genellikle koagülasyon-flokülasyon, membran filtrasyonu veya denitrifikasyon-nitrifikasyon proseslerinden biri kullanılmaktadır. Üçüncül arıtım sürecinde ileri arıtım teknolojilerinden biri kullanılmadığı sürece giderim verimleri %5 ile %20 arasında değiştiği bilinmektedir (Talvitie vd., 2017; Magni vd., 2019). Tüm bu üç arıtım sürecine dâhil olan atıksudan mikroplastik % 82 ile %99 oranında giderilebilmektedir. Son 5 yıl içerisinde yapılan, farklı arıtma aşamalarında mikroplastik giderim verimliliği araştırmaları Tablo 1’de verilmiştir. Arıtma aşamaları göz önünde bulundurularak konvansiyonel atıksu arıtma tesisine ait akış diyagramı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Arıtma tesisi akış diyagramı.

Figure 3. Treatment plant flow diagram.

Yukarıdaki etmenlerden farklı olarak arıtım aşamalarından çıkan suyun içerdiği polimer yapıların da değiştiği tespit edilmiştir. Magni vd., (2019) ön çöktürme tankı çıkışında atıksuyun mikroplastik içeriğinin değiştiğini raporlamıştır. Çıkış suyunda kopolimer yüzdesinde azalmış olsa da polyster, polipropilen ve poliamidlerin konsantrasyonlarında sırasıyla %23, 11 ve 11 oranında artış gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise polivinilklorür, epoksi reçine ve polioksümetilen gibi bazı mikroplastiklerin yalnızca atıksu çıkış noktasında tespit edilebildiği raporlanmıştır (Talvitie vd., 2015). Polimer yüzdesindeki bu artış başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Gündoğdu vd., (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada arıtma tesisi giriş suyunda polyster yüzdesi %50,8 iken çıkış suyundaki polyster konsantrasyonu %68,8’e yükseldiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Vollertsen & Hansen, (2017) çalışmalarında arıtma çamurunda tespit edilen poliamid,

polietilen ve polipropilen türevlerinin atıksularda tespit edilemediğini bildirmiştir.

Mikroplastik boyutu ve arıtma basamakları giderim verimi açısından değerlendirildiğinde ise ön arıtmanın giderim veriminin özellikle 300 µm’den büyük boyuttaki mikroplastiklerin gideriminde etkili olduğu raporlanmıştır (Talvitie vd., 2017). Vogelsang vd., (2018) ise yeterli alıkonma süresi sağlanıldığı takdirde çöktürme tanklarının fiber ve boyutları 20-100 µm arasında değişen diğer mikroplastiklerin gideriminde oldukça etkili bir proses olacağını bildirmiştir. Bunu destekler nitelikte yapılan çalışmalarda atıksu içerisindeki mikroplastiklerin çamura kıyasla daha küçük boyutta olduğu belirlenmiştir (Murphy vd., 2016). Bunun nedeni ise daha küçük partiküllerin sıvı içerisinde askıda kalırken, daha büyük boyuttakilerin çökeltme sonrası çamura geçiyor olmasıdır. Mikroplastik boyutuna bağlı ileri arıtım prosesleri incelendiğinde ise avantajları olduğu kadar bazı dezavantajları olduğu da raporlanmıştır. Lv vd., (2019) gerçekleştirmiş olduğu çalışmada mekanik süreçler sırasında büyük boyuttaki plastiklerin daha küçük boyutlara parçalandığını raporlamıştır. Benzer şekilde UV ile dezenfeksiyon sürecinde de plastiklerin degradasyon olması nedeniyle mikroplastik konsantrasyonunda artış olduğu belirlenmiştir. İlginç olan ise bu sonuçlar konvansiyonel arıtım proseslerinde tam tersi yönde belirlenmiş olmasıdır. Yapılan birçok çalışmada çıkış suyundaki mikroplastik boyut ortalamasının giriş suyuna kıyasla daha büyük olduğu belirtilmiştir (Estahbanati & Fahrenfeld, 2016; Akarsu vd., 2020). Bu durum konvansiyonel arıtım proseslerinin küçük boyuttaki mikroplastikleri tutma veriminin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Long vd., (2019) gerçekleştirdiği çalışmada boyutları 43-125 µm aralığında değişen mikroplastiklerin %95,3 oranında giderildiği, bu oranın daha büyük boyuttaki mikroplastikler için maksimum %80 olduğu belirlenmiştir. Lee & Kim, (2018) ise 106 – 300 µm boyut aralığında mikroplastiklerin flok ve biyofilm oluşumuna bağlı olarak daha büyük boyuttaki mikroplastiklere kıyasla daha yüksek oranda giderildiği belirtmiştir.

İleri atıksu arıtma metotları ile mikroplastik giderimi: Dünya genelinde entegre atıksu deşarj standartlarında yaşanan güncellemeler nedeniyle atıksu arıtma tesisleri için alternatif oluşturacak prosesler üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu proseslerin başında da membran biyo-reaktör (MBR) gelmektedir (Brepols vd., 2008). MBR sistemlerinde genellikle gözenek boyutu 0,1-50 µm aralığında değişen mikrofiltrasyon (MF) veya 0,001–0,1 µm arasında değişen ultrafiltrasyon (UF) membranlar kullanılmaktadır (Zhang vd., 2020).

Tablo 1. Farklı arıtma proseslerinin mikroplastik giderim verimi kıyaslamaları.
Table 1. Comparison of microplastic removal efficiency of different treatment processes.

Ülke	Giriş MPs/L	Çıkış MPs/L	Giderim Verimi	Debi ($\times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{gün}^{-1}$)	Arıtma Basamağı	Kaynak
Almanya	-	5,9	-	0,1	İkincil	Wolff vd., 2019
Almanya	-	2,14	-	$6,3 \times 10^4$	Üçüncül	Wolff vd., 2021
Amerika	-	0,023	-	2,16	İkincil	Dyachenko vd., 2017
Avustralya	0,76	$2,8 \times 10^{-1}$ - 1,54	66-90	4600	Üçüncül	Ziajahromi vd., 2017
Avustralya	11,8	2,76	76,6	$4,8 \times 10^4$	İkincil	Raju vd., 2020
Çin	6,55	0,59	91	1,2	İkincil	Long vd., 2018
Çin	79,9	28,4	64,4	0,2	İkincil/Üçüncül	Lv vd., 2019
Danimarka	7827	120,3	98,5	7670	İkincil	Simon vd., 2018
Finlandiya	6,9	5×10^{-3} - 3×10^{-1}	40-99,9	-	Üçüncül	Talvitie vd., 2017
Fransa	244	2,84	98,8	0,8	Üçüncül	Kazour vd., 2019
Güney Kore	5840	66	99	0,21	Üçüncül	Hidayaturrahm & Lee, 2019
Hollanda	5-220	20-225	72	432	Üçüncül	Leslie vd., 2017
Hong Kong	-	0,27-0,4	60,4-86,9	0,83-18,31	İkincil	Ruan vd., 2019
Hong Kong	10,36	-	-	$9,3 \times 10^4$	İkincil	Cao vd., 2020
İngiltere	7011	15,7	99,8	$3,1 \times 10^4$	İkincil	Horton vd., 2021
Iran	12,67	0,42	-	0,22	İkincil	Alavian Petroody vd., 2020
Iran	9,2	0,58	93,7	$2,9 \times 10^4$	İkincil	Takdastan vd., 2021
İspanya	-	0,44	-	0,4	İkincil	Alvim vd., 2020
İspanya	-	12,8	-	$4,5 \times 10^4$	İkincil	Edo vd., 2020
İsrail	64,78	1,97	97	3×10^4	Üçüncül	Ben-David vd., 2021
İsviçre	533	4	99,2	$3,7 \times 10^5$	Üçüncül	Rasmussen vd., 2021
İtalya	2,5	0,4	-	4,0	Üçüncül	Magni vd., 2019
İtalya	1,8	0,2	88,9	$1,8 \times 10^4$	İkincil	Pittura vd., 2021
Kanada	31,1	5×10^{-1}	99	5,49	İkincil	Gies vd., 2018
Kanada	-	1,76	-	8×10^7	İkincil	Prajapati vd., 2021
Polonya	195,78	0,34	99,8	0,15	-	Wiśniowska vd., 2018
Slovenya	-	21,7	-	-	İkincil	Kalcikova vd., 2017
Tayland	12,2	2	83,6	$1,3 \times 10^5$	İkincil	Hongprasith vd., 2020
Türkiye	3,1	1,6	48	1,5	Üçüncül	Akarsu vd., 2020
Türkiye	2,6	0,7	73	0,12	İkincil	Akarsu vd., 2020

Baresel vd., (2019) gerçekleştirdiği çalışmada UF ile mikroplastik giderimi %100 olarak belirlemiştir. Talvitie vd., (2017) gerçekleştirdiği çalışmada da birincil arıtmadan çıkan sudaki mikroplastiklerin MBR prosesi ile %99,9 oranında giderildiğini bildirmiştir. Aynı çalışmada MBR'nin işletilmediği yerine aktif çamur prosesi sonrasında hızlı kum filtresi veya disk filtre kullanıldığı şartlarda giderim oranının maksimum %98,5 olduğu tespit edilmiştir. Yine benzer bir proses kıyaslaması da Lares vd., (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Giriş atıksuyunda mikroplastik konsantrasyonunun MBR prosesi ile $57600 \text{ MP} \cdot \text{m}^{-3}$ 'ten $400 \text{ MP} \cdot \text{m}^{-3}$ 'e düşürüldüğü klasik aktif çamur prosenin ise ancak $1000 \text{ MP} \cdot \text{m}^{-3}$ 'e düşürülebildiği raporlanmıştır. Tabii bu araştırmacılar için yeni bir endişenin kaynağı olmuştur. Çünkü MBR'lar daha büyük boyuttaki partikülleri tutarken çok daha küçük boyuttaki partiküllerin deşarjını direkt alıcı ortama mümkün kılmaktadır (Ogonowski vd., 2018).

Mikroplastik tutma verimi araştırılan diğer bir proses ise elektrokoagülasyon (EC)'dir. EC, konvansiyonel koagülasyon ve aktif çamur prosesinde kullanılan kimyasallara veya mikroorganizmalara dayanmayan basit bir atık su arıtma prosesi olarak tanımlanabilmektedir (Shen vd., 2018). Birçok kirleticinin atıksudan giderilmesi sürecinde başarıyla uygulanmıştır (Chou vd., 2010; Weisbart vd., 2020). Proses sürecinde aynı anda hem çöktürme hem de yüzdürme ile kirletici giderimi mümkün olduğu için mikroplastik gideriminde de oldukça başarılı sonuçlar tespit edilmiştir. Bu bağlamda

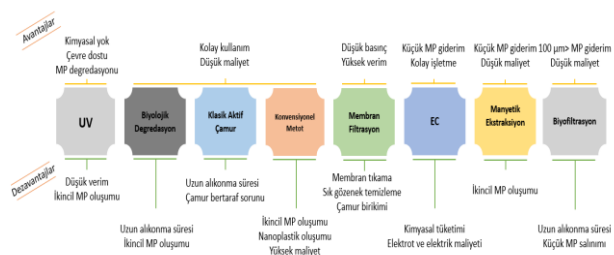
gerçekleştirilen çalışmalarda; Perren vd., (2018) mikroplastik gideriminin %99,24'e ulaştığını bildirmiştir. Shen vd., (2022) tarafından yapılan çalışmada polipropilen için %99,9 giderim verimi raporlanmıştır. Benzer bir çalışma, elektrokoagülasyon ve membran filtrasyon proseslerin entegre edilerek mikroplastik giderim veriminin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilmiş ve %100 giderim verimi elde edilmiştir (Akarsu vd., 2021).

Araştırmalar özellikle küçük boyuttaki mikroplastiklerin atıksudan uzaklaştırılmasında manyetik ekstraksiyonun umut verici olduğu ifade etmektedir. Demir bazlı nanopartiküllerin kullanıldığı süreçte mikroplastikleri ortamdan uzaklaştırmak için manyetik çekim kuvvetinden yararlanılmaktadır. Hidrofobik nanopartikül üzerinde plastiklerin bağ oluşturabileceği bir moleküler yapı oluşturulmakta ve manyetik çekim kuvveti ile nanopartikül ile birlikte ortamdan uzaklaştırılmaktadır. İlk sonuçlar 10-20 μm boyut aralığındaki mikroplastiklerin %92'sinin giderildiğini göstermektedir (Dey vd., 2021). Bu proses özellikle küçük boyutta mikroplastik içeren atıksular için umut vaat edici sonuçlar sunmaktadır.

Mikroplastiklerin sucul ekosistemlerdeki bolluğu üzerine yapılan tespitlerden sonra, biyolojik olarak degradasyonu üzerine daha spesifik çalışmaları beraberinde getirmiştir. Çalışmalardan ilki Russell vd., (2011) tarafından gerçekleştirilmiş ve Portekiz kıyılarında oldukça yaygın olan *Zalerion maritimum* ortamdan soyutlanarak laboratuvar ortamında mikroplastik

degradasyon verimi araştırılmıştır. Ön sonuçlar mikroplastiklerin %43'ünü giderebildiği yönündedir. Benzer şekilde çalışmalar mikroalg ve bakteriler için de denemiş olsa da denemeler mikro ölçekte kalmıştır (Gong vd., 2018; Moog vd., 2019). Bununla birlikte, var olan proseslerin modifikasyonu da diğer bir alternatif oluşturmaktadır. Bu amaçla Liu vd. (2020) ikincil arıtım sürecinde diğer kirleticiler ile birlikte mikroplastik gideriminin de sağlanması amacıyla özel bir biofiltre geliştirmişlerdir. Altı farklı katmandan oluşan bu yeni biofiltre standartlarına göre %79 daha fazla mikroplastik giderebildiği tespit edilmiştir.

Tüm bu detaylar ile birlikte mikroplastik giderim teknolojileri henüz gelişme aşamasındadır ve ticari ölçekte oluşturulmuş güvenilir bir arıtım metodu henüz geliştirilmemiştir. Günümüz şartlarında mevcut konvansiyonel metotlar yüksek olarak değerlendirilebilecek giderim verimlerine rağmen çok miktarda MP çıkış suları ile birlikte alıcı ortama verilmektedir. Bununla birlikte konvansiyonel proseslerin sebep olabileceği ikincil mikroplastik kaynakları hakkında henüz yeterince bilgi birikimi oluşmamıştır. Yukarıda belirtilen metotlardan biyolojik olarak degradasyon gerçek ölçekli uygulanabilmesi için oldukça yavaştır dolayısıyla mikroplastiklerin kimyasal olarak degradasyonu üzerine çalışmalarda artış olması gerekmektedir. Ayrıca manyetik ekstraksiyon ve koagülasyon gibi kimyasal süreçler umut verici sonuçlar sunuyor olsa da kullanımları oldukça sınırlı olabilmektedir. Dolayısıyla hibrit arıtma teknolojileri şeklinde kullanılmalarına ihtiyaç vardır. Bunun için en öne çıkan metot membran filtrasyon olsa da bu proses kendi içerisinde yüzey yükü, membran malzemesi, transmembran basıncı gibi olumsuz etkenler nedeniyle daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. İleri atıksu arıtma prosesleri ile mikroplastik gideriminin değerlendirilmesi.

Figure 4. Evaluation of microplastic removal by advanced wastewater treatment processes.

Geleceğe yönelik ihtiyaçlar: Temel giderim mekanizmaları eski olsa da granüler aktif çamur prosesi atıksu arıtımında kullanımında artış göstermektedir. Granüler aktif çamur prosesi yüksek biyokütle ihtiva etmesinden dolayı organik gideriminde oldukça başarılıdır (Li vd., 2019). Bununla birlikte proses gideriminde hücre dışı polimerik madde temel rol oynamaktadır. Bu da

makalenin üst metninde tartışıldığı üzere mikroplastiklerin çamur içerisinde birikime uğraması ile giderimini mümkün kılmaktadır. Granüler aktif çamur prosesi ile mikroplastik giderimi üzerine herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiş olsa da, mikroplastik varlığının organik ve azot giderimi üzerine etkisi araştırılmış ve çamur yapısına zarar verdiği için giderim veriminin belirli oranda düştüğü belirlenmiştir (Qin vd., 2020; Zhao vd., 2020). Bazı çalışmalar spesifik mikroorganizma kullanımı nedeniyle ANAMMOX prosesi ile mikroplastik gideriminin önemine de vurgu yapmaktadır (Zhang vd., 2020). Bu yönde araştırmacıların daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte çalışmaların birbirleri ile kıyaslanabilmesi için mikroplastik örnekleme ve karakterizasyon süreçlerinin standardize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada güncel literatür araştırmalarına yer verilmiş olmakla birlikte, literatürdeki araştırmaların belirli boyutlar özelinde çalışmaları gerçekleştirdiği görüşmüş, 50 m'den küçük mikroplastiklerin mevcudiyetinin belirlenmesi üzerine daha çok çalışma yapılması gerektiği görülmektedir. Bu sayede daha küçük boyuttaki mikroplastiklerin diğer kirleticiler ile etkileşimleri üzerine de daha belirgin sonuçlara varılabilecektir. Mikroplastiklerin diğer kirleticiler ile olan etkileşimleri ve ekosistem sağlığı üzerine etkileri belirsizliğini korumaktadır. Hâlihazırda hem atıksu arıtma tesisi basamaklarında hem de çamurda bulunan mikroplastik bolluğu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş olsa da metotların standardizasyonu sonucu ortak bir sonuç elde edebilmek adına tekrardan gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulacaktır. Bu aynı zamanda süregelen kirliliğin takibine de imkân sağlayacaktır.

Arıtma tesisleri giriş, çıkış ve ara basamaklarındaki mikroplastik bolluğu üzerine araştırmalar devam etmekle birlikte proses sürecinde mikroplastiklerin parçalanarak ikincil mikroplastik oluşma potansiyeli üzerine araştırmalar oldukça azdır. Ayrıca proses içerisinde mikroplastik bolluğunun diğer kirleticilerin giderim verimine olan etkisi de belirsizliğini korumaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilecek çalışmalar sürecin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

SONUÇ

Yapılan çalışmalar atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik giderim verimini etkileyen birçok faktör olduğunu ortaya koymuştur. Bu faktörlere bağlı olarak bazı ülkelerin atıksu arıtma tesislerindeki arıtım prosesleri %99 verime ulaşıyor olsa da büyük bir çoğunluğu bu verimi yakalayamamaktadır. Dolayısıyla literatür araştırmalarında belirtildiği üzere her gün milyarlarca mikroplastik alıcı ortamlara deşarj edilmektedir.

Birincil arıtım sürecinde mikroplastığın büyük bir çoğunluğunun gideriliyor olsa da araştırmalar, verimin

kritik seviyelerde başarılı olmasını koagülasyon/flokülasyon, membran filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi üçüncül arıtım basamaklarının sağladığını raporlamaktadır. Proses iyileştirme veya yeni yapılan arıtma tesisi proseslerine dahil edilebilecek alternatif arıtma proseslerinin mikroplastik giderim veriminin belirlenmesi üzerine laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bir çoğunda %95 ile %100 aralığında giderim verimi tespit edilmiştir. Laboratuvar ölçekli sonuçlar membran prosesinin mikroplastik gideriminde oldukça başarılı olabileceğini gösteriyor olsa da gerçek ölçekli tesis verileri bu konuda bazı belirsizliklerin oluşmasına sebep olmaktadır (Akarsu vd., 2021). Bu nedenle çalışmaların pilot ölçekli gerçekleştirilmesi verilerin temsil edebilirliği açısından önem arz etmektedir.

Bununla birlikte bu proseslerde mikroplastikler fiziksel olarak tutulduğu için raporların birçoğunda aslında gerçekleştirilen çöktürme, yüzdürme, adsorpsiyon ve filtrasyon gibi süreçlerin kirleticinin sudan uzaklaştırılıp çamur içerisinde hapsedildiğini vurgulamaktadır. Mikroplastiklerin tek başına çamur çürütme üzerinde olumsuz etkisinin olmadığı belirlenmiş olsa da yapısında toksik bileşenler bulundurması nedeniyle bu çamurun yönetilmesi konusunda bazı sıkıntılar yaşanabileceği öngörülmekte ve bu konuda çalışmalar yapılmaya devam edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akarsu, C., Kumbur, H., Gökdag, K., Kideys, A.E. & Sanchez-Vidal, A. (2020).** Microplastics composition and load from three wastewater treatment plants discharging into Mersin Bay, north eastern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **150**, 110776.
- Akarsu, C., Kumbur, H. & Kideys, A.E. (2021).** Removal of microplastics from wastewater through electrocoagulation-electroflotation and membrane filtration processes. *Water Science and Technology*, **84**(7), 1648-1662.
- Akdogan, Z. & Guven, B. (2019).** Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental Pollution*, **254**, 113011.
- Alavian Petroody, S.S., Hashemi, S.H. & van Gestel, C.A.M. (2020).** Factors affecting microplastic retention and emission by a Wastewater treatment plant on the southern coast of Caspian Sea. *Chemosphere*, **261**, 128179.
- Álvarez-Lopezello, J., Robles, C. & del Castillo, R.F. (2021).** Microplastic pollution in neotropical rainforest, savanna, pine plantations, and pasture soils in lowland areas of Oaxaca, Mexico: Preliminary Results. *Ecological Indicators*, **121**.
- Baresel, C., Harding, M. & Fang, J. (2019).** Ultrafiltration/Granulated active carbon-biofilter: efficient removal of a broad range of micropollutant. *Applied Sciences*, **9**, 710.
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C. & Barlaz, M. (2009).** Küresel ortamlarda plastik döküntülerin birikmesi ve parçalanması. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **364**, (1526).
- Ben-David, E.A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D.L., Broth, A.M. & Sabbah, I. (2021).** Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science and the Total Environment*, **752**, 141880.
- Blackburn, K. & Green, D. (2021).** The potential effects of microplastics on human health: what is known and what is Unknown, *Ambio*.
- Brepols, C., Dorgeloh, E., Frechen, F.B., Fuchs, W., Haider, S., Joss, A., de Korte, K., Ruiken, C., Schier, W., van der Roest, H., Wett, M. & Wozniak, T. (2008).** Upgrading and retrofitting of municipal wastewater treatment plants by means of membrane bioreactor (MBR) technology. *Desalination*, **231** (1), 20-26.
- Carr, S.A., Liu, J. & Tesoro, A.G. (2016).** Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, **91**, 174-182.
- Chou, W., Wang, C., Chang, W. & Chang, S. (2010).** Adsorption treatment of oxide chemical mechanical polishing wastewater from a semiconductor manufacturing plant by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, **180**, 217-224.
- Dey, T.K., Uddin, M.E. & Jamal, M. (2021).** Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. *Environment Science Pollution Research*, **28**, 16925-16947.
- Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F. & Rosal, R. (2020).** Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge. *Environment Pollution*, **259**, 113837.
- EU. (2019).** <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211027-2>
- Gong, J., Kong, T., Li, Y., Li, Q., Li, Z. & Zhang, J. (2018).** Biodegradation of microplastic derived from poly (ethylene terephthalate) with bacterial whole-cell biocatalysts. *Polymers*, **10**(12), 1326.
- Hidayaturrahman, H. & Lee, T.G. (2019).** A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. *Marine Pollution Bulletin*, **146**, 696-702.
- Hongprasith, N., Kittimethawong, C., Lertluksanaporn, R., Eamchotchawalit, T., Kittipongvises, S. & Lohwacharin, J. (2020).** IR microspectroscopic identification of microplastics in municipal wastewater treatment plants. *Environ. Science and Pollution Research*, **27**, 18557-18564.

- Gasperi, J., Wright, S.L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F.J., Tassin, B. (2018).** Microplastics in air: are we breathing it in?. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, *1*, 1-5.
- Guo, J., Huang, X., Xiang, L., Wang, Y., Li, Y., Li, H., Cai, Q., Mo, C., & Wong, M., (2020).** Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, *137*, 105263.
- Gündoğdu, S., Çevik, C., Güzel, E. & Kilercioğlu, S. (2018).** Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(11), 626.
- Kazour, M., Terki, S., Rabhi, K., Jemaa, S., Khalaf, G. & Amara, R. (2019).** Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill. *Marine Pollution Bulletin*, *146*, 608-618.
- Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpää, M. & Sillanpää, M. (2018).** Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research*, *133*, 236-246.
- 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. (2018).** Evidence that the great pacific garbage patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, *8*(1), 4666.
- Lee, H. & Kim, Y. (2018).** Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea. *Marine Pollution Bulletin*, *137*, 1-8.
- Leslie, H.A., Brandsma, S.H., van Velzen, M.J.M. & Vethaak, A.D. (2017).** Microplastics en route: field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota. *Environment International*, *101*, 133-142.
- Li, D., Zhang, S., Li, S., Zeng, H. & Zhang, J. (2019).** Aerobic granular sludge operation and nutrients removal mechanism in a novel configuration reactor combined sequencing batch reactor and continuous-flow reactor. *Bioresource Technology*, *292*, 122024.
- Liu, X., & Wang, J. (2020).** Algae (*Raphidocelis subcapitata*) mitigate combined toxicity of microplastic and lead on *Ceriodaphnia dubia*. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *14*, 97.
- Liu, F., Nord, N.B., Bester, K. & Vollertsen, J. (2020).** Microplastics removal from treated wastewater by a biofilter. *Water*, *12*(4), 1085.
- Liu, Y., Shao, H., Liu, J., Cao, R., Shang, E., Liu, S. & Li, Y. 2021.** Transport and transformation of microplastics and nanoplastics in the soil environment: A critical review, *Soil use and management*, *37*(2), 224-242.
- Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., Lin, H., Chen, H. & Jin, X. (2019).** Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China. *Water Research*, *155*, 255-265.
- Lu, L., Wan, Z., Luo, T., Fu, Z. & Jin, Y., 2018.** Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice. *Science of the Total Environment*, *631*, 449-458.
- Lv, X., Dong, Q., Zuo, Z., Liu, Y., Huang, X. & Wu, W.M. (2019).** Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies. *Journal of Cleaner Production*, *225*, 579-586.
- Magni, S. Binelli, A. Pittura, L. Avio, C. G. Della Torre, C. Parenti, C. C. Gorbi S. & Regoli, F. (2019).** The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant. *Science of the Total Environment*, *652*, 602-610.
- Magnusson, K. & Norén, F. (2014).** Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant, Swedish Environmental Research Institute.
- Moog, D., Schmitt, J., Senger, J., Zarzycki, J., Rexer, K.H., Linne, U., Erb, T. & Maier, U.G. (2019).** Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microb Cell Factories* *18*(1), 171.
- Murphy, F., Ewins, C. & Carbonnier, F. (2016).** Wastewater Treatment Works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environment Science and Technology*, *50*(11), 5800-5808.
- NG, (2021).** <https://www.nationalgeographic.org/article/whopping-91-percent-plastic-isnt-recycled/>
- Okoffo, E.D., O'Brien, S., O'Brien, J.W., Tscharke, B.J. & Thomas, K.V. (2019).** Wastewater treatment plants as a source of plastics in the environment: a review of occurrence, methods for identification, quantification and fate. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *5*(11), 1908-1931.
- Ogonowski, M., Gerdes, Z. & Gorokhova, E. (2018).** What we know and what we think we know about microplastic effects – a critical perspective. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, *1*, 41-46.
- PA. (2018).** Avrupa plastik üretimi, talebi ve atık verilerinin analizi, <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2016.aspx>
- Perren, W. Wojtasik, A. & Cai, Q. (2018).** Removal of microbeads from wastewater using electrocoagulation. *ACS Omega*, *3*(3), 3357-3364.
- Pittura, L., Foglia, A., Akyol, Ç., Cipolletta, G., Benedetti, M., Regoli, F., Eusebi, A.L., Sabbatini, S., Tseng, L.Y., Katsou, E., Gorbi, S. & Fatone, F. (2021).** Microplastics in real wastewater treatment schemes: Comparative

- assessment and relevant inhibition effects on anaerobic processes. *Chemosphere*, **262**, 128415.
- Prajapati, S., Beal, M., Maley, J. & Brinkmann, M. (2021).** Qualitative and quantitative analysis of microplastics and microfiber contamination in effluents of the City of Saskatoon wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 32545–32553.
- Qin, R., Su, C., Liu, W., Tang, L., Li, X., Deng, X., Wang, A. & Chen, Z. (2020).** Effects of Exposure to Polyether Sulfone Microplastic on the Nitrifying Process and Microbial Community Structure in Aerobic Granular Sludge. *Bioresource Technology*, 122827.
- Raju, S., Carbery, M., Kuttykattil, A., Senthirajah, K., Lundmark, A., Rogers, Z., SCB, S., Evans, G. & Palanisami, T. (2020).** Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant. *Water Research*, **173**, 115549.
- Rasmussen, L.A., Iordachescu, L., Tumlin, S. & Vollertsen, J. (2021).** A complete mass balance for plastics in a wastewater treatment plant—Macroplastics contributes more than microplastics. *Water Research*, **201**, 117307.
- Ross, P.S., Chastain, S., Vassilenko, E. Etemadifar, A., Zimmermann, S., Quesnel, S.A., Eert, J., Solomon, E., Patankar, S., Posacka, A.M. & Williams, B. (2021).** Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs. *Nature Communications*, **12**, 106.
- Russell, J.R., Huang, J., Anand, P., Kucera, K., Sandoval, A.G., Dantzler, K.W., Hickman, D., Jee, J., Kimovec, F.M. & Koppstein, D. (2011).** Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, **77**(17), 6076–6084.
- Shen, M., Song, B., Zhu, Y., Zeng, G., Zhang, Y., Yang, Y., Wen, X., Chen, M. & Yi, H. (2020).** Removal of microplastics via drinking water treatment: current knowledge and future directions, *Chemosphere*, **251**, 126612.
- Shim, W. & Thompson, R. (2015).** Microplastics in the ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **69**(3), 265-268.
- Simon, M., van Last, N. & Vollertsen, J. (2018).** Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research*, **142**, 1–9.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C. & Ni, B.J. (2019).** Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research*, **152**, 21-37.
- Takdastan, A., Niari, M.H., Babei, A., Dobaradaran, S., Jorfi, S. & Ahmadi, M. (2021).** Occurrence and distribution of microplastic particles and the concentration of Di 2-ethyl hexyl phthalate (DEHP) in microplastics and wastewater in the wastewater treatment plant. *Journal of Environmental Management*, **280**, 111851.
- Talvitie, J. Mikola, A. Koistinen, A. & Setälä, O. (2017).** Solutions to microplastic pollution – removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment Technologies. *Water Research*, **123**, 401-407.
- Wagner, S. Hüffer, T. Klöckner, P. Wehrhahn, M. Hofmann, T. & Reemtsma, T. (2018).** Tire wear particles in the aquatic environment-a review on generation, analysis, occurrence, fate and effects, *Water Research*, **139**, 83-100.
- Weisbart, C., Raghavan, S., Muralidharan, K. & Potter B.G. (2020).** Feasibility of removal of graphene oxide particles from aqueous suspensions by DC/AC electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, **36**, 101249.
- Wisniewska, E., Moraczewska-Majkut, K. & Noco'n, W. (2018).** Efficiency of microplastics removal in selected wastewater treatment plants—Preliminary studies. *Desalination and Water Treatment*, **134**, 316–323
- Wolff, S., Kerpen, J., Prediger, J., Barkmann, L. & Müller, L. (2019).** Determination of the microplastics emission in the effluent of a municipal waste water treatment plant using Raman microspectroscopy. *Water Research X*, **2**, 100014.
- Wolff, S., Weber, F., Kerpen, J., Winklhofer, M., Engelhart, M. & Barkmann, L. (2021).** Elimination of microplastics by downstream sand filters in wastewater treatment. *Water*, **13**, 33.
- Vogelsang, C., Lusher, A.L., Dadkhah, M.E., Sundvor, I., Umar, M., Ranneklev, S.B., Eidsvoll, D. & Meland, S. (2018).** Microplastics in Road Dust—Characteristics, Pathways and Measures.
- Vollertsen, J., & Hansen, A. A. (2017).** Microplastic in Danish wastewater: Sources, occurrences and fate. The Danish Environmental Protection Agency. Environmental Project, 1906.
- Vuori, L. & Ollikainen, M. (2022).** How to remove microplastics in wastewater? A cost-effectiveness analysis, *Ecological Economics*, **192**, 107246.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z. & Wu, C. (2021).** Microplastics in freshwater sediment: a review on methods, occurrence, and sources. *Science of the Total Environment*, **754**, 141948.
- Zhang, X., Chen, J. & Li, J. (2020).** The removal of microplastics in the wastewater treatment process and their potential impact on anaerobic digestion due to pollutants association, *Chemosphere*, **251**, 126360.
- Zhao, L., Su, C., Liu, W., Qin, R., Tang, L., Deng, X., Wu, S. & Chen, M. (2020).** Exposure to polyamide 66 microplastic leads to effects performance and microbial community structure of aerobic granular sludge, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **190**, 110070.
- Ziajahromi, S. Neale, P. Rintoul, L. & Leusch, F. (2017).** Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics, *Water Research*, **112**, 93-99.