



## Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Etkileri ve Arıtma Yöntemleri

Berk Köker<sup>1\*</sup>, Meltem Sarioğlu Cebeci<sup>1</sup>, Zinnur Yılmaz<sup>1</sup>, Sefa Furkan Selçuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

E-Posta: [berkkoker@cumhuriyet.edu.tr](mailto:berkkoker@cumhuriyet.edu.tr), [sarioglu@cumhuriyet.edu.tr](mailto:sarioglu@cumhuriyet.edu.tr), [zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr](mailto:zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr), [sefafurkan.selcuk@gmail.com](mailto:sefafurkan.selcuk@gmail.com)

**Gönderim 27.07.2022; Kabul 05.09.2022**

**Özet:** Mikroplastikler günlük hayatta sıklıkla kullandığımız ve çevreye yayılması kaçınılmaz olan kimyasallardır. Genel olarak 5 milimetreden küçük plastik parçaları mikroplastik olarak tanımlanır. Günümüzde mikroplastik kirliliği kaynaklarının çok fazla olması, kalıcı oluşu ve hem ekosistem hem de insan sağlığına toksik etkileri nedeniyle giderek daha fazla ilgili çekmektedir. Günlük hayat sırasında ve endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan mikroplastikler kolaylıkla atıksu arıtma tesislerine ulaşabilmektedir. Mikroplastikler, atıksu arıtma tesislerinin verimliliğini azaltır ve çamur hacmini artırır. Mikrobiyal aktiviteyi olumsuz yönde etkileyebilir. Bu derleme mikroplastiklerin kentsel atıksu arıtma tesislerine etkileri, arıtma yöntemleri ve ileri arıtım yöntemleri ile giderilebilirliğini değerlendirmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikroplastikler, Atıksu arıtımı

## Effects And Treatment Methods of Microplastics in Wastewater Treatment Plants

**Received 27.07.2022; Accepted 05.09.2022**

**Abstract:** Microplastics are chemicals that we use frequently in daily life and that are inevitable to spread to the environment. In general, plastic parts smaller than 5 millimeters are defined as microplastics and the toxic effects of microplastics are attracting more and more attention today. Microplastics, which are produced during daily life and because of industrial activities, can easily reach wastewater treatment plants. Microplastics reduce the efficiency of wastewater and sludge treatment processes and increase sludge volume. It can negatively affect microbial activity. In this review, the effects of microplastics on wastewater treatment plants, treatment methods and removal of microplastics with advanced treatment methods.

**Key Words:** Microplastics, Wastewater treatment

## GİRİŞ

Plastikler, günlük hayatımızda sıklıkla kullandığımız sentetik ve yarı-sentetik kimyasallardır. Hafif olmaları, şekil verilmesinin ve işlemenin kolaylığı, kimyasal korozyona dayanıklı olmaları, ısı ve elektrik akımlarına dayanıklı olmaları ve üretiminin ucuzluğu gibi sebeplerle paketlenme, yapı malzemeleri, elektronik, otomobil, medikal cihazlar, tarım ve diğer tüketim ürünleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır [1].

Genel olarak 5 milimetreden küçük plastik parçaları mikroplastik (MP) olarak tanımlanır. Çevredeki plastik parçaları boyutlarına göre genellikle beş farklı kategoride değerlendirilmektedir. Plastiklerin 1 nm - 1 mm arası olanları nanoplastik, 1-5 mm arası mikroplastik, 5-20 mm arası mezoplastik, 20-100 mm arası makroplastik ve 100 mm' den büyük olanları ise megaplastik olarak adlandırılmaktadır [2].

İnsan etkileşiminin olduğu neredeyse tüm sucul, karasal ve atmosferik ortamlarda mikroplastikler bulunmaktadır. Canlı organizmaların büyümeleri, gelişmeleri ve üremeleri üzerine olumsuz etkileri olduğu bildirilmektedir. Günümüzde mikroplastiklerin toksik etkileri giderek daha fazla ilgili çekmektedir. İnsan vücuduna girişleri besin zinciri yoluyla, yutarak veya soluyarak olabilmektedir. Ayrıca doğada binlerce yıl boyunca bozunmadan kalabilmektedirler [3]. Yüksek yüzey alanlarının yanı sıra fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle de polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), Poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve metalleri adsorbe etme potansiyelleri de yüksektir [4].

\*İlgili E-posta/ Corresponding E-mail: [berkkoker@cumhuriyet.edu.tr](mailto:berkkoker@cumhuriyet.edu.tr), Orcid: 0000-0002-0332-7434

Mikroplastikler çok farklı şekil, kompozisyon, büyüklük ve tipte olabilirler. En sık karşılaşılan mikroplastikler polietilen (PE), polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP), polistiren (PS), polyester (PES), polietilen tereftalat (PET), poliamid (PA) ve poliüretan (PUR) olarak bilinmektedir. Mikroplastiklerin kompozisyonu kristallikleri, yoğunlukları ve yüzey kimyaları gibi farklı fizikokimyasal özelliklerine göre nitelendirilir. Ayrıca farklı şekillerde de olabilmektedirler. Granül, fiber, mikrobuncuk, toprak parça, köpük, partikül, pul gibi birçok nitelendirme söz konusudur. Bu şekiller mikroplastığın kaynağından kaynaklanabileceği gibi atmosferik veya biyolojik bozunmalardan da kaynaklanabilmektedir [3].

Günlük hayat sırasında ve endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan mikroplastikler kolaylıkla atıksu arıtma tesislerine ulaşabilmektedir. Benzer bir şekilde atıksu arıtma tesisindeki ekipmanlardan, filtrelerden ve benzeri bileşenlerden dökülen atık plastikler de parçalanarak mikroplastik haline gelmektedir [5]. Mikroplastiklerin %83-95 kadarı atıksu arıtma tesislerinde giderilse de %5-17 kadarlık kısmı çevreye salınmaktadır [6].

## MİKROPLASTİKLERİN ATIKSU ARITMA TESİSLERİNE ETKİLERİ

### *Ön arıtmaya etkileri*

Birincil arıtma, temel olarak askıda katıların atıksudan ayrıldığı fiziksel metotlardan oluşmaktadır. Kaba ızgaralar genellikle 16-25 mm; ince ızgaralar 3-10 mm açıklıkta olmaktadır. Mikroplastikler boyunları nedeniyle kaba ızgaralarda tutulamamakta fakat ince ızgaralar için boyutları ve şekillerine bağlı olarak tutulabilmektedir. Aynı zamanda yüksek yüzey alanları ve hidrofobik olmaları nedeniyle birçok bileşeni adsorplayabilmektedirler. İleri kademelerde mikroplastiksiz bir sistem ile eşdeğer bir arıtım gerçekleştirmek için doğal olarak kimyasal madde konsantrasyonlarında artış gerekmektedir. Ek olarak toksik bileşenlerin mikroplastikler tarafından adsorplanabilmesi nedeniyle bir ön arıtım şeklinde sudan uzaklaştırılmalarını da etkilemektedir [1, 7]. Bakir (2014), diklorodifeniltrikloroetan (DDT) ve fenilalanin (Phe) gibi kalıcı organik kirleticilerin plastikler tarafından taşındığını ve taşıma kapasitesinin kirletici maddelerin sudaki konsantrasyonları ile ilgili olduğunu bildirmiştir [7].

### *İkincil arıtmaya etkileri*

Mikroplastikler, atıksuların ikincil arıtımı sırasında inorganik azotun biyolojik çevrimini etkilemektedir. Zhu (2018), Mikroplastiklerin *Rhizobiaceae*, *Xanthobacteraceae* ve *Isosphaeraceae* familyasından mikroorganizmaların aktif çamur içerisindeki oranını azalttığını gözlemlemiştir. Bu familyalar azot döngüsü ve organik madde ayrışmasını sağlayan kritik mikroorganizmalardan oluşmaktadır [8]. Mikroplastiklerin varlığında ve özellikle de 80 mg/L gibi yüksek nanoplastik konsantrasyonlarında NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N'nin dönüşüm verimliliği azalmaktadır [9]. Denitrifikasyon prosesini inhibe etmeleri nedeniyle amonyak birikimine neden olabilir. Cluzard (2015), çalışmasında mikroplastiklerin, özellikle de mikrobuncukların, çökeltiler içerisindeki amonyum gibi temel nutrientlerin döngüsünü ciddi şekilde değiştirdiğini söylemektedir. Artan amonyumun arıtılmamış atıksuların kıyı ve nehirlerle verilmesi sonucunda ötrofikasyon sorunu yaşanabilmektedir. Yani mikroplastikler hem nitrifikasyon hem de denitrifikasyon prosesleri etkilemektedir [10].

Mikroplastikler fosfor giderimi konusunda azot giderimine göre daha az etki etmektedir. Bunun nedeni azot arıtım prosesleri ile ilişkilendirilen bakterilerin daha hassas olmaları nedeniyle. Liu (2017), farklı mikroplastik oranları eklediği ortamdaki çözünmüş madde konsantrasyonlarının değişimini araştırdığı çalışmasında mikroplastiklerin varlığının toplam fosfor ve çözünmüş organik fosfor seviyesini büyük ölçüde arttırdığını fakat fosfor giderimine belirgin bir etkide bulunmadığını bildirmiştir [11]. Diğer taraftan biyolojik oksijen ihtiyacı, çözünmüş oksijen, toplam azot ve toplam fosfor; mikroplastikler konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak artmaktadır [12].

Kalčíková (2017), çalışmasında kozmetik kaynaklı polietilen mikrobuncuklarından büyüklüğü 70 µm'ye kadar olanlarının aktif çamur içerisinde tutulduğunu fakat daha büyük boyutluların çıkış suyunda tespit edildiğini bildirmiştir. Ayrıca laboratuvar ölçekli ardışık kesikli reaktöründe mikrobuncukların %52'si aktif çamur içerisinde tutulmuştur [13].

Biyolojik aktif filtrelerde mikroplastikler mikroorganizma büyümesi için bir yüzey oluşturmaktadır. Ancak filtredeki bölgesel yüzey kaybı, filtrasyon aşaması sonundaki su basıncının daha büyük olması nedeniyle hava direnci fenomenine neden olabilmektedir. Ek olarak mikroplastiklerin devasa yüzey alanları yüzünden atıksu içerisinde bulunan askıda bileşenler ile küreler oluşturarak suyun

eşit olmayan bir şekilde dağılmasına neden olmaktadır. Uzun süreli yüksek seviyede mikroplastik yüklenmesi, toplam atık çamur miktarını %9,1 oranında arttırmakta ve atık çamur taşıma ve bertaraf maliyetini arttırmaktadır [1].

### **Üçüncül arıtmaya etkileri**

Koagülasyon prosesinde alüminyum tuzları ve demir tuzları gibi flokülantlarla negatif yüzey yüklü mikroplastiklerin etkileşimi nedeniyle etkin flokülant dozu azalmaktadır. Plastiksiz sistemlerle eşdeğer bir verim elde etmek için ek kimyasal gerekmekte bu da maliyeti arttırmaktadır [14].

Flotasyon aşamasında yüzey özellikleri nedeniyle mikroplastikler kolaylıkla kirleticileri adsorbe etmekte ve topaklanmaya neden olmaktadır. Bu oluşan topakların büyüklüğü ve yoğunluğu flotasyon tankı tasarım kriterlerine uymayabilmektedir [1].

Mikroplastikler şekilleri önceki arıtma basamaklarında bozularak daha düzensiz hale gelmiş olabilir. Bu düzensiz şekillere sahip mikroplastikler mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) proseslerinde membranların yırtılmasına ve tıkanmasına neden olabilmektedir. Yüksek basınç ile çalışmakta olan NF ve TO membranlarında bu olay daha çok yaşanabilmektedir. Günümüzde birçok atıksu arıtma tesisinde polimer membranlar kullanılmakta ve mikroplastiklerin bu tip membranlarla etkileşimi filtrasyon performansını düşürmektedir. Ek olarak yüzey özellikleri nedeniyle mikroplastikler porların tıkanması veya kek oluşumuna neden olabilmektedirler. Oluşan bu tıkanma şekilleri nedeniyle aynı miktar akı elde etmek için daha yüksek transmembran basınçlarının uygulanması gerekliliğine, daha uzun filtrasyonu sürelerine ve daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır [15, 16]. Örneğin Abdelrasoul (2013), poli (sülfon) membranların PS lateks (0,2 µm) sebebiyle tıkanmasını araştırmış ve 10 µm'den küçük partiküllerin membran porlarını tıkadığını ve 10 µm'den büyük partiküllerin kek tabakası oluşturduğunu gözlemlemiştir [17].

Mikroplastikler aynı zamanda dezenfeksiyon prosesini de etkilemektedir. Askıda haldeki mikroplastikler atıksuda klor ve UV dezenfeksiyonunu engellemektedir. Çünkü bakteriler için bir korunak olmakta ve aynı zamanda ozon da mikroplastikleri okside edebildiğinden etkin ozon moleküllerini azaltmaktadır [18].

### **Arıtma çamuruna etkisi**

Atıksu arıtma tesisinin yükleme oranına bağlı olarak mikroplastik konsantrasyonu etkilenmektedir. Atıksu arıtma tesisindeki yüklemeler hidrolik alıkonma süresini azaltmakta ve atıksu akış miktarını arttırmakta ve mikrobiyal bozulmayı azaltmaktadır ki bu nedenle mikroplastik konsantrasyonu artmaktadır [19, 20]. Ham atıksudaki mikroplastiklerin %99 kadarı arıtma çamurlarında tutulmaktadır [21, 22].

En yaygın çamur stabilizasyon yöntemlerinden biri olan anaerobik çürüme sırasında yüksek PVC miktarı yüksek çözünmüş KOI çıkışına sebep olmaktadır. Atık aktif çamurda mikroplastiklerin bulunması protein ve polisakaritlerin hidrolizine negatif etki yapmaktadır ve bu da asidifiye substratların üretimini azaltmakta ve daha az gaz oluşumuna neden olmaktadır [23, 24].

## **MİKROPLASTİKLERİN GİDERİMİ**

Günümüzde atıksu arıtma tesislerinde kullanılan prosesler, mikroplastikleri ve iz kontaminasyonlarını gidermek için verimleri yüksek olmayan proseslerdir [25]. Mikroplastiklerin gideriminde kullanılan yöntemler fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

### **Fiziksel metotlar**

Fiziksel arıtım yöntemleri arasında filtrasyon, çökeltme, hızlı kum filtreleri, çözünmüş hava flotasyonu, membranlar sayılabilir. Kaba filtrelerin aralıkları mikroplastik tutmak için yeterli değildir. İnce ızgaranın da belirgin bir giderim gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Mikroplastığın üretildiği polimerin bazı fiziksel giderim türlerine etkisi söz konusudur. Örneğin PS, PP, düşük ve yüksek yoğunluklu (<960 kg m<sup>-3</sup>) PE kolaylıkla flotasyon ile ayrılabilir. Bu ayırım şeklinde parçacığın şekli önem taşımaktadır. Daha büyük yoğunluklu mikroplastikler için çökeltme ile ayrılmaktadır [26]. Murphy (2016), çalışmasında kum tutucuda %44,59, ön çökeltmede buna ek olarak %33,75 ve havalandırma ve son çökeltim sonrasında ek %20,07 giderim bildirmiştir [20].

Disk filtreler, dünyada genelinde bazı atıksu arıtma tesislerinde biyolojik olarak arıtılmış atıksulara uygulanan bir tekniktir. Kapalı bir tank içerisinde bulunan yuvarlık yapıda bir filtre sistemidir. Simon

(2019) çalışmasında disk filtre ile partiküllerin %89,7'sini ve kütlece %75,6'sını tutmayı başarmıştır. Fakat filtre por büyüklük sınırından küçük partiküllerin geçmesine engel olamamıştır [27].

Talvitie (2017), çalışmasında Finlandiya'da bulunan ve farklı son arıtma teknolojileri kullanan dört farklı atıksu arıtma tesisinin atıksularını incelemiştir. Birincil arıtma çıkışını arıtan MBR ve ikincil arıtma çıkış suyunu arıtan disk filtre, hızlı kum filtrasyonu ve çözünmüş hava flotasyonu ile mikroplastik giderimi değerlendirilmiştir. MBR mikroplastiklerin %99,9'unu giderirken (6,9 mikroplastik/L'den 0,005 MP/L'ye indirmiş); hızlı kum filtresinde %97 (0,7 MP/L'den 0,02 MP/L'ye), çözünmüş hava flotasyonunda %95 (2 MP/L'den 0,1 MP/L'ye) ve disk filtrede %40-98,5 (0,5-2 MP/L'den 0,03-0,3 MP/L'ye) giderim verimi söz konudur [28].

Membran sistemleri mikroplastik gideriminde çok iyi performans vermektedir. Ma (2019), 30 nm por çapı olan ultrafiltrasyon (UF) membranı ile mikroplastikleri tamamen gidermiştir. Membran akısında sadece mikroplastik varlığında ciddi bir düşüş gözlemlenmediğini bildirmektedir [15]. Mikroplastiklerin fiziksel metotlarla arıtımının yapıldığı bazı çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Fiziksel metotlar ile çeşitli mikroplastiklerin arıtıldığı çalışmalar

Aritma Yöntemi	Mikroplastik	Verim	Açıklama	Kaynak
<b>Kum tutucu</b>	PS, PP, PE	%44,59	Girişte 15,70 ( $\pm$ 5,20) MP/L	[20]
<b>Ön çökeltme</b>	PS, PP, PE	%33,75	bulunmakta. Kum tutucu sonrasında 8,70( $\pm$ 1,56) ve ön çökeltme sonrasında 3,40 ( $\pm$ 0,28) MP/L mikroplastik çıkmaktadır.	[20]
<b>Disk filtre</b>	Sayica %42 PE, %28 PES; ağırlıkça %65 PVC	%89,7	Filtre girişinde 29 MP/L, çıkışında 3 MP/L ölçülmüş.	[27]
<b>Hızlı kum filtre</b>	13 farklı	%97	0,7 MP/L'den 0,02 MP/L'ye düşürmüştür.	[28]
<b>Çözünmüş hava flotasyonu</b>	polimer tespit edilmiş: %60'ı	%95	2 MP/L'den 0,1 MP/L'ye düşürmüştür.	[28]
<b>Disk filtre (10 <math>\mu</math>m)</b>	PES, %14 PE,	%40	0,5 MP/L'den 0,3 MP/L'ye düşürmüştür.	[28]
<b>Disk filtre (20 <math>\mu</math>m)</b>	%7 poliakrilat, %5 PVC vd.	%98,5	2 MP/L'den 0,03 MP/L'ye düşürmüştür.	[28]
<b>UF</b>	PE	%100	PF 100 kDa membran kullanılmış.	[15]

### Kimyasal metotlar

Koagülasyon ve flotasyon atıksu arıtma tesislerinde sıklıkla uygulanan proseslerdir ve aslında mikroplastiklerin gideriminde de etkilidirler. Rajala (2020), Fe ve Al tuzları ile yapılan giderim çalışmalarında PS mikroplastiklerinin demir klorür ve polialüminyum klorür ile sırasıyla %99,4 ve %98 verim ile giderildiği bildirilmiştir. 1  $\mu$ m boyutundaki mikropalstiklerde %95, 6,3  $\mu$ m boyutundakilerde %76 giderim gözlemlenmiştir. Büyük mikroplastikler için daha az koagülant dozlarına gerek olduğunu söylemektedir [29]. Lapointe (2020), parçalanmış ve parçalanmamış PE mikroküreleri, PS ve poliester (PEST) fiberlerinin koagülasyon flokülasyon verimini incelemiş ve mikroplastığın parçalanmış olmasının verimi arttırdığını bildirmiştir. PEST fiberleri için %97, parçalanmış PE için %99, parçalanmamış PE için %82, parçalanmamış PS için %84 giderim gerçekleştirilmiştir [31]. Giderimin veriminin düşük olduğunu bildiren çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin Ma (2019), Fe tuzları (FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O) ile yapılan geleneksel koagülasyon ile PE partiküllerinin gideriminin %15'in altında kaldığını söylemektedir [15]. Mikroplastikler çamur floklarına kolaylıkla adsorbe olmaktadırlar. Demir sülfat ve alüminyum sülfat gibi flokülantların birincil çökeltme tankına ilavesiyle mikroplastiklerin birikimi artırılabilir [1].

Adsorpsiyon kimyasal arıtma yöntemleri arasında mikroplastiklerin gideriminde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Misra (2020), Manyetik polioksometalat kompozit malzeme ile 1-10  $\mu$ m çaplı PS boncuklarını tamamen giderebilmiştir [31]. Tang (2020) çalışmasında PE, PET ve PA mikroplastiklerini (5 g/L), manyetik karbon nanotüpler (M-CNT'ler, 5 g/L) tamamen giderilmiştir [32].

Fotodegradasyon ve benzeri yöntemler de mikroplastik gideriminde kullanılabilir. TiO<sub>2</sub> nanopartikül film ile 254 nm UV ışık altında 24 saatte PS partiküllerinin %100 oranda giderilebileceği bildirilmiştir [33]. Jiao (2020), PE, PP ve PVC'nin CO<sub>2</sub>'ye ve sonrasında da CH<sub>3</sub>COOH'a mineralize

olduğunu bildirmektedir. Örneğin PE, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ile 40 saat içerisinde tamamen CO<sub>2</sub>'ye fotodegradasyon edilmektedir. Ayrıca fotodegradasyon sonrasında mikroplastiklerin morfolojisi ile mekanik, optik ve kimyasal özelliklerinde değişikliklerin olduğu bildirilmiştir [34].

Elektrokoagülasyon, elektroflotasyon gibi elektrokimyasal teknolojiler kimyasal ajanlara veya mikroorganizmalara bağlı olmayan daha az maliyetli bir çözümdür. Mikroplastik gideriminde elektrokoagülasyon kullanımı efektif bir çözüm olabilir. Shen (2022), alüminyum ve demir anotları ile yaptığı çalışmada %80'in üzerinde giderim sağlamıştır. Alüminyum anodun daha iyi giderim sağladığı ve PE için %93,2, polimetil metakrilat (PMMA) için %91,7, selüloz asetat (CA) için %98,2 ve PP için %98,4 giderim verimleri elde ettiğini bildirmiştir. Ayrıca fiber şeklindeki mikroplastiklerin granüler şekilde olanlardan daha iyi giderildiğini söylemektedir [35]. Mikroplastiklerin kimyasal metotlarla arıtımının yapıldığı bazı çalışmalar Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kimyasal metotlar ile çeşitli mikroplastiklerin arıtıldığı çalışmalar

Arıtma Yöntemi	Mikroplastik	Verim	Açıklama	Kaynak
<b>Koagülasyon/flokülasyon</b>	Sentetik olarak hazırlanmış PS (1 µm ve 6,3 µm)	%99,4	Al ve Fe tuzları kullanılmış, 1 µm 182x106 MP/L; 6,3 µm için 50 × 106 MP/L giriş belirlenmiş.	[29]
<b>Koagülasyon/flokülasyon</b>	PE (15-140 µm), PS (140 µm), PEST	%97 PEST, %99	PEST için 5 fiber/L, PS için 80±11 MP/L, 140 µm PE için 90±14 MP/L	[36]
<b>Koagülasyon/flokülasyon</b>	PE	%15	Fe-bazlı koagülant ile.	[15]
<b>Adsorpsiyon</b>	PS 10 µm	%100	magPOM-SILPs	[31]
<b>Adsorpsiyon</b>	PS 1 µm	%100		
<b>Adsorpsiyon</b>	PE, PET, PA	%100	M-CNTs, 5 g/L MP dozunu 300 dk'da tamamen giderilmiştir.	[32]
<b>Fotodegradasyon</b>	PS	%99,99	TiO <sub>2</sub> nanopartikül film, 254 nm UV ışık, 24 saat	[33]
<b>Fotodegradasyon</b>	PS	%44,66	Sulu ortamda toz halinde TiO <sub>2</sub> , 254 nm UV ışık, 12 saat	[33]
<b>Fotodegradasyon</b>	PE, PP, EVC	%100	300 W Xe lamba, standart AM 1.5G filtre, hava ortamında ve oda şartlarında mikroplastikler CH <sub>3</sub> COOH'e fotokatalize edilmiştir.	[34]
<b>Elektrokoagülasyon</b>	PE, PMMA, CA, PP	%91,7 PE, %91,7 PMMA, %98,2 CA, %98,4 PP	0,05 M elektrolit konsantrasyonunda, pH 7,2'de, 10 V ve Al anodu ile.	[35]

### **Biyolojik Metotlar**

1970'lerde PE, PS ve PP mikroplastikleri doğal ortamda biyolojik olarak parçalanamaz olarak kabul edilmekteydi. Fakat az da olsa bakterilerin ve kurt/larvaların bu plastikleri parçalayabildiği ortaya çıkmıştır. Atıksu arıtma tesislerindeki anaerobik-anoksik-aerobik (A<sub>2</sub>O) prosesinin az da olsa mikroplastik giderimi gerçekleştirebildiği bilinmektedir. Arıtma çamuru içerisinde hipertermofil bakterilerle yapılan kompostlaştırma işlemi ile 45 günde %43,7 oranında mikroplastik giderimi gözlemlenmiştir [3].

Anaerobik arıtma sistemleri tekstil endüstrisi atıksuları gibi nanoplastiklerin olduğu atıksuların arıtımında önemli bir role sahiptir [37]. Mikroplastikler anaerobik çürütücü tanklarında biyogaza ayrıştırılabilir [38]. Mahon (2016), çalışmada mikroplastik içeren çamur örnekleri anaerobik çürüme,

termal kurutma ve kireç stabilizasyonuna tabi tutulmuş ve anaerobik çürütücü çıkışında mikroplastik miktarının az olduğu ve kireç stabilizasyonunda mikroplastiklerin daha küçük parçalara ayrıldığı belirlenmiştir [39].

Atıksulardan mikroplastik giderimi konusunda membran biyoreaktör (MBR) teknolojisi, geleneksel aktif çamur prosesinden daha verimli olduğu bildirilmektedir. MBR tekniği kullanılarak birincil atıktan nihai atık suya kadar mikroplastiklerin ortalama konsantrasyonları %96,2 oranında azalmakta olmaktadır [40]. Lares (2018), klasik aktif çamur prosesinde %98,3 mikroplastik giderimi olduğunu ve  $1 \pm 0,4$  MP/L çıkış elde edildiğini; ardına koyulan MBR ile  $0,4 \pm 0,1$  MP/L'ye indirildiğini bildirmiştir. Fakat, MBR gibi metotlarda basıncın etkisi ile oluşan mekanik stres mikroplastiklerin yıpranması ve çevreye salınmasına neden olabildiğini de söylemektedir [25]. Bir başka dezavantaj olarak küçük partiküllerin filtrasyonunun daha uzun olması ve tıkanmaya neden olarak bakım maliyetlerini arttırması sayılabilir. Pittura (2021), tam ölçekli bir aktif çamur tesisinin mikroplastikleri %86 oranında giderdiğini fakat 1 mm'nin altındaki parçacıkların çıkışta gözlemlendiğini söylemektedir. Pilot ölçekli yukarı akışlı granüler anaerobik çamur prosesi (UASB) ile anaerobik membran biyoreaktör (AnMBR) konfigürasyonu ile %94 mikroplastik giderimi yapıldığı ve fiberlerin %87'sinin, partiküllerin tamamının giderildiğini bildirmektedir [41]. Mikroplastiklerin biyolojik metotlarla arıtımının yapıldığı bazı çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Biyolojik metotlar ile çeşitli mikroplastiklerin arıtıldığı çalışmalar

Arıtma Yöntemi	Mikroplastik	Verim	Açıklama	Kaynak
<b>MBR</b>	PES, PE, poliakrilat, PVC vd.	%99,9	6,9 MP/L'den 0,005 MP/L'ye düşürmüştü.	[38]
<b>MBR</b>		%96,2		[40]
<b>MBR</b>	PES, PET, PE, PA, PP	%99,4	MBR süzütüsünde $0,4 \pm 0,1$ MP/L belirlenmiştir.	[25]
<b>Klasik aktif çamur</b>	PES, PET, PE, PA, PP	%98,3	Çıkışta $1 \pm 0,4$ MP/L belirlenmiştir.	[25]
<b>Klasik aktif çamur</b>	PE, PP	%86		[41]
<b>UASB + AnMBR</b>	PE, PP	%94 (fiberlerin %87'i ve partiküllerin %100'ü)		[41]

## SONUÇ

Atıksu arıtma tesislerindeki mikroplastikler esas olarak polyester ve polietilenden oluşmaktadır. Morfolojik olarak granüler ve liflidirler. Ve çalışmalar göstermektedir ki bazı mikroplastikler atıksu arıtma tesislerinde bir miktar giderilebilmektedir. Fakat mikroplastikler aktif çamur yumakları üzerinde inhibitör etkileri vardır. Mikroplastik seviyesinin artması atıksu ve çamur arıtımını olumsuz etkiler. Biyolojik arıtım sırasında organik maddenin giderilmesini, nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçlerini, dezenfeksiyonu ve çamur arıtımında metan üretimini engelleyebilir.

Kentsel atıksu arıtma tesisleri, mikroplastikleri gidermek için özel olarak tasarlanmamıştır ve özellikle fiber şeklinde mikroplastiklerin gideriminde yetersizdir. Bu durum literatürde atıksu arıtma tesislerinin sucul ortamlar için birer mikroplastik salım kaynağı olarak görülmesine neden olmaktadır. Atıksu arıtma tesisi ünitelerinin mikroplastik giderim verimlerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi; mikroplastik emisyonlarının azaltılmasında önemlidir. Mikroplastiklerin atık su ve çamur arıtma sistemlerine zarar vermesini önlemek için belirli mikroplastikleri hedefleyen arıtma üniteleri tasarlanabilir ve atıksu arıtma tesislerinde uygulanabilir.

Mikroplastiklere yönelik çözüm için kaynak kontrolüne odaklanılmalıdır. Kişisel bakım ürünlerinden plastik boncukların azaltılması hatta çıkarılması, çöp poşeti kullanımının azaltılması, yeşil ambalajın desteklenmesi, aşırı ambalajın ortadan kaldırılması ve plastik ürünlerin kademeli olarak biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerle değiştirilmesi gündeme getirilmelidir.

## KAYNAKLAR

[1] Zhang, Z., & Chen, Y., 2020, Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal: A review, Chemical Engineering Journal, 382, 122955.

- [2] Yurtsever, M., 2018, Küresel Plastik Kirliliği, Nano-Mikroplastik Tehlikesi Ve Sürdürülebilirlik, Çevre, Bilim ve Teknoloji, S171-197.
- [3] Ahmed, R., Hamid, A. K., Krebsbach, S. A., He, J., & Wang, D., 2022, Critical review of microplastics removal from the environment, *Chemosphere*, 293, 133557.
- [4] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway T.S., 2011, Microplastics as contaminants in the marine environment: a review, *Mar. Pollut. Bull.*, C 62, S 2588-2597.
- [5] Carr, S.A., Liu, J., Tesoro A.G., 2016, Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants, *Water Res.*, 91, S 174-182.
- [6] 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, *Environ. Chem.*, C 12, S 592.
- [7] Bakir, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., 2014, Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, C 140, S 14-21.
- [8] Zhu, B., Fang, Y., Zhu, D., Christie, P., Ke, X., Zhu Y., 2018, Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus*, *Environ. Pollut.*, C 239, S 408-415.
- [9] Sun, X., Chen, B., Li, Q., Liu, N., Xia, B., Zhu, L., & Qu, K., 2018, Toxicities of polystyrene nano- and microplastics toward marine bacterium *Halomonas alkaliphile*, *Science of The Total Environment*, C 642, S 1378-1385.
- [10] Cluzard, M., Kazmiruk, T.N., Kazmiruk, V.D., Bendell, L.I., 2015, Intertidal concentrations of microplastics and their influence on ammonium cycling as related to the shellfish industry, *Arch. Environ. Con. Tox.*, C 69, S 310-319.
- [11] Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., Ritsema, C.J., Geissen V., 2017, Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil, *Chemosphere*, C 185, S 907-917.
- [12] Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., Hinata H., 2019, Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan, *Environ. Pollut.*, C 244, S 958-965.
- [13] Kalčíková G., Alič, B., Skalar, T., Bundschuh, M., Gotvajn A.Ž., 2017, Wastewater treatment plant effluents as source of cosmetic polyethylene microbeads to freshwater, *Chemosphere*, C 188, S 25-31.
- [14] Perren, W., Wojtasik, A., Cai Q., 2018, Removal of microbeads from wastewater using electrocoagulation, *ACS Omega*, C 3, S 3357-3364.
- [15] Ma, B., Xue, W., Ding, Y., Hu, C., Liu, H., & Qu, J., 2019, Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment, *Journal of Environmental Sciences*, C 78, S 267-275.
- [16] Lai, C.Y. Groth, A., Gray, S., Duke M., 2014, Enhanced abrasion resistant PVDF/nanoclay hollow fibre composite membranes for water treatment, *J. Membr. Sci.*, C 449, S 146-157.
- [17] Abdelrasoul, A., Doan, H., Lohi, A., 2013, A mechanistic model for ultrafiltration membrane fouling by latex, *J. Membr. Sci.*, C 433, S 88-99.
- [18] Zhang, X., Zhou, Y., Xu, T., Zheng, K., Zhang, R., Peng, Z., Zhang H., 2018, Toxic effects of CuO, ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles in environmental concentration on the nitrogen removal, microbial activity and community of anammox process, *Chem. Eng. J.*, C 332, S 42-48.
- [19] 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 Res.*, C 155, S 255-265.
- [20] Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., Quinn B., 2016, Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment, *Environ. Sci. Technol.*, C 50, S 5800-5808.
- [21] Mason, S.A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D., Rogers D.L., 2016, Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent, *Environ. Pollut.*, C 218, S 1045-1054.
- [22] 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*, C 133, S 553-561.
- [23] Wei, W., Zhang, Y., Huang, Q., Ni, B., 2019, Polyethylene terephthalate microplastics affect hydrogen production from alkaline anaerobic fermentation of waste activated sludge through altering viability and activity of anaerobic microorganisms, *Water Res.*, C 163, Article 114881.

- [24] Zhao, Y., Chen, Y., Zhang, D., Zhu X., 2010, Waste activated sludge fermentation for hydrogen production enhanced by anaerobic process improvement and acetobacteria inhibition: the role of fermentation pH, *Environ. Sci. Technol.*, C 44, S 3317-3323.
- [25] Lares, M., Neibi, 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 Res.*, C 133, S 236-246.
- [26] Kurt, Z., Özdemir, I., & James R., A. M., 2022, Effectiveness of microplastics removal in wastewater treatment plants: A critical analysis of wastewater treatment processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, C 10(3), 107831.
- [27] Simon, M., Vianello, A., & Vollertsen, J., 2019, Removal of >10 µm Microplastic Particles from Treated Wastewater by a Disc Filter. *Water*, C 11(9), 1935.
- [28] 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*, C 123, S 401-407.
- [29] Rajala, K., Grönfors, O., Hesampour, M., & Mikola, A., 2020, Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals, *Water Research*, C 183, S 116045.
- [31] Misra, A., Zambrzycki, C., Kloker, G., Kotyrba, A., Anjass, M. H., Franco Castillo, I., Mitchell, S. G., Güttel, R., & Streb, C., 2020, Water Purification and Microplastics Removal Using Magnetic Polyoxometalate-Supported Ionic Liquid Phases (magPOM-SILPs), *Angewandte Chemie International Edition*, C 59(4), S 1601-1605.
- [32] Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y., & Xie, B., 2021, Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes, *Chemical Engineering Journal*, C 406, 126804.
- [33] Nabi, I., Bacha, A.-U.-R., Li, K., Cheng, H., Wang, T., Liu, Y., Ajmal, S., Yang, Y., Feng, Y., & Zhang, L., 2020, Complete Photocatalytic Mineralization of Microplastic on TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Film, *IScience*, C 23(7), 101326.
- [34] Jiao, X., Zheng, K., Chen, Q., Li, X., Li, Y., Shao, W., Xu, J., Zhu, J., Pan, Y., Sun, Y., & Xie, Y., 2020, Photocatalytic Conversion of Waste Plastics into C<sub>2</sub> Fuels under Simulated Natural Environment Conditions, *Angewandte Chemie International Edition*, C 59(36), S 15497-15501.
- [35] Shen, M., Zhang, Y., Almatrafi, E., Hu, T., Zhou, C., Song, B., Zeng, Z., & Zeng, G., 2022, Efficient removal of microplastics from wastewater by an electrocoagulation process, *Chemical Engineering Journal*, C 428, 131161.
- [36] Lapointe, M., Farnier, J. M., Hernandez, L. M., & Tufenkji, N., 2020, Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation. *Environmental Science & Technology*, C 54(14), S 8719-8727.
- [37] Feng, Y., Feng, L., Liu, S., Duan, J., Zhang, Y., Li, S., Sun, X., Wang, S., Yuan X., 2018, Emerging investigator series: inhibition and recovery of anaerobic granular sludge performance in response to short-term polystyrene nanoparticle exposure, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, C 4, S 1902-1911.
- [38] Talvitie, J., Heinonen, M., Pääkkönen, J., Vahtera, E., Mikola, A., Setälä, O., Vahala R., 2015, Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea, *Water Sci. Technol.*, C 72, S 1495-1504.
- [39] Mahon, A.M., Connell, B.O., Healy, M.G., Connor, I.O., Officer, R., Nash, R., Morrison L., 2016, Microplastics in sewage sludge: effects of treatment, *Environ. Sci. Technol.*, C 51, S 810-818.
- [40] Mishra, S., Singh, R. P., Rout, P. K., & Das, A. P., 2022, Chapter 3—Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology for removal of synthetic microplastics, *Development in Wastewater Treatment Research and Processes* S 45-60.
- [41] 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*, C 262, 128415.