Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 31, Sayı 1, 2026 DERLEME

DOI: 10.17482/uumfd.1768287

SU KALİTE GÖSTERGE PARAMETRELERİNİN SU VE ATIKSU ORTAMINDA MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN İZLENMESİNDE KULLANILMASI

Ceyhun AKARSU [*]
Nüket SİVRİ [**]

Alınma: 19.08.2025; düzeltme: 15.10.2025; kabul: 12.12.2025

Öz: Mikroplastik ve nanoplastik gibi partikül plastiklerin analizi literatürde yaygın çalışmalar içeriyor olsa da laboratuvar süreçlerinin zaman ve kaynak gerektirmesi nedeniyle günümüzde hala önemli analitik ve metodolojik zorluklar barındırmaktadır. Bu sınırlılıklar, söz konusu plastiklerin çevredeki akıbeti, taşınım mekanizmaları ve biyolojik etkileşimlerine dair kapsamlı araştırmaların yürütülmesini zorlaştırmaktadır. Her ne kadar mikrometrenin altındaki plastik parçacıkların tespiti için çeşitli analiz yöntemlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da mikroplastik varlığı ile su kalitesi parametreleri arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması, çevresel risklerin değerlendirilmesi ve kirlilik izleme stratejilerinin iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bilgi eksikliği, özellikle atıksu arıtma tesislerinde mikroplastiklerin rutin olarak izlenmesini güçleştirmekte ve bu bağlamda güvenilir, ekonomik ve kolay ölçülebilir gösterge parametrelerin belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sorunu ele almak amacıyla, bu çalışmada mikroplastik konsantrasyonları ile su kalitesi parametreleri arasındaki korelasyonları inceleyen araştırma yayınları sistematik olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın temel hedefi, arıtılmış çıkış suları ve giriş sularında plastik kirliliğinin rutin olarak izlenmesini kolaylaştırabilecek potansiyel fizikokimyasal gösterge parametrelerini belirlemektir. Elde edilen bulguların, plastik kirliliğinin kontrolüne yönelik daha etkili stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlaması ve arıtma süreçlerinin sürdürülebilirliği ile işletme verimliliğini artıracak sağlam izleme protokollerinin oluşturulmasına destek vermesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu Deşarjı, Arıtma Verimliliği, Plastik Kirliliği, Su Kalitesi Gösterge Parametreleri

Application of Water Quality Indicators in the Monitoring of Microplastic Contamination in Aquatic and Wastewater Environments

Abstract: Analyzing particulate plastics, particularly microplastics and nanoplastics, is still a major analytical and methodological challenge due to the time- and resource-intensive laboratory procedures involved. These limitations hinder comprehensive investigations into fate in the environment, transport mechanisms and biological interactions. Although significant progress has been made in the development of analytical methods capable of detecting submicron plastic particles, a better understanding of the relationship between the presence of microplastics and water quality parameters is essential for assessing environmental risks and improving pollution monitoring strategies. This knowledge gap poses a particular challenge for the routine monitoring of microplastics in wastewater treatment plants, where the development of reliable, cost-effective and easily measurable surrogate indicators is essential. To address this problem, the present study systematically analyzed peer-reviewed research papers investigating correlations between microplastic concentrations and water quality parameters in wastewater treatment plants. The aim is to identify promising physico-chemical indicators that can facilitate the routine monitoring of plastic pollutants in treated effluents and influents. The results of this study are expected to contribute to the development of more effective plastic pollution control strategies and support the implementation of robust monitoring protocols that improve the sustainability and operational efficiency of water treatment processes.

Keywords: Detection and Analysis, Plastic Pollution, Treatment Efficiency, Wastewater Discharge, Water Quality Indicators

[*] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, Türkiye
[**] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, Türkiye
İletişim Yazarı: Ceyhun AKARSU (ceyhunakarsu@iuc.edu.tr)

1. GİRİŞ

Plastik üretimi, plastik kullanımını sınırlamaya yönelik politikalara rağmen küresel ölçekte artış göstermeye devam etmektedir (Geyer ve diğ., 2017). Bu artışın bir sonucu olarak, güncel küresel tahminler, dünya okyanuslarının yüzey sularında yaklaşık 82–358 trilyon plastik parçacığının bulunduğunu ve bu değerin ortalama olarak yaklaşık 170 trilyon parçacığa karşılık geldiğini göstermektedir (Eriksen ve diğ., 2023; Yang ve diğ., 2025). Mikroplastikler yalnızca denizlerde değil, aynı zamanda akarsularda (Li, 2018), haliçlerde (Leads ve Weinstein, 2019), göllerde (Mandal ve diğ., 2025) ve kıyı sularında (Pan ve diğ., 2019) yaygın bir kirletici olarak karşımıza çıkarmaktadır.

Mikroplastiklerin kaynağını anlamak, çevreye olan baskılarını önlemeye yönelik stratejilerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Rhodes, 2018). Mikroplastikler; konutlar, endüstriler ve atıksu arıtma tesisleri gibi noktosal kaynaklardan, ayrıca atmosferik taşınım, oşinografik süreçler ve yağmur suyu gibi noktosal olmayan kaynaklardan alıcı ortamlara ulaşabilmektedir (Iordachescu ve diğ., 2024). Bu kaynaklar arasında özellikle atık su arıtma tesisleri, mikroplastik kirliliğinin başlıca yayılım yollarından biri olarak öne çıkmaktadır (Alvim ve diğ., 2020).

Evsel ve endüstriyel faaliyetler, özellikle kişisel bakım ürünleri, sentetik tekstil yıkamaları ve plastik üretim süreçleri, mikroplastiklerin atıksulara karışmasında başlıca kaynaklar arasında yer almaktadır (Aslam ve diğ., 2023; Thompson ve diğ., 2024). Yürütülen araştırmalarda arıtma süreçleri sırasında mikroplastiklerin %64 ile 99'unun giderilebildiği bildirilmiştir (Akarsu ve diğ., 2020). Örneğin, yalnızca birincil ve ikincil arıtım uygulayan tesislerin çıkış sularında mikroplastik konsantrasyonu $9x10^{-4}$ ile 447 mikroplastik/litre (MP/L) arasında değişirken, üçüncül arıtım yapan tesislerde bu değer 0 ile 51 MP/L arasında ölçülmektedir (Wagner ve diğ., 2018). Bu giderim oranı; atıksuyun bileşimi, kullanılan arıtma teknolojisi ve uygulanan örnekleme ile analiz yöntemlerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir (Sönmez ve diğ., 2024). Ancak bu sonuçlara rağmen, mikroplastik giderimine ilişkin literatürde sunulan verilerin doğrudan karşılaştırılması, çeşitli metodolojik sınırlamalar nedeniyle oldukça güçtür. Bu durum, çalışmaların istenilen düzeyde doğruluk ve hassasiyetle karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmesini engellemektedir. Başlıca nedenler arasında örnekleme ve analiz yöntemlerindeki farklılıklar, kısa süreli örnekleme dönemleri ve sınırlı numune hacimleri yer almaktadır (Okoffo ve diğ., 2019). Bu metodolojik çeşitlilik, mikroplastik bolluğunun kıyaslanması ve yorumlanması sürecinde ciddi belirsizliklere yol açmaktadır. Öte yandan, meteorolojik koşullar da bu belirsizlikleri arttıran önemli bir etkendir. Nitekim Almanya'da yapılan bir çalışmada, yağışlı günlerde mikroplastik konsantrasyonu 5900 MP/m^3 olarak ölçülürken, yağışsız günlerde bu değer 3000 MP/m^3'e kadar düşmüştür (Wolff ve diğ., 2018).

Günümüzde çeşitli yöntemler benimsenmiş olsa da küçük boyutlu parçacıkların belirlenmesindeki sınırlamalar büyük ölçüde örnekleme düzeneklerine bağlıdır. En yaygın uygulamalardan biri, 10 ila 300 μm aralığında gözenek boyutuna sahip filtrelerin kullanılmasıdır (Sönmez ve diğ., 2022). Ancak bu durum, özellikle nanoplastik boyutundaki daha küçük parçacıkların analiz dışı kalmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte ortamda bulunan diğer safsızlıklar ölçüm sonuçlarını doğrudan etkileyebilmekte, hatalı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir (Stile ve diğ., 2022; Yuan ve diğ., 2022). Bu bağlamda, karmaşık ortamlardan mikroplastiklerin uzaklaştırılması konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş, organik materyalin parçalanması ve ATR-FTIR, μ-RAMAN gibi yarı otomatik sistemler ile gerçekleştirilen kimyasal analizler sayesinde bu süreç daha etkin hale gelişmiştir (Schwaferts ve diğ., 2019; Shim ve diğ., 2017). Bu gelişmeler, zaman alıcı yöntemler kullanılsa dahi, çeşitli ortamlardaki mikroplastik konsantrasyonlarının daha güvenilir bir şekilde ölçülebilmesini mümkün kılmıştır (Di Fiore ve diğ., 2023). Bununla birlikte, yarı otomatik sistemlerle parçacık boyutunun değerlendirilebildiği mevcut tekniklerin tespit sınırları genellikle mikrometre düzeyinde kalmakta ve çoğu zaman kırınım limitlerine yaklaşmaktadır (Käppler ve diğ., 2018). Dedektör teknolojilerindeki

ilerlemeler gelecekte daha hızlı ölçümlere olanak sağlayabilecek olsa da günümüz teknolojisiyle tekli nanoplastik parçacıkların tespiti halen zorlu bir süreç olarak görülmektedir (Jung ve diğ., 2023).

Günümüzde herhangi bir ortamda partikül plastik dağılımını değerlendirme sürecinde karşılaşılan zorluklar; boyut ve bileşim açısından heterojen yapıya sahip plastik parçacıkların güvenilir şekilde temsil edebilecek doğru örnekleme protokollerinin oluşturulması, alt mikrometre boyut aralığındaki plastik partiküllerin ölçülmesi ve farklı sistemlerde plastik akılarının zaman içinde çözünmüş verilerle izlenebilmesi – ki bu da mevcut analitik iş akışlarının zaman ve emek açısından daha verimli hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır (NASEM, 2020). Mikroplastik analizlerinin günümüzde zaman ve laboratuvar imkanı gerektiren süreçler olması, bu kirleticilerin akıbeti, taşınımı ve biyolojik etkileşimlerine yönelik derinlemesine çalışmaları sınırlandırmaktadır (Dümichen ve diğ., 2017). Alt mikron ölçeğindeki partikül plastiklerin saha koşullarında ölçülmesine yönelik analitik yöntemlerde ilerlemeler kaydedilse de (Mintenig ve diğ., 2018) laboratuvar veya pilot ölçekli çalışmalar, farklı yaklaşım ve araçlar kullanarak yeni metodolojik olanaklar arayışındadır. Bu bağlamda, mikroplastik kirliliğinin çevresel etkilerini daha iyi anlamak ve metodolojik sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla, literatür araştırmaları su ve atıksu ortamından alınan örneklerde mikroplastik konsantrasyonunun belirlenmesi için potansiyel gösterge parametreleri belirlemeyi hedeflemektedir (Nguyen ve diğ., 2023).

Bu bağlamda, mikroplastik varlığını etkileyen su kalitesi parametrelerinin analiz edilmesi, mikroplastik konsantrasyonu ile çevresel koşullar arasındaki ilişkiyi ortaya koymak açısından yüksek derece önem arz etmektedir. Mevcut literatür genel olarak, bazı su kalitesi göstergeleri ile mikroplastik varlığı arasında anlamlı ilişkiler kurulabileceğini ileri sürerken; bazı çalışmalarda ise bu türden bir ilişkinin bulunmadığı ifade edilmektedir (Luo ve diğ., 2023; Abi Farraj ve diğ., 2024). Dolayısıyla, mikroplastiklerin çevresel ortamlardaki dağılımı, konsantrasyonu ve özellikleri ile fizikokimyasal su kalitesi parametreleri arasındaki bağlantılar hâlâ netlik kazanmamış, hatta bazı durumlarda çelişkili sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çelişkili bulgular, özellikle atıksu arıtma tesisleri özelinde mikroplastiklerin varlığını düzenli olarak izleyebilecek güvenilir gösterge parametrelerin belirlenmesini güçleştirmektedir. Mikroplastik varlığı ile su kalitesi değişkenleri arasındaki ilişkinin tüm atıksu arıtma sistemleri için geçerli olup olmadığı halen bir soru işareti olarak durmaktadır. Bu belirsizlikten hareketle, bu çalışma kapsamında, söz konusu ilişkilere yönelik bugüne kadar yapılmış bilimsel çalışmalar kapsamlı biçimde incelenmiş ve atıksu arıtma tesislerinde mikro ve nanoplastik konsantrasyonlarının düzenli olarak izlenmesine olanak tanıyabilecek potansiyel su kalitesi göstergelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yürütülen literatür taraması hem mevcut bilgilerin sentezlenmesini hem de ileride yapılacak çalışmalar için bilimsel bir temel oluşturmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda elde edilen bulgular, mikroplastik ve nanoplastik kirliliğiyle mücadele kapsamında su ve atıksu arıtma süreçlerinin daha etkin yönetimine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikro ve Nanoplastik Yükü, Tespiti ve Yaşanılan Zorluklar

Atıksu arıtma tesisleri (AAT'ler); evsel, endüstriyel ve yağmur sularını arıtmakta olup, bu kaynakların her biri önemli miktarda mikroplastik içermektedir. Literatürde evsel atıksular için 0,76-7827 MP/L (Ziajahromi ve diğ., 2017; Simon ve diğ., 2018), endüstriyel atıksular için 361-1030 MP/L (Chan ve diğ., 2021; Akarsu ve diğ., 2022), yağmur suları için ise 1,6–29,6 MP/L (Zhang ve diğ., 2023) arasında değişen mikroplastik konsantrasyonları bildirilmiştir (Tablo 1). Benzer arıtma prosesleri kullanılsa da yüksek mikroplastik içeriğine sahip atıksuların arıtımında elde edilen giderim verimleri tesisler arasında önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, A^2/O prosesine sahip bir AAT'de mikroplastik giderimi %66,1 iken, aynı prosesi kullanan üç farklı tesiste bu oran %89,2–93,6 arasında değiştiği rapor edilmiştir (Zhang ve diğ., 2021; Tang ve diğ., 2020). Benzer bir fark, oksidasyon hendeği prosesi kullanılan tesislerde de gözlenmiş olup, giderim oranları %53,6 ile %92,1 arasında değişmektedir (Yang ve diğ., 2019; Lv ve diğ., 2019). Yapılan değerlendirmelerde bu farkların operasyonel parametrelerdeki değişikliklerden kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır. Nitekim, Bilgin ve diğ. (2020) gerçekleştirdikleri araştırmada, daha uzun hidrolik bekleme süresinin (HRT; 6–8 saat), kısa sürelere (4 dakika) kıyasla mikroplastik giderimini %41 oranında artırdığını tespit etmiştir. Ayrıca, düşük pH koşullarında mikroplastiklerin daha küçük parçalara ayrıldığı ve bu durumun giderimi zorlaştırdığı bildirilmiştir (Bayo ve diğ., 2020).

AAT'lerin mikroplastik giderim verimliliğini daha iyi anlamak ve geliştirmek amacıyla, son yıllarda bu tesislerde bulunan mikroplastiklerin bolluğu, morfolojisi ve kimyasal bileşimi ayrıntılı olarak incelenmektedir. Literatürde yer alan çeşitli çalışmalara göre AAT'lerde mikroplastik giderim oranları %21,8 ile %98,4 arasında değişmektedir. Örneğin, Hajji ve diğ. (2024) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, girişte 1114 ± 90 adet/L olan mikroplastik bolluğu çıkışta 607 ± 101 adet/L'ye düşmüş ve %46 oranında bir giderim sağlanmıştır. Bayo ve diğ. (2020), giriş konsantrasyonu olarak 3,20 ± 0,67 adet/L, çıkışta ise 0,31 ± 0,06 adet/L ölçerek %90,3 giderim verimliliği bildirmiştir. Benzer şekilde, Can ve diğ. (2023) %96,17; Alavian Petroody ve diğ. (2020) %96,7; Huang ve diğ. (2023) ise %88,1 oranında mikroplastik giderimi elde ettiklerini raporlamıştır. Literatürde bildirilen en yüksek giderim oranlarından biri olan %98,4, Murphy ve diğ. (2016) tarafından kaydedilmiştir.

Bu çalışmalar yalnızca giderim verimliliklerini değil, aynı zamanda atık sularda bulunan mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal karakteristiklerini de ortaya koyarak, kaynakların ve davranış biçimlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Tesislerde tespit edilen mikroplastiklerin boyutları çoğunlukla 25–1000 µm arasında değişmekte olup, en yaygın aralıklar 100–500 µm ve 400–600 µm olarak öne çıkmaktadır. Şekil açısından değerlendirildiğinde, lif (fiber) formundaki mikroplastikler en baskın türdür. Örneğin, İran (%66,9–77,3), Çin (%85,9) ve Türkiye'deki (%92,6) AAT'lerde lif formundaki mikroplastikler en yüksek oranlarda saptanmıştır. Bu durum, özellikle çamaşır yıkama sularından kaynaklanan evsel mikroplastiklerin lif bazlı olduğunu göstermektedir (Cai ve diğ., 2020; Cesa ve diğ., 2017). Parçacıklar (fragment), granüller ve daha az sıklıkla film formundaki mikroplastikler de bu çalışmalarda rapor edilmiştir. Kimyasal bileşim açısından, polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), politen tereftalat (PET), polyester (PES), poliamid (PA), polivinil klorür (PVC) ve rayon gibi polimerler en yaygın olarak tespit edilen türlerdir. Bu çeşitlilik, söz konusu polimerlerin ambalaj, tekstil, otomotiv, inşaat ve tarım gibi birçok sektörde yoğun olarak kullanılmasıyla ilişkilendirilmektedir. PlasticsEurope (2020) verilerine göre 2019 yılında dünya genelinde üretilen plastiklerin %63,3'ünü PE, PP, PS ve PET oluşturmuştur. Renk bakımından ise siyah, beyaz ve şeffaf mikroplastikler baskın olup, bu durum polimerlerin yaşlanma süreçleri ve kaynakları hakkında bilgi sunmaktadır. Balestra ve Bellopede (2022) siyah olan partiküllerin diğer renkteki partiküllere kıyasla daha fazla kirleticiyi absorbe ettiğini ifade etmiştir. Yin ve diğ. (2019) rengini

kaybedip saydamlaşan plastiklerin deniz kamplumbağaları tarafından besin olarak tüketilme eğiliminde olduğunu belirtmiştir.

Mevcut arıtma teknolojileri, çeşitli aşamalardan oluşmasına ve mikroplastiklerin %80'den fazlasını giderme kapasitesine sahip olmasına rağmen (Sun ve diğ., 2019), arıtma çıkış suyunda kalan az miktardaki mikroplastikler dahi alıcı su ortamlarında ciddi çevresel riskler oluşturmaktadır. Bunun temel nedeni, arıtma sistemlerinin mikroplastikleri hedef alacak şekilde tasarlanmamış olması ve çıkış sularındaki mikroplastik seviyelerine ilişkin yasal sınırların bulunmamasıdır. Ayrıca, özellikle daha küçük boyutlara sahip olan nanoplastiklerin arıtım sistemlerinden kaçma ihtimali daha yüksektir. Alimi ve diğ. (2018), nanoplastiklerin arıtmanın ileri aşamalarında daha yoğun bulunduğunu belirtmiştir. Bunun temel nedeni atıksu arıtım sürecinde giderildiği düşünülen mikroplastiklerin önemli bir kısmının nanoplastik boyutuna (<1 μm) ingirgenmesinden kaynaklanmaktadır (Monira ve diğ., 2025). Bu parçalanmaların, büyük olasılıkla, AAT'lerde tipik olan hızlı karıştırma, pompalama ve köpürtme süreçleri sırasında üretilen güçlü su kesme kuvvetlerinden kaynaklandığı belirtilmektedir (Enfrin ve diğ., 2020; Pramanik ve diğ., 2021).

Bu kapsamda, mikroplastiklerin yanı sıra nanoplastiklerin de atıksu arıtma sistemlerinde varlığının belirlenmesi ve davranışlarının anlaşılması, yalnızca çevresel etkilerin değerlendirilmesi değil, aynı zamanda mevcut arıtım teknolojilerinin optimizasyonu açısından da büyük önem arz etmektedir. Ancak, mevcut yöntemsel sınırlılıklar, özellikle nano boyutta olan kirleticilerin sürekli izlenmesi açısından ciddi zorluklar yaratmaktadır (Abi Farraj ve diğ., 2024). Günümüzde atıksulardan mikroplastik ve nanoplastiklerin tespitine yönelik çeşitli teknikler kullanılmakta olup, bu yöntemler partiküllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir (Tablo 2). Genel kabul gören analiz adımları; örnekleme, morfolojik karakterizasyon, örneklerin sınıflandırılması, arıtım/ön işleme ve nicel analizden oluşmaktadır (Sönmez ve diğ., 2022). Bu adımların harmonize edilmesi ve geri kazanım oranlarının belirlenebilmesi için sentetik mikroplastik içeren örneklerle test edilmesi gerekmektedir. Ancak, nanoplastiklerin kantifikasyonu, kimyasal analizleri ve tespiti hâlâ önemli zorluklar barındırmaktadır (Nath ve diğ., 2020). Görsel tanımlama, düşük maliyetli ve yaygın kullanılan bir yöntem olsa da özellikle parçacık boyutu azaldıkça yanlış pozitif ve negatif oranlarında artış gözlemlenmektedir (Löder ve diğ., 2015).

Bu teknik zorluklarına rağmen, mikro ve nanoplastiklerin detaylı analizi, bu kirleticilerin çevresel yayılımını, kaynaklarını ve potansiyel etkilerini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, çevre mühendisleri ve araştırmacılar tarafından mikroplastik analizleri yoğun şekilde yürütülmektedir (Mai ve diğ., 2018; Ashrafy ve diğ., 2023). Uygulanan analiz teknikleri arasında; filtrasyon, mikroskopi (görsel inceleme, mikroskobik sayım), spektroskopik teknikler (fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), μ-Raman, taramalı elektron mikroskobu enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS)), termo-analitik yöntemler (piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (Py-GC/MS), termogravimetrik kütle spektrometrisi (TGA-MS), termal ekstraksiyon desorpsiyon-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (TED-GC-MS)) ve kombine yaklaşımlar (etiketleme, sıvı kromatografi, SEM-EDS) ile gerçekleştirilmektedir. Elde edilen veriler; çevresel etki değerlendirmesi, su kalitesi izleme, insan sağlığı ve gıda güvenliği gibi birçok alanda karar alma süreçlerine katkı sunmaktadır (Du ve diğ., 2021). FTIR ve Raman spektroskopisi, mikroplastiklerin kimyasal yapısını belirlemede yaygın olarak kullanılan spektroskopik yöntemlerdir. FTIR yüksek hassasiyet ve çoklu malzeme analizine olanak sağlarken; Raman spektroskopisi, seçiciliği yüksek, hızlı ve tahribatsız bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, her iki yöntem de küçük partiküllerin analizi, karışık örneklerin değerlendirilmesi ve cihaz maliyetleri gibi sınırlamalara sahiptir (Chen ve diğ., 2020; Araujo ve diğ., 2018). SEM-EDS kombinasyonu, mikroplastiklerin hem morfolojik özelliklerini hem de elementel bileşimini detaylı biçimde sunabilmektedir. Ancak bu yöntem, yüksek çözünürlüklü görüntüler sunmasına karşın örnek hazırlığının zorluğu, maliyet ve analiz süresi açısından kısıtlayıcıdır. Özellikle düşük mikroplastik konsantrasyonlarında

güvenilir sonuçlara ulaşmak zorlaşmaktadır (Gniadek & Dąbrowska, 2019). Pyro GC-MS ve TGA-MS, mikroplastiklerin bileşimini ayrıntılı biçimde analiz etmeye imkân sağlamaktadır. Pyro GC-MS yüksek seçicilik ve duyarlılıkla dikkat çekerken, TGA-MS polimerlerin termal bozunma davranışlarını nicel olarak değerlendirme yeteneğiyle öne çıkar. Bununla birlikte, bu yöntemler zaman alıcıdır, küçük partiküllerin tespitinde sınırlıdır ve uzmanlık gerektirir (Pipkin ve diğ., 2021; Mansa & Zou, 2021; de la Fuente ve diğ., 2022).

Termal ekstraksiyon-desorpsiyon GC/MS (TED-GC/MS) yöntemi, mikroplastik bileşenlerini hızlı ve etkin biçimde analiz etme imkânı sunsa da plastiklerin şekil ve boyutu hakkında bilgi vermez ve numune üzerinde tahribat oluşturur. Ayrıca, örnek ön işlemleri oldukça zahmetlidir (Zambrano-Pinto ve diğ., 2023). Mikroplastiklerin çevresel dağılımını izlemek için kullanılan etiketleme (tagging) yöntemleri, seçici işaretleme sayesinde kaynak takibini kolaylaştırmakta

Tablo 1. Farklı atıksu arıtma tesisleri giriş ve çıkış suyundaki mikroplastik konsantrasyonuna, giderim verimine ve karakterizasyonuna genel bakış

Giriş (MP/L)	Çıkış (MP/L)	Giderim Verimi (%)	Boyut (µm)	Renk	Şekil	Polimer	Kaynak
1114 ± 90	607 ± 101	46	500–100	-	lif	PET, PE, PVC	Hajji ve diğ. (2024)
3,20 ± 0,67	0,31 ± 0,06	90,3	400–600	-	parçacık ve lif	LDPE	Bayo ve diğ. (2020)
107,1 ± 40,2	4,1 ± 1,1	96,17	1000–500	siyah ve saydam	lif	PE, PP, PET	Can ve diğ. (2023)
12,6	0,43	96,7	37–300	-	parçacık ve lif	PS, PE	Alavian Petroody ve diğ. (2020)
50,7 ± 12,93	5,59 ± 2,00	88,10 ± 2,30	38–63	-	parçacık ve lif	PP, PE	Huang ve diğ. (2023)
1567,49 ± 413,18	131,35 ± 95,36	91,62	-	-	lif	PE, PA	Franco ve diğ. (2023)
9,2	0,84	90,87	25-420	saydam	lif	-	Takdastan ve diğ. (2021)
276,22 ± 104,98	208,55 ± 77,61	21,8-25,3	1,6-100	siyah, beyaz ve saydam	lif	PE, PET	Van Manh ve diğ. (2022)
6,54 ± 5,48	0,59 ± 0,53	79,3–97,8	63-125	beyaz	granül	PP	Long ve diğ. (2019)
196 ± 89,31	9,04 ± 2,63	90-97,2	100-500	-	lif	Rayon	Xu ve diğ. (2019)
4,40 ± 3,85	0,39 ± 0,36	89–93,6	200-500	-	parçacık ve lif	PP, PE	Zhang ve diğ. (2021)
2,5 ± 0,3	0,4 ± 0,1	84	500-1000	-	lif	Akrilonitril bütadien stiren	Magni ve diğ. (2019)
15,70 ± 5,20	0,25 ±0,04	98,4	598	kırmızı	parçacık	PES	Murphy ve diğ. (2016)
12,03 ± 1,29	0,59 ± 0,22	95	0-600	siyah	lif	PET	Yang ve diğ. (2019)

Bununla birlikte, sadece etiketlenmiş plastiklerde uygulanabilir olması, yalancı pozitif sonuçlara yol açabilmesi ve karmaşık örnek matrislerinde güvenilirliğin azalması gibi sınırlamalara sahiptir (Kukkola ve diğ., 2022). Sıvı kromatografi, mikroplastiklerin kimyasal

özelliklerine göre ayrıştırılmasını ve analizini mümkün kılmakla birlikte; numune hazırlama, analiz süresi ve yüksek maliyet gibi engeller taşır. Ayrıca, yüksek moleküler ağırlıklı ve çoğu çözücüde çözünmeyen plastik türlerinin analizi kısıtlıdır (Martín-Gómez ve diğ., 2024). Son olarak, SEM ile dispersif X-ışını spektroskopisi, yüzey özelliklerinin yanı sıra elementel kompozisyonu da analiz ederek mikroplastiklerin kaynaklarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlar. Ancak, yüzey yükleri, analiz derinliği sınırlamaları ve homojen olmayan örneklerde temsiliyet problemi gibi sınırlamaları göz önünde bulundurulmalıdır (Mushtak ve diğ., 2024). Tüm bu yöntemlerin sunduğu farklı analiz kapasiteleri, AAT'lerde mikroplastiklerin doğru biçimde tanımlanabilmesi için çoklu analiz stratejilerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Mevcut teknolojilerle her ne kadar önemli bilgiler elde edilebilse de nanoplastiklerin tespiti, karışık matrislerdeki mikroplastiklerin ayrıştırılması ve otomatik analiz süreçlerinin iyileştirilmesi gibi konular hâlâ önemli araştırma alanları olarak varlığını sürdürmektedir.

Ancak bu tekniklerin her birinin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunmaktadır. Özellikle nanoplastiklerin toplanması ve incelenmesi teknik açıdan ciddi zorluklar doğurmakta, bu da plastik kirliliğinin düzeyinin eksik değerlendirilmesine yol açmaktadır (Fang ve diğ., 2024). Ayrıca, analiz yöntemlerinin standardizasyonundaki eksiklikler, farklı çalışmalar arasında elde edilen verilerin karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmakta ve yorum farklılıklarına neden olmaktadır (Chae ve diğ., 2015; Du ve diğ., 2021). En temel analiz yöntemlerinden biri olan görsel inceleme ve mikroskobik sayım, optik mikroskoplar aracılığıyla doğrudan gözleme imkânı sağlamaktadır. Bu yöntem, mikroplastiklerin morfolojik olarak tanımlanmasında etkili olmakla birlikte, tanımlamanın operatör bağımlılığı ve zaman alıcılığı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, nanopastik türlerinin ve boyut dağılımlarının doğru biçimde belirlenmesi bu yöntemle oldukça zordur (Lv ve diğ., 2021).

Tablo 2. Mikroplastik tespiti ve analiz yöntemlerinin sınırlamaları.

Analiz Metodu	Metot İçeriği	Metodolojik Kısıtlamalar	Referans
Görsel analiz ve sayım	MP'lerin optik mikroskop kullanılarak doğrudan gözlemlenmesi hızlı tanımlamaya olanak sağlar.	▪ Zaman alıcı, ▪ Mikroplastik tiplerini belirlemede zorluk, ▪ Operatör bağımlılığı, mikroplastik boyut dağılımını belirlemede zorluk, ▪ Otomasyon zorlukları	Lv ve diğ. (2021)
FTIR	Moleküler yapıya dayalı tanımlama, polimer türleri hakkında detaylı bilgi sağlar.	▪ Küçük parçacıkların analizi, ▪ Kontaminasyon riski, ▪ Mikroplastik karışımlarının analizi, ▪ Eğitim gereksinimi, ▪ Yüzey analizi zorlukları	Chen ve diğ. (2020)
Raman Spectroscopy	Lazerle oluşturulan saçılma yoluyla moleküler tanımlama, çeşitli polimer tipleri için etkilidir.	▪ Zayıf sinyaller, ▪ Floresan arka plan, ▪ Analiz derinliği, ▪ Ekipman maliyeti, ▪ Numune floresansı	Araujo ve diğ. (2018)
SEM dispersive X-ray spectrometer	Elementel kompozisyonun analizi, mikroplastikleri ve kaynaklarını belirlemede yardımcıdır.	▪ Örnek hazırlama zorlukları, ▪ Yüzey yükleri ve yarı iletkenler, ▪ Yüksek maliyet, ▪ Analizde derinlik sınırlamaları, ▪ Örneklemenin temsililiği	Mushtak ve diğ. (2024)

Tablo 2. Devamı

SEM-EDS	Karmaşık numuneler için morfoloji ve element kompozisyonunun aynı anda görselleştirilmesi faydalıdır.	▪ Örnek hazırlama zorlukları, ▪ Düşük mikroplastik konsantrasyonu, ▪ Mikroplastik tiplerinin belirlenmesinde zorluk, ▪ Yoğun örneklerin analizi, ▪ Maliyet pahalı, ▪ Hassas örnek hazırlama gereksinimi, ▪ Çok sayıda örneği işlemeye uygun olmaması	Gniadek & Dąbrowska (2019)
Pyro GC-MS	İşlem, piroliz ürünlerine dayalı olarak mikroplastik bileşenlerinin ayrıştırılması ve tanımlanmasını, ayrıntılı kimyasal bilgi sağlanmasını içerir.	▪ Numune hazırlama zorlukları, ▪ Daha uzun analiz süresi, ▪ Çok küçük parçacıkları tespit etmede kısıtlama, ▪ Ekipman maliyeti, ▪ Operatör eğitim gereksinimi	Pipkin ve diğ. (2021)
TGA-MS	Yöntem, termal davranış ve kütle değişimlerinin incelenmesini, böylece polimer bileşimi hakkında bilgi sağlamayı içerir.	▪ Karmaşık polimer karışımlarını ayırt etmede sınırlı, ▪ Numune hazırlama zorlukları, ▪ Operatör bağımlılığı, ▪ Ekipman maliyeti, ▪ Analiz süresi	de la Fuente ve diğ. (2022)
TED-GC/MS	Termal ekstraksiyon, bileşenlerin detaylı analiz için tanımlanmasında kullanışlı bir yöntemdir.	▪ Plastiklerin boyutu ve şekli hakkında bilgi içermiyor, ▪ Plastik malzemelere zarar veriyor ▪ Zahmetli bir numune ön işlemi gerektiriyor.	Zambrano-Pinto ve diğ. (2023)
Etiketleme yöntemi	Mikroplastiklerin kaynak takibi için işaretlenmesi çevresel dağılıma ilişkin çalışmaları kolaylaştırır.	▪ Etiket kararlılığı, ▪ Yanlış pozitifler, ▪ Etiketli plastiklerle sınırlı, ▪ Karmaşık örnek matrisi, ▪ Yöntem geliştirme	Kukkola ve diğ. (2022)
Liquid chromatography	İşlem, mikroplastik bileşenlerinin kimyasal özelliklerine göre ayrılması ve tanımlanmasını içerir.	▪ Örnek hazırlama zorlukları, ▪ Analiz süresi, ▪ Yüksek maliyet, ▪ Operatör eğitim gereksinimi, ▪ Yüksek moleküler ağırlığa sahip mikroplastiklerin varlığı ▪ Çoğu çözücüde sınırlı çözünürlük	Martín-Gómez ve diğ. (2024)

3. ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE MİKROPLASTİK TESPİTİNDE KULLANILAN İNDİKATÖR PARAMETRELER

Su kalitesi, genellikle bir litre sudaki kirlilik miktarına göre değerlendirilir. Su tüketiminin farklı amaçlar için belirlenen standart değerleri ve sınırları bulunmaktadır; bu sınırlar kullanım amacına göre değişiklik gösterir. Örneğin, tarımsal sulamada kullanılan su için geçerli kalite standartları ile içme suyu için belirlenen standartlar birbirinden farklıdır; aynı şekilde endüstriyel ve evsel kullanım amaçlı sular için de farklı kalite kriterleri tanımlanmıştır (Jothivenkatachalam ve diğ., 2010). Su kalitesini belirlemek amacıyla çeşitli kılavuzlar ve ölçüm cihazları kullanılarak analizler yapılır. Bu analizlerde genellikle fizikokimyasal parametreler esas alınır. Sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik (Eİ), bulanıklık, toplam çözünmüş katı madde (TDS), çözünmüş oksijen (DO), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve tuzluluk gibi parametreler su kalitesinin belirlenmesinde temel unsurlar olarak kabul edilir ve düzenli olarak ölçülür (Patil ve diğ., 2012; Tao ve diğ., 2019). Bu nedenle, mikroplastik kirliliği üzerine yapılan son dönem çalışmalar, AAT, içme suyu arıtma tesisleri ve yüzey sularında mikroplastik varlığının farklı çevresel parametrelerle korelasyonunu incelemiştir (Tablo 3). Atıksu arıtma tesislerinde yürütülen çalışmalar, mikroplastiklerin yoğunluğunun ve davranışlarının çeşitli fiziksel ve kimyasal parametrelerle pozitif ve negatif yönde ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Örneğin, İspanya'nın Cabezo Beaza bölgesinde gerçekleştirilen bir çalışmada, mikroplastik yoğunluğu ile amonyum azotu (NH_4^+-N) ve toplam azot (TN) arasında sırasıyla -0,558 ve -0,548 değerlerinde negatif korelasyonlar tespit edilmiştir (Bayo ve diğ., 2020). Bu bulgu, artan azot konsantrasyonlarının mikroplastik bolluğunda azalmaya eşlik edebileceğini göstermektedir.

Arjantin'in Languevyl bölgesindeki bir diğer çalışmada, Eİ ile mikroplastik bolluğu arasında oldukça yüksek bir korelasyon (R^2=0,891) belirlenmiştir (Montecinos ve diğ., 2024). Benzer şekilde, İsviçre'de yürütülen araştırmalarda askıda katı madde (AKM) ile mikroplastik konsantrasyonu arasında r=0,940 düzeyinde güçlü bir ilişki saptanmıştır (Frehland ve diğ., 2020). Bu durum, mikroplastiklerin sudaki katı maddelere bağlanarak taşınabileceğini ve katı madde ölçümlerinde potansiyel pozitif hataya yol açabileceğini düşündürmektedir. Güney Kore'nin Gumi kentinde yapılan bir çalışmada, toplam organik karbon (TOK) ile mikroplastik bolluğu arasındaki ilişki oldukça yüksek bulunmuş ve R^2 değeri 0,980 olarak rapor edilmiştir (Kim ve diğ., 2022). Bu sonuç, organik içerikli atıksuların mikroplastiklerin varlığıyla yakından ilişkili olabileceğine işaret etmektedir. Hindistan'ın Kolkata şehrinde gerçekleştirilen bir çalışmada ise mikroplastik yoğunluğu ile bulanıklık (r=0,750), toplam fosfor (TP) ve pH arasında pozitif korelasyonlar bulunurken; klorür, sülfat ve toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) ile anlamlı bir ilişki saptanamamıştır (Sarkar ve diğ., 2021). Çin'in Changsha kentinde yapılan bir diğer çalışmada, mikroplastik bolluğu ile kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam fosfor ve NH_4^+-N arasında pozitif ilişkiler gözlemlenmiş, ancak AKM ile anlamlı bir korelasyon tespit edilmemiştir (Luo ve diğ., 2023). Bu sonuç, mikroplastiklerin her ortamda aynı şekilde askıda katı maddelerle ilişkilendirilmediğini ve yerel proses koşullarının belirleyici olabileceğini göstermektedir. İçme suyu arıtma tesislerine yönelik az sayıdaki çalışmalardan biri olan Güney Kore'deki Nakdong tesisinde mangan (Mn) ile mikroplastik arasında pozitif bir ilişki bildirilmişken TOK ile geçerli bir ilişki görülmemiştir. Ayrıca, Kanada'da yapılan bir çalışmada ise bulanıklık ile mikroplastik varlığı arasında yüksek düzeyde pozitif korelasyon (r=0,94) bulunmuştur (Jung ve diğ., 2022).

Yüzey sularında yapılan araştırmalarda da benzer korelasyon eğilimleri gözlemlenmiştir. Örneğin, Japonya'da BOİ ile mikroplastik bolluğu arasında R^2=0,340 düzeyinde bir ilişki belirlenmişken, Hindistan'ın Ganga Nehri'nde yapılan bir çalışmada bu değer R^2=0,701 olarak daha yüksek rapor edilmiştir (Kataoka ve diğ., 2019; Sarkar ve diğ., 2019). Çin'in Yantai kentindeki araştırmada mikroplastik bolluğu ile bulanıklık, silikat ve TOK arasında pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir (Zhang ve diğ., 2020). Tayland'ın Bangkok şehrinde yürütülen bir çalışmada ise mikroplastiklerle, bulanıklık (R^2=0,930), toplam katı madde (TKM; R^2=0,900), Eİ (R^2=0,910) ve BOİ (R^2=0,690) arasında güçlü ilişkiler belirlenmiştir (Eamrat ve diğ., 2021).

Genel olarak, mikroplastik giderim verimliliği yalnızca mikroplastik bolluğuna değil, aynı zamanda atıksuyun fizikokimyasal ve biyolojik özellikleriyle de ilişkilidir. Luo ve diğ. (2023) tarafından Çin'in Changsha kentindeki bir AAT'de bir yıl boyunca yürütülen çalışmada, mikroplastiklerin gideriminde kullanılan döngüsel aktif çamur teknolojisinin oldukça verimli olduğu ve bu verimin, bazı su kalitesi parametreleriyle pozitif korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. Bu parametreler arasında karışık sıvı askıda katı madde (MLSS), HRT, katı madde bekleme süresi (SRT), KOİ, $BOİ_5$, toplam azot (TN), amonyum-azot (NH_4^+-N) ve toplam fosfor (TP) yer almaktadır. Bununla birlikte, mikroplastik bolluğu ile su kalitesi göstergeleri arasındaki pozitif ilişkinin yalnızca yağışsız dönemlerde geçerli olduğu, yağışlı dönemlerde ise bu ilişkinin yön değiştirdiği bildirilmiştir.

Özellikle birleşik kanalizasyon sistemleri ile ayrı sistemler arasında mikroplastik konsantrasyonları açısından belirgin farklılıklar bulunmuştur; bu farklılıklar büyük ölçüde kanalizasyon altyapısının türüne, hidrolik yüküne ve bölgesel iklim koşullarına bağlı olarak şekillendirilmektedir. Küresel iklim değişikliği senaryoları doğrultusunda, yağış rejimlerinde ve mikroplastiklerin çevresel aşınma süreçlerinde meydana gelecek değişimler, atıksularda mikroplastiklerin dağılımını önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir (Luo ve diğ., 2023).

Tablo 3. Atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik konsantrasyonları ile gösterge parametreleri arasındaki ilişkiye yönelik seçilmiş literatür araştırmaları.

Çalışma Alanı	Gösterge Parametre	İlişkilendirilemeyen Parametre	Kaynak
Atıksu Arıtma Tesisi			
Cabezo Beaza, İspanya	NH_4^+-N (r=−0,558, p=0,002) Toplam azot (r=−0,548, p=0,003)	-	Bayo ve diğ. (2020)
Langueyú, Arjantin	Eİ (R^2=0,891)	-	Montecinos ve diğ. (2024)
Kanada	TSS	-	Abi Farraj ve diğ. (2024)
İsviçre	AKM (r=0,940)	-	Frehland ve diğ. (2020)
Kassel, Almanya	Bulanıklık (R^2=0,545)	-	Roscher ve diğ. (2022)
Xiamen, Çin	AKM (R^2=0,966)	-	Long ve diğ. (2019)
Gumi, Güney Kore	TOK (R^2=0,890)	-	Kim ve diğ. (2022)
Kolkata, Hindistan	Bulanıklık (r=0,750), toplam fosfor, pH	Klorür, Sülfat, TÇKM, Eİ	Sarkar ve diğ. (2021)
Changsha, Çin	KOİ, toplam fosfor, toplam azot ve NH_4^+-N	AKM	Luo ve diğ. (2023)

Tablo 3. Devamı

Çalışma Alanı	Gösterge Parametre	İlişkilendirilemeyen Parametre	Kaynak
İçme Suyu Arıtma Tesisi			
Nakdong, Güney Kore	Mn	TOK	Jung ve diğ. (2022)
-	Bulanıklık (r=0,94)	-	Lapointe ve diğ. (2020)
Yüzey Suları			
Japonya	BOİ (R^2=0,340)	pH, AKM, toplam azot, toplam fosfor	Kataoka ve diğ. (2019)
Ganga, Hindistan	BOİ (r=0,855), toplam fosfor (r=0,701)	Eİ (r=0,145), toplam azot (r=0,329)	Sarkar ve diğ. (2019)
Yantai, Çin	Bulanıklık, silikat ve TOK	-	Zhang ve diğ. (2020)
North Shore Kanalı, Amerika Birleşik Devletleri	Eİ	-	Hollein ve diğ. (2017)
Surabaya, Endonezya	-	KOİ ve AKM	Junior ve diğ. (2024)
Chennai, Hindistan	-	pH, Eİ, KOİ, BOİ, TÇKM	Somasundaram ve Radhakrishnan (2023)
Brantas, Endonezya	Sıcaklık, BOİ, AKM, Bulanıklık	toplam fosfor, toplam azot, pH	Buwono ve diğ. (2021)
Thohoyandou, Güney Afrika	-	Eİ, TÇKM, pH, sıcaklık	Dalu ve diğ. (2021)
Bangkok, Tayland	Bulanıklık (R^2=0,930), TKM (R^2=0,900), Eİ (R^2=0,910) ve BOİ (R^2=0,690)	-	Eamrat ve diğ. (2021)

AAT'lere ulaşan mikroplastiklerin miktarı ve giderim verimliliği, yalnızca fiziksel ve kimyasal parametrelerle değil, aynı zamanda işletme koşullarıyla da yakından ilişkilidir. Yapılan birçok çalışmada, mikroplastiklerin arıtma sürecindeki davranışlarını etkileyen önemli faktörler arasında AKM, HRT, çalkantı/türbülans durumu ve organik madde içerikleri yer almaktadır (Long ve diğ., 2019; Kim ve diğ., 2022). İspanya'da gerçekleştirilen bir araştırmada, yüksek askıda katı madde konsantrasyonlarının, giriş suyundaki mikroplastik bolluğu ile güçlü bir negatif ilişki (r=-0,587) gösterdiği belirlenmiştir (Bayo ve diğ., 2020). Yani, askıda katı madde oranı yüksek olan giriş suyunda mikroplastik sayısı düşük, ancak boyutları büyük olarak gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, mikroplastiklerin organik maddelerle birleşerek agrega oluşturabileceğini, bu durumun özellikle büyük boyutlu mikroplastiklerin hızlı çökelmesine veya batmasına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Nitekim, 1 mm'den daha büyük boyuttaki mikroplastiklerin çoğunlukla yüksek askıda katı madde içeren atıksularda bulunduğu; buna

karşılık 1 mm'den daha küçük boyuttaki mikroplastiklerin ise düşük sıklıkta tespit edildiği rapor edilmiştir.

AAT'lerde her bir ünitenin işletme koşulları da mikroplastiklerin giderim oranını önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle, HRT olarak bilinen bekleme süresi, belirli bir hacimdeki suyun arıtma ünitesinden geçme süresi olup, bu sürenin yüksek olması suyun daha yavaş akmasına, düşük olması ise daha hızlı akmasına neden olur (Kwon ve diğ., 2020). Önceki bir çalışmada, çökeltme tankında uygulanan bekleme süresinin mikroplastiklerin giderimine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, düşük HRT'nin yüksek giderim oranı sağladığı; yüksek HRT'de ise daha düşük bir giderim oranı elde edildiği ortaya konmuştur. Bu durum, düşük bekleme süresinde atıksu akış hızının azalması ve mikroplastiklerin çökelme eğiliminde olması ile açıklanabilir (Kwon ve diğ., 2020). Bilgin ve diğ. (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada, türbülans ve HRT'nin mikroplastik giderimine etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışmada havalandırmalı kum tutucu ile çökeltme tankları karşılaştırılmıştır. Havalandırmalı kum tutucunun bekleme süresi 4 dakika olup yüksek türbülans içermekte, çökeltme tanklarının ise 6–8 saatlik uzun bir bekleme süresi ve düşük türbülans düzeyi bulunmaktadır. Kum tutucuda mikroplastik miktarı %30 oranında azaltılarak 30,7 MP/L'den 21,7 MP/L'ye düşürülmüştür. Ancak daha uzun HRT'ye sahip çökeltme tanklarında bu oran %71'e ulaşmış ve mikroplastik bolluğu 6,3 MP/L'ye kadar düşürülmüştür. Bu sonuçlar, uzun bekleme süresi ve düşük türbülans gibi istikrarlı akış koşullarının mikroplastik giderimi üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Öte yandan, bazı durumlarda mikroplastik kirliliği ile belirli parametreler arasında herhangi bir korelasyon bulunamaması, mikroplastik kaynaklarının araştırma kapsamında ele alınmayan başka faktörlere bağlı olabileceğini düşündürmektedir. Bu faktörlerden biri de düzensiz ve kontrolsüz şekilde yüksek miktarda mikroplastik salımına yol açabilen sanayi faaliyetleridir. Bu nedenle, AAT'lere mikroplastik girişi ile ilgili kaynakların ve girdilerin daha iyi anlaşılabilmesi için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

4. SONUÇ

Mikroplastiklerin tanımlanması, sınıflandırılması ve terminolojisi konusunda bir görüş birliği bulunmamaktadır, bu da mikroplastiklerin analizindeki standardizasyonu ve karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmaktadır. Çeşitli su matrislerinde mikroplastiklerin örneklenmesi, izole edilmesi, çıkarılması ve tanımlanmasına yönelik farklı protokoller ve teknikler kullanılmakta olup, bu da sonuçların doğruluğunu ve karşılaştırılabilirliğini azaltmaktadır. MP'lerin analizinde kullanılan yöntemler, fiziksel ve kimyasal özelliklerini tam olarak karakterize edemeyebilir, bu da mikroplastiklerin kaynaklarını, etkilerini ve kaderini belirlemeyi yetersiz hale getirebilmektedir. Bu sorunu çözmek adına, su ve atıksu sistemlerinde çevresel risk değerlendirmesi (kaynaklar, dağılım, etkiler ve mikroplastiklerin kaderi) için mikroplastiklerin örneklenmesi ve analizi için standardize edilmiş ve optimize edilmiş analiz yöntemlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca, bazı analiz yöntemlerinin maliyetli, zaman alıcı, karmaşık, hassas ya da seçici olmaması gibi sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sebeple, mikroplastiklerin hızlı, ucuz, basit, hassas ve seçici tespiti için yeni ve yenilikçi teknikler ile biyosensörlerin geliştirilmesi, mikroplastik kirliliğini önlemek, azaltmak ve yönetmek için stratejilerin ve politikaların geliştirilmesinde önemli bir adım olabilir. Bu, insan sağlığı ve ekosistemler için mikroplastiklerin risklerini değerlendirme açısından önemli bir araç olabilir (Özgenç, 2024).

Literatürde sunulan veriler değerlendirildiğinde AKM, bulanıklık, BOİ, toplam fosfor, Eİ ve TOK, mikroplastik yoğunluklarıyla en sık korele edilen parametreler olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayıları yüksek olan parametreler genellikle fiziksel (AKM, bulanıklık) ve organik yükü temsil eden parametrelerdir (BOİ, TOK, KOİ). Besin maddeleri (toplam fosfor, NH_4^+-N) ile de pozitif ilişkiler sıkça tespit edilmiştir. Buna karşın, sülfat, klorür, TÇKM gibi bazı parametreler

çoğu çalışmada anlamlı bir korelasyon sergilememiştir. Bu bulgular, mikroplastiklerin çevresel davranışının yalnızca miktarlarıyla değil, aynı zamanda bulundukları ortamın fizikokimyasal özellikleriyle de derinden ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Yapılan incelemelerde, korelasyon gösterme potansiyeli taşıyor olsa da sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik gibi bazı parametrelerin etkilerinin çok az çalışmada detaylandırılıldığı görülmektedir. Yine literatür araştırmaları korelasyon sürecinde doğrudan mikroplastik bolluğu ile ilişki kurulmasının yanı sıra mevsimsel değişimlerin, polimer türlerinin ve şekillerinin dağılımının yakından incelenerek bu faktörlerin de etkilerinin ortaya koyulması gerekliliğini vurgulamıştır. Ayrıca bu parametrelerin her biri için eşik değerler ve uyarı seviyeleri belirlenerek mikroplastik kirliliği yönetiminde rehberlik edici metrikler geliştirilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

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

YAZAR KATKISI

Yazar 1 ve Yazar 2 çalışmanın kavramsal çerçevesinin oluşturulması, kapsamının belirlenmesi, literatür taraması ve ilgili çalışmaların değerlendirilmesi, içeriğin yapılandırılması, metnin yazımı ve eleştirel gözden geçirilmesi süreçlerine eşit düzeyde katkı sağlamıştır. Her iki yazar da makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

KAYNAKLAR

1. Abi Farraj, S., Lapointe, M., Kurusu, R.S. (2024) Targeting nanoplastic and microplastic removal in treated wastewater with a simple indicator, *Nature Water*, 2, 72–83. doi: 10.1038/s44221-023-00177-3

2. Akarsu, C., Kumbur, H., Gökdağ, K., Kıdeyş, A. E. and 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. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110776

3. Alavian Petroody, S. S., Hashemi, S. H. and 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. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128179

4. Alimi, O. S., Farner Budarz, J., Hernandez, L. M. and Tufenkji, N. (2018) Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport, *Environmental science & technology*, 52(4), 1704–1724. doi: 10.1021/acs.est.7b05559

5. Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M. and Ribeiro-Claro, P. J. (2018) Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects, *Water Research*, 142, 426–440. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.060

6. Ashrafy, A., Liza, A. A., Islam, M. N., Billah, M. M., Arafat, S. T., Rahman, M. M. and Rahman, S. M. (2023) Microplastics pollution: A brief review of its source and abundance in different aquatic ecosystems, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100215. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100215

7. Aslam, S., Khurram, A., Hussain, R., Qadir, A. and Ahmad, S. R. (2023) Sources, distribution, and incipient threats of polymeric microplastic released from food storage plastic materials, *Environmental monitoring and assessment*, 195(6), 638. doi: 10.1007/s10661-023-11242-5

8. Balestra, V., & Bellopede, R. (2022). Microplastic pollution in show cave sediments: First evidence and detection technique. *Environmental pollution*, *292*, 118261. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118261

9. Bayo, J., Olmos, S. and López-Castellanos, J. (2020) Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors, *Chemosphere*, 238, 124593. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124593

10. Bilgin, M., Yurtsever, M. and Karadagli F. (2020) Microplastic removal by aerated grit chambers versus settling tanks of a municipal wastewater treatment plant, *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101604. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101604

11. Buwono, N. R., Risjani, Y. and Soegianto, A. (2021) Distribution of microplastic in relation to water quality parameters in the Brantas River, East Java, Indonesia, *Environmental Technology and Innovation*, 24, 101915. doi: 10.1016/j.eti.2021.101915

12. Can, T., Üstün, G. E. and Kaya, Y. (2023) Characteristics and seasonal variation of microplastics in the wastewater treatment plant: The case of Bursa deep sea discharge, *Marine pollution bulletin*, 194(Pt A), 115281. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115281

13. Chae, D.-H., Kim, I.-S., Kim, S.-K., Song, Y. K. and Shim, W.J. (2015) Abundance and distribution characteristics of microplastics in surface seawaters of the Incheon/Kyeonggi coastal region, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69, 269–278. https://doi.org/10.1007/s00244-015-0173-4

14. Chan, C. K., Park, C., Chan, K. M., Mak, D. C., Fang, J. K. and Mitrano, D. M. (2021) Microplastic fibre releases from industrial wastewater effluent: a textile wet-processing mill in China, *Environmental Chemistry*, 18. doi: 10.17863/CAM.62683

15. Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H. and Luo, Y. (2020) Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 18, 14–19. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.05.004

16. Dalu, T., Banda, T., Mutshekwa, T., Munyai, L. F. and Cuthbert, R. N. (2021) Effects of urbanisation and a wastewater treatment plant on microplastic densities along a subtropical river system, *Environmental science and pollution research*, 28(27), 36102–36111. doi: 10.1007/s11356-021-13185-1

17. de la Fuente, A. M., Marhuenda-Egea, F. C., Ros, M., Pascual, J. A., Saez-Tovar, J. A., Martinez-Sabater, E. and Peñalver, R. (2022) Thermogravimetry coupled with mass spectrometry successfully used to quantify polyethylene and polystyrene microplastics in organic amendments, *Environmental Research*, 213, 113583. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113583

18. Di Fiore, C., Sammartino, M. P., Giannattasio, C., Avino, P. and Visco, G. (2023) Microplastic contamination in commercial salt: An issue for their sampling and quantification, *Food chemistry*, 404(Pt B), 134682. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.134682

19. Du, S., Zhu, R., Cai, Y., Xu, N., Yap, P.-S., Zhang, Y., He, Y. and Zhang, Y. (2021) Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: A review, *RSC Advances*, 11(26), 15762–15784. Doi: 10.1039/D1RA00880C

20. Dümichen, E., Eisentraut, P., Bannick, C. G., Barthel, A. K., Senz, R. and Braun, U. (2017) Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method, *Chemosphere*, 174, 572–584. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.010

21. Eamrat, R., Taweesan, A. and Pussayanavin, T. (2022) Assessment of Microplastics Distribution and Related Water Quality in an Urban Canal, *Thailand. Pollution*, 8(4), 1172-1184. doi: 10.22059/poll.2022.340679.1407

22. Enfrin, M., Lee, J., Gibert, Y., Basheer, F., Kong, L. and Dumée, L. F. (2020) Release of hazardous nanoplastic contaminants due to microplastics fragmentation under shear stress forces, *Journal of hazardous materials*, 384, 121393. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121393

23. Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G. and Reisser, J. (2014) Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea, *PloS one*, 9(12), e111913. doi: 10.1371/journal.pone.0111913

24. Fang, C., Luo, Y. and Naidu, R. (2024) Advancements in Raman imaging for nanoplastic analysis: Challenges, algorithms and future Perspectives, *Analytica chimica acta*, 1290, 342069. doi: 10.1016/j.aca.2023.342069

25. Franco, A. A., Iglesias-Arroyo, D., Egea-Corbacho, Á., Martín-García, A. P., Quiroga, J. M. and Coello, M. D. (2023) Influence of tourism on microplastic contamination at wastewater treatment plants in the coastal municipality of Chiclana de la Frontera, *Science of the total environment*, 900, 165573. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165573

26. Frehland, S., Kaegi, R., Hufenus, R. and Mitrano, D. M. (2020) Long-term assessment of nanoplastic particle and microplastic fiber flux through a pilot wastewater treatment plant using metal-doped plastics, *Water research*, 182, 115860. doi: 10.1016/j.watres.2020.115860

27. Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science advances*, *3*(7), e1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782

28. Gniadek, M. and Dąbrowska, A. (2019) The marine nano-and microplastics characterisation by SEM-EDX: The potential of the method in comparison with various physical and chemical approaches, *Marine Pollution Bulletin*, 148, 210–216. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.067

29. Hajji, S., Ben-Haddad, M., Abelouah, M. R., Rangel-Buitrago, N. and Ait Alla, A. (2024) Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge, *Science of the total environment*, 945, 174115. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174115

30. Hoellein, T.J., McCormick, A.R., Hittie, J., London, M.G., Scott, J.W. and Kelly, J.J. (2017) Longitudinal patterns of microplastic concentration and bacterial assemblages in surface and benthic habitats of an urban river, *Freshwater Science*, 36:3, 491-507. https://doi.org/10.1086/693012

31. Huang, J., Wang, L., Liu, J., Qian, X. and Wu, Y. (2023) Abundance, characteristics, and removal of microplastics in different wastewater treatment plants in a Yangtze River Delta city of China, *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103987. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103987

32. Iordachescu, L., Nielsen, R. V., Papacharalampos, K., Barritaud, L., Denieul, M. P., Plessis, E., Baratto, G., Julien, V. and Vollertsen, J. (2024) Point-source tracking of microplastics in sewerage systems. Finding the culprit, *Water research*, 257, 121696. doi: 10.1016/j.watres.2024.121696

33. Jothivenkatachalam, K., Nithya, A. and Mohan, S. C. (2010) Correlation analysis of drinking water quality in and around Perur block of Coimbatore District, Tamil Nadu, India, *Rasayan Journal of Chemistry*, 3(4), 649–654.

34. Jung, J. W., Kim, S., Kim, Y. S., Jeong, S. and Lee, J. (2022) Tracing microplastics from raw water to drinking water treatment plants in Busan, South Korea, *Science of the total environment*, *825*, 154015. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154015

35. Jung, S., Raghavendra, A. J. and Patri, A. K. (2023) Comprehensive analysis of common polymers using hyphenated TGA-FTIR-GC/MS and Raman spectroscopy towards a database for micro- and nanoplastics identification, characterization, and quantitation, *NanoImpact*, 30, 100467. doi: 10.1016/j.impact.2023.100467

36. Junior, T., Nisaa, A. F., Karnaningroem, N. and Mardyanto, M. A. (2024) The presence of microplastics in Surabaya coastal area and its correlation with conventional water quality parameters, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1414(1), 012038. doi: 10.1088/1755-1315/1414/1/012038

37. Käppler, A., Fischer, M., Scholz-Böttcher, B. M., Oberbeckmann, S., Labrenz, M., Fischer, D., Eichhorn, K. J. and Voit, B. (2018). Comparison of μ-ATR-FTIR spectroscopy and py-GCMS as identification tools for microplastic particles and fibers isolated from river sediments, *Analytical and bioanalytical chemistry*, 410(21), 5313–5327. doi: 10.1007/s00216-018-1185-5

38. Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K. and Hinata, H. (2019) Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan, *Environmental pollution*, *244*, 958–965. doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.111

39. Kim, M. J., Na, S. H., Batool, R., Byun, I. S. and Kim, E. J. (2022) Seasonal variation and spatial distribution of microplastics in tertiary wastewater treatment plant in South Korea, *Journal of hazardous materials*, 438, 129474. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129474

40. Kwon, H. J., Hidayaturrahman, H., Peera, S. G. and Lee, T. G. (2022) Elimination of Microplastics at Different Stages in Wastewater Treatment Plants, *Water*, 14(15), 2404. doi: 10.3390/w14152404

41. Kukkola, A., Senior, G., Maes, T., Silburn, B., Bakir, A., Kröger, S. and Mayes, A. (2022) A large-scale study of microplastic abundance in sediment cores from the UK continental shelf and slope, *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113554. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113554

42. Lapointe, M., Farner, J. M., Hernandez, L. M. and Tufenkji, N. (2020) Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation, *Environmental science & technology*, 54(14), 8719–8727. doi: 10.1021/acs.est.0c00712

43. Leads, R. R. and Weinstein, J. E. (2019) Occurrence of tire wear particles and other microplastics within the tributaries of the Charleston Harbor Estuary, South Carolina, USA, *Marine pollution bulletin*, 145, 569–582. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.061

44. Li, J., Liu, H. and Paul Chen, J. (2018) Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection, *Water research*, 137, 362–374. doi: 10.1016/j.watres.2017.12.056

45. Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., Lin, H., Chen, H. and Jin, X. (2019) Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China, *Water research*, 155, 255–265. doi: 10.1016/j.watres.2019.02.028

46. Löder, M.G.J. and Gerdts, G. (2015). Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics—A Critical Appraisal. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3_8

47. Luo, Y., Xie, H., Xu, H., Zhou, C., Wang, P., Liu, Z., Yang, Y., Huang, J., Wang, C. and Zhao, X. (2023) Wastewater treatment plant serves as a potentially controllable source of microplastic: Association of microplastic removal and operational parameters and water quality data, *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129974. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129974

48. Lv, L., Yan, X., Feng, L., Jiang, S., Lu, Z., Xie, H., Sun, S., Chen, J. and Li, C. (2021) Challenge for the detection of microplastics in the environment, *Water Environment Research*, 93(1), 5–15. https://doi.org/10.1002/wer.1281

49. Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., Avio, C. G., Della Torre, C., Parenti, C. C., Gorbi, S. and Regoli, F. (2019) The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant, *Science of the total environment*, 652, 602–610. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.269

50. Mai, L., Bao, L.-J., Shi, L., Wong, C. S. and Zeng, E. Y. (2018) A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 11319–11332.https://doi.org/10.1007/s11356-018-1692-0

51. Mandal, M., Roy, A., & Sarkar, A. (2025). Comprehensive study of the microplastic footprint in the urban pond and river of Eastern India. *Scientific Reports*, *15*(1), 8645. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87452-3

52. Mansa, R. and Zou, S. (2021) Thermogravimetric analysis of microplastics: A mini review, *Environmental Advances*, 5, 100117. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100117
53. Martín-Gómez, B., Elmore, J. S., Valverde, S., Ares, A. M. and Bernal, J. (2024) Recent applications of chromatography for determining microplastics and related compounds (bisphenols and phthalate esters) in food, *Microchemical Journal*, 197, 109903. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.109903
54. Monira, S., Roychand, R., Hai, F. I., Bhuiyan, M. and Pramanik, B. K. (2025) Microplastic fragmentation into nanoplastics by water shear forces during wastewater treatment: Mechanical insights and theoretical analysis, *Environmental pollution*, 364(Pt 1), 125310. doi: 10.1016/j.envpol.2024.125310
55. Montecinos, S., Tognana, S., Salgueiro, W. and Frosinini, C. (2024) Temporal variation of the microplastic concentration in a stream that receives discharge from wastewater treatment plants. *Environmental pollution*, 340(Pt 1), 122776. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122776
56. Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F. and Quinn, B. (2016) Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. Environmental science & technology, 50(11), 5800–5808. doi: 10.1021/acs.est.5b05416
57. Mushtak, F., Prakash, J. and Katoch, S. S. (2024) Microplastics in complex soil matrix: Recovery, identification and removal using micro nano techniques, *Micro and Nano Engineering*. 22, 100237. https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100237
58. NASEM, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Division on Earth and Life Studies, Sawyer, K., Sharples, F. and Poole, R. (Eds.). (2020) *Emerging Technologies to Advance Research and Decisions on the Environmental Health Effects of Microplastics: Proceedings of a Workshop—in Brief*. National Academies Press (US).
59. Nguyen, T. L. H., Duong, T. L., Nguyen, T. H. T., Dang, T. Q., Nguyen, T. H., Dao, N. N., Nguyen, K. T., Duong, C. D., Pham, N. N. and Nguyen, B. Q. (2023) Microplastics and trace metals in river sediment: Prevalence and correlation with multiple factors, *Science of the total environment*, 895, 165145. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165145
60. Özgenç, E. (2024) Advanced analytical techniques for assessing and detecting microplastic pollution in water and wastewater systems, *Environmental Quality Management*, 34, e22217. doi: 10.1002/tqem.22217
61. Pan, Z., Guo, H., Chen, H., Wang, S., Sun, X., Zou, Q., Zhang, Y., Lin, H., Cai, S. and Huang, J. (2019). Microplastics in the Northwestern Pacific: Abundance, distribution, and characteristics, *Science of the total environment*, 650(Pt 2), 1913–1922. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.244
62. Patil, P. N., Sawant, D. V. and Deshmukh, R. N. (2012) Physico-chemical parameters for testing of water-a review, *International journal of environmental sciences*, 3(3), 1194.
63. Pipkin, W., Belganeh, R., Robberson, W., Allen, H., Cook, A.-M. and Watanabe, A. (2021), Identification of microplastics in environmental monitoring using pyrolysis–GC–MS analysis, *LCGC North America*, 39(4), 179–186.
64. Pramanik, B. K., Pramanik, S. K. and Monira, S. (2021) Understanding the fragmentation of microplastics into nano-plastics and removal of nano/microplastics from wastewater using membrane, air flotation and nano-ferrofluid processes, *Chemosphere*, 282, 131053. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131053
65. Rhodes C. J. (2018) Plastic pollution and potential solutions. *Science progress*, 101(3), 207–260. doi: 10.3184/003685018X15294876706211
66. Sarkar, D. J., Das Sarkar, S., Das, B. K., Manna, R. K., Behera, B. K. and Samanta, S. (2019) Spatial distribution of meso and microplastics in the sediments of river Ganga at eastern India, *Science of the total environment*, *694*, 133712. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133712
67. Sarkar, D. J., Das Sarkar, S., Das, B. K., Praharaj, J. K., Mahajan, D. K., Purokait, B., Mohanty, T. R., Mohanty, D., Gogoi, P., Kumar V, S., Behera, B. K., Manna, R. K. and Samanta, S. (2021) Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with

pulse clarifier, *Journal of hazardous materials*, 413, 125347. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125347

68. 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. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.019

69. Singh, S., Kumar Naik, T. S. S., Anil, A. G., Dhiman, J., Kumar, V., Dhanjal, D. S., Aguilar-Marcelino, L., Singh, J. and Ramamurthy, P. C. (2022). Micro (nano) plastics in wastewater: A critical review on toxicity risk assessment, behaviour, environmental impact and challenges, *Chemosphere*, 290, 133169. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133169

70. Somasundaram, R. and Radhakrishnan, N. (2023). Establishment the relationship between water quality parameter and micro plastic concentration for Adyar and Cooum estuary, *Environmental Quality Management*, 33(1), 121–133. doi: 10.1002/tqem.22028

71. Sönmez, V.Z., Akarsu, C., Cumbul Altay, M., Sivri, N. (2022) Extraction, Enumeration, and Identification Methods for Monitoring Microplastics in the Aquatic Environment. In: Hashmi, M.Z. (eds) *Microplastic Pollution. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies*. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-89220-3_2

72. Stile, N., Raguso, C., Pedruzzi, A., Cetojevic, E., Lasagni, M., Sanchez-Vidal, A. and Saliu, F. (2021) Extraction of microplastic from marine sediments: A comparison between pressurized solvent extraction and density separation, *Marine pollution bulletin*, 168, 112436. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112436

73. Takdastan, A., Niari, M. H., Babaei, A., Dobaradaran, S., Jorfi, S. and 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. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111851

74. Tao, H., Bobaker, A. M., Ramal, M. M., Yaseen, Z. M., Hossain, M. S. and Shahid, S. (2019) Determination of biochemical oxygen demand and dissolved oxygen for semi-arid river environment: Application of soft computing models, *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 923–937. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3663-x

75. Thompson, R. C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K. and Koelmans, A. A. (2024) Twenty years of microplastic pollution research-what have we learned?, *Science,* 386(6720), eadl2746. doi: 10.1126/science.adl2746

76. Van Manh, D., Thao, X. T. L., Ngo, D. V., Thom, T. D. (2022) Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants, *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102286. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102286

77. Wagner, S., Hüffer, T., Wehrhahn, M., Klöckner, P., 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. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051

78. Xu, X., Jian, Y., Xue, Y., Hou, Q. and Wang, L. (2019) Microplastics in the wastewater treatment plants (WWTPs): Occurrence and removal, *Chemosphere*, 235, 1089–1096. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.197

79. Yang, L., Li, K., Cui, S., Kang, Y., An, L. and Lei, K. (2019) Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant, *Water research*, 155, 175–181. doi: 10.1016/j.watres.2019.02.046

80. Yang, X., Huang, G., Geng, X., Lyu, L., Bi, H., & An, C. (2025). Deciphering the behavior and fate of microplastics in coastal aquatic environments: A comprehensive review illuminating coastal dynamics and driving mechanisms. *Earth-Science Reviews*, *270*, 105235.

81. Yin, L., Jiang, C., Wen, X., Du, C., Zhong, W., Feng, Z., ... & Ma, Y. (2019). Microplastic pollution in surface water of urban lakes in Changsha, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(9), 1650. https://doi.org/10.3390/ijerph16091650

82. Yuan, C., Almuhtaram, H., McKie, M. J. and Andrews, R. C. (2022) Assessment of microplastic sampling and extraction methods for drinking waters, *Chemosphere*, 286(Pt 3), 131881. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131881

83. Zambrano-Pinto, M. V., Tinizaray-Castillo, R., Riera, M. A., Maddela, N. R., Luque, R. and Díaz, J. M. R. (2023), Microplastics as vectors of other contaminants: Analytical determination techniques and remediation methods, *Science of the Total Environment*, 908, 168244. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168244

84. Zhang, Y., Lu, J., Wu, J., Wang, J. and Luo, Y. (2020) Potential risks of microplastics combined with superbugs: Enrichment of antibiotic resistant bacteria on the surface of microplastics in mariculture system, *Ecotoxicology and environmental safety*, 187, 109852. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109852

85. Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., and Gao, P. (2021) Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China, *Journal of Cleaner Production*, 291, 125968. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125968

86. Zhang, J., Ding, W., Zou, G., Wang, X., Zhao, M., Guo, S. and Chen, Y. (2023) Urban pipeline rainwater runoff is an important pathway for land-based microplastics transport to inland surface water: A case study in Beijing, *The Science of the total environment*, *861*, 160619. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160619

87. 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. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042