

Mikrokirleticilerin Ekolojik Ayak izleri ve Arıtım Yöntemleri

Yeşim DEDE SAĞSÖZ¹ , Damla MUSTAFAOĞLU^{1*} 

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: damlamustafaoglu83@gmail.com

İnceleme Makalesi/Review Article
Geliş Tarihi/Received: 11.11.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 10.06.2025

ÖZ

Mikrokirleticiler, çoğunlukla insan faaliyetleri kaynaklı; kimyasal bileşikler, pestisitler, ilaç kalıntıları ve endüstriyel yan ürünlerden meydana gelen ve çevrede kalıcı etkiler gösteren potansiyel olarak zararlı maddelerdir. Bu bileşiklerin su, toprak ve havada uzun süre varlığını sürdürebilmeleri, onların çevrede ve ekosistemlerde kalıcı bir tehdit haline gelmesine sebep olur. Özellikle sucul ekosistem alanlarında, bioakümülayon ve biyomagnifikasyon yoluyla besin zincirinde üst kademelere doğru taşınarak organizmaların dokularında birikir ve kümülatif olarak artarak toksik etkiler oluşturur. Mikrokirleticiler; hormon bozucu, nörotoksik ve genotoksik özellikleri sebebiyle canlılar için önemli riskler teşkil ederler. Ekosistemlerde; biyolojik çeşitliliğin azalması, besin ağlarının bozulması ve ekolojik dengenin zarar görmesi gibi geri dönüşü olmayan etkiler gösterirken İnsanlarda ise hormon dengesini, sinir sistemi işleyişini etkileyerek genetik materyalde hasarlara neden olur. Bu sebeplerden dolayı mikrokirleticilerin çevresel etkilerini azaltmak önemlidir. Ekosistemlerin sağlığını korumak için gelişmiş arıtma teknikleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda biyolojik, fiziksel ve kimyasal arıtma tekniklerinin konvansiyonel olarak kullanıldığı ileri arıtım teknolojileri önem arz eder. Aktif karbon adsorpsiyonu, ozonlama, ileri oksidasyon prosesleri ve membran filtrasyon gibi yöntemler, bu kirleticilerin atıksulardan etkin bir biçimde uzaklaştırılmasında büyük başarı gösterir. Fakat mevcut arıtma teknolojilerinin, verimliliğinin artırılmasının yanı sıra sürdürülebilir çevre dostu çözümlerle desteklenmesi gerekmektedir. Mikrokirleticilere karşı etkili bir mücadele için kirletici düzeylerinin çevresel izleme sistemleriyle düzenli olarak takip edilmesi gereklidir. Bu sayede potansiyel riskler önceden belirlenebilir. Etkili bir strateji; gelişmiş arıtma teknolojileri, sürekli izleme çalışmaları ve daha sıkı yasal düzenlemelerle desteklenmelidir.

Anahtar Kelimeler: Mikrokirleticiler, Mikrokirleticilerin etkileri, Mikrokirleticilerin kaynakları, Mikrokirleticilerin arıtım metodları

Ecological Footprints of Micropollutants and Treatment Methods

ABSTRACT

Micropollutants are potentially harmful substances mostly caused by human activities; chemical compounds, pesticides, drug residues, and industrial by-products permanently affect the environment. The long-term existence of these compounds in water, soil, and air causes them to become a permanent threat to the environment and ecosystems. Especially in aquatic ecosystem areas, they accumulate in the tissues of organisms by being carried to the upper levels of the food chain through bioaccumulation and biomagnification and create toxic effects by increasing cumulatively. Micropollutants pose significant risks to living things due to their hormone-disrupting, neurotoxic, and genotoxic properties. In ecosystems, they show irreversible effects such as decreased biodiversity, disruption of food webs, and damage to ecological balance, while in humans, they affect hormone balance and nervous system functioning and cause damage to genetic material. For these reasons, it is important to reduce the environmental effects of micropollutants. Advanced treatment techniques play a critical role in protecting the health of ecosystems. In this context, advanced treatment technologies that use conventional biological, physical, and chemical treatment techniques are important. Methods such as active carbon adsorption, ozonization, advanced oxidation processes, and membrane filtration show great success in effectively removing these pollutants from wastewater. However, in addition to increasing the efficiency of existing treatment technologies, they need to be supported by sustainable, environmentally friendly solutions. For an effective fight against micropollutants, pollutant levels need to be regularly monitored with environmental monitoring systems. In this way, potential risks can be determined in advance. An effective strategy should be supported by advanced treatment technologies, continuous monitoring studies, and stricter legal regulations.

Keywords: Micropollutants, Effects of micropollutants, Sources of micropollutants, Treatment methods of micropollutants

Cite as;

Sağsöz, Y.D., Mustafaoğlu, D. (2025). Mikrokirleticilerin Ekolojik Ayak izleri ve Arıtım Yöntemleri, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 428-451. Doi: 10.53501/rteufemud.1583277

1. Giriş

Mikrokirleticiler, sularda mikrogram veya daha düşük konsantrasyonlarda var olan (Luo vd., 2014; Sousa vd., 2019; Rogowska vd., 2020) fakat bu konsantrasyonlarda dahi çevresel ortamlar üzerine olumsuz etkiler yaratan riskli maddelerdir. Mikrokirleticilerin çevredeki miktarları, kentleşme ve endüstriyel faaliyetlerdeki yükseliş ile sağlık hizmetlerindeki yenilikler ve iyileşmeler sebebiyle giderek önem kazanmaktadır (Bhatt vd., 2022).

Mikrokirleticiler, organik ve inorganik kirleticileri içerebilir. Sucul ortamlardaki mikrokirleticiler genellikle insan kaynaklıdır ve ilaçlar, kişisel bakım ürünleri, endüstriyel kimyasallar, çözücüler, pestisitler, nanomalzemeler ve dezenfeksiyon yan ürünlerini kapsar. Bu tür kirleticilere bazen "zenobiyotik" terimi de atfedilir. Zenobiyotikler, organizma tarafından tanınmayan, dolayısıyla metabolize edilmesi zor ve potansiyel olarak zararlı etkiler yaratan maddeler olarak tanımlanır (Hejna vd., 2022).

Doğal ya da sentetik yapıda olabilen mikrokirleticiler, organizmaya dışarıdan alınarak hormonların işleyiş mekanizmasını etkiler. Endokrin sistem üzerinde müdahalede bulunarak üreme, gelişim, sentez, salgılama, taşıma ve bağlanma gibi hayati aktiviteleri bozabilir veya olumsuz etkiler yaratabilirler (Durmaz ve Giray, 2013).

Mikrokirleticiler, endokrin bozucu kimyasallar (EDC'ler), farmasötikler, kişisel bakım ürünleri, tarım ilaçları ve endüstriyel kimyasallar gibi çevrede düşük konsantrasyonlarda bulunan fakat ekosistem ve insan sağlığı üzerinde uzun vadeli etkiler yaratabilen bileşiklerdir. Bu kimyasal maddelerin çevreye yayılması; çoğunlukla endüstriyel deşarjlar, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan akıntılar, evsel atıklar ve atık sular aracılığıyla gerçekleşir (Ebele vd., 2017). Bu bileşikler çeşitli çevresel matrislerde (örneğin su, toprak, hava ve sediment) bulunabilirler ve özellikle dirençli yapıda olanlar, doğal bozunmaya karşı mukavemetlidirler. Bundan

dolayı hiç kullanılmadıkları veya doğrudan salınmadıkları yerlerde bile tespit edilebilirler (Schwarzenbach vd., 2006). Mikrokirleticilerin çevresel yayılımı neticesinde sucul ve karasal ekosistemlerde birikim gözlenmektedir. Örneğin, sucul ekosistemlerdeki mikrokirleticiler su kalitesini bozmakla kalmaz, aynı zamanda besin zincirine de dahil olarak organizmaların biyokimyasal süreçlerini etkileyebilmektedirler. Mikrokirleticilerin biyolojik olarak aktif olmaları, özellikle endokrin sistemine müdahale edebilme potansiyelleri, ekosistemdeki türlerin üreme, büyüme ve davranışlarını olumsuz şekilde etkiler. Bu durum, özellikle balıklar, amfibiler ve sucul omurgasızlar gibi organizmalar üzerinde gözlemlenmiştir. Besin zincirinde biyolojik olarak birikerek üst seviyelerde bulunan yırtıcı türlerde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşarak toksik etkiler oluşturur (Rogowska vd., 2020). Topraktaki mikrokirleticiler ise mikrobiyal toplulukların çeşitliliğini azaltarak ekosistemin doğal döngülerini sekteye uğratmaktadır. Ayrıca, bu maddelerin bitkilere geçmesi, tarım ürünleri vesilesiyle insanlara ulaşabilme riskini artırmaktadır. Tarımsal uygulamalar ile toprağa karışan mikrokirleticiler, yağmur veya yeraltı suyu ile taşınarak içme suyu kaynaklarını da kirletmektedirler (Stoob vd., 2007). Bu tür mikrokirleticilerle mücadele etmek, sadece doğrudan çevresel etkileri azaltmak için değil, aynı zamanda biyolojik çeşitliliği korumak ve insan sağlığını tehdit eden potansiyel riskleri ortadan kaldırmak için önemlidir. Ancak, mikrokirleticilerin değişik fizikokimyasal özellikleri ve çevredeki davranışları sebebiyle tek tip bir arıtma veya giderim yöntemi uygulanması mümkün değildir. Ekosistem sağlığını koruma ve sürdürülebilir bir çevre sağlama amacıyla, mikrokirleticilerin doğada birikim yollarını daha iyi anlamaya yönelik kapsamlı araştırmalar yapılması gerekmektedir (Nas vd., 2017).

Günümüzde mikrokirleticilerin atık sulardan etkili bir şekilde uzaklaştırılması için, geleneksel arıtma yöntemlerine ilaveten ileri arıtma tekniklerinden faydalanılmaktadır. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olan mikrokirleticiler, bir tek yöntemle verimli bir

şekilde giderilemediğinden, genellikle birkaç arıtma ünitesinin bir arada kullanıldığı kombinasyonlar tercih edilmektedir. Mikrokirleticilerin giderimi, her bileşiğin kendine özgü nitelikleri sebebiyle çeşitli arıtma yöntemleri ve çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu sebeple, tüm mikrokirleticilere yönelik tek bir arıtma tekniği geliştirmek mümkün değildir; her tür mikrokirletici giderimi için farklı proseslerin kullanılması gerekmektedir. Örneğin, ileri oksidasyon prosesleri (AOPs), kimyasal yapıyı bozarak kirleticileri etkisiz hale dönüştüren güçlü oksidanlar kullanır. İyon değiştirme yöntemleri, çözeltideki belirli iyonları uzaklaştırmak için kullanılırken, adsorpsiyon işlemleri mikrokirleticilerin yüzeylere tutunarak sudan uzaklaşmasını sağlar. Membran prosesleri ise mikrokirleticileri fiziksel bir bariyerle süzme yöntemiyle sudan ayırır. Bu yöntemlerin kombinasyonu, kirleticilerin çevreye zarar vermeden uzaklaştıracak nitelikte olmalıdır (Ergin, 2023).

Mikrokirleticilerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla mevzuat düzenlemeleri ve halkın bilinçlendirilmesi önemlidir. Mikrokirleticiler, düşük konsantrasyonlarda dahi ekosistem ve insan sağlığı üzerinde uzun vadeli zararlı etkiler yaratabilir. Bu nedenle, birçok ülkede mikrokirletici emisyonlarını kontrol etmek için atık su arıtma standartları güçlendirilmekte ve kirleticileri gidermek için yeni teknolojiler teşvik edilmektedir. Örneğin, bazı Avrupa ülkelerinde sucul ortama salınan mikrokirleticilerin azaltılmasını amaçlayan yasal düzenlemeler yürürlükte olup, arıtma tesislerinde mikrokirletici giderimi için ileri arıtma yöntemlerinin uygulanması zorunlu hale getirilmiştir (Stam vd., 2016). Halkın bilinçlendirilmesi ise bu düzenlemelerin etkin olması için kritik bir tamamlayıcıdır. Yapılan araştırmalar, farkındalık kampanyalarının, bireylerin günlük hayatlarında kullandıkları ürünleri çevreye zarar vermeyecek biçimde bertaraf etme bilincini artırmada başarılı olduğunu göstermektedir. Bilinçlendirme çalışmaları, ilaçların güvenli şekilde atılması,

kimyasal içeren kişisel bakım ürünlerinin azaltılması gibi davranış değişikliklerini teşvik ederek kirliliğin önlenmesini desteklemektedir. Başarılı kampanyalar, toplumu bu tür ürünlerin çevresel etkileri konusunda bilgilendirmenin yanı sıra aynı zamanda daha sürdürülebilir alternatiflerin kullanımına katkı sağlar. Bu tür mevzuat ve bilinçlendirme stratejileri, çevre sağlığını koruma amacını güderken, yanı sıra sürdürülebilir bir toplum için kritik önlemler olarak öne çıkmaktadır (Debrah vd., 2021).

Bu çalışmanın amacı, mikrokirleticilerin çevresel ortamlarda oluşturduğu riskleri çok yönlü olarak incelemek ve bu bileşiklerin etkin yönetimi için çözüm önerileri sunmaktır. Bu doğrultuda çalışmada, mikrokirleticilerin tanımı, sınıflandırılması, çevresel kaynakları, yayılım yolları ve ekotoksikolojik etkileri detaylı şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca bu maddelerin su ve toprak gibi çeşitli çevresel matrislerdeki davranışları ve birikim potansiyelleri değerlendirilmekte hem geleneksel hem de ileri düzey arıtma teknolojilerinin etkinliği analiz edilmektedir. Bununla birlikte, mikrokirleticilere ilişkin ulusal ve uluslararası yasal düzenlemeler, mevcut izleme stratejileri ve toplumsal farkındalık çalışmaları da kapsam dahilinde tartışılmaktadır. Çalışmanın kapsamı; literatür taraması temelli olup çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkı sunacak bütüncül bir değerlendirme sunmayı hedeflemektedir.

2. Mikrokirleticilerin Kaynakları ve Etkileri

Mikrokirleticiler, çevrede düşük konsantrasyonlarda bulunmasına rağmen toksik etkiler oluşturabilen kimyasal bileşiklerdir. Bu kirleticiler genellikle sucul ekosistemlere, toprağa ve atmosfere yayılır ve uzun vadede çevre ve insan sağlığı için risk oluşturabilir. Mikrokirleticiler arasında farmasötik maddeler, pestisitler, endokrin bozucular, ağır metaller ve plastik katkı maddeleri gibi birçok kimyasal yer almaktadır (Pal vd., 2014). Bu kirleticiler kaynağına göre çeşitli gruplara ayrılabilir.

2.1. Evsel kaynaklı mikrokirleticiler

Evlerden kaynaklanan mikrokirleticiler, günlük yaşantımızda kullandığımız çeşitli ürünlerden oluşur. Başlıca kaynaklar şunlardır:

- **Farmasötik Maddeler:** Ağrı kesiciler, antibiyotikler, antidepresanlar gibi ilaçlar vücutta tamamen metabolize edilmez ve idrar yoluyla atılır. Atık su arıtma tesisleri bu ilaçları tam olarak gideremediği için ilaç kalıntıları su yollarına geçer.
- **Kişisel Bakım Ürünleri:** Şampuan, kozmetik ürünler, parfümler gibi kişisel bakım ürünleri mikrokirleticilere katkıda bulunur. Bu ürünlerde bulunan fenoller, parabenler ve UV filtreleri gibi kimyasallar su kaynaklarına ve dolayısıyla çevreye karışabilir.
- **Ev Temizlik Ürünleri:** Çamaşır deterjanları, yüzey temizleyiciler, çamaşır suyu gibi kimyasal maddeler su yollarına karışarak çevresel mikrokirleticilere yol açabilir. Bu kimyasal maddeler çevredeki organizmalar üzerinde toksik etki gösterebilir (Samal vd., 2022).

2.2. Tarımsal kaynaklı mikrokirleticiler

Tarımsal faaliyetlerde kullanılan çeşitli kimyasal maddeler mikrokirletici olarak çevreye yayılabilir:

- **Pestisitler:** Böcek öldürücüler, ot öldürücüler ve mantar öldürücüler gibi tarımsal kimyasallar toprak ve su sistemlerine karışabilir. Bu kimyasallar uzun süre doğada kalabilen ve biyobirikime neden olabilen özelliklere sahiptir.
- **Gübreler:** Gübreler, tarımsal üretimde temel besin kaynağı sağlarken, içeriklerinde çeşitli mikrokirleticiler de barındırabilir. Sentetik gübrelerde fosfat ve nitrat gibi temel bileşenlerin yanı sıra, üretim sürecinden veya ham madde kaynaklarından kaynaklanan kadmiyum, kurşun ve arsenik gibi ağır metaller bulunabilir. Bu metaller zamanla toprak ve su ekosistemlerinde birikerek

çevresel risk oluşturur. Organik kökenli gübrelerde ise, hayvan atıklarından veya arıtma çamurlarından gelen antibiyotik kalıntıları, hormonlar ve diğer farmasötik bileşikler mikrokirletici olarak çevreye taşınabilir. Bu durum, gübrelerin yalnızca besin elementi değil, aynı zamanda mikrokirletici taşıyıcısı olabileceğini göstermektedir (Joosa, ve Tender, 2022).

- **Hayvansal Atıklar:** Hayvancılık faaliyetleri sonucunda oluşan atık maddelerde antibiyotik kalıntıları ve diğer farmasötik maddeler bulunabilir. Bu atıklar uygun bir biçimde yönetilmediğinde çevreye mikrokirletici olarak dağılır (Bhalla vd., 2022).

2.3. Endüstriyel kaynaklı mikrokirleticiler

Endüstriyel süreçler sırasında birçok mikrokirletici atmosfere, suya ve toprağa yayılır:

- **Ağır Metaller:** Maden işletmeleri, kimyasal üretim tesisleri ve sanayi atıklarından açığa çıkan kurşun, cıva, kadmiyum gibi ağır metaller çevreye salınır ve kalıcı mikrokirleticiler arasında yer alır (Alloway, 2013).
- **Organik Kimyasallar:** Plastik üretimi, boya, deterjan ve solvent üretimi esnasında kullanılan kimyasallar çevreye karışabilir. Bu kimyasallar arasında poliklorlu bifeniller (PCB'ler), dioksinler ve perflorlu bileşikler (PFAS) bulunmaktadır (EPA, 2022).
- **Tekstil ve Deri Sanayi:** Tekstil boyaları, çözücüler ve ağır metaller, su kaynakları yoluyla çevresel mikrokirleticilere katkı sağlar. Tekstil sanayi özellikle azo boyaları ve formaldehit gibi toksik kimyasalların kaynaklarını oluşturmaktadır (Hammoudani vd., 2024).

2.4. Kentsel altyapı ve trafikten kaynaklanan mikrokirleticiler

Kentsel alanlar ve trafikte kullanılan maddeler de mikrokirleticilere sebep olabilir:

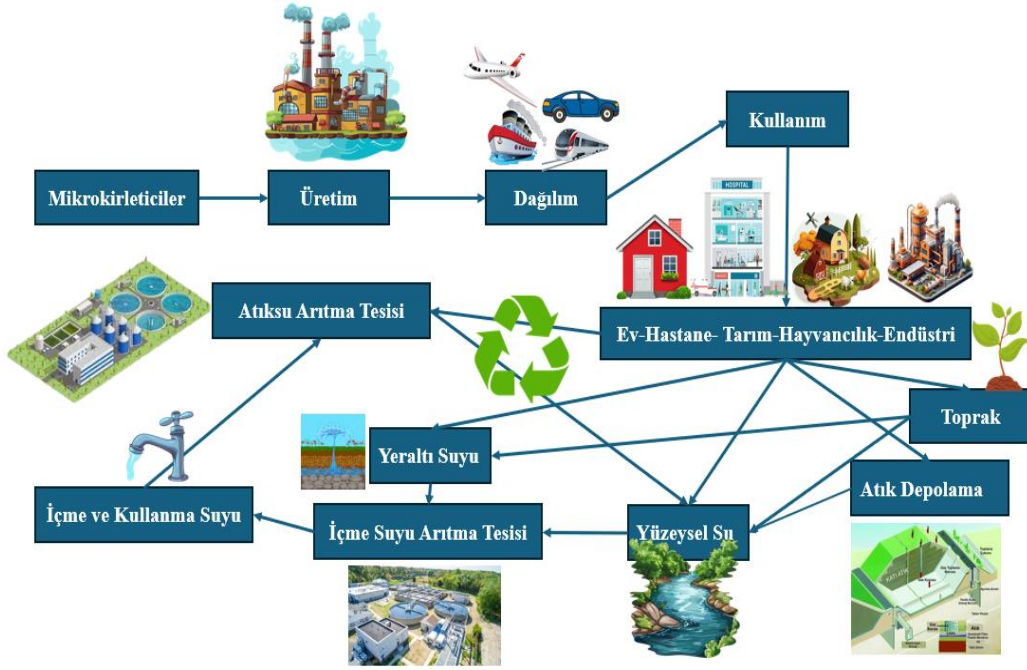
- **Araç Lastikleri ve Fren Balataları:** Lastiklerin ve fren balatalarının aşınması ile ağır metaller

(örneğin bakır, çinko) ve mikroplastikler atmosfer ortamına ve su yollarına karışır.

- Yakıt ve Yağlar: Trafikte araçlardan sızan yakıt ve yağlar da mikrokirletici olarak su yollarına ve toprağa ulaşmaktadır.
- Asfalt ve İnşaat Malzemeleri: Özellikle inşaat süreçlerinde kullanılan asfalt ve diğer

malzemelerde var olan kimyasallar, çevreye mikrokirletici olarak yayılabilmektedir (Giechaskiel vd., 2024).

Şekil 1’de mikrokirleticilerin oluşum kaynakları ve çevresel dağılımı yolları verilmiştir (Pal vd., 2010’dan uyarlanmıştır).

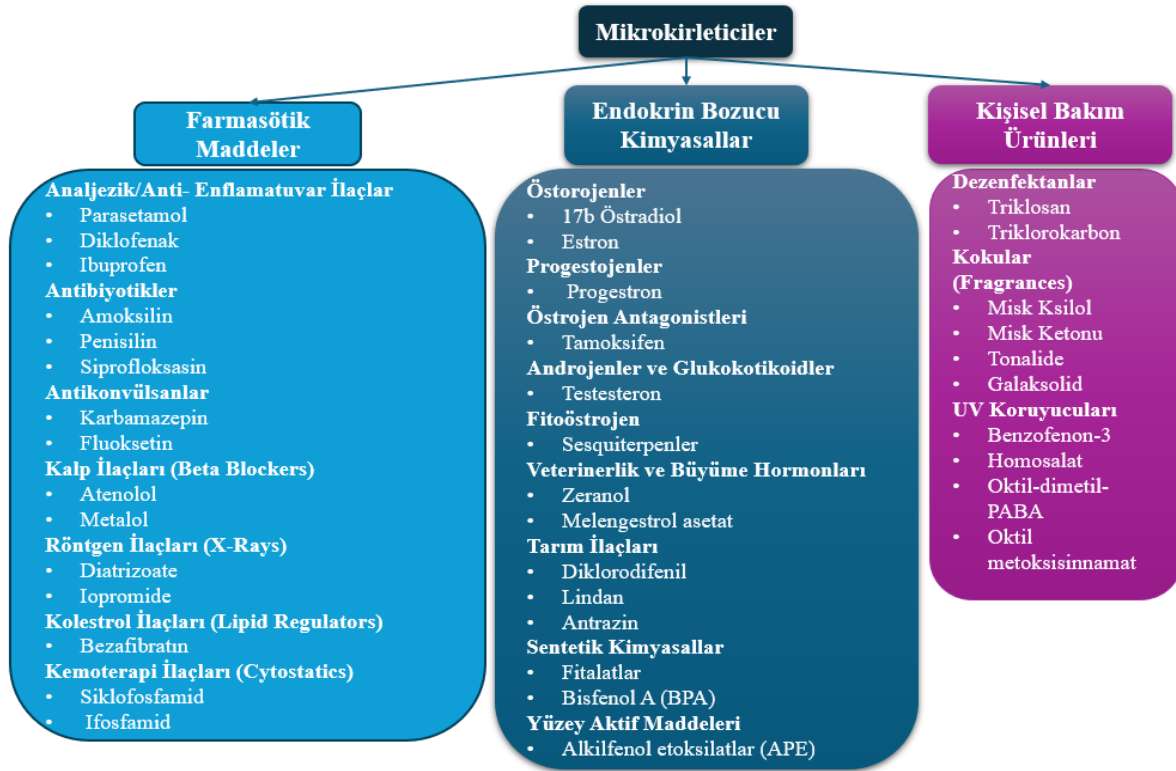


Şekil 1. Çevresel ortamlardaki mikrokirleticilerin kaynaktan dağılımı.

Figure 1. Resource distribution of micropollutants in environmental environments.

Kullanım alanı bakımından en yaygın ve çevresel açıdan risk teşkil eden mikrokirletici çeşitleri; Farmasötik maddeler, endokrin bozucular ve kişisel bakım ürünleridir. Farmasötik ürünler, kişisel bakım ürünleri ve endokrin bozucular, çevrede yaygın olarak var olan önemli mikrokirleticiler arasında yer almaktadır. Farmasötik maddeler, örneğin antibiyotikler, ağrı kesiciler ve antidepresanlar, hastalar tarafından kullanılmasının ardından atık su sistemine karışır ve klasik arıtma tesislerinde tamamen giderilemez, böylece su yollarına geçerek sucul ekosistemler üzerinde toksik etkilere yol açabilir. Benzer şekilde, kişisel bakım ürünlerinden kaynaklanan UV filtreleri, parabenler ve diğer

kimyasallar, şampuan, deodorant ve kozmetik gibi günlük kullanılan ürünlerle atık suya karışarak çevreye yayılır. Bu kimyasalların bir kısmı çevresel ortamda kalıcı olup biyolojik sistemlere toksik etkiler yaratabilir. Endokrin bozucular ise hormonal sistemleri etkileyerek canlıların üreme, gelişim ve davranışlarında sorunlara yol açabilir; örneğin, plastik katkı maddesi olan BPA ve çeşitli kozmetik ürünlerde kullanılan ftalatlar, hormon dengesini bozarak hem çevre hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Kümmerer, 2009). Şekil 2’de mikrokirleticilerin çeşitleri ve sınıflandırılması mevcuttur (Jiang vd., 2013).



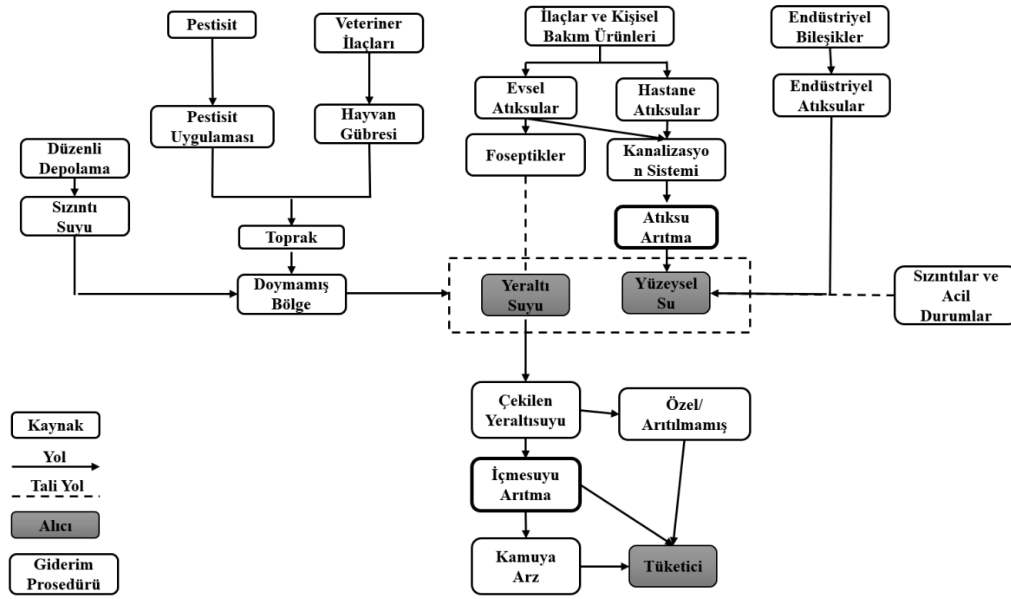
Şekil 2. Mikrokirleticilerin çeşitleri ve sınıflandırılması.

Figure 2. Types and classification of micropollutants.

3. Mikrokirleticilerin Çevresel Yayılımı ve Biyoakümülyasyon Süreçleri

Mikrokirleticiler, günlük hayatımızın pek çok alanında yaygın olarak kullanılan ve çevreye yayılabilen kimyasal bileşiklerdir. İnsan yaşamını kolaylaştırmak amacıyla kullanılan ilaçlar, hormonlar, temizlik ürünleri ve kişisel bakım ürünleri gibi maddeler, kullanım sonrası atık sular yoluyla sulara karışırlar. Evlerde veya hastanelerde kullanılan tıbbi ilaçlar, hormonlar ve kişisel bakım ürünleri vücuda alındıktan sonra metabolize olabilir veya hiç değişmeden atılabilir. İdrar ve dışkı yoluyla kanalizasyon sistemine karışan bu maddeler, atık su arıtma tesislerine ulaşır (Luo vd., 2014). Fakat bu tesislerde tam olarak arıtmaları zor olduğundan, arıtılamayan mikrokirleticiler sucül ortamda kalıcı hale gelirler. Böylece, akarsular, göller ve denizler yoluyla yer altı sularına ve hatta içme suyuna

kadar karışarak su kaynaklarının kirlenmesine neden olurlar. Diğer taraftan, kullanılmadan çöpe atılan ilaçlar, çöp alanlarında biriken sızıntı sularına karışarak sucül sisteme yayılabilirler. Veterinerlikte kullanılan ilaçlar ise farklı bir yayılma yoluna sahiptir; hayvanların dışkıları gübre olarak kullanıldığında bu ilaçlar toprakta birikerek yer altı sularına karışabilir. Endüstriyel mikrokirleticiler ise, genellikle fabrikalardan gelen atıkların kanalizasyon sistemine boşaltılmasıyla sulara ulaşır. Bu tür mikrokirleticiler de arıtma tesislerinde tamamen giderilemez ve bu nedenle alıcı ortamlara karışır. Böylece, mikrokirleticiler nehirler, göller ve denizler gibi sucül ekosistemlere ulaşarak, doğal su döngüsünü bozar ve su kaynaklarının kirlenmesine sebep olur (Kim ve Zoh, 2016). Şekil 3'te mikrokirleticilerin çevresel ortama karışma ağı verilmiştir (Doğruel vd., 2022).



Şekil 3. Mikrokirlleticilerin çevresel ortama karışma ağı.

Figure 3. Network of micropollutant dispersion into the environment.

4. Ekosistem Üzerindeki Ekolojik Hasar ve Biyoçeşitliliğe Etkileri

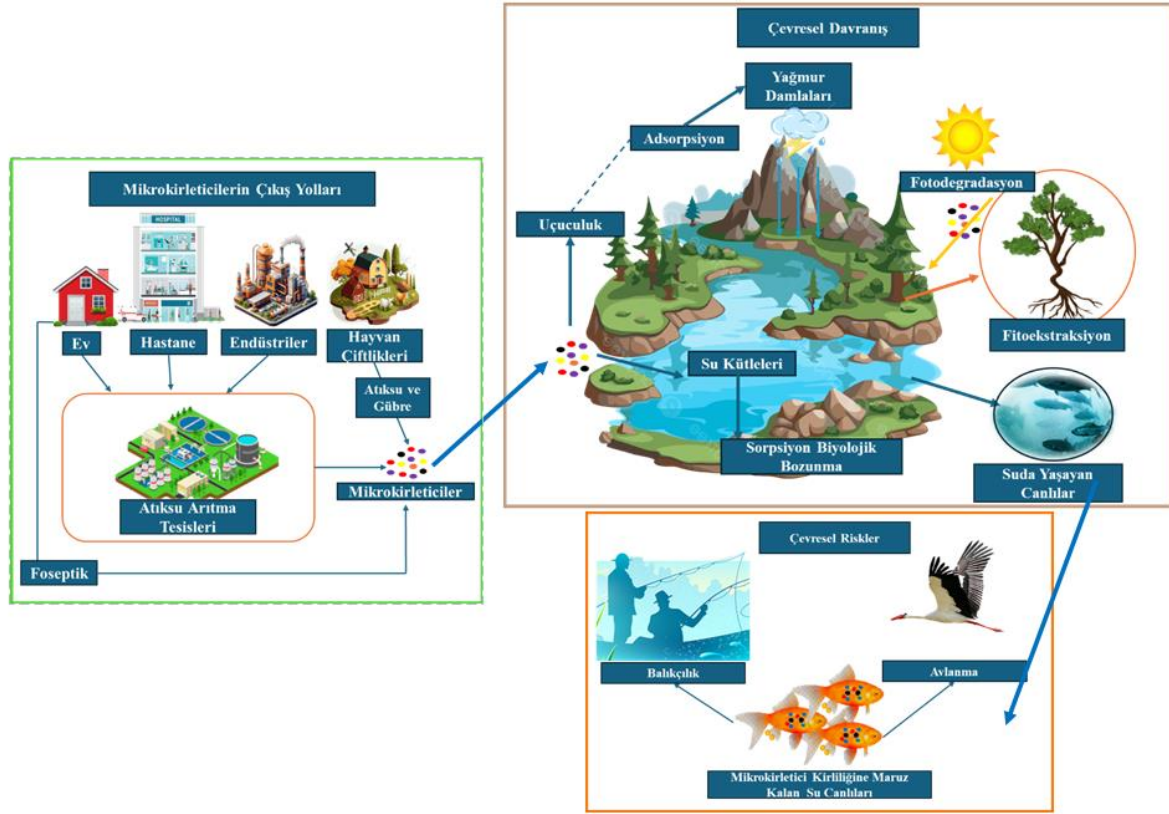
Mikrokirlleticiler, özellikle sucul ekosistemlerde birikim yaparak besin zinciri boyunca taşınmaktadır. Bu maddeler, balıklar, kabuklular ve diğer sucul organizmaların biyokimyasal süreçlerini bozabilir, üreme sistemlerini etkileyebilir ve bağışıklık sistemlerini zayıflatabilir. Bu durum, popülasyon seviyelerinde düşüşe, tür çeşitliliğinde azalmaya ve ekosistem dengesinin bozulmasına sebep olur. Ayrıca, mikrokirlleticilerin etkinliği yalnızca tek bir türle sınırlı kalmaz; bu kirleticiler besin zinciri boyunca yukarı taşındığında, daha büyük organizmalara geçerek insanlara ulaşmaktadır (Kılınç ve Keser, 2021).

Mikrokirlleticilerin sucul ortam etkilerinin değerlendirilmesinde, toksikolojik etkilerin tür bazında ve ölçülebilir parametrelerle desteklenmesi önem taşımaktadır. Özellikle *Daphnia magna* ve *Danio rerio* gibi model organizmalar kullanılarak yapılan testler, mikrokirlleticilerin canlılar üzerindeki olası etkilerini anlamada yol göstericidir. Bu testlerde

sıklıkla başvurulmuş LC_{50} ve EC_{50} gibi toksisite göstergeleri, kirleticilerin organizmalar üzerindeki öldürücü ya da etkili doz düzeylerini ortaya koymaktadır. Bu etkili doz değerlerinin belirlenmesi ile mikrokirlleticilerin ekosistem üzerindeki etkileri daha somut bir şekilde ortaya konulmaktadır (Yılmaz vd., 2022).

Toprak ekosistemlerinde pestisitler, farmasötik kalıntılar, ağır metaller ve kişisel bakım ürünleri gibi maddeler, toprak mikrobiyal dengesini bozarak faydalı mikroorganizmaların aktivitelerini olumsuz etkiler. Bu durum, toprak verimliliğinin azalmasına neden olurken, bitki gelişimi üzerinde de toksik etkilere yol açmaktadır (Rai vd., 2023). Ayrıca mikrokirlleticiler bitkiler tarafından alınıp gıda zincirine dahil olduklarında insanlar ve hayvanlarda hormonal bozukluklara, üreme sistemin sıkıntılara ve gelişimsel problemlere yol açmaktadırlar (Marlatt vd., 2022).

Şekil 4'te mikrokirlleticilerin ekosistemlere ulaşma süreci şematik olarak sunulmuştur. Şekil 4, Giesy ve Kannan'ın 2001'deki çalışmalarından uyarlanmıştır.



Şekil 4. Mikrokirleticilerin ekosistemlere ulaşma süreci
Figure 4. Stages of micropollutants reaching ecosystems.

Mikrokirleticiler, sucul ekosistemlerdeki organizmalar tarafından alındığında biyomagnifikasyon ve biyolojik birikim süreçleri yoluyla besin piramidinde yukarı doğru ulaşır. Bu süreçte, kirleticiler öncelikle planktonlar gibi küçük organizmalar tarafından alınır. Daha sonra, bu planktonlarla beslenen küçük balıklara ve onları avlayan daha büyük balıklara geçerken kirleticilerin miktarı da artar. Böylece, besin zincirinde yukarıya doğru çıktıkça mikrokirletici konsantrasyonları da artar ve en üst seviyedeki yırtıcı türlerde (örneğin, büyük balıklar, kuşlar ve memelilerde) en yüksek seviyeye ulaşır. Bu, kirleticilerin organizmaların biyolojik sistemlerine zarar verme olasılığını artırır ve ekosistem dengelerini tahrip eder. Biyomagnifikasyon süreci, aynı zamanda insanlar için de büyük risk oluşturur, zira insanlar balık gibi yüksek trofik seviyelerdeki türleri tüketmeleri halinde bu kirleticilere maruz

kalabilirler (Krause vd., 2021). Mikrokirleticiler, çevresel ortamlardan insanlara çeşitli yollarla taşınmaktadır. Bu aktarım süreci Şekil 5’te detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 5. Mikrokirleticilerin insanlara ulaşma aşamaları.
Figure 5. Stages of micropollutants reaching people.

5. Mikrokirleticilerin Arıtımında Geleneksel ve İleri Prosesler

Mikrokirleticiler, düşük konsantrasyonlarda bile sucul ekosistemlerde ve insan sağlığında önemli çevresel ve biyolojik riskler yaratan kimyasal bileşenler olduğu bilinmektedir. Endüstriyel faaliyetler, tarımsal uygulamalar ve evsel atıklar gibi birçok farklı kaynaktan doğaya yayılan bu kirleticiler, arıtma tesislerinde geleneksel yöntemlerle istenilen düzeylerde uzaklaştırılamamaktadır. Mikrokirleticilerin çevreye olan etkilerine artan farkındalık ile birlikte, hem geleneksel hem de gelişmiş giderim yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi, mevcut teknolojilerin sınırlarını ve iyileştirme gereksinimlerini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmanın bu kısmında, mikrokirleticilerin etkin yönetimi için uygulanan çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik giderim yöntemleri detaylandırılmakta ve gelişmiş yöntemlerin bu alandaki potansiyelleri ele alınmaktadır.

5.1. Mikrokirleticilerin arıtımında geleneksel prosesler

Mikrokirleticilerin gideriminde kullanılan geleneksel arıtım yöntemleri arasında; filtrasyon, adsorpsiyon, koagülasyon-flokülasyon ve aktif çamur prosesleri öne çıkmaktadır. Geleneksel arıtım yöntemlerinin uygulanmalarında, mikrokirleticilerin fiziksel özellikleri göz önüne alınarak uygun proses tercihi sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemler mikrokirleticilerin gideriminde genellikle tek başına yeterli olmamaktadır. Bundan dolayı arıtımın istenilen düzeyde sağlanması adına ilave arıtım gerektirmesi, bu yöntemlerin iki ya da daha çok kombinleri veya ileri arıtım yöntemleri ile kombinleri tercih edilmektedir (Ceylan ve Mustafaoğlu, 2017).

5.1.1. Filtrasyon Yöntemi

Geleneksel filtrasyon yöntemleri; atıksulardan askıda katı madde, kum, tortu ve büyük partiküllerin fiziksel olarak uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kalay vd., 2021).

Bu yöntemler, basit yapıları sayesinde kolayca kurulabilmektedir. İşletme maliyetleri ise oldukça düşüktür (Rodriguez-Mozaz vd., 2017). Ek olarak, fiziksel filtrasyon süreci genellikle kimyasal katkı gerektirmediğinden çevresel açıdan da daha sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Matamoros ve Bayona, 2006). Ancak mikrokirleticilerin gideriminde etkinliği mikrokirleticilerin fiziksel boyutlarına bağlı olarak etkinliği değişen bir yöntem olduğundan sınırlıdır. Filtrasyon, yalnızca belirli boyuttaki partiküllerin tutulmasına olanak sağlamaktadır (Bolong vd., 2009). İlaç kalıntıları, pestisitler ve kozmetik ürün bileşenleri gibi moleküler düzeydeki kirleticiler için yeterli bir arıtım sağlamaz (Gupta ve Ali, 2013). Arıtım veriminin artırılması için kombine prosesler kullanılabilmektedir. Membran biyoreaktörler (MBR) ve aktif karbon adsorpsiyon sistemleri, geleneksel filtrasyon sonrası ilave arıtmalar sağlayarak mikrokirletici giderim verimliliğini artırabilmektedir (Rodriguez-Mozaz vd., 2017).

Filtrasyon sistemlerinde por çapı, mikrokirleticilerin tutulabilirliğini doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Mikrokirleticilerin büyük bir kısmı nanometre boyutlarında olduğundan, özellikle mikrofiltrasyon (0.1–10 µm), ultrafiltrasyon (2–100 nm), nanofiltrasyon (1–10 nm) ve ters ozmoz (<1 nm) gibi membran teknolojilerinde kullanılan por çapları, hedef kirleticilere göre seçilmektedir. Örneğin, farmasötik atıkların uzaklaştırılmasında 1–10 nm por çapına sahip nanofiltrasyon sistemleri yüksek verim sağlamaktadır (Xu vd., 2024).

5.1.2. Adsorpsiyon Yöntemi

Organik mikrokirleticilerin giderimde yaygın olarak kullanılan adsorban aktif karbondur (Rodriguez vd., 2016; Jeirani vd., 2017). Aktif karbon, farklı birleşiklere karşı afinitesi ve geniş iç yüzey alanı nedeniyle çok yönlü bir adsorbandır (Piai vd., 2019). Aktif karbon gibi adsorbanlar kullanılarak mikrokirleticiler yüzeyde tutulmaktadır. Bu yöntem özellikle suda çözünmüş organik maddelerin gideriminde oldukça etkilidir. Hidrofobik bileşiklerinden

adsorpsiyonun da etkili olduğu bilinmekte olan aktif karbonun hidrofilik bileşiklerin gideriminde de etkili olduğu bildirilmiştir (Nguyen vd., 2012; Nam vd., 2014). Aktif karbon ile adsorpsiyon maliyet açısından diğer giderim yöntemlerine göre daha tercih edilebilirdir. Aynı zamanda bu proses ile giderim yapıldığında istenmeyen yan ürün oluşumu meydana gelmemektedir (Husien vd., 2022). Aktif karbon rejenerasyonu için gerekli olan yüksek enerji gereksinimi ve adsorpsiyon kinetiğinin yavaş olması ise en büyük dezavantajlarıdır (Worch, 2012). Ancak bu dezavantajlarına rağmen mikrokirleticilerin giderimi için tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Katsigiannis vd., 2015). Mikrokirleticiler çözeltiden aktif karbonun gözeneklerine, yüzey ve por difüzyonu yoluyla adsorbe olurlar. Bu adsorpsiyonu etkileyen temel parametreler ise suyun sıcaklığı, pH değeri, adsorbanın yüzey alanı, mikro kirleticilerin kimyasal yapısı ve polaritesidir (Ahmad vd., 2012). Aktif karbonun yanı sıra granüler aktif karbon da arıtım süreçlerinde kullanılan farklı aktif karbon türüdür. Karbon nanotüpler ve grafen oksit de sulu çözeltilerde mikrokirleticilerin giderimi için sorbent olarak kullanılmakta olup, yüksek verimlilik sağladığı kanıtlanmıştır (Delhiraja vd., 2019; Kurwadkar vd., 2019).

Adsorpsiyon yöntemi, mikrokirleticilerin gideriminde sunduğu yüksek performans, kolay uygulanabilirlik ve esnek proses tasarımı sayesinde dikkat çekmektedir. Kurulumunun basit oluşu ve mevcut arıtma sistemlerine entegrasyonundaki pratiklik, yöntemin farklı ölçeklerde kullanımını mümkün kılar. Ancak adsorban malzemelerin doyuma ulaşmasıyla birlikte verimlilikte azalma gözlenebilmekte; bu durum, işletme sürecinde düzenli yenileme veya rejenerasyon ihtiyacını gündeme getirmektedir. Bu çerçevede, adsorpsiyonun hem kısa vadeli etkinliği hem de uzun vadeli maliyet ve sürdürülebilirlik boyutları bir bütün olarak değerlendirilmelidir.

5.1.3. Koagülasyon-Flokülasyon Yöntemi

Koagülasyon-flokülasyon, kirletici partiküllerin suda koagülant ve flokülant eklenerek

çöktürülmesi işlemidir. Bu işlemde, suya katılan kimyasallar küçük parçacıkları bir araya getirip daha büyük ve çökmesi kolay floklar oluşturur. Ancak bu süreç, mikrokirleticilerin tamamen giderilmesinde etkili değildir. Bu tür kirleticiler genellikle çok küçük boyutludur ve çözünmüş halde bulunurlar. Koagülasyon-flokülasyon prosesleriyle mikrokirleticilerin sıvı fazdan katı faza aktarılması sağlanır. Bu durumda, kirletici su ortamından fiziksel olarak ayrılmak yerine, sudan çöktürülerek katı hâle geçmiş olur (Nas vd., 2017).

Koagülasyon-flokülasyon, geleneksel olarak su ve atıksu arıtımında yaygın biçimde kullanılan, işletme açısından basit ve uygulanabilirliği yüksek bir kimyasal arıtım yöntemidir. Ancak mikrokirleticilerin genellikle düşük konsantrasyonda ve çözünmüş halde bulunması, bu yöntemin tek başına yüksek giderim verimliliği sağlamasını güçleştirmektedir. Kimyasal dozajlama hassasiyet gerektirdiğinden, işlem optimizasyonu saha koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Kullanılan koagülant ve flokülant türüne göre işletme maliyetleri makul düzeyde seyretse de, oluşan çamurun miktarı ve bertaraf gereksinimi, ekonomik ve çevresel açıdan ek yükler oluşturabilmektedir.

Koagülasyon-flokülasyon gibi fizikokimyasal prosesler mikrokirleticilerin çevresel etkilerini azaltmaya katkıda bulunmaktadır. Fakat mikrokirleticilerin tamamen giderilmesi için genellikle ek ileri arıtma teknikleri gereklidir. Özellikle kimyasal oksidasyon veya biyolojik arıtma süreçleri gibi yöntemler, mikrokirleticilerin daha etkili bir şekilde uzaklaştırılması için bu işlemlerle birleştirilerek kullanılmaktadır.

5.1.4. Biyolojik Yöntemler

Biyolojik yöntemlerin temeli, mikrokirleticilerin mikroorganizmalar tarafından biyodegradasyon yoluyla giderilmesi esasına dayanmaktadır. Konvansiyonel biyolojik arıtma sistemleri, özellikle karbon bazlı bazı mikrokirleticiler üzerinde etkilidir. Mikrokirleticilerin büyük bir kısmı, kimyasal yapıları itibarıyla oldukça karardır ve bu nedenle biyolojik arıtma

süreçlerine karşı direnç göstermektedir. Klasik atıksu arıtma tesislerinde bu maddelerin biyolojik yöntemler ile etkili bir şekilde giderilmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu da onların arıtılmış suyla birlikte doğal su kaynaklarına deşarj edilmesine sebep olmaktadır (Akkurt ve Oğuz, 2019). Mikrokirleticilerin, atıksu arıtma süreçlerinde yetersiz uzaklaştırılmasının sonucunda, bu bileşikler alıcı ortamlarda birikerek su kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Özdemir, 2018; Liu vd., 2020; Kumar vd., 2021). Potansiyel olarak ekosistem sağlığını tehdit eden seviyelere ulaşabilmektedir. Özellikle farmasötikler, pestisitler, endokrin bozucular gibi organik kirleticiler, sucul yaşam ve insan sağlığı üzerinde uzun vadeli etkiler yaratabilir (Li vd., 2024).

Biyolojik arıtım süreçleri, düşük işletme maliyetleri ve enerji gereksinimi sayesinde ekonomik açıdan sürdürülebilir seçenekler sunmakta ve büyük ölçekli uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, geleneksel biyolojik sistemler mikrokirleticilerin yapısal çeşitliliği ve biyolojik olarak zor parçalanabilir özellikleri nedeniyle bu bileşikler üzerinde sınırlı bir giderim performansı sergilemektedir. Süreç verimliliği; mikrobiyal topluluğun uyumu, kirletici konsantrasyonu ve temas süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Uygulama kolaylığına rağmen, yalnızca biyolojik yöntemlerin mikrokirleticilerin etkin uzaklaştırılması açısından yetersiz kalabileceği göz önünde bulundurulmalı; bu nedenle biyolojik sistemlerin ileri oksidasyon, adsorpsiyon veya membran teknolojileriyle desteklenmesi bütüncül bir arıtım yaklaşımı için önem taşımaktadır.

5.2. Mikrokirleticilerin arıtımında ileri prosesler

Atıksu arıtımında geleneksel arıtım yöntemleri, arıtma tesisine gelen veya deşarj edilen atıksudaki tüm mikrokirleticileri istenilen düzeyde gidermemektedir. Bu sebeple ileri arıtma yöntemlerinin, örneğin; ileri oksidasyon süreçleri, membran filtrasyon ve elektrokimyasal arıtım prosesleri gibi daha sofistike teknolojilerin

kullanımını giderek daha önemli hale getirmektedir.

5.2.1. İleri oksidasyon prosesleri (AOPs)

Kompleks organik mikrokirleticilerin mineralizasyonunda ileri oksidasyon prosesleri (AOP'ler), umut verici yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Oluwole vd., 2020). AOP'ler temelinde yüksek oksidasyon potansiyeli olan güçlü oksidanların kullanımına dayanmaktadır (Palit vd., 2021). Bu prosesler de yaygın olarak oksidasyon potansiyeli 2,8 V olan OH• (hidroksil) radikallerini kullanır.

Hidroksil radikalleri, atıksu ve su arıtmada kullanılan en güçlü oksidanlarından (Bilińska, 2018). Organik bileşikler mineralize ederek karbondioksit (CO₂) ve suya (H₂O) dönüştüren oldukça hızlı ve seçici olmayan bir oksidasyon sağlar (Lee ve von Gunten, 2010).

Ozonun sulu ortamda parçalanması (Derco vd., 2021), UV ışığı ile aktive edilen hidrojen peroksit (Sturm vd., 2022), hidrojen peroksit fotolizi (Baycan, 2021), fenton reaksiyonu (González-Rodríguez vd., 2024; Pisharody vd., 2022) ve elektrokimyasal oksidasyon (Oturam vd., 2015) gibi süreçler yaygın olarak kullanılan AOP'lerdir.

AOP'ler, Tablo 1'de kimyasal ve fotokimyasal proses olarak sınıflandırılmıştır (Wypart-Pawul vd., 2023).

İleri oksidasyon prosesleri, çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Oksidasyon konsantrasyonu, uygulanan ışık kaynağının dalga boyu, organik maddelerin özellikleri, pH değeri ve oksidasyon sürecinin verimliliğini etkileyen temel parametrelerdir (Miklos vd., 2018).

İleri oksidasyon yöntemleri, özellikle su ve atıksu arıtımında farmasötik bileşikler, pestisitler ve endokrin bozucular gibi dirençli mikrokirleticilerin gideriminde etkili bir çözümdür (Kundan vd., 2022; Pisharody vd., 2022). Bunlara ek olarak; uygulama maliyetleri, enerji gereksinimi ve reaktif kimyasalların güvenli kullanımı gibi bazı zorluklar mevcuttur. Uygulama açısından pilot ölçekten tam ölçekli

sistemlere geçişte mühendislik ve proses optimizasyonu gerektiren teknik zorluklar söz konusu olabilmektedir. Buna rağmen, yüksek giderim verimliliği ve geniş kirlenici yelpazesi üzerinde etkili olması, AOP'leri mikrokirleticilere

karşı güçlü ve stratejik bir seçenek haline getirmektedir. Bu nedenle, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak adına ileri oksidasyon yöntemlerinin optimize edilmesi ve yenilikçi teknolojilerle birleştirilmesi oldukça önemlidir.

Tablo 1. AOP'lerin sınıflandırılması

Table 1. Classification of AOPs

AOP'ler			
Kimyasal Prosesler	-O ₃ ve H ₂ O ₂ oksidasyonu -Fenton reaksiyonu -Elektrokimyasal oksidasyon -Islak hava oksidasyon -Süperkritik su oksidasyonu	Fotokimyasal Prosesler	-UV fotolizi -UV/O ₃ kullanılan proses -UV/H ₂ O ₂ kullanılan proses -UV/O ₃ /H ₂ O ₂ kullanılan proses -Foto-Fenton reaksiyonu -Yarı iletkenlerin sulu süspansiyonlarında fotokatalitik bozunma -Ultrasonik süreçler

5.2.2. Membran teknolojileri

Mikrokirleticilerin, özellikle farmasötikler, kişisel bakım ürünleri ve pestisitler gibi çevresel ve halk sağlığı üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini gidermek için bu kimyasalların etkili bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Membran prosesleri, bu kirlenicilerin gideriminde ileri arıtım prosesleri arasında ön plana çıkmıştır (Shanmuganathan vd., 2017).

Ters ozmoz, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve mikrofiltrasyon membran filtrasyon yöntemleri arasında yer almaktadır (Peng vd., 2020). Ters ozmoz ve nanofiltrasyon, özellikle farmasötikler ve kişisel bakım ürünleri gibi mikrokirleticilerin atıksudan uzaklaştırılmasında etkili yöntemlerdir (Song vd., 2020; Xu vd., 2020). Ters ozmoz ve nanofiltrasyon prosesleri, yüksek verimliliklerde giderim sağlayan ve su kalitesini artıran yöntemlerdir (Alhussaini vd., 2024). Membran prosesler, kirlenicilerin fiziksel bir bariyerle tutulması neticesinde geçirgenliğe bağlı olarak etkili bir ayırma mekanizması sağlar. Membran proseslerinin verimliliği, membran yapısının özelliklerine, çalışılan basıncı, besleme suyu özelliklerine ve kirlilik yükü gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Othman vd., 2021).

Nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO); mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasında oldukça etkilidir. NF, tipik olarak 1-2 nm aralığında gözenek boyutlarına sahiptir. Bu aralıktaki gözenek boyutu da mikrokirleticilerin yük yoğunluğuna ve iyonik yapısına bağlı olarak yüksek seçicilik sunar. RO ise daha küçük ve sıkı bir gözenek yapısına sahiptir (Castaño Osorio vd., 2022). Basınç farkı ile su moleküllerini geçirirken, çözünmüş organik ve inorganik maddeleri etkin bir şekilde tutmaktadır (Garud vd., 2011). Yapılan çalışmalar, RO'nun mikrokirleticilerin gideriminde oldukça etkili bir proses olduğunu göstermektedir (Belete vd., 2023; Sahar vd., 2011).

Membran biyoreaktörleri (MBR); membran filtrasyonunu biyolojik arıtma ile birleştirilmesi sonucu oluşan proseslerdir (Al-Asheh vd., 2021). Mikrokirleticilerin gideriminde oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır. MBR'lerin en büyük avantajı, biyolojik arıtmanın mikrobiyal parçalanma ile mikrokirleticileri uzaklaştırabilmesinin yanı sıra membran filtrasyonunun bu süreçte kalan mikrokirleticileri etkili bir şekilde uzaklaştırmasıdır (Genz vd., 2024; El Brahmi vd., 2024; Sözüdoğru, 2021). Bu hibrit sistemler, biyolojik süreçlerin yeterince etkili olmadığı dirençli mikrokirleticilerin giderilmesini sağlamaktadır.

Membran prosesleri, yüksek arıtım verimliliği sağlamasının yanı sıra kimyasal kullanımı gerektirmediğinden sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Ancak, membran tıkanıklığı ve yüksek enerji tüketimi, bu proseslerin geniş ölçekli uygulamalarında karşılaşılan temel zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır (Shen vd., 2024). Membranların düzenli temizliği ve değiştirilmesi, maliyet etkinliği açısından göz önünde bulundurulması gereken ek yüklerdir. Uygulama açısından, membran sistemleri genellikle küçük ve orta ölçekli tesislerde daha verimli çalışırken, büyük ölçekli uygulamalarda enerji tüketimi ve membran ömrü gibi faktörler, ekonomik sürdürülebilirlik açısından sınırları zorlamaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, membranların geliştirilmesine, enerji verimliliğinin artırılmasına ve membran tıkanıklığı probleminin azaltılmasına odaklanarak mikrokirleticilerin gideriminde daha sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

5.2.3. Elektrokimyasal prosesler

Elektrokimyasal prosesler, son yıllarda su ve atıksulardaki mikrokirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılması için öne çıkan yenilikçi ve çevre dostu ileri arıtma yöntemleridir (Włodarczyk-Makuła vd., 2023). Bu proseslerde elektrik akımı yardımıyla kirleticilerin oksidasyon, redüksiyon veya koagülasyon yoluyla giderilmesini sağlar. Kimyasal madde kullanımını azaltması ve yüksek arıtma verimliliği sunması, bu yöntemleri cazip kılmaktadır (Pulkka vd., 2014).

Elektrooksidasyon; kirleticilerin doğrudan veya dolaylı olarak oksitlenmesiyle temeline dayanan bir prosestir. Doğrudan elektrooksidasyon da, kirleticiler elektrot yüzeyinde oksidasyona uğrarken dolaylı elektrooksidasyon da elektrot yüzeyinde üretilen hidroksil radikalleri ve diğer güçlü oksidanlar, kirleticilerin parçalanmasını sağlar (Dede Sağsöz, 2024). Özellikle farmasötikler ve pestisitler gibi dirençli organik bileşiklerin mineralizasyonu bu prosesle sağlanabilmektedir (Sözüdoğru, 2021; Qiao ve Xiong, 2021).

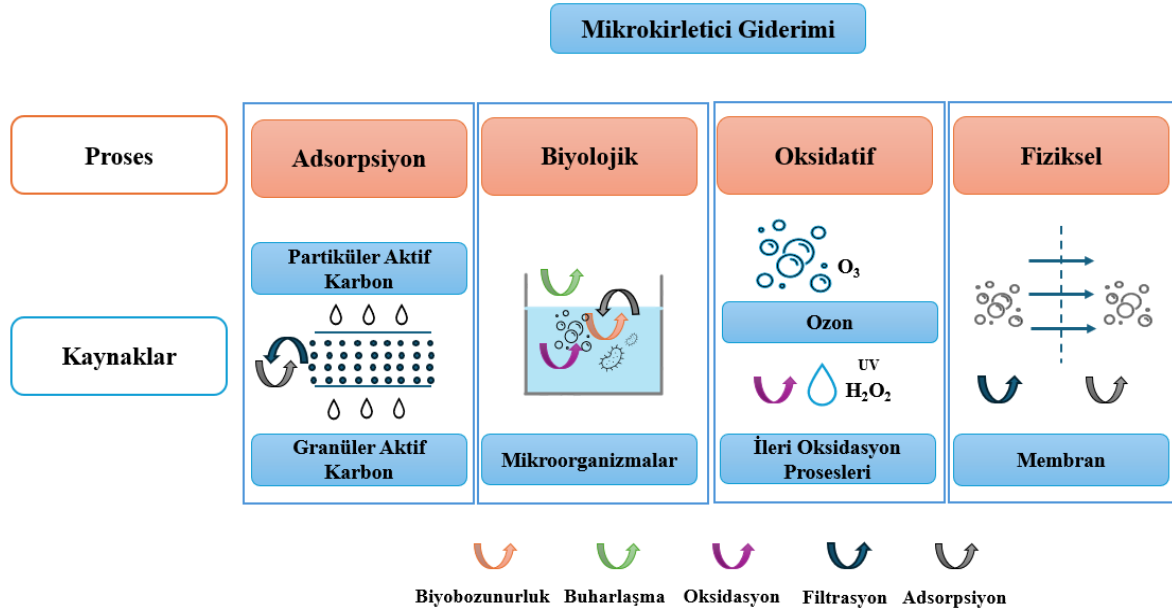
Elektrokoagülasyon; demir veya alüminyum elektrotların çözünmesiyle suda koagülant maddelerin üretilmesini kapsayan bir prosestir. Bu koagülantlar, kirleticileri adsorbe ederek veya çökeltirerek uzaklaştırır. Prosesin verimliliği; akım yoğunluğu, pH ve elektrot malzemesine bağlı olarak değişmektedir (Mollah vd., 2004). Elektrokoagülasyon mikrokirleticilerin partikül boyutunda tutulmasını ve ayrıştırılmasını hızlandırarak etkili bir giderim sağlar (Biswas ve Goel, 2022).

Elektroflotasyon; elektrik akımı ile suyun elektrolizi sonucu oksijen ve hidrojen kabarcıkları üretilmesine ve bu kabarcıkların suyun içindeki askıda katı maddeler ve mikrokirleticiler ile birleşerek yüzeye çıkıp ayrılmasını sağlayan bir yöntemdir (Włodarczyk-Makuła vd., 2023; Zaidi vd., 2019). Elektroflotasyonun avantajı, yüksek etkinlikte küçük parçacıkların ve çözünmüş kirleticilerin giderilmesi için kullanılması ve kimyasal madde eklenmesine ihtiyaç duyulmamasıdır (Bazrafshan vd., 2015). Bu yöntem, elektrokoagülasyon ile birleştirildiğinde, daha kapsamlı ve etkili bir arıtma sağlanabilir (Biswas ve Goel, 2022).

Elektrokimyasal proseslerin; ekstra kimyasal gereksiniminin bazı durumlar hariç olmaması, yüksek arıtma verimliliği ve çevreye uyumlu olması avantajları arasında bulunur. Bununla birlikte, enerji tüketimi, elektrot kirlenmesi ve yan ürün oluşumu gibi bazı zorluklar, geniş ölçekli uygulamalar için önemli sınırlamalardır (Dede Sağsöz, 2024). Bunların önüne geçilmesi halinde mikrokirleticilerin gideriminde bu prosesler ile yüksek verimliliğe erişebilmek mümkündür.

Ayrıca, yüksek başlangıç maliyetleri ve ekipman gereksinimleri, özellikle büyük ölçekli sistemlerde ekonomik sürdürülebilirliği sınırlamaktadır. Mikrokirleticiler için elektrokimyasal sistemlerin kullanımı, yüksek giderim verimliliği sağlasa da, maliyet ve işletme sürekliliği göz önüne alınması gereken önemli faktörlerdir.

Şekil 6'da atıksulardaki mikrokirleticilerin giderim stratejilerine genel bir bakış verilmiştir.



Şekil 6. Atıksulardaki mikrokirleticilerin giderim stratejilerine genel bir bakış.

Figure 6. An overview of the removal strategies of micropollutants in wastewater.

6. Mikrokirleticilerin Gideriminde Kullanılan Yeni Nesil Prosesler

Günümüzde mikrokirleticilerin etkili bir şekilde arıtılması, çevresel sürdürülebilirliği ve insan sağlığını korumak adına önemli bir konu haline gelmiştir. Geleneksel arıtım teknolojileri, mikrokirleticilerin gideriminde belirli bir etkililik seviyesine ulaşabilse de, bu bileşiklerin karmaşık ve direnç yapısı nedeniyle yetersiz kalabilmektedir. Bu kapsamda, ileri arıtım teknolojileri devreye girmekte ve daha yüksek giderim verimleri sunmaktadır. Ancak bu tekniklerin genellikle yüksek maliyetli ve geniş alan gereksinimleri nedeniyle uygulamada zorluklar meydana gelmektedir. Bu durum, alternatif ve daha sürdürülebilir çözümler arayışını teşvik etmiştir. Son zamanlarda yeni nesil prosesler ortaya çıkmış ve mikrokirleticilerin arıtımında umut vaat eden teknolojiler olmuşlardır.

6.1. Yapay sulak alanlar (biyoremediasyon ve fitoremediasyon yaklaşımları)

Yapay sulak alanlar (CW'ler), mikrokirleticilerin gideriminde umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. CW'ler hem mikrokirleticilerin etkin

bir şekilde giderimini sağlarken hem de kent alanlarında biyolojik çeşitliliği artırarak ekosisteme katkıda bulunur (Knapp vd., 2019). Yapılan araştırmalar, özellikle dikey akışlı alt yüzey akışlı CW'lerin, mikrokirleticilerin gideriminde etkili olduğunu göstermektedir (Brunhoferova vd., 2022). Bu sistemlerde mikrokirletici giderim mekanizmaları; bitkiler tarafından kirleticilerin alınması ve parçalanmasını içeren fitoremediasyon, toprak matrisi üzerindeki adsorpsiyon ve mikroorganizmaların kirleticileri ayrıştırması sonucu meydana gelen biyoremediasyon olarak sınıflandırılabilir (Brunhoferova vd., 2021). Özellikle biyoremediasyon, mikrokirleticilerin doğal ve müdahalesiz bir şekilde giderilmesi açısından ileri çıkan bir proses olmuştur. Rhizosferdeki bakteriler ve mantarlar gibi mikroorganizmalar, bu sürecin ana bileşenleridir. Bitkilerin kökleri etrafındaki bu zengin mikroorganizmalar, kirleticileri parçalayıp ayrıştırırlar (Stottmeister vd., 2003). Bu tür biyolojik mekanizmaların anlaşılması ve optimize edilmesi, sürdürülebilir ve etkin maliyetli mikrokirletici yönetim stratejilerinin geliştirilmesine imkan vermektedir.

Yapay sulak alanlar, doğayla uyumlu yapıları sayesinde mikrokirleticilerin gideriminde çevre dostu ve ekonomik bir seçenek halini almaktadır. Enerji gereksiniminin düşük olması, bu sistemleri özellikle küçük yerleşim yerleri için uygulanabilir kılmaktadır. Ancak sistemin verimliliği; kullanılan bitki türüne, iklim koşullarına ve kirletici tipine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca geniş alan ihtiyacı ve mevsimsel değişkenlikler, bu yöntemin her koşulda etkin çalışmasını engelleyebilen faktörlerdir. Bu nedenle yapay sulak alanlar, düşük maliyetli ve sürdürülebilir çözümler sunsa da, mikrokirleticilerin tamamen giderilmesi açısından genellikle destekleyici bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

6.2. Plazma arıtım prosesleri

Plazma arıtım, mikrokirleticilerin su içerisinde plazma oluşturularak radikaller aracılığıyla oksitlenmesini içeren bir prostestir. Yüksek enerjili plazma, güçlü oksidanlar ve radikaller oluşturarak organik mikrokirleticileri giderebilmektedir. Bu yöntem henüz gelişme aşamasında olup, özel uygulamalarda etkili olacağı öngörülmektedir (Nippatlapalli ve Ganta, 2024).

Plazma arıtım prosesleri, yüksek enerjili reaktif türler oluşturarak mikrokirleticilerin yapılarını parçalama potansiyeli taşıyan ileri düzey teknolojilerden biridir. Özellikle biyolojik yolla giderimi zor olan farmasötik kalıntılar ve sentetik kimyasallar için etkili sonuçlar verebilmektedir. Sistemlerin kurulumu ve işletimi için gereken teknik altyapı ve enerji maliyetleri, yaygın kullanımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca prosesin karmaşıklığı ve sürekli çalışmaya uygun olmaması gibi faktörler de göz önünde bulundurulduğunda, plazma teknolojileri henüz geniş ölçekli arıtma tesisleri için ekonomik ve pratik bir çözüm sunmamaktadır. Belirli koşullarda ve özellikle kombine sistemlerin bir parçası olarak değerlendirildiğinde, mikrokirleticilere karşı yüksek etkinlik sağlayabilecek yenilikçi bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

6.3. Mikroalgler ile arıtım

Mikroalglerin mikrokirleticilerin giderimi için kullanılması, biyolojik arıtma süreçlerine doğal ve etkili bir yaklaşım olarak açığa çıkmaktadır. Mikrokirleticilerin mikroalglerin yüzeyine bağlanarak uzaklaştırılması işlemi adsorpsiyonu sağlar iken, bu kirleticilerin alg hücrelerinde birikmesini ise biyobirikimi sağlar. Bunun yanı sıra meydana gelen fotodegradasyon, mikroalglerin ışık enerjisi ile mikrokirleticilerin bozunmasına sebep olur. Biyotransformasyon ve biyodegradasyon, mikroalglerin bu kirleticileri biyolojik olarak dönüştürüp zararsız hale getirmelerini sağlar. Ayrıca volatilizasyon ile de kirleticilerin gaz haline dönüştürülerek atmosferle atılmasını meydana gelmiş olur. Bu yöntemin etkinliğini artırmak ise proses optimizasyonu ile mümkündür (Onay ve Onay, 2024).

Mikroalgler ile arıtım, hem mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasında hem de biyokütle üretimi yoluyla sürdürülebilir kaynak yönetiminde dikkat çeken bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı alg türleri, özellikle farmasötik ve kişisel bakım ürünleri gibi kalıcı kirleticileri biyolojik süreçlerle parçalayabilmektedir. Bu yönüyle çevre dostu ve potansiyel olarak düşük maliyetli bir seçenek sunmakta, ancak sistemin verimli çalışabilmesi için kontrollü ışık, sıcaklık ve besin koşullarına ihtiyaç duyulması, hem enerji gereksinimini artırmakta hem de büyük ölçekli uygulamalarda uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, giderim verimliliği kirletici türüne ve alg türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bu nedenle mikroalg temelli arıtım, mikrokirleticilere karşı umut vadeden bir yaklaşım olsa da, yaygın kullanımı için teknik iyileştirmelere ve daha fazla saha verisine ihtiyaç duyulmaktadır.

6.4. Fotokatalitik Membran Reaktörler

Bu yöntem, fotokataliz ve membran filtrasyon teknolojilerinin birleştirilmiş halidir. Fotokatalizör ile kaplı membranlar, UV ışığı ile mikrokirleticileri oksitlerken, membran filtrasyonu ile katı parçacıkların uzaklaşmasını sağlamaktadırlar. Böylece mikrokirleticilerin

gideriminde çift etki sağlanmış giderim verimliliği artırılmış olur (Song vd., 2023).

Bu teknolojinin yaygın kullanımı hâlâ sınırlıdır; çünkü fotokataliz sürecinde kullanılan malzemelerin maliyeti yüksek olup, uzun vadede membran tıkanması gibi operasyonel sorunlar da ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, fotokatalitik membran reaktörler yüksek etkinlik potansiyeline sahip olsa da, maliyet ve operasyonel sürdürülebilirlik açısından halen daha geliştirilmesi gereken bir arıtım alternatifi olarak karşımıza çıkmaktadır.

6.5. Yeşil Kimya Temelli Prosesler

Yeşil kimya, çevreye daha az zarar veren ve daha az toksik maddeler kullanılarak mikrokirleticilerin giderilmesini hedeflemektedir. Daha yeşil yöntemlerle biyolojik enzimler ve çevre dostu çözücüler kullanarak mikrokirleticilerin parçalanması üzerine kurulu bir prosestir. Bu proses; mikrokirleticilerin çeşitli özellikleri göz önüne alınarak seçilmektedir. Optimizasyon sağlandığında; uygun maliyet, çevresel sürdürülebilirlik ve giderim verimliliği bakımından öne çıkan proseslerdendir (Abdelhamid vd., 2024). Ancak mikrokirleticilerin çevredeki mevcut birikimleri dikkate alındığında, yeşil kimya proseslerinin tek başına yeterli bir giderim verimliliği sunması mümkün olmamaktadır. Ayrıca bu süreçlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği hâlen gelişim aşamasında olduğundan etkinliği çoğu zaman hedef bileşiklerin çeşitliliği karşısında sınırlı kalabilmektedir. Bundan dolayı yeşil kimya temelli yaklaşımlar, kaynak kontrolü ve sürdürülebilir üretim politikaları kapsamında değerli olsa da, mevcut kirlilik yükünü ortadan kaldırmak için ileri arıtım teknolojileriyle entegre bir şekilde kullanılmalıdır.

7. Mikrokirletici Yönetimi ve Politikalar

Mikrokirleticiler düşük konsantrasyonlarda bile çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle, mikrokirleticilerin etkili yönetimi ve izlenebilmesi için çeşitli politika ve düzenleme

yaklaşımlarının yanı sıra sürdürülebilir stratejiler geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Mikrokirleticiler için emisyon sınır değerlerinin belirlenmesi, su kaynaklarına ulaşan kirlilik yükünü de sınırlandırmaktadır. Avrupa Birliği'nin Su Çerçeve Direktifi (WFD), bazı mikrokirleticiler için alıcı ortamda sağlanması gereken kalite kriterleri belirlenmiştir (European Commission, 2015). Bu kapsamda, AB izleme listesi (watch list) 2015/495/EU spesifik kirleticiler ve öncelikli maddeler ile ilgili bir liste hazırlamıştır (Sousa vd., 2018).

Mikrokirleticilere dair izlenebilirlik ve etiketleme sistemi oldukça önemlidir. Üreticilerin bu kimyasalların içeriklerini açıkça bildirmesi sayesinde; düzenleyiciler ve kullanıcılar, bu kimyasalların çevresel risklerini daha iyi görebilmektedir (Gaw vd., 2014). Buna ilaveten mikrokirleticiler yerine yeşil kimya prensipleri ile üretilen daha çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin geliştirilmesi de oldukça önemlidir. Kimyasal ürünlerin üretiminde çevre dostu alternatiflerin kullanımını uzun vadede mikrokirletici kirliliğini azaltacaktır (Kümmerer, 2019).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme suyunda bulunan farmasötik maddelere ilişkin olarak WHO/HSE/WSH/11.05 numaralı bir rehber doküman yayımlamıştır. Türkiye'de ise Su Çerçeve Direktifi doğrultusunda, su kalitesi ve sınıflandırmasına yönelik Avrupa Birliği mevzuatının önemli bölümleri ulusal mevzuata dahil edilmiştir. Bu kapsamda, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (RG:28483, 30.11.2012) ile Yüzeysel Sular ve Yeraltı Sularının İzlenmesine Dair Yönetmelik (RG:28910, 11.02.2014) yürürlüğe girmiştir.

Mikrokirleticilerin atık su arıtma tesislerine ulaşmadan önce kontrol edilmesi, kirliliğin en etkili yönetim stratejilerindendir. Eğer hastane ve endüstri atıklarının atık su arıtma tesislerinden bağımsız olarak arıtılmasını sağlayan sistemler yaygınlaşırsa, mikrokirleticilerin kirlilik yükünü büyük ölçüde azaltılmış olacaktır (Kümmerer, 2009). Ayrıca etkin arıtımın sağlanması ile geri

kazanılan suların sulama suyu olarak tekrar kullanılması doğal su kaynaklarındaki mikrokirletici baskısını da azaltacaktır (Lyu vd., 2019).

Mikrokirleticiler için atıksu arıtma tesislerinde henüz belirlenmiş net deşarj standartları bulunmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, mevcut arıtma tesislerinin çoğunlukla üçüncül arıtma seviyesine kadar işlem yapmaları ve bu seviyedeki arıtımın mikrokirleticileri tamamen giderememesidir. Ayrıca, mikrokirleticilerin yapısal çeşitliliği nedeniyle her arıtma yöntemi bu kirleticileri aynı etkinlikte uzaklaştıramamaktadır. İsviçre mikrokirleticilerin giderimine yönelik düzenleyici bir adım atmış ve ulusal mevzuatı kapsamında 100 atıksu arıtma tesisine dördüncül arıtma aşamasının eklenmesine karar vermiştir (Üstün Odabaşı vd., 2020).

Mikrokirleticiler; su ve hava yoluyla sınırları aşabilmektedir. Bu nedenle uluslararası işbirlikleri, etkili bir kontrol mekanizması sağlamaktadır. Örneğin, Stockholm Sözleşmesi, kalıcı organik kirleticilere dair küresel bir kontrol sistemi sağlayarak mikrokirleticilerin çevresel etkilerini sınırlamayı hedeflemektedir (UNEP, 2001). Bu strateji ve öneriler; mikrokirleticilerin genel çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada önemli adımlar sunmaktadır.

8. Sonuç ve Öneriler

Mikrokirleticiler, günümüzde giderek daha sık karşılaşılan ve etkileri henüz tam olarak kontrol altına alınamayan kirleticiler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bileşikler uzun süre çevrede kalabilmeleri biyolojik sistemler de birikmeleri ve canlıların üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir çevresel risk faktörüdür. İlaç kalıntıları, kişisel bakım ürünleri, endokrin sistem bozucular ve tarımsal pestisitler en yaygın mikrokirleticilerdir.

Bu kirleticilerin çevresel etkileri sadece kısa vadeli toksik etkilerle sınırlı kalmamaktadır. Bu etkilerin yanı sıra hormonal bozukluklar, davranış değişiklikleri, üreme sorunları gibi çeşitli biyolojik bozulmalara da neden olabilmektedir.

Ayrıca, bu bileşikler besin zincirinde yukarı doğru taşınarak, biyobirikim ve biyomagnifikasyon ile insanlara kadar ulaşmaktadır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde geleneksel atıksu arıtma sistemlerinin bu kirleticilerin giderimi konusunda istenilen verimlilikte arıtımın sağlanamadığı görülmüştür. Bu kapsamda, ileri arıtım teknolojilerine olan ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerin mikrokirletici gideriminde kullanılmaları ile yüksek verimlilik elde edilmesine rağmen, uygulamada bazı kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Yüksek enerji gereksinimi, işletme maliyetleri, özel altyapı gereksinimleri bu sistemlerin geniş ölçekli kullanımının önüne geçmektedir. Dolayısıyla, bu teknolojilerin sadece teknik açıdan değil, aynı zamanda maliyet, uygulanabilirlik ve etkinlik yönünden kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gereklidir. Özellikle enerji verimliliği yüksek, işletme maliyetleri düşük, modüler yapıda ve yerel kaynaklara uyurlanabilir sistemlerin geliştirilmesi, bu alanda atılacak önemli adımlardan biri olarak görülmektedir. Ayrıca, farklı ileri arıtma tekniklerinin bir arada kullanıldığı hibrit sistemlerin geliştirilmesi, hem verimliliği artırmakta hem de ekonomik çözümler sunmaktadır.

Teknik yaklaşımların yanı sıra, mikrokirleticilerin kaynağında azaltılmasına yönelik stratejiler de büyük önem taşımaktadır. Bilinçli ilaç kullanımı, pestisit tüketiminin sınırlandırılması, kişisel bakım ürünlerinde çevre dostu içeriklerin teşviki gibi önlemler, bu kirleticilerin çevresel dolaşımını azaltacaktır. Ayrıca, üretici sorumluluğunun artırılması ve ürün etiketleme gibi politika araçları ile tüketicilerin çevresel etkileri daha az olan ürünlerin tercih edilmesini sağlayacaktır.

Ulusal düzeyde yürürlüğe konacak yasal düzenlemeler ve uluslararası düzeyde geliştirilecek iş birlikleri, mikrokirletici yönetiminin başarısı için kritik öneme sahiptir. Özellikle su kaynaklarının paylaşıldığı havzalarda, sınır aşan etkilerin dikkate alınarak ortak yönetim stratejileri geliştirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, mikrokirleticiler günümüz çevre yönetiminin en karmaşık sorunlarından birini oluşturmaktadır. Bu sorunun çözümü, sadece arıtma teknolojilerine değil, aynı zamanda bütüncül bir yönetim anlayışına bağlıdır. Akademi, sanayi, politika yapıcılar ve toplumun tüm kesimleri arasında kurulacak iş birlikleri, sürdürülebilir ve etkili çözümler üretilmesini mümkün kılacaktır.

Yazar Katkısı

“Her iki yazar da bu çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur. Literatür taraması, veri analizleri ve yazım süreçleri dahil olmak üzere tüm aşamalar ortak bir çalışma ve işbirliği içinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, çalışmanın hazırlanması ve nihai versiyonun oluşturulmasında birlikte çalışmış ve onaylamışlardır.”

Çıkar Çatışması Beyanı

“Yazarlar, bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder. Araştırmanın tasarımı, yürütülmesi ve sonuçlarının yazımı sırasında hiçbir finansal, ticari veya kişisel çıkar çatışması söz konusu olmamıştır.”

References

- Abdelhamid, M.A.A., Khalifa, H.O., Yoon, H.J., Ki, M.R., Pack, S.P. (2024). Microbial immobilized enzyme biocatalysts for multipollutant mitigation: harnessing nature's toolkit for environmental sustainability. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 616. <https://doi.org/10.3390/ijms25168616>
- Ahmad, M., Lee, S.S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J.E., Ok, Y.S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>
- Akkurt, Ş., Oğuz, M. (2019). Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikro Kirleticilerin Arıtılabilirliği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 58-77. <https://doi.org/10.17780/ksujes.451940>
- Al-Asheh, S., Bagheri, M., Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>
- Alhussaini, M.A., Souza-Chaves, B.M., Felix, V., Achilli, A. (2024). Comparative analysis of reverse osmosis and nanofiltration for the removal of dissolved contaminants in water reuse applications. *Desalination*, 586, 117822. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117822>
- Alloway, B.J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Baycan, N. (2021). Micro-Pollutant degradation using nanostructured catalysts. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(3), 378-383. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.66066>
- Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., Mahvi, A.H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process- a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 26, 13,74. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0233-8>
- Belete, B., Desye, B., Ambelu, A., Yenew, C. (2023). Micropollutant removal efficiency of advanced wastewater treatment plants: a systematic review. *Environmental Health Insights*, 8,17. <https://doi.org/10.1177/11786302231195158>
- Bhalla, G., Bhalla, B., Kumar, V., Sharma, A., Saruchi, Upadhye, V.J., Pathak, D. (2022). Pesticides Remediation Technologies from Water and Wastewater, Chapter 11 - Remediation of pesticide residues from contaminated water using various nanomaterials and nanocomposites. ISBN: 978-0-323-90893, Elsevier, 229-251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90893-1.00011-8>
- Bhatt, P., Bhandari, G., Bilal, G. (2022). Occurrence, toxicity impacts and mitigation of emerging micropollutants in the aquatic environments: Recent tendencies and perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107598. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107598>
- Bilińska, L. (2018). Decolorization of textile wastewater by Advanced Oxidation Processes (AOPs) under industrial conditions, Doctoral thesis, Lodz University of Technology, Poland.

- Biswas, B., Goel, S. (2022). Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: A review. *Chemosphere*, 302, 134709. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134709>
- Bolong, N., Ismail, A.F., Salim, M.R., Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, 239(1-3), 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>
- Brunhoferova, H., Venditti, S., Laczny, C.C., Lebrun, L., Hansen, J. (2022). Bioremediation of 27 Micropollutants by Symbiotic Microorganisms of Wetland Macrophytes. *Sustainability*, 14(7), 3944. <https://doi.org/10.3390/su14073944>
- Brunhoferova, H., Venditti, S., Schlien, M., Hansen, J. (2021). Removal of 27 micropollutants by selected wetland macrophytes in hydroponic conditions. *Chemosphere*, 281, 130980. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130980>
- Castaño Osorio, S., Biesheuvel, P.M., Spruijt, E., Dykstra, J.E., van der Wal, A. (2022). Modeling micropollutant removal by nanofiltration and reverse osmosis membranes: considerations and challenges. *Water Research*, 225, 119130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119130>
- Ceylan, Z., Mustafaoğlu, D. (2018). Çevre-Bilim ve Teknoloji, mikrokirleticiler' in izleme-analiz ve arıtım yöntemleri, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, ISBN: 978-605-7594-06-8, İstanbul.
- Debrah, J.K., Vidal, D.G., Dinis, M.A.P. (2021). Raising Awareness on Solid Waste Management through Formal Education for Sustainability: A Developing Countries Evidence Review. *Recycling*, 6(1), 1-21. <https://doi.org/10.3390/recycling6010006>
- Dede Sağsöz, Y. (2024). Elektrokimyasal Yöntemlerle Yerde Dezenfektan Üretim Sistemlerinin Performansının İncelenmesi ve Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Delhiraja, K., Vellingiri, K., Boukhvalov, D.W., Philip, L. (2019). Development of highly water stable graphene oxide-based composites for the removal of pharmaceuticals and personal care products. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 2899-2913. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02668>
- Derco, J., Dudáš, J., Valičková M., Šimovičová, K., Kecskés, J. (2021). Removal of micropollutants by ozone-based processes. *Processes*, 9, 1013. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.03.014>
- Doğruel, S., Gürel, M., Pehlivanoğlu-Mantas, E. (2022). Mikrokirleticiler: Tanım, Mevzuat ve Ülkemizde Atıksularda ve Yerüstü Sularında Mevcudiyetleri. *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(2), 133-144.
- Durmaz, E., Giray, B. (2013). Çevresel bir endokrin bozucu: Bisfenol A ve toksik etkilerinin değerlendirilmesi. *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 56(4), 192-199.
- Ebele, A.J., Abdallah, M.A.E., Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*, 3(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.12.004>
- El Brahmi, A., Azzellino, A., Malpei, F., Buttiglieri, G. (2024). Are Membrane Bioreactors Really More Efficient in Removing Pharmaceutical Substances?—Variance Component Analysis of Micropollutant Removal. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235, 728. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07505-7>
- Ergin, B. (2023). Kentsel Atıksudan Adsorpsiyon ve Membran Filtrasyon Prosesleri ile Mikrokirleticilerin Giderimi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye.
- European Commission. (2015). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. The European Parliament and The Council of The European Union.
- Garud, R.M., Kore, S.V., Kore, V.S., Kulkarni, G.S. (2011). A short review on process and applications of reverse osmosis. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 01, 233-238. <https://www.environmentaljournal.org/1-3/ujert-1-3-2.pdf>
- Gaw, S., Thomas, K.V., Hutchinson, T.H. (2014). Sources, impacts and trends of pharmaceuticals in the marine and coastal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369 (1656), 20130572. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0572>
- Genz, P., Hofmann, A.H., Katayama, V.T., Reemtsma, T. (2024). Multiple barriers for micropollutants in nutrient recovery from centrate – combining membrane bioreactor

- and electrodialysis. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10, 1908-1919. <https://doi.org/10.1039/D4EW00063C>
- Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Mathissen, M., Quik, J., Tromp, P., Gustafsson, M., Franco, V., Dilara, P. (2024). Contribution of road vehicle tyre wear to microplastics and ambient air pollution. *Sustainability*, 16(2), 522. <https://doi.org/10.3390/su16020522>
- González-Rodríguez, J., Conde, J.J., Vargas-Osorio, Z., Vázquez-Vázquez, C., Piñeiro, Y., Rivas, J., Feijoo, G., Moreira, M.T. (2024). LED-driven photo-Fenton process for micropollutant removal by nanostructured magnetite anchored in mesoporous silica. *Journal of Environmental Management*, 349, 119461. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119461>
- Gupta, V.K., Ali, I. (2013). *Environmental water: Advances in treatment, remediation and recycling*. Elsevier Science, ISBN: 978-0-444-59399-3, UK.
- Hammoudani, Y., Dimane, F., Haboubi, K., Benaissa, C., Benaabidate, L., Bourjila, A., Achoukhi, I., Boudammoussi, M.E., Faiz, H., Touzani, A., Moudou, M., Esskifati, M. (2024). Micropollutants in wastewater treatment plants: A bibliometric bibliographic study. *Desalination and Water Treatment*, 317, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100190>
- Hejna, M., Kapuścińska, D., Aksmann, A. (2022). Pharmaceuticals in the Aquatic Environment: A Review on Eco-Toxicology and the Remediation Potential of Algae. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 1-40. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137717>
- Husien, Sh., El-taweel, R.M., I. Salim, A., Fahim, I.S., Said, L.A., Radwan, A.G. (2022). Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: Preparation, and modelling. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100325>
- Jeirani, Z., Niu, C.H., Soltan, J. (2017). Adsorption of emerging pollutants on activated carbon. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5), 491-522. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0027>
- Jiang, J., Zhou, Z., Sharma, V.K. (2013). Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micropollutants in waste water-a review from global views. *Microchemical Journal*, 110, 292-300. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.04.014>
- Joosa, L., Tender, C. (2022). Soil under stress: The importance of soil life and how it is influenced by (micro)plastic pollution. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 4(20), 1554-1566. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.03.041>
- Kalay, E., Sarioğlu, H., Özkul, İ. (2021). Design parameters of sand filtration systems in wastewater treatment process, *Advanced Engineering Science*, 1, 34-42.
- Katsigiannis, A., Noutsopoulos, C., Mantziaras, J., Gioldasi, M. (2015). Removal of emerging pollutants through granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 280, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.109>
- Kılınç, G., Keser, A. (2021). Besinlerle alınan endokrin bozucuların pubertal gelişim üzerine etkisi. *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilim Dergisi*, 14(2), 342. <https://doi.org/10.26559/mersinsbd.842650>
- Kim, M.K., Zoh, K.D. (2016). Occurrence and removals of micropollutants in water environment, *Environmental Engineering Research*, 21(4), 319-332. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.115>
- Knapp, S., Schmauck, S., Zehnsdorf, A. (2019). Biodiversity impact of green roofs and constructed wetlands as progressive ecotechnologies in urban areas. *Sustainability*, 11, 5846. <https://doi.org/10.3390/su11205846>
- Krause, S., Baranov, V., Nel, H.A., Drummond, J.D., Kukkola, A., Hoellein, T., Smith, S., Lewandowski, J., Bonet, B., Packman, A.I., Sadler, J., Inshyna, V., Allen, S., Allen, D., Simon, L., Mermillod-Blondin, F., Lynch, I. (2021). Gathering at the top? Environmental controls of microplastic uptake and biomagnification in freshwater food webs. *Environmental Pollution*, 268(1), 115750. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115750>
- Kumar, R., Akbarinejad, A., Jasemizad, T., Fucina, R., Travas-Sejdic, J., Padhye, L.P. (2021). The removal of metformin and other selected PPCPs from water by poly(3,4-ethylenedioxythiophene) photocatalyst. *Science of The Total Environment*, 751, 142302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142302>
- Kundan, S., Mahapatra, S., Ali, M., (2022). Pharmaceutical wastewater as Emerging Contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*, 6, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100076>

- Kurwadkar, S., Hoang, T.V., Malwade, K., Kanel, S.R., Harper, W.F., Struckhoff, G. (2019). Application of carbon nanotubes for removal of emerging contaminants of concern in engineered water and wastewater treatment systems. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4, 12. <http://dx.doi.org/10.1007/s41204-019-0059-1>
- Kümmerer, K. (2009). The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use – present knowledge and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2354-2366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.023>
- Kümmerer, K., Dionysiou, D.D., Olsson, O., Fatta-Kassinos, D. (2019). Reducing aquatic micropollutants – Increasing the focus on input prevention and integrated emission management. *Science of The Total Environment*, 652, 836-850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.219>
- Lee, Y. von Gunten, U. (2010). Oxidative transformation of micropollutants during municipal wastewater treatment: comparison of kinetic aspects of selective (chlorine, chlorine dioxide, ferrate VI, and ozone) and non-selective oxidants (hydroxyl radical). *Water Research*, 44, 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.11.045>
- Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., Li, S. (2024). Comprehensive Review of Emerging Contaminants: Detection Technologies, Environmental Impact, and Management Strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>
- Liu, D., Song, K., Xie, G., Li, L., (2020). MBR-UV/Cl₂ System in Treating Polluted Surface Water with Typical PPCP Contamination. *Scientific Reports*, 10, 8835. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65845-w>
- Luo, Y., W. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai, J. Zhang, S. Liang, and X.C. Wang (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 1, 619-641, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065>
- Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., Jiao, W. (2019). Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. *Journal of Environmental Sciences*, 77, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.08.007>
- Marlatt, V.L., Bayen, S., Castaneda-Cortès, D., Delbès, G., Grigoroza, P., Langlois, V.S., Martyniuk, C. J., Metcalfe, C.D., Parent, L., Rwigemera, A., Thomson, P., Van Der Kraak, G. (2022). Impacts of endocrine disrupting chemicals on reproduction in wildlife and humans. *Environmental Research*, 208, 112584. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112584>
- Matamoros, V., Bayona, J. M. (2006). Elimination of pharmaceuticals and personal care products in subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Science & Technology*, 40(18), 5811-5816. <https://doi.org/10.1021/es0607741>
- Miklos, D.B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K.G., Drewes, J.E., Hübner, U. (2018). Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal Hazardous Materials*, 114(1-3), 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
- Nam, S.W., Choi, D.J., Kim, S.K., Her, N., Zoh, K.D. (2014). Adsorption characteristics of selected hydrophilic and hydrophobic micropollutants in water using activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 270, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.037>
- Nas, B., Dolu, T., Ateş, H., Argun, M.E., Yel, E. (2017). Treatment Alternatives for Micropollutant Removal in Wastewater. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 5(2), 133-143. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.77>
- Nguyen, L.N., Hai, F.I., Kang, J., Price, W.E., Nghiem, L.D., (2012). Removal of trace organic contaminants by a membrane bioreactor-granular activated carbon (MBR-GAC) system. *Bioresource Technology*, 113, 169-173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.05>
- Nippatlapalli, N., Ganta, A. (2024). Recent progress on application of nonthermal plasma for the degradation of aqueous emerging contaminants: A review on mechanism, reactor strategies, integrated systems and future perspective. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 1454-1470. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.009>

- Oluwole, A.O., Omotola, E.O., Olatunji, O.S. (2020). Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: a review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation. *BMC Chemistry*, 14, 1–29. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>
- Onay, M., Onay, A. (2024). Algae Mediated Bioremediation: Industrial Prospectives Chapter 17 Removal of Micropollutants in Industrial Wastewater Using Microalgae. ISBN: 978-3-527-84335-0, E-book. <https://doi.org/10.1002/9783527843367.ch17>
- Othman, N.H., Alias, N.H., Fuzil, N.S., Marpani, F., Shahrudin, M.Z., Chew, C.M., David Ng, K.M., Lau, W.J., Ismail, A.F. (2021). A review on the use of membrane technology systems in developing countries. *Membranes (Basel)*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.3390/membranes12010030>
- Oturan, N., van Hullebusch, E. D., Zhang, H., Mazeas, L., Budzinski, H., Menach, K.L., Oturan, M. A. (2015). Occurrence and removal of organic micropollutants in landfill leachates treated by electrochemical advanced oxidation processes. *Environmental Science & Technology*, 49, 20. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02809>
- Özdemir, G. (2018). Mikro Kirleticiler. 2. *Uluslararası Mesleki ve Çevresel Hastalıklar Kongresi*, 04-08 Mart, Antalya, Türkiye.
- Pal, A., Gin, K.Y. H., Lin, A.Y.C., Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*, 408(24), 6062–6069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026>
- Pal, A., He, Y., Jekel, M., Reinhard, M., Gin, K.Y.H. (2014). Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle. *Environmental International*, 71, 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.025>
- Palit, C.H.S. (2021). Advanced Oxidation Processes as Nonconventional Environmental Engineering Techniques for Water Treatment and Groundwater Remediation, Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control, *Elsevier*, ISBN: 978-0-12-822134-1, Netherlands, pp. 33–44.
- Peng, B., Qiu, D., Wu, X. (2020). Treatment of landfill leachate by combined submerged membrane bioreactor (SMBR) and electrochemical oxidation. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 12, 953–960. <http://dx.doi.org/10.1166/nnl.2020.3185>
- Piai, L., Dykstra, J.E., Adishakti, M.G., Blokland, M., Langenhoff, A.A.M., Wal, A. (2019). Diffusion of hydrophilic organic micropollutants in granular activated carbon with different pore sizes. *Water Research*, 162 (2019), 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.012>
- Pisharody, L., Gopinath, A., Malhotra, M., Nidheesh, P.V., Kumar, M.S. (2022). Occurrence of organic micropollutants in municipal landfill leachate and its effective treatment by advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 287, 132216. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132216>
- Pulkka, S., Martikainen, M., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. (2014). Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water – A review. *Separation and Purification Technology*, 132, 252–271. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.021>
- Qiao, J., Xiong, Y. (2021). Electrochemical oxidation technology: A review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102308. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102308>
- Rai, M., Pant, G., Pant, K., Aloo, B.N., Kumar, G., Singh, H.B., Tripathi, V. (2023). Microplastic pollution in terrestrial ecosystems and its interaction with other soil pollutants: A potential threat to soil ecosystem sustainability. *Resources*, 12, 67. <https://doi.org/10.3390/resources12060067>
- Rodriguez, E., Campinas, M., Acero, J.L., Rosa, M.J., (2016). Investigating PPCP removal from wastewater by powdered activated carbon/ultrafiltration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227 (177). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2870-7>
- Rodríguez-Mozaz, S., Alvarez-Muñoz, D., Barcelo, D. (2017). Pharmaceuticals in the marine environment: Analytical techniques and applications. *Environmental Problems in Marine Biology: Methodological Aspects and Applications*, 01, 268–316. <https://doi.org/10.1201/9781315119113>
- Rogowska, J., Cieszyńska-Semenowicz, M., Ratajczyk, W., Wolska, L. (2020). Micropollutants in treated wastewater. *Ambio*, 49(2), 487–503. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01219-5>

- Sahar, E., David, I., Gelman, Y., Chikurel, H., Aharoni, A., Messalem, R., Brenner, A. (2011). The use of RO to remove emerging micropollutants following CAS/UF or MBR treatment of municipal wastewater. *Desalination*, 273, 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.004>
- Schwarzenbach, R.P., Escher, B.I., Fenner, K., Hofstetter, T.B., Johnson, C.A., von Gunten, U., Wehrli, B. (2006). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072-1077. <https://doi.org/10.1126/science.1127291>
- Shanmuganathan, S., Loganathan, P., Kazner, C., Johir, M.A.H., Vigneswaran, S. (2017). Submerged membrane filtration adsorption hybrid system for the removal of organic micropollutants from a water reclamation plant reverse osmosis concentrate. *Desalination*, 401, 134-141. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.048>
- Shen, Y., Zhang, Y., Jiang, Y., Cheng, H., Wang, B., Wang, H. (2024). Membrane processes enhanced by various forms of physical energy: A systematic review on mechanisms, implementation, application and energy efficiency. *Science of The Total Environment*, 906, 167268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167268>
- Song, P., Du, J., Shi, Y., Fang, X., Ma, X., Liu, D., Cao, D., Li, J., Chen, R., Wu, C., Cui, J., Wang, Y., Di, J., Low, J., Kong, T., Long, R., Zhang, H., Xiong, Y. (2023). Highly active 3d composites for a flow-through photocatalytic membrane reactor toward water micropollutant removal. *ACS Materials Letters*, 6, 2. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.3c01416>
- Song, W., Lee, L.Y., Ng, H.Y. (2020). Nanofiltration and reverse osmosis processes for the removal of micro-pollutants. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, pp. 527-552. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-819594-9.00021-8>
- Sousa, J.C.G., Ribeiro, A.R., Barbosa, M.O., Pereira, M.F.R., and Silva, A. M. T. (2018). A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines, *Journal of Hazardous Materials*, 344, 15, 146-162.
- Sousa, J.C.G., A.R. Ribeiro, M.O. Barbosa, C. Ribeiro, M.E. Tiritan, M.F.R. Pereira, A.M.T. Silva (2019). Monitoring of the 17 EU Watch List contaminants of emerging concern in the Ave and the Sousa Rivers. *Science of The Total Environment*, 649, 1083-1095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.309>
- Sözüdoğru, O. (2021). Endokrin Bozucu Maddelerinin Membran Biyoreaktör Sistemine Entegre Edilmiş Elektrokoksiasasyon Sistemiyle Arıtımının Araştırılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Stam, C., Räsänen, K., Burdon, F.J., Altermatt, F., Jokela, J., Joss, A., Ackermann, M., Eggen, R.I.L. (2016). Unravelling the Impacts of Micropollutants in Aquatic Ecosystems: Interdisciplinary Studies at the Interface of Large-Scale Ecology. *Advances in Ecological Research*, 55, 183-223. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.07.002>
- Stoob, K., Singer, H. P., Müller, S. R., Schwarzenbach, R. P., Stamm, C. H. (2007). Dissipation and transport of veterinary sulfonamide antibiotics after manure application to grassland in a small catchment. *Environmental Science & Technology*, 41(21), 7349-7355. <https://doi.org/10.1021/es070840e>
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müllet, R., Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22, 93-117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>
- Sturm, M. T., Myers, E., Schober, D., Thege, C., Korzin, A., Schuhen, K. (2022). Adaptable Process Design as a Key for Sustainability Upgrades in Wastewater Treatment: Comparative Study on the Removal of Micropollutants by Advanced Oxidation and Granular Activated Carbon Processing at a German Municipal Wastewater Treatment Plant. *Sustainability*, 14(18):11605. <https://doi.org/10.3390/su141811605>
- UNEP. (2001). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). United Nations Environment Programme. Retrieved from <https://chm.pops.int/>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *PFAS Explained*. <https://www.epa.gov/pfas/pfas-explained>
- Üstün Odabaşı, S., Altın, S.H., Büyükgüngör, H. (2020). Sucul Ortamdaki Bazı Mikrokirleticilerin Oluşumu, Durumu ve İleri Oksidasyon Prosesleri ile Giderilmesi. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 57-71.

- Włodarczyk-Makuła M, Myszograj S, Włodarczyk M. (2023). Removal of Organic Micro-Pollutants from Wastewater in Electrochemical Processes—Review. *Energies* 2023, 16(15), 5591. <https://doi.org/10.3390/en16155591>
- Worch, E. (2012). Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling. *Walter de Gruyter GmbH & Co. KG*, Berlin/Boston. <https://doi.org/10.1515/9783110240238>
- Wypart-Pawul, A., Neczaj, A., Grobelak, A. (2023). Advanced oxidation processes for removal of organic micropollutants from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 305,114-128. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29665>
- Xu, R., Zhou, M., Wang, H., Wang, X., Wen, X. (2020). Influences of temperature on the retention of PPCPs by nanofiltration membranes: Experiments and modeling assessment. *Journal of Membrane Science*, 599, 117817. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117817>
- Xu, R., Zhang, Z., Deng, C., Nie, C., Wang, L., Shi, W., Lyu, T., Yang, Q. (2024) Micropollutant rejection by nanofiltration membranes: A mini review dedicated to the critical factors and modelling prediction. *Environmental Research*, 244, 117935. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117935>
- Yılmaz, H., Avaz, G., Yetiş, Ü., Özkan, M. (2022). Toxicity of environmentally important micropollutants on three trophic levels. *Aquatic Research*, 5(1), 20-28. <https://doi.org/10.3153/AR22003>
- Zaidi, S., Chaabane, T., Sivasankar, V., Darchen, A., Maachi, R., Msagati, T.A.M. (2019). Electro-coagulation coupled electro-flotation process: Feasible choice in doxycycline removal from pharmaceutical effluents. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 2798–2809. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.009>