

Su ve atık sulardan PFAS gideriminde güncel yaklaşımlar

Dr. Öykü Mutlu Salmanlı



2012 yılında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2023 yılında İstanbul Teknik Üniversitesinde doktorasını tamamladı. Doktora çalışmaları kapsamında TÜBİTAK bursuyla Duke University'de araştırmalar yürüttü. 2015 yılından itibaren MEMTEK'te araştırmacı, 2024 yılından itibaren ise İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üye. olarak görev almaktadır.

Doç. Dr. Kübra Ulucan Altuntaş



2007 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2018 yılında aynı üniversitede doktorasını tamamladı. Yüksek lisans, doktora ve doktora sonrası çalışmalarını İtalya ve Almanya'da sürdürdü. TÜBİTAK ve Marie Skłodowska-Curie bursları başta olmak üzere çeşitli ulusal ve uluslararası burs ve ödüllere layık görüldü. 2022 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde doçent olarak çalışmaktadır.

Dr. Ayşegül Derya Altınay



2010 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Bölümünden mezun oldu. Yüksek lisansını Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde, doktorasını ise 2023 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Programı'nda tamamladı. Yüksek lisans çalışmaları sırasında Almanya'daki TU Braunschweig'da araştırmalar yürüttü. 2015 yılından itibaren MEMTEK UYG-AR Merkezinde araştırmacı, 2019 yılından itibaren ise İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır.

Tuğçe Akça



2021 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2024 yılında aynı üniversitede yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans çalışmalarını MEMTEK bünyesinde yürüttü ve çeşitli araştırma projelerinde görev aldı. 2022 yılında İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Hâlen çevre mühendisliği alanındaki doktora çalışmalarını sürdürmektedir.

Prof. Dr. İsmail Koyuncu



2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde profesör ünvanını aldı. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü ve İTÜ Rektörlüğü dâhil çeşitli idari görevlerde bulundu. 2019 yılından itibaren Michigan State University'de misafir profesör olarak çalışmalarını yürütmektedir. Araştırmalarını membran prosesleri, su ve atık su arıtımı, konsantrasyon yönetimi ve kaynak geri kazanımı alanlarında sürdürmektedir.

Dünya genelinde, gelişmiş izleme yöntemleriyle tespit sınırlarının düşmesi, regülasyonların sıkılaşması ve kamuoyu duyarlılığının artması, belediye ve endüstri ölçekli arıtım yatırımlarını hızlandırmaktadır. Bugün, yüzbinlerce nüfusa hizmet veren içme suyu tesislerinden

farmasötik, metal kaplama ve tekstil sektörlerindeki endüstriyel deşarj hatlarına kadar geniş bir alanda, PFAS giderimi için çok kademeli arıtım hatları devreye alınmaktadır (Beak vd., 2026; Ćurić vd., 2025; "Directive - EU - 2024/3019 - EN - EUR-Lex", 2026; "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) I US EPA", 2026; Vershinin vd., 2026).

PFAS bileşikler, karbon-flor bağının olağanüstü kararlılığı nedeniyle çevrede kalıcı, hidrofobik ve lipofilik özellikler gösterir. Bu güçlü bağ enerjisi (yaklaşık 485 kJ/mol) PFAS'ların biyolojik, kimyasal ve termal bozunmaya dirençli olmasına yol açar. Bu nedenle arıtım süreçleri, çoğunlukla fiziksel ayırma (adsorpsiyon, membran filtrasyonu) veya kimyasal



dönüşüm (oksidasyon, indirgeme, plazma yıkımı) ilkelerine dayanır. PFAS gideriminde hedef yalnızca uzaklaştırma değil; aynı zamanda mineralizasyon, yani organoflor bileşiğin CO₂ ve diğer inert son ürünlere parçalanmasıdır. Ancak bu süreçlerin verimliliği; PFAS türünün zincir uzunluğuna, fonksiyonel gruplarına, pH, iyonik güç ve çözünmüş organik karbon gibi matris etkilerine duyarlıdır. Bu nedenle PFAS arıtımı, termodinamik kararlılıkla kinetik erişilebilirlik arasındaki hassas dengeyi çözümlmeye dayanan çok disiplinli bir yaklaşıma ihtiyaç duyar. Bu bilimsel çerçevede, laboratuvar ölçekli araştırmalar farklı PFAS türlerinin kimyasal stabilitesini, adsorpsiyon eğilimlerini, oksidatif parçalanma davranışlarını ve yan ürün üretim mekanizmalarını aydınlatmayı amaçlamıştır. Bu bağlamda PFAS gideriminde uygulanan fiziksel, kimyasal prosesler ve bu prosesler esnasında ortaya çıkan yan akımlardan PFAS'ların giderimi, bu bileşikler ile ilgili gelecek perspektifi de ele alınarak incelenmiştir.

PFAS Arıtımında Fiziksel Giderim Teknolojileri

Adsorpsiyon ve İyon Değiştirme (IX): Ülkemizde PFAS kirliliği üzerine son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar,

durumun ciddiyetini ortaya koymaktadır. 2017–2018 yıllarında 33 ildeki musluk sularından alınan 94 örneğin analizi, toplam PFAS düzeyinin 0,08 – 11,27 ng/L aralığında olduğunu göstermiştir (Eren ve Application, 2019). Hâlihazırda yürürlükte, PFAS için özel bir içme suyu standardı bulunmamakta; ancak 2023 yılında Avrupa Birliği'nin yeni içme suyu direktifine uyum süreci kapsamında mevzuat geliştirmeye başlayarak kısıtlama getirmesi beklenmektedir (Yurtsever, 2025). İSKİ gibi büyük su idareleri, bazı tesislerinde yıllardır aktif karbon filtrasyonu prosesi uygulamaktadır ancak bu proses daha çok genel organik madde ve tat/koku giderimine yöneliktir. PFAS özelinde arıtım teknolojilerinin kurulumu ise Türkiye'de henüz pilot ve laboratuvar ölçekli araştırmalar düzeyindedir.

Fiziksel mekanizmalara sahip kum filtreleri gibi geleneksel su arıtma teknikleri PFAS'ları gideremediğinden, ileri arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, granüler aktif karbon (GAC) adsorpsiyonu ve iyon değiştirici reçine (ion exchange, IX) sistemleri, su kaynaklarındaki PFAS kirliliğini gidermede en yaygın ve kanıtlanmış yöntemler olarak öne çıkmaktadır. GAC, yüksek gözeneklilik ve geniş yüzey alanına sahip karbon partikül-

Ülkemizde PFAS kirliliği üzerine son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, durumun ciddiyetini ortaya koymaktadır. 2017-2018 yıllarında 33 ildeki musluk sularından alınan 94 örneğin analizi, toplam PFAS düzeyinin 0,08 – 11,27 ng/L aralığında olduğunu göstermiştir. Hâlihazırda yürürlükte, PFAS için özel bir içme suyu standardı bulunmamakta; ancak 2023 yılında Avrupa Birliği'nin yeni içme suyu direktifine uyum süreci kapsamında mevzuat geliştirmeye başlayarak kısıtlama getirmesi beklenmektedir.

leri sayesinde su içindeki PFAS gibi organik kirleticileri yüzeylerinde tutarak adsorbe eder. PFAS molekülleri de GAC yüzeyine fiziksel-kimyasal etkileşimlerle bağlanarak sudan uzaklaştırılır. Uygun tasarım ve işletme koşullarında GAC, PFOA ve PFAS gibi uzun zincirli PFAS bileşiklerini etkili bir şekilde tutabilirken, zincir uzunluğu kısaltıldıkça adsorpsiyon verimi ciddi ölçüde düşer. Kısa zincirli PFBS veya PFBA gibi bileşikler GAC tarafından zayıf tutulur ve filtreyi çok daha hızlı geçebilir (Y. Zhang vd., 2025). Örneğin İtalya'nın Veneto bölgesinde PFAS ile kirlenmiş yer altı suyunu arıtan ve 100.000 kişiye hizmet veren tam ölçekli bir içme suyu tesisinde 5 yıllık GAC verimi incelendiğinde, kısa zincirli PFBA'nın en önce filtreden geçmeye başladığı, onu sırasıyla PFBS ve PFOA'nın takip ettiği görülmüştür. Bu tesiste aktif karbonun PFAS tutma kapasitesi, PFBA için ton başına yalnızca 1,7 gram iken, PFOA için ton başına 24,6 grama ulaşmıştır. Tüm PFAS türlerinin toplam yükü yaklaşık 40 g/ton karbon olarak ölçülmüştür (Bertanza vd., 2020). GAC performansını etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar, karbonun ham maddesi ve gözenek yapısı, tane büyüklüğü, yatak derinliği, suyun sıcaklığı, boş yatak temas süresi, sudaki çözünmüş organik madde ve kirleticilerin varlığı bunların başında gelir (Yuan vd., 2022). GAC filtreleri doygunluğa ulaştığında granül karbon yenisiyle değiştirilir. Kullanılan doymuş karbon ise genellikle yüksek sıcaklıkta rejenera edilir veya tehlikeli atık olarak bertarafa gönderilir. Bu noktada önemli bir sorun, PFAS tarafından doyurulmuş aktif karbonun güvenli ve sürdürülebilir bertarafıdır. Çünkü tehlikeli atık olarak değerlendirilebilecek PFAS içerikli medyaların yakma işlemleri ekonomik ve çevresel açıdan zorlayıcıdır (Sonmez Baghirzade vd., 2021). Son yıllarda daha düşük maliyetli biyokömür (biochar) adsorbentler laboratuvar ölçekli de olsa, GAC'ye alternatif olarak sunulmaktadır (D. Zhang vd., 2021). Bu malzemelerin geliştirilmesi gelecek için umut verici bir yaklaşımdır.

PFAS gideriminde GAC'ye kıyasla bir diğer güçlü seçenek, anyon değiştirici reçine (ion exchange, IX) teknolojisidir. İyon değişimi sürecinde, sudaki hedef kirletici iyonlar katı fazdaki zıt yüklü yüzeylere kimyasal olarak bağlanarak sudan uzaklaştırılır. PFAS bileşikleri genellikle anyonik yani eksi yüklü formda oldukları için, artı yüklü anyon değiştirici

reçine tanecikleri PFAS moleküllerini bir mıknatıs gibi çekerek bünyelerine hapseder (Al-Maqtari vd., 2025). IX prosesi, çoğu zaman GAC'den daha geniş bir PFAS yelpazesini ve özellikle daha kısa zincirli türevleri yüksek verimle sudan uzaklaştırabilir. Nitekim bazı çalışmalarda GAC'nin ancak yüzde 30–40 oranında tutabildiği kısa zincirli PFBA, PFBS gibi bileşiklerin uygun anyon reçinelerle yüzde 90-100 verime kadar giderilebildiği gösterilmiştir (Fang vd., 2021). Genel olarak, eş şartlar altında IX reçineler adsorpsiyon kapasitesi ve servis süresi bakımından GAC'yi geride bırakmaktadır. Örneğin pilot ölçekli bir karşılaştırmada, IX reçineleri test edilmiş ve özellikle kuaterner amonyum gruplu anyon reçinelerinin PFOA ve PFOS gibi perflorlanmış bileşiklere yüksek afinite gösterdiği bulunmuştur. Reçineler, kısa ve uzun zincirli PFAS türlerini GAC'ye göre daha etkili şekilde gidermiştir (Woodard ve Newman, 2017). Ayrıca IX prosesiyle yapılan çalışmalarda, rejenerasyon işlemi

sonrası PFAS gideriminin tekrar benzer kapasiteyle çalışarak elde edildiği söylenmektedir (Y. Liu ve Sun, 2021). Ancak rejenerasyon uygulamasında, organik çözücü ve tuzlu su karışımı kullanarak doymuş reçineler yıkanır. Yıkanan reçinelerden elde edilen yüksek konsantrasyonlu PFAS içeren atık su çözeltisi (yan akım olarak da adlandırılır) ayrı bir arıtım ve bertaraf ihtiyacı doğurmaktadır. Bunun için, reçine bertarafında en tercih edilen yöntem yakmadır. Reçine medyası doygunluğa ulaştığında yenisiyle değiştirilir. Çıkarılan PFAS yüklü reçine yüksek sıcaklıkta yakılarak imha edilir. Son dönemde araştırmacılar, reçinelerin kullanım ömrü sonunda daha düşük sıcaklıklarda parçalanabilen, yenilikçi yöntemlerin gerekliliğini belirtmiştir (Mohammadi vd., 2025). Ayrıca, reçinelerin birim maliyetinin GAC'ye 6,5 kat kadar daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle IX teknolojinin işletme maliyeti GAC'ye kıyasla daha yüksek kalır (Murray vd., 2021).



GAC ve IX teknolojilerinin genellikle seri hâlede bütünleşik biçimde kullanılması önerilir. Amaç, GAC'nin yüksek hacimli suyu arıtabilme ve büyük PFAS moleküllerini tutmadaki faydasını, ardından IX reçinesinin daha küçük ve zor yakalanan PFAS türlerini giderme kabiliyeti ile birleştirmektir. Örneğin İsveç'in Uppsala kentindeki Kungsängsverket atık su arıtma tesisinde gerçekleştirilen uzun vadeli pilot ölçekli çalışmada, GAC ve IX teknolojilerinin birlikte kullanımı, PFAS gideriminde yüksek verimle sonuçlanmıştır. Çalışmada, GAC'nin özellikle uzun zincirli PFAS türlerinde etkili olduğu, ancak etkinliğinin belirli bir boş yatak hacmi sonrasında azaldığı, bu noktada devreye giren IX sisteminin hem kısa hem uzun zincirli PFAS'ların gideriminde performansı sürdürdüğü gösterilmiştir. Kombinasyon sisteminin, gerçek atık su koşullarında 200.000 boş yatak hacmine kadar stabil çalışabildiği rapor edilmiştir (Baresel vd., 2025).

Membran Teknolojileri

Çevrede kalıcılıkları, biyobirikim potansiyelleri ve toksisiteleri sebebi ile sonsuz kimyasallar olarak adlandırılan ve atık su arıtma tesislerinde öncelikli kirlenici grubu olarak ele alınan PFAS'ı geleneksel arıtma yöntemlerinin etkin şekilde gidermekte yetersiz kalması sebebi ile membran teknolojilerinin araştırılması ve kullanılması önemli hâle gelmiştir. PFAS gideriminde ters osmoz (RO), nanofiltrasyon (NF), membran distilasyon (MD) ve elektrodializ (ED) yöntemleri yüksek giderim verimliliği göstermektedir. En yaygın kullanılan basınç sürücülü membran proseslerden RO ve NF uzun zincirli PFAS bileşiklerinin gideriminde %90-99 üzerinde giderim verimine ulaşabilmektedir (Gulver vd., 2026).

NF membranları kullanılarak PFAS gideriminde birincil mekanizma, negatif yüklü membranların anyonik PFAS moleküllerini ittiği elektrostatik itmedir. Bu etki, membran yüzeyindeki konsantrasyon polarizasyonu ile geçici olarak artırılabilir ve bu da ret oranlarını artırır; ancak bu fayda zamanla membran kirlenmesine de neden olur. Ayrıca, kimyasal etkileşimler de giderim sürecine katkıda bulunur. NF membranlarının genellikle Mg^{2+} ve Ca^{2+} gibi çok değerlikli katyonları gidermede etkili olduğu bilindiğinden, özellikle bu katyonlar PFAS moleküllerini daha büyük kompleksler hâlinde bağlayarak membran tarafından reddini artırabilir ve genel arıtma verimliliğini artırabilir (Sanzana

vd., 2025). Laboratuvar koşullarında, PFAS moleküllerinin giderimi için NF membranlarının kullanılması, çoğunlukla yüzde 90-95'in üzerinde ret oranlarıyla mükemmel sonuçlar göstermektedir. Ancak, gerçek hayattaki bu uyarım eksikliğinin, PFAS gideriminde NF için doğal sular veya atık sular üzerinde deneyler yapılarak gözden geçirilmesi gerekmektedir.

NF ile benzer çalışma ilkelerine dayanan RO, genellikle tuzdan arıdırmada kullanılır ve daha düşük membran boyutları, tek değerlikli iyonların giderilmesini sağlar. RO sistemlerinin verimliliğini etkileyen çeşitli etkenler vardır; bunlar arasında çalışma koşulları, PFAS konsantrasyonu, pH ve membran özellikleri, iyonik güç ve organik madde sayılabilir. Basınç farkı ve sıcaklık gibi çalışma koşulları, membranların çalışma mekanizmasını doğrudan etkilediğinden ve pH'ın düşmesi gözenek boyutlarının küçülmesine ve dolayısıyla daha yüksek giderim oranlarına yol açtığından, bu parametreler dikkatlice değerlendirilmelidir. Ayrıca, besleme suyunda çeşitli iyonların bulunması, iyonların değerliliğine bağlı olarak verimliliği artırabilir veya azaltabilir çünkü bunların hepsi membran ve besleme suyu arasındaki elektrostatik etkileşimlere katkıda bulunur (Jin ve ark., 2021).

Literatürdeki RO ve NF'in birlikte kullanıldığı çalışmalarda da özellikle farklı zincir uzunluğundaki PFAS bileşiklerinin gideriminde verim farklılıklarının olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin PFBA, PFBS, PFHxS, PFOA ve PFOS'un farklı RO/NF membranları kullanılarak giderimi test edildiğinde RO membranının yüzde 98,5 üzerinde verime sahip olurken, NF membran kullanımında yüzde 42-91 arası giderim verimlerine ulaşılabilirdiği gösterilmiştir. Bu sonuçlar PFAS zincir uzunluğu ve membran gözenek boyutunun giderim verimi üzerinde kritik olduğunu göstermektedir (Cao ve ark., 2025; Safulko ve ark., 2023).

GAC ve IXR'ye göre RO ve NF membranları daha yüksek giderme verimi göstermekte, daha az sıklıkta değişim gerektirmekte, ayrıca GAC ve IXR kullanımında rejenerasyon ve geri yıkama zorunlulukları olması sebebi ile membranların uygulama kolaylığı sağladığı da söylenebilir.

Basınca dayanan NF ve RO'nun aksine, MD buhar basıncı farkı ile çalışan termal bir membran sürecidir; bu sürecin temel

ilkesi, hidrofobik ve mikro gözenekli membrandan yalnızca su buharının geçmesine izin verirken, PFAS dâhil olmak üzere uçucu olmayan kirlenicileri engellemektir (Patel vd., 2025). Arıtılacak su, membran yüzeyi ile doğrudan temas hâlinde ve yalnızca membran yüzeyiyle temas eder, çok sayıda gözenegin iç kısımlarıyla temas etmez. Hidrofobik yapısı sayesinde membran, gözeneklere su sızmasını engelleyerek gözenek açıklıklarında sıvı ve buhar arayüzlerinin ortaya çıkmasını sağlar (El-Bourawi ve ark., 2006). Literatürde PFAS giderimi için MD kullanımı ile yüzde 95'in üzerinde giderim verimlerine ulaşılmıştır (Yousefi ve ark., 2024). MD, GAC ve IXR gibi sorpsiyon teknolojilerine kıyasla sorpsiyon performansına bağlı kalmak yerine fiziksel bir ayırma sergiler. MD'nin temel kısıtı düşük akı ve membran ıslanması riskidir, bu nedenle membran yüzey değişiklikleri ve süperhidrofobik membran tasarımı çalışmaları son yıllarda önem kazanmıştır.

Membran teknolojileri PFAS bileşiklerinin atık sulardan gideriminde en etkili yöntemlerden biri hâline gelmiştir. Uzun zincirli PFAS türlerinin gideriminde RO, NF, MD ve ED gibi membran süreçleri yüksek verim göstermekte, kısa zincirli PFAS ve konsantre yönetimi gibi problemlerde ise hibrit sistemlerin entegrasyonu gibi çözümler uygulanabilmektedir.

İleri Oksidasyon Teknolojileri

PFAS arıtma teknikleri arasında fiziksel arıtma prosesleri yüksek oranda PFAS giderimi sağlamaktadır ancak meydana gelen konsantre akım ve bertaraf edilmesi gereken adsorban malzeme gibi ikincil bir kirlenici kaynağına neden olurlar. İleri oksidasyon prosesleri ise güçlü C-F bağlarının kırılmasını sağlayan proseslerdir ve günümüzde en çok araştırılan teknolojiler arasında yer alırlar. İleri oksidasyon prosesleri dendiğinde elektrokimyasal bozundurma (Soriano vd., 2017; Wang vd., 2020), sonokimyasal bozundurma (Shende vd., 2019), fotokatalitik bozundurma (Gomez-ruiz vd., 2018) ve soğuk atmosferik plazma teknolojileri (Saleem vd., 2020; Stratton vd., 2017a; Ulucan-Altıntaş vd., 2024) öne çıkmaktadır. Bu proseslerin büyük bir kısmında PFAS'ların mineralizasyonunda etkili başlıca oksidan türler $\bullet OH$, $SO_4\bullet$ ve hidratlanmış elektrondur. Perflorokarboksilik asitler (PFCAs) ve perfloroalkansülfonik asitler (PFSA's) için

ise ardışık CF₂ kaybı sonucu daha kısa zincirli ara ürünlerin (PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA, PFPrA, TFA) ortaya çıktığı; bu bileşiklerin zaman içinde birikime eğilim gösterdiği rapor edilmiştir (Gar Alalm & Boffito, 2022).

Foto-bazlı ileri oksidasyon prosesleri (fotokataliz, fotoelektrokataliz, fotosonoliz ve psödo-fotokataliz) son yıllarda PFAS giderimi için çalışılan yaklaşımlar arasındadır. Fotokatalitik sistemlerde yarı iletken yüzeyinde oluşan e⁻/h⁺ çiftleri, bir yandan PFAS moleküllerinin baş grubunda dekarboksilasyon veya desülfonasyon başlatırken, diğer yandan su veya yüzey –OH gruplarından •OH üreterek zincir kısalmasına ve deflorinasyona yol açar. Metal-organik iskeletler (MOF'lar), fotokatalitik PFAS gideriminde bir sınıf ileri oksidasyon malzemesi olarak öne çıkmaktadır. MOF'lar, metal iyonlarının (veya kümelerinin) organik ligandlarla üç boyutlu bir ağ yapısı meydana getirdiği melez kristalin malzemelerdir ve olağanüstü yüksek özgül yüzey alanı ile bol miktarda adsorpsiyon bölgesine sahiptir. Bu yapı, PFAS moleküllerinin C-F zincirinin hidrofobik gözeneklere, fonksiyonel baş grubunun ise koordinatif veya elektrostatik etkileşimler yoluyla metal merkezlere ya da ligand fonksiyonlarına tutunmasına imkân verir (Najafidoust vd., 2026). MOF'larda ligand fonksiyonelleştirilmesi, hem PFAS adsorpsiyonunu artırmak (hidrofobik–hidrofilik dengeyi ayarlayarak uzun zincirli PFAS'a özgül çekim sağlamak) hem de bant aralığını güneş spektrumuna daha uygun hâle getirmek için kullanılır (Yan vd., 2025). Karışık metal merkezler ise, farklı redoks çiftleri sağlayarak hem oksidatif (•OH, SO₄•⁻) hem de indirgen (e_sq⁻) türlerin üretimini kolaylaştırır ve F⁻ iyonlarının salımı ile deflorinasyon hızını artırır. MOF/yarı iletken heteroeklemlerinde (örneğin TiO₂, BiOX, g-C₃N₄ ile kombine yapılar) oluşan heteroeklem arayüzleri, yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesini baskılayarak fotokatalitik etkinliği ciddi ölçüde yükseltir (Kong vd., 2022).

Karbon-bazlı partiküller, karbon nanotüpler (CNT), grafen, grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit (rGO), biyokömür (biochar) ve karbon nanofibler (CNF)– hem adsorpsiyon hem de fotokatalizör destek malzemesi olarak PFAS arıtımında dikkat çekmektedir. Bu malzemeler yüksek özgül yüzey alanları, ayarlanabilir yüzey fonksiyonel grupları ve iletkenlikleri sayesinde

PFAS'ı yoğunlaştırmak, fotokatalizörler üzerindeki yük taşınımını hızlandırmak ve çok fazlı sistemlerde kütle taşınımını iyileştirmek için kullanılmaktadır (Kong vd., 2022). Benzer şekilde, MOF/karbon kompozitlerinde (MOF/rGO, MOF/CNT, MOF-bazlı karbon iskeletleri) karbon fazı; elektron iletkenliği, gözeneklilik ve mekanik kararlılığı artırarak hem fotokatalitik hem de adsorptif süreçleri güçlendirmektedir (Regmi vd., 2025).

Geleneksel ileri oksidasyon prosesleri olarak geçen ozon ve hidroksil radikalleri kullanan sistemlerin (O₃, O₃/H₂O₂, UV/H₂O₂ vb.), PFAS'ların alkil zincirindeki çok güçlü C–F bağlarını kırma konusunda sınırlı kaldığı ve çoğu durumda yalnızca öncü bileşikler (prekürsörleri) daha kısa zincirli perfloroalkil asitlere oksitleyerek toplam PFAS yükünü artırdığı pilot ölçekli çalışmalarla gösterilmiştir (Venkatesan vd., 2022; Xu vd., 2024). Buna karşılık, soğuk atmosferik plazma ile arıtmada gaz–sıvı arayüzünde PFAS'ların hidrofobik zorlanma ile yüzeye zenginleşmesi ve plazma fazında meydana gelen metastabil Ar⁺ türleri, yüksek enerjili

elektronlar, UV fotonları ve reaktif oksijen türleri (•OH, O, O₃, H₂O₂) arasında gelişen sinerji, C–F bağlarının kırılması ve hızlı deflorinasyon için çok daha elverişli bir mikro-reaksiyon ortamı yaratmaktadır (Stratton vd., 2017b). Son yıllarda yapılan yüksek etkili çalışmalar, soğuk atmosferik plazma jetleri ve diğer non-termal plazma yapılanmalarının, hem sulara çözünmüş PFAS türleri için (Nau-Hix vd., 2021; Topolovec vd., 2024; Ulucan-Altuntas vd., 2024) hem de PFAS yüklü katı fazların (ör. çamur, adsorban) gliding-arc plazma reaktörlerinde arıtımı için (Murillo-Gelvez vd., 2025) geleneksel AOP'lere kıyasla çok daha kısa temas süresinde daha yüksek mineralizasyon verimi ve enerji verimi sağladığını ortaya koymuştur (Murillo-Gelvez vd., 2025; Topolovec vd., 2024; H. Zhang vd., 2024). Bu bulgular, özellikle Ar⁺ gibi metastabil türlerin ve plazma kaynaklı hidratlanmış elektronların, klasik ozon ve •OH temelli ileri oksidasyon proseslerine göre PFAS mineralizasyonunu anlamlı ölçüde hızlandırdığını ve soğuk atmosferik plazmayı PFAS gideriminde yeni nesil bir “destrüksiyon teknolojisi” olarak konumlandığını göstermektedir (Stratton et al., 2017; Topolovec et al., 2024; Zhang et al., 2024).

İleri oksidasyon ve indirgeme prosesleri PFAS'ı çözüldüden uzaklaştırmak ve mineralize etmek için güçlü araçlar sunsa da çoğu zaman “yoğunlaştır–yok et” yaklaşımının bir parçası olarak termal proseslerle birlikte düşünülmektedir. GAC veya iyon değişim reçinelerine adsorplanmış PFAS'ın rejenerasyonu için uygulanan yüksek sıcaklıklı işlemler, PFAS'ın uçucu florlu türlere dönüşerek giderilmesini hedefler; ancak bu durum hem mikro gözenek yapısının bozulması, hem de baca gazı içinde ikincil PFAS veya HF oluşumu gibi riskler taşır (Lin vd., 2025; Vakili vd., 2024). Yüksek sıcaklıklı yakma, süperkritik su oksidasyonu, termal plazma destekli piroliz veya termal oksidasyon gibi termal prosesler, uygun koşullarda PFAS'ı CO, HF ve inorganik tuzlara kadar mineralize edebilen nihai “destrüksiyon teknolojileri” olarak önerilmektedir; ancak enerji tüketimi, malzeme korozyonu ve yan ürün kontrolü, bu teknolojilerin ölçeklenmesinde hâlen kapsamlı değerlendirme gerektiren başlıklar olarak kalmaktadır (Chiang vd., 2023; Webb vd., 2025).

Sonuç olarak, PFAS gideriminde yalnızca faz ayırma teknolojilerine dayalı çözümler yetersiz kalmakta; bu nedenle

Granüler aktif karbon ve iyon değiştirici reçine sistemleri, su kaynaklarındaki PFAS kirliliğini gidermede en yaygın ve kanıtlanmış yöntemlerdir. Aktif karbon uzun zincirli PFAS bileşiklerini etkili şekilde tutarken, kısa zincirli PFAS'ların gideriminde performansı düşmektedir. İyon değiştirici reçineler ise daha geniş bir PFAS yelpazesini, özellikle kısa zincirli türleri, yüksek verimle sudan uzaklaştırabilmektedir.

ileri oksidasyon/indirgeme proseslerini içeren çok kademeli arıtım yaklaşımlarına yönelim kaçınılmaz görünmektedir. Membran filtrasyon ya da adsorpsiyon, seyreltik sular için ön yoğunlaştırma adımı olarak işlev görürken; foto-bazlı AOP'ler, elektrokimyasal oksidasyon, UV/sülfid ve soğuk atmosferik plazma esaslı süreçler özellikle konsantre akımların kimyasal parçalanması ve mümkün olduğunca mineralizasyonu için tamamlayıcı teknolojiler olarak öne çıkmaktadır.

Konsantre Yönetimi ve Nihai Bertaraf Stratejileri

Membran prosesler kompakt yapıları, diğer arıtma proseslerine adapte edilebilirlikleri ile bahsedildiği gibi PFAS gideriminde kullanılan teknolojilerdendir. Membran prosesler ile bir arıtım uygulandığında, membranın ayırma özelliğine göre (por boyutlarına, konsantrasyon ya da elektrik yükü vb.) giderilmek istenen maddeler membran tarafından ret edilerek membrandan geri çevrilerek, ilgili kirlilik açısından çok daha yüksek konsantrasyona sahip konsantre akımlarını meydana getirirler. Çevre ve insan sağlığı için ciddi risk teşkil etmeyen konsantre akımlarında dahi ortaya çıkardığı bu akımları alıcı ortama en az zarar oluşturacak şekilde buharlaşma, derin kuyu boşalımı gibi yöntemler belirlenerek bertaraf edilmektedir. Fakat söz konusu parçalanabilirliği düşük ve giderimi son derece zor olan PFAS'lara geldiğinde oluşan membran konsantreleri daha ciddi bir sorun hâlini almaktadır (Ali ve ark., 2024). Ortaya çıkan konsantre iyi yönetilmezse, içerdiği PFAS bileşikler tekrar çevreye salınarak su döngüsüne girebilir; böylece insanlara ve ekosistemlere zararlı hâle gelirler. Konsantre akımına yönelik etkili arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi için öncelikle üretilen hacim, konsantre akımında meydana gelen PFAS konsantrasyonu, ham suyun özellikleri ve işletme koşulları gibi önemli etkenlerin değerlendirilmesi ve iz miktarlardaki kirleticileri tespit edebilecek güvenilir çözümleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Konsantre akımın ortaya çıkmasını PFAS gideriminde kullanılan ters osmoz (RO) prosesi üzerinden örnekleyecek olursak; gelen akımın yüzde 10-30'u aralığında değişebilen bir konsantre akımı elde edilecektir. PFAS içeren konsantrelerin arıtımında kademeli membran proses kullanımı ile konsantre hacminin azal-

tilması uygulanan yöntemlerdendir. Membran proseslerinden elde edilen konsantre hacmi, ek RO ve NF membran proseslerinin kesikli ya da yarı-kesikli yapılandırılmasında uygulanması ve bu sistemlerin yüksek geri kazanım için en uygun hâle getirilmesiyle konsantre akımını yüzde 3 mertebesine kadar azaltılabilmektedir. Konsantre hacmi azaltma ya da seyreltme yoluyla PFAS içeren membran konsantrelerinin yönetiminde bir elektro-membran prosesi olan elektrodializ RO konsantresine uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Her ne kadar ED, direkt henüz PFAS ayırımı için uygulanmamış olsa da perfloroalkil asitler (PFAAs) gibi anyonik PFAS bileşenlerini ya da PFAS yıkım süreçlerinden kaynaklanan florür iyonlarını RO konsantresinden doğrudan ayırmak için potansiyel taşımaktadır. ED uygulaması RO konsantresindeki yüklü iyonları azaltarak, aynı PFAS konsantrasyonuna sahip fakat daha az iyon içeren bir seyreltik akım oluşturabilir ve bu seyreltik akım daha sonra RO sistemine yeniden besleme suyu olarak döndürülerek PFAS'ların daha fazla yoğunlaştırılmasına katkı sağlayabilir (Tow ve ark., 2021). PFAS'ların özellikleri bilindikçe uygulanabilir giderim yöntemleri de çeşitlenmektedir. Örneğin PFAS'lar yüzey aktif madde benzeri özellik göstererek su hava ara yüzeyine ilgi duyarlar. Sıvı yüzeyinde bulunan PFAS'ların yapılan çalışmalarda köpük parçalama (fraksiyonlama) tekniği ile ayrıştırıldığı görülmüştür. Örneğin PFAS yüklü düzenli depolama sahası sızıntı suyu üzerinde yapılan çalışma ile havalandırma-köpük toplama yöntemiyle yüzde 92 genel PFAS ayırma verimi elde edilmiştir (Robey et al., 2020). Dolayısıyla membran konsantrelerine havalandırma köpük toplama yöntemi uygulanabilir bir yöntemdir ancak PFAS içeren sıvılardaki hava kabarcıkları köpük hâlinde yakalanmadan serbest yüzeyde patladığında, PFAS açısından zengin bir aerosol meydana getirebilirler. Bu nedenle daha ileri bir arıtma için toplanmaları önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalarda PFAS açısından zengin akımlar için ozonlu hava kullanımı ile muamelenin, yalnızca hava kullanımına kıyasla daha yüksek PFAS giderimi ile sonuçlandığı görülmüştür. Köpük ayırma (fraksiyonlama) yöntemi ultraviyole (UV), foto degradasyon gibi yöntemler ile birleştirilerek PFOS'un hem yoğunlaştırılması hem de parçalanması da bir diğer alternatiftir. Havalandırma-köpük toplama sürecinde iyonik gücün (örneğin 5 mM NaCl) artırılmasının PFAS

ayırma verimini artırdığını göstermiştir. Bu bulgu, PFAS yüklü konsantre akımlarının yüksek tuz içeriğinin, bu yöntemde uygun bir ortam oluşturabileceğini göstermiştir (Tow ve ark., 2021). Membran konsantrelerinin ya da konsantre edilerek hacmi azaltılmış PFAS akımlarının bertarafında uygulanan düzenli depolama bertaraf tesisinde olabilecek sızıntı ya da taşınım-lar mutlaka göz önünde bulundurularak uygulanmalıdır. Bu yöntemler PFAS'ları veya bozunma ürünlerini yeniden çevreye geri verme potansiyeline sahiptir ve bu nedenle PFAS'lar döngüsel bir problem oluşturmaya devam ederler (Stoiber ve ark., 2020). Bu bağlamda PFAS konsantrelerinin arıtımı için biyolojik arıtım, UV temelli bozundurma, fotokatalitik yöntemler ileri oksidasyon prosesleri, C-F bağlarına etki eden hidrate elektronlar, plazma yöntemi ya da elektron ışını (electron beam), sonikasyon gibi PFAS'ların parçalanması temelli yöntemlerin kullanılması çok daha çözüm odaklı bir yaklaşım olacaktır. Fakat bu proseslerin yapılacağı çalışmalarla araştırılması ve PFAS gideriminde karşılaşılabilecek negatif ve pozitif yönlerinin aydınlatılması hâlâ önemli bir konudur. Örneğin, süperkritik su oksidasyonu (SCWO), PFAS dâhil olmak üzere organik bileşikler başarıyla parçalayabilen bir yöntemdir. Bu nedenle, PFAS içeren konsantrelerin arıtımında kullanılan tuzlu çözeltileri ve adsorbanlar (örneğin granüler aktif karbon – GAC) gibi maddelerin bertarafı için potansiyel taşımaktadır. Fakat SCWO sürecinde oluşabilecek çökeltme ve tıkanma sorunları ve membran konsantrelerinin yüksek tuzluluğu, bu yöntemin uygulanabilirliğini zorlaştıran başlıca etkenlerdir. Dolayısıyla PFAS'lı membran konsantrelerinin arıtımında uygulanacak yöntem seçimi için yapılacak fizibilite çalışmaları, giderim ve uygulanabilirlik açısından önem arz etmekte; konsantre arıtımı ve yönetimine ilişkin alternatifler, hâlen aktif bir araştırma alanı olmayı sürdürmektedir.

Küresel Gerçek Ölçekli Arıtım Uygulamaları

Gerçek ölçekli uygulamalarda granüler aktif karbon (GAC) ve anyon değiştirici reçineler (IX), özellikle uzun zincirli PFAS'ların tutulmasında birincil bariyer olarak öne çıkar. Nanofiltrasyon/ters osmoz (NF/RO), kısa zincirli PFAS ve toplam PFAS yükünü düşürmede etkilidir ancak konsantre akımların



yönetimi kritik bir sorundur. Bu nedenle ileri oksidasyon süreçleri (UV/H₂O₂, ozon, elektrokimyasal oksidasyon) ve termal/ısı yıkım yaklaşımları, konsantrelerin nihai bertarafı veya hacim küçültme-mineralizasyon amacıyla devreye alınmaktadır. Küresel deneyimler, tek teknolojiyle "tam uyum"un nadir olduğunu; GAC/IX + membran + konsantrite yönetimi gibi entegre trenlerin sürdürülebilirliği artırdığını göstermektedir. Ayrıca çevre-sağlık odaklı risk iletişimi, düzenleyici sınırların kademeli sıkılaştırılması, saha-özellik doğrulama ve izleme-doğrulama çerçeveleri başarıyı belirler. Sonuç olarak, PFAS yönetiminde kaynakta azaltım ve endüstri-belediye-akademi iş birliği ile desteklenen, enerji ve atık ayak izi düşük, konsantreye çözüm üreten, çok kademeli arıtım stratejileri, güvenli su hedefleri için en gerçekçi yol haritasını ortaya koymaktadır.

Gelecek Perspektifi

PFAS'ın biyobirikim özellikleri, çevrede kalıcılığı ve toksik etkilerine yönelik farkındalığın her geçen gün artması; küresel ölçekte daha sıkı düzenlemelerin ve gelişen arıtma teknolojilerinin yaygınlaşma hızının artacağına göstergesidir. Dolayısı ile PFAS yönetiminin önümüzdeki 5-10 yıl içerisinde gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde önemli bir dönüşüm geçirmesi

beklenmektedir. Membran teknolojileri açısından değerlendirdiğimizde yeni nesil düşük enerji gerektiren, yüksek geçirgen ve kirlenmeye karşı daha dirençli membranların tasarımı ile hem maliyeti düşüren hem de daha verimli sistemlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar hız kazanacaktır. Bununla birlikte yalnızca giderime odaklanmanın aksine konsantrite akımların güvenli nihai bertarafı hususu da bir o kadar önemli ve kritik bir konudur. GAC ve IX gibi sistemler için ise daha seçici reçinelerin geliştirilmesi, yüksek PFAS tutunumu sağlayacak yeni fonksiyonel grupların geliştirilmesi ve rejenerasyon süreçlerinin kimyasal ve enerji perspektifinde optimize edilmesi konuları önem kazanacaktır. Türkiye özelinde bakıldığında PFAS limit değerlerinin belirlenmesi, artan akademik çalışmaların ivme kazanması ve ulusal PFAS envanterinin oluşturulması konularının temel adımlar olması beklenmektedir. Bu bağlamda su ve atık su arıtma tesislerimizde PFAS taramalarının yapılması, PFAS kaynaklarının karakterizasyonu ve yönetim planlarının yapılması gibi somut adımlar atılması gerekmektedir. Türkiye'de arıtma tesislerinde kullanılan RO ve NF sistemlerinin PFAS giderimi açısından avantaj sağlayabileceği durumu söz konusu olmasına karşın PFAS'a özgü proses tasarımı, konsantrite yönetimi ve pilot ölçekli uygulamaların artırılması bir zorunluluktur. Dolayısı ile PFAS yöne-

timi yalnızca arıtma teknolojileri özelinde değil; ürün tasarımı, atık yönetimi ve çevre politikalarını da kapsayan çok yönlü bir yaklaşım gerektirmektedir.

Kaynaklar

- Al-Maqdadi, Q. A., Mahdi, A. A., Othman, N., Noman, A. E., Alsubhi, L. M., AlAnsi, W., ... Al-Gheethi, A. 2025. "Comprehensive review of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water: Physiochemical properties, sources, health impacts, regulatory limits, and future perspectives". *Results in Engineering*, 28(August), 107169.
- Baresel, C., Andersson, J., Olofsson, L., Sundin, A. M., Malovanyy, A., Högborg, C. J., Björkman, L. 2025. "Assessing the potential of activated carbon and anion-exchange in combination to remove organic micropollutants from wastewater – Long term pilot trials at Kungsängsverket WWTP, Uppsala, Sweden". *Science of the Total Environment*, 964(November 2024).
- Beak, S., Kim, E., Jung, T., Lee, J., Bae, J. 2026. "Pilot-scale performance of a UV-regenerable Iron-based activated carbon system for pharmaceutical and PFAS removal". *Journal of Water Process Engineering*, 82, 109468.
- Bertanza, G., Capoferri, G. U., Carmagnani, M., Icarelli, F., Sorlini, S., Pedrazzani, R. 2020. "Long-term investigation on the removal of perfluoroalkyl substances in a full-scale drinking water treatment plant in the Veneto Region, Italy". *Science of the Total Environment*, 734, 139154.
- Cao, J., Feng, S., Dolatabad, A. A., Zhi, Y., Deng, B., Liu, C., ... Xiao, F. 2025. "PFAS removal from reverse osmosis and nanofiltration brine by granular activated carbon: Thermodynamic insights into salinity effects". *Water Research*, 282, 123758.
- Chiang, S. Y. D., Saba, M., Leighton, M., Ballenghien, D., Hatler, D., Gal, J., Deshusses, M. A. 2023. "Supercritical water oxidation for the destruction of spent media wastes generated from PFAS treatment". *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132264.

- Ćurić, I., Saračević, E., Krampe, J., Dolar, D. 2025. "Removal of PFAS from real textile wastewater using a UF-RO hybrid system: Efficiency, mechanisms, and environmental implications". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 118608.
- Directive - EU - 2024/3019 - EN - EUR-Lex. t.y. Geliş tarihi 23 Mart 2026, gönderen <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj/eng>.
- Dixit, F., Dutta, R., Barbeau, B., Berube, P., Mohseni, M. 2021. "PFAS removal by ion exchange resins: A review". *Chemosphere*, 272, 129777.
- Ellis, A. C., Boyer, T. H., Fang, Y., Liu, C. J., Strathmann, T. J. 2023. "Life cycle assessment and life cycle cost analysis of anion exchange and granular activated carbon systems for remediation of groundwater contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)". *Water Research*, 243, 120324.
- Eren, Z., Application, D. 2019. "Chemosphere Assessment of per fl uoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey", 235.
- Fang, Y., Ellis, A., Choi, Y. J., Boyer, T. H., Higgins, C. P., Schaefer, C. E., Strathmann, T. J. 2021. "Removal of Per- And Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Aqueous Film-Forming Foam (AFFF) Using Ion-Exchange and Nonionic Resins". *Environmental Science and Technology*, 55(8), 5001-5011.
- Gomez-ruiz, B., Ribao, P., Diban, N., Rivero, M. J., Ortiz, I. 2018. "Photocatalytic degradation and mineralization of perfluorooctanoic acid (PFOA) using a composite TiO₂ - rGO catalyst". *Journal of Hazardous Materials*, 344, 950-957.
- Gulver, I., Mutlu-Salmanli, O., Koyuncu, I. 2026. "Efficient removal of per-polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water by using membrane distillation technology: a review". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 25(1), 8.
- Han, J., Choong, C. E., Jang, M., Lee, J., Hyun, S., Lee, W.-S., Kim, M. 2024. "Causative mechanisms limiting the removal efficiency of short-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by activated carbon". *Chemosphere*, 365, 143320.
- Kong, Z., Lu, L., Zhu, C., Xu, J., Fang, Q., Liu, R., Shen, Y. 2022. "Enhanced adsorption and photocatalytic removal of PFOA from water by F-functionalized MOF with in-situ-growth TiO₂: Regulation of electron density and bandgap". *Separation and Purification Technology*, 297, 121449.
- Lin, Z., Doudrick, K., Herckes, P., Chester, M., Westerhoff, P., Boyer, T. H. 2025. "Life cycle assessment of the thermal oxidation and pyrolysis of granular activated carbon loaded with perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)". *Journal of Cleaner Production*, 501, 145325.
- Liu, B., Chen, J., You, Y., Sun, M. 2025. "Cyclic removal and destruction of per- and polyfluoroalkyl substances from water using ion exchange, resin regeneration, and UV/sulfite reduction". *Water Research*, 272, 122915.
- Liu, Y., Sun, M. 2021. "Ion exchange removal and resin regeneration to treat per- and polyfluoroalkyl ether acids and other emerging PFAS in drinking water". *Water Research*, 207(August), 117781.
- Mohammadi, N., Guclu, S., Atespare, A. E., Koseoglu-Imer, D. Y., Unal, S., Dizman, B. 2025. "Sustainable ion exchange-based remediation of per- and polyfluoroalkyl substances; recent progress and future prospects". *Journal of Water Process Engineering*, 71(February), 107345.
- Murillo-Gelvez, J., Rabinovich, A., Sales, C. M., Fridman, A., Fridman, G., McKenzie, E. R. 2025. "Treatment of PFAS-laden solids via fluidized bed gliding arc plasmatron". *Journal of Hazardous Materials*, 494.
- Murray, C. C., Marshall, R. E., Liu, C. J., Vatankhah, H., Bellona, C. L. 2021. "PFAS treatment with granular activated carbon and ion exchange resin: Comparing chain length, empty bed contact time, and cost". *Journal of Water Process Engineering*, 44(September), 102342.
- Najafidoust, A., Ghanbari, R., Farahbakhsh, J., Perma-la, R., Iglauer, S., Zargar, M. 2026. "Emerging trends in photocatalyst-based metal-organic frameworks for PFAS degradation". *Coordination Chemistry Reviews*, 549, 217264.
- Nau-Hix, C., Multari, N., Singh, R. K., Richardson, S., Kulkarni, P., Anderson, R. H., ... Thagard, S. M. 2021. "Field Demonstration of a Pilot-Scale Plasma Reactor for the Rapid Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Groundwater". *ACS ES&T Water*, 1(3), 680-687.
- Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) | US EPA. t.y. Geliş tarihi 23 Mart 2026, gönderen <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
- Regmi, S., Sarker, M. S., Oglesby, A. K., Banning, K. N., Lanier, E. E., Xia, C., ... Liu, J. 2025. "Fabrication of nZVI/rGO via an innovative thermal co-reduction method for enhanced PFAS removal through sequential adsorption and photocatalytic degradation". *Journal of Hazardous Materials*, 497, 139586.
- Saleem, M., Biondo, O., Sretenović, G., Tomei, G., Magarotto, M., Pavarin, D., ... Paradisi, C. 2020. "Comparative performance assessment of plasma reactors for the treatment of PFOA: reactor design, kinetics, mineralization and energy yield". *Chemical Engineering Journal*, 382, 123031.
- Shende, T., Andaluri, G., Suri, R. P. S. 2019. "Kinetic model for sonolytic degradation of non-volatile surfactants: Perfluoroalkyl substances". *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 359-368.
- Sonmez Baghirzade, B., Zhang, Y., Reuther, J. F., Saleh, N. B., Venkatesan, A. K., Apul, O. G. 2021. "Thermal Regeneration of Spent Granular Activated Carbon Presents an Opportunity to Break the Forever PFAS Cycle". *Environmental Science and Technology*, 55(9), 5608-5619.
- Soriano, Á., Gorri, D., Uriaga, A. 2017. "Efficient treatment of perfluorohexanoic acid by nanofiltration followed by electrochemical degradation of the NF concentrate". *Water Research*, 112, 147-156.
- Stratton, G. R., Dai, F., Bellona, C. L., Holsen, T. M., Dickenson, E. R. V., Mededovic Thagard, S. 2017a. "Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater". *Environmental Science and Technology*, 51(3), 1643-1648.
- Stratton, G. R., Dai, F., Bellona, C. L., Holsen, T. M., Dickenson, E. R. V., Mededovic Thagard, S. 2017b. "Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater". *Environmental Science and Technology*, 51(3), 1643-1648.
- Tisler, S., Mrkajic, N. S., Reinhardt, L. M., Jensen, C. M., Clausen, L., Thomsen, A. H., ... Christensen, J. H. 2025. "A non-target evaluation of drinking water contaminants in pilot scale activated carbon and anion exchange resin treatments". *Water Research*, 271, 122871.
- Topolovec, B., Jovanovic, O., Puac, N., Skoro, N., Lumbaque, E. C., Petrovic, M. 2024. "Plasma water treatment for PFAS: Study of degradation of perfluorinated substances and their byproducts by using cold atmospheric pressure plasma jet". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112979.
- Ulucan-Altuntas, K., Foglia, S., Saleem, M., Tomei, G., Ceriani, E., Carmagnani, M., ... Paradisi, C. 2024. "Application of Response Surface Methodology for the Optimization of Operating Conditions of a Self-Pulsing Discharge (SPD) Plasma Reactor for the Degradation of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Water". *Plasma Processes and Polymers*, e2400155.
- Vakili, M., Cagnetta, G., Deng, S., Wang, W., Gholami, Z., Gholami, F., ... Blaney, L. 2024. "Regeneration of exhausted adsorbents after PFAS adsorption: A critical review". *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134429.
- Venkatesan, A. K., Lee, C. S., Gobler, C. J. 2022. "Hydroxyl-radical based advanced oxidation processes can increase perfluoroalkyl substances beyond drinking water standards: Results from a pilot study". *Science of The Total Environment*, 847, 157577.
- Vershinin, P., Seemann, O., Dror, I., Berkowitz, B. 2026. "Electrochemical per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) removal from tap water: proof-of-concept and laboratory scale pilot". *Environmental Technology & Innovation*, 104897.
- Wang, Y., Pierce, R. "david", Shi, H., Li, C., Huang, Q. 2020. "Electrochemical degradation of perfluoroalkyl acids by titanium suboxide anodes". *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(1), 144-152.
- Webb, H., Rosansky, S., Al-Dirani, S. M., Dasu, K., Scheitlin, C. G., Davis, J., Chiques, L. 2025. "PFAS destruction using supercritical water oxidation (SCWO) at Peterson Space Force Base". *Journal of Hazardous Materials Letters*, 6, 100156.
- Woodard, S., Newman, B. 2017. "Ion exchange resin for PFAS removal and pilot test comparison to GAC", 19-27.
- Xu, X., Li, Y., Vo, P. H. N., Shukla, P., Ge, L., Zhao, C. X. 2024. "Electrochemical advanced oxidation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Development, challenges and perspectives". *Chemical Engineering Journal*, 500, 157222.
- Yan, C., Zhong, Z., Wang, J., Feng, K., Xing, D. 2025. "Enhanced photocatalytic defluorination of perfluorooctanoic acid through integrated hydrogen atoms/electrons reduction and ROS oxidation with metal-organic framework heterogeneous catalysts". *Chemical Engineering Journal*, 513, 163058.
- Yuan, J., Passetport, E., Hofmann, R. 2022. "Understanding adsorption and biodegradation in granular activated carbon for drinking water treatment: A critical review". *Water Research*, 210(August 2021), 118026.
- Yurtsever, M. 2025. "Çevredeki Per ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: Tarihçesi, Kaynakları, Analizi, Riskleri ve İlgili Düzenlemeler". *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 403-427.
- Zhang, D., He, Q., Wang, M., Zhang, W., Liang, Y. 2021. "Sorption of perfluoroalkylated substances (PFASs) onto granular activated carbon and biochar". *Environmental Technology (United Kingdom)*, 42(12), 1798-1809.
- Zhang, H., Zhu, L., Zhang, Y., Héroux, P., Cai, L., Liu, Y. 2024. "Removal of per- and polyfluoroalkyl substances from water by plasma treatment: Insights into structural effects and underlying mechanisms". *Water Research*, 253, 121316.
- Zhang, Y., Lee, C. S., Li, D., Zheng, S., Hsiao, B. S., Venkatesan, A. K. 2025. "Hydrophobic Ion Pairing as a Pretreatment to Enhance the Removal of Short-Chain Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Granular Activated Carbon". *Environmental Science and Technology*, 59(38), 20761-20771.