

Çevre sağlığı sorunu olarak PFAS'lar

Dr. Zeynep Akdoğan



Lisans eğitimini İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde tamamladıktan sonra, Boğaziçi Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı; bu süreçte araştırma görevlisi olarak çalıştı. Hâlen aynı enstitüde doktora sonrası araştırmacı olarak çalışmalarına devam etmektedir.

İlk üretimleri 1940'lara dayanmasına rağmen, PFAS'lar (Per- ve polifloroalkil maddeler) günlük yaşamda uzun süredir kullanılan ve son yıllarda çevresel ve sağlık etkileri nedeniyle gündeme gelen kimyasal maddeler arasında yer alıyor. 10.000'den fazla türü olan bu maddeler, sahip oldukları termal kararlılık, kimyasal bozulmaya karşı direnç ile su ve yağ itici özellikleri nedeniyle uzun yıllardır endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, yapışmaz tencere kaplamaları, yangın söndürme köpüğü, su geçirmez kumaşlar, ter tutmayan giysiler ve gıda ambalajları gibi birçok üründe kullanılan PFAS'lar (1), çevrede ve insan vücudunda uzun süre kalıcı olmaları nedeniyle "sonsuz kimyasallar (forever chemicals)" olarak adlandırılmaktadır (2).

Dünyanın farklı bölgelerindeki PFAS kirliliğine ilişkin araştırmalar, PFAS'ların ekonomik/endüstriyel gelişme düzeyinden bağımsız olarak küresel ölçekte yayıldığını göstermektedir (3). Gelişmekte olan ülkelerin tatlı su kaynaklarından Everest Dağı'na ve Pasifik ve Atlantik Okyanuslarına kadar dünyanın pek çok bölgesinde PFAS'lar tespit edilmiştir (4, 5). Bu bulgular, PFAS'ların hem atık su deşarjları ve akarsular hem de uzun mesafeli atmosferik taşınım ile çevreye yayıldığını göstermektedir (3).

Yakın tarihli bir çalışma, bu yayılımın Türkiye için de geçerli olduğunu göstermiştir. Türkiye'nin farklı tatlı su

kaynaklarında yürütülen bir araştırmada; Terkos, Küçükçekmece, Büyükçekmece, Eğirdir ve Beyşehir gölleri ile Ergene ve Sakarya nehirlerinden alınan su ve balık örneklerinde PFAS tespit edilmiştir (6). Bu durum, söz konusu maddelerin halk sağlığı açısından Türkiye'de de önemli bir risk unsuru oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Halk Sağlığına Etkileri ve İnsanlar Üzerinde Yapılan İncelemeler

PFAS kirliliğinin küresel ölçekte yayılım göstermesi ve su, toprak ile hava gibi hemen her çevresel ortamda tespit edilmesi, bu maddelerin hayvanlar, bitkiler ve insanlar üzerinde biyobirikimine yol açmaktadır. İnsanlar PFAS'lara içme suyu, hava, iç mekân tozu, toprak, gıda, gıda ile temas eden malzemeler ve pişirme kapları aracılığıyla maruz kalabilmektedir (7). Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kanada, Şili, Fransa, Japonya, Meksika ve Norveç gibi birçok ülkede gerçekleştirilen içme suyu analizlerinde PFAS bileşiklerinin konsantrasyonlarının, tespit limitinin altından 39 ng/L'ye kadar uzanan geniş bir aralıkta dağılım gösterdiği belirlenmiştir (8). Türkiye'de, süpermarketlerden temin edilmiş 18 farklı markaya ait şişe içme sularında yapılan bir araştırmaya göre ise, ortalama PFAS değeri 0,41 ng/L olarak tespit edilmiştir (9). Aynı araştırmaya göre, Türkiye'nin en büyük ve sanayileşmiş illerinden biri olan İstanbul'un musluk sularında Türkiye'nin diğer illerine kıyasla yüksek oranda

PFAS (11,27 ng/L) bulunmuştur. İzmir, Eskişehir, Ankara, Gaziantep, Şanlıurfa ve Adana gibi diğer kalabalık ve sanayileşmiş şehirlerden alınan örneklerde de önemli miktarlarda PFAS tespit edilmiştir. Araştırmaya göre, bulgular, ABD Çevre Koruma Ajansı'nın içme suları için belirlediği PFAS sınır değerleriyle karşılaştırıldığında herhangi bir sağlık endişesi yaratmasa da çocuklar üzerinde yapılan immünotoksisite çalışmaları, içme suyunda, özellikle PFAS'ların sıkça rastlanan bileşikler olan PFOS (Perflorooktansülfonat) ve PFOA (Perflorooktanoik asit) için çok daha düşük bir referans seviyesi (1 ng/L) önermiştir (9, 10). Bu bulgular ve araştırma sonuçlarına göre, içme sularında PFAS sınır değerleri için uygun standartların belirlenmesi hem Türkiye'de hem de küresel ölçekte gereklidir. Ancak PFAS'ların özellikle içme sularında çok düşük konsantrasyonlarda bulunmaları nedeniyle ölçülmesi ve geleneksel arıtma yöntemleriyle giderilmesi oldukça zordur. Buna karşın, son yıllarda geliştirilen yeni arıtma teknolojileri sayesinde ABD Çevre Koruma Ajansı, İçme Suyu Arıtılabilirlik Veritabanı'na 26 PFAS kimyasalının giderimini kapsayan yeni arıtma proseslerini dâhil etmiştir (11). Ancak çok sayıdaki PFAS türü ve bunların farklı toksisite seviyeleri göz önünde bulundurulduğunda bu maddelerin izlenmesi ve arıtılması yönünde daha kapsamlı yeni teknolojilere ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.

Farklı gıda türleri üzerinde yapılan araştırmalarda et, süt, deniz ürünleri, yumurta, meyve ve sebzelerde ve hatta anne sütünde PFAS türleri tespit edilmiştir (2). Bu maddeler, insanlar tarafından doğrudan gıda yoluyla alınabildiği gibi, PFAS içeren ambalajlarda satılan gıdaların tüketilmesiyle dolaylı yoldan da bulaşabilmektedir. Çalışmalar, düzenli olarak ambalajlı gıda tüketen kişilerin kan örneklerinde daha yüksek PFAS seviyelerine rastlandığını göstermiştir (2, 12, 13). Ayrıca araştırmalar, PFAS'ların anneden fetüse ya da emzirme ile yenidoğanlara bulaştığını da ortaya koymuştur (7). Günümüzde insanlar üzerinde yapılan epidemiyolojik çalışmalar çoğunlukla uzun zincirli PFAS'lara yoğunlaşsa da (2), 2013-2016 yılları arasında, Çin'de, erken gebelik dönemindeki 752 kadın üzerinde yapılan bir çalışma, kısa zin-

cirli PFAS'lara maruziyetin fetal üreme hormonları üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya çıkarmıştır (14). Tarım ürünleri üzerinde yapılan araştırmalarda da kısa zincirli PFAS'ların buğday, mısır, patates, pirinç, domates vb. birçok bitki tarafından kolayca alındığı ve yaprak, tohum, kök ve gövde kısımlarında birikerek toksik etkilere neden olduğu tespit edilmiştir (2, 15).

PFAS'ların doku ve organlardaki biyobirikimi uzun zamandır araştırılan kritik bir halk sağlığı sorunudur. İnsanlar üzerinde yapılan ilk çalışmalar öncelikle fabrika işçilerine ve PFAS maruziyetiyle ilişkili potansiyel toksik etkilere odaklanmıştır. Örneğin ABD'de yürütülen Ulusal Sağlık ve Beslenme Araştırması, 2003 ve 2004 yıllarında toplanan insan serum örneklerinin yüzde 98'inde eser miktarda

PFAS bulunduğunu açıklamıştır (3, 8, 16). Öte yandan, PFOA'nın sağlık üzerindeki etkilerine odaklanan uzun vadeli bir epidemiyolojik çalışmada, 2005 ile 2013 yılları arasında 30.000'den fazla yerli ve fabrika işçisinin tıbbi izleme verileri incelenmiş ve PFOA maruziyeti ile yüksek kolesterol, ülseratif kolit, tiroid hastalığı, testis kanseri, böbrek kanseri ve gebeliğe bağlı hipertansiyon gibi sağlık sorunları arasında bağlantı olduğu bulunmuştur (3, 17, 18). PFAS maruziyeti ayrıca, steroid hormon bozukluğu, kısırlık, insülin direnci, karaciğer ve kardiyovasküler hastalıklar gibi başka sağlık riskleri de oluşturmaktadır (19, 20). Bebeklerde ve çocuklarda, PFAS maruziyeti büyüme parametrelerinde azalmaya, motor becerilerde düşüşe, dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğuna (DEHB), kabakulak ve kızamıkçık gibi hastalıklara



Bugün PFAS'lara yalnızca endüstriyel alanlarda değil, günlük yaşamımızın pek çok noktasında rastlıyoruz. İçtiğimiz su, tükettiğimiz gıdalar, kullandığımız ambalajlar ve ev ortamlarımız bu maddelere maruz kalmamıza neden olabiliyor. Çevrede uzun süre kalabilmeleri ve canlı dokularında birikebilmeleri nedeniyle “sonsuz kimyasallar” olarak adlandırılan PFAS'ların insan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik araştırmalar her geçen gün artıyor. Elde edilen bulgular, bu kimyasalların çevredeki yayılımını ve sağlık üzerindeki olası sonuçlarını daha dikkatli değerlendirmemiz gerektiğini gösteriyor.



karşı antikor üretiminde düşüşe, akciğer ve solunum fonksiyonlarında azalmaya yol açabilmektedir (7). Mevcut çalışmalar, PFAS'ların proteince zengin kan, karaciğer, böbrekler ve kemiklerde birikme eğiliminde olduğunu göstermiştir (21). Kısa zincirli PFAS'ların insan kanındaki yarı ömrü uzun zincirli türlerine kıyasla daha kısa olsa da bu maddelerin de akciğerler, böbrekler ve beyinde birikmeye devam ettiği gözlemlenmiştir (22). İnsan biyozileme çalışmaları sonucunda, kan haricinde, plasenta, amniyotik sıvı, anne sütü, beyin omurilik sıvısı, saç, tırnak, idrar ve dışkı örneklerinde PFAS'lar tespit edilmiştir (23).

Tüm bu araştırmalara rağmen, PFAS'ların etkilerini kesin olarak değerlendirmek hâlâ zor bir süreç olarak kabul edilebilir çünkü potansiyel olarak farklı toksisite seviyelerine sahip binlerce PFAS bulunmaktadır. Örneğin farklı türdeki PFAS'ların göreceli etkileri çocuklar ve yetişkinler arasında değişiklik göstermektedir. İnsanlar çeşitli kaynaklardan bu maddelere maruz kalmakta ancak PFAS türleri ve kullanımları zaman içinde değişmekte, bu da maruziyet sonucu sağlık etkilerinin izlenmesini ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda, çoğu çalışma belirli türdeki ya da daha çok bilinen PFAS türlerine odaklanmıştır (23). Çok sayıdaki PFAS türü ve buna bağlı olarak ekosistemdeki kalıcılıkları ve biyobirikim potansiyelleri

arasındaki olası farklılıklar PFAS'lara ilişkin toksisite verilerinde belirsizliğe sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, daha güvenilir verilerin elde edilmesi ve izlenmesi için bu karmaşık faktörlerin kapsamlı bir analizi gerekmektedir (24).

Dünyada ve Türkiye'deki Düzenlemeler

PFAS'ların ekosistemdeki birikimlerine dair kanıtların ortaya çıkmasıyla birlikte, 2000'li yılların başında ABD'de ve Tehlikeli Maddelerin Sınırlanması direktifi uyarınca, Avrupa'da ilk kısıtlamaların getirilmesiyle bu kirleticiler hakkında farkındalık artmaya başlamıştır. 2009 yılında, PFAS ile ilgili maddelerin Kalıcı Organik Kirleticilere İlişkin Stockholm Sözleşmesi kapsamına alınması ise önemli bir dönüm noktası olmuştur. Sözleşme, katılımcı ülkeler için bu maddelerin üretimini, kullanımını ve salınımını kısıtlamak için yasal olarak bağlayıcı yükümlülükler getirmiştir (3, 23, 25). Buna paralel olarak, Avrupa Birliği giderek daha kapsamlı bir düzenleyici çerçeve geliştirmiş; PFAS'lar Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanmasına İlişkin Tüzük (REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) yönetmeliğine dâhil edilerek üretimleri, pazarlamaları ve kullanımları üzerinde 2023 yılında geniş kapsamlı bir kısıtlama önerisi hazırlanmıştır (26). Yönetmeliğin amaçlarından biri

10.000'e yakın PFAS türünün üretimini ve kullanımını 2025 yılı itibarıyla aşamalı olarak yasaklamak olmuştur. Ayrıca 12 Ocak 2026 itibarıyla yürürlüğe giren kurallara göre üye devletler, İçme Suyu Direktifi kapsamında AB limit değerlerine uyumu sağlamak için içme suyundaki PFAS seviyelerini izlemek zorundadır. Limit değerler aşırsa, üye devletler halk sağlığını korumak için kirlenmiş kuyuların kapatılması, PFAS giderimi için arıtma adımlarının eklenmesi veya aşım devam ettiği sürece içme suyu kaynaklarının kullanımının kısıtlanması gibi önlemler almalı ve halkı bilgilendirmelidir (27).

ABD'de de PFAS ile ilgili düzenlemeler son yıllarda ivme kazanmıştır. Yıllarca süren izleme ve sağlık uyarılarının ardından, ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA), 2024 yılında PFAS için ilk yasal olarak uygulanabilir ulusal içme suyu standartlarını belirleyerek, çeşitli yüksek riskli PFAS bileşiklerini için limitler koymuştur (28). Benzer düzenleyici yaklaşımlar Kanada, Japonya, Avustralya ve diğer bölgelerde de benimsenmiş veya güçlendirilmiştir (25).

Türkiye'de ise AB düzenlemeleri ile uyumlu politika izlenmesi ve PFAS'ların Çevre ve Şehircilik Bakanlığı yönetmeliğiyle kısıtlanması gündemdedir (25) ancak içme suyundaki PFAS limitlerine ilişkin özel düzenlemeler henüz gündem konusu değildir.

Sonuç ve Gelecek Planı

PFAS'ların çevre ve halk sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için atılabilecek temel adımlar; bu maddelerin kaynağının azaltılması, çevresel düzenlemeler aracılığıyla üretimden bertarafa kadar olan süreçlerin kontrol altına alınması, yeni arıtma teknolojileri ile giderimlerinin artırılması ve biyoizleme verilerinin daha kapsamlı değerlendirilerek sağlık risklerinin analiz edilmesi olarak sıralanabilir.

PFAS'ların kaynağını azaltmak için yeni politikalar geliştirilerek üretim süreçlerinde yeniliğin desteklenmesi gerekmektedir. PFAS içeren ürünler için kapalı döngü geri dönüşüm sistemleri ile atık oluşumu ve çevresel kirlilik azaltılabilir. PFAS içermeyen alternatiflerin geliştirilmesi için ise sanayi, araştırmacılar ve karar vericiler arasında iş birliği gereklidir. Özellikle, sanayi kuruluşlarının bu alandaki araştırmalara yatırım yapması kritik öneme sahiptir (7). Alternatif kısa zincirli PFAS'ların kullanımı ise belirsiz ve hatta daha zararlı olabilecek sağlık etkileri nedeniyle kapsamlı toksikolojik çalışmalar yapılmadan düşünülmemelidir. Ayrıca unutulmamalıdır ki kısa zincirli PFAS'ların çevresel ortamlarda daha hareketli olması, daha yaygın kirlenmeye ve bu maddelerin besin zincirine kolaylıkla girmesine sebep olmaktadır (23).

Kanun düzenleyiciler PFAS'ları çevresel ortamlardan uzaklaştırmak için çeşitli iyileştirme stratejileri ve uygun standartlar geliştirmelidir. Nitekim, PFAS'ların özellikle içme sularındaki konsantrasyonlarının azaltılması ve kullanımının sınırlandırılması amacıyla AB ülkeleri, ABD ve diğer birçok ülkede çeşitli düzenlemeler yürürlüğe girmiş ve uygulamaya yönelik önemli adımlar atılmıştır. Buna karşın, Türkiye'de PFAS'lara yönelik kapsamlı yasal düzenlemelerin sınırlı olduğu görülmekte olup, bu alanda somut adımların atılması çevre ve halk sağlığı açısından kaçınılmazdır. Bunun için PFAS'ların üretiminden bertarafına kadar olan kullanım, geri dönüşüm, çevreye salınım ve halk sağlığına etkileri gibi süreçler izlenerek risklerin kontrol edilmesi ve eylem planlarının hazırlanması gereklidir. Bu hedeflere ulaşmak için hem atık su hem de içme sularından PFAS'ların giderimine yönelik uygun maliyetli ve verimli yeni teknolojilerin geliştirilmesi desteklenmelidir. Bunun yanı sıra, PFAS maruziyeti ve bu maddelerin

olası zararları konusunda kamuoyunun bilinçlendirilmesi, eylem planının önemli adımlarından biri olmalıdır. Aynı zamanda, farklı PFAS türlerinin etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi adına insan biyoizleme çalışmalarının yaygınlaştırılması ve bu maddelerin toksikolojik etkileri üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılması büyük önem taşımaktadır.

Kaynaklar

- 1) Alam, M.J., Habib, A., Hasan, M.M., et al. (2025). *Industrial applications, environmental fate, human exposure, and health effects of PFAS*. *Pollutants*, 5, 43.
- 2) Yurtsever, M., 2024. *Per- ve polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasallar) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri*. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14, 412-423.
- 3) Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S.R., et al. (2022). *Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution*. *Science of the Total Environment*, 809, 151003.
- 4) Benskin, J.P., Muir, D.C.G., Scott, B.F., et al. (2012). *Perfluoroalkyl acids in the Atlantic and Canadian arctic oceans*. *Environmental Science & Technology*, 46, 5815-5823.
- 5) Miner, K.R., Clifford, H., Taruscio, T., et al. (2021). *Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest*. *Science of the Total Environment*, 759, 144421.
- 6) İkizoglu, B. (2024). *PFOA and PFOS pollution in surface waters and surface water fish*. *Water*, 16, 2342.
- 7) Miš'ánová, C., & Valachovičová, M. (2025). *Health impacts of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): A comprehensive review*. *Life*, 15, 1-35.
- 8) Kaboré, H.A., Vo Duy, S., Munoz, G., et al. (2018). *Worldwide drinking water occurrence and levels of newly-identified perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances*. *Science of the Total Environment*, 616-617, 1089-1100.
- 9) Ünlü Endirlik, B., Bakır, E., Boşgelmez, İ.İ., et al. (2019). *Assessment of perfluoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey*. *Chemosphere*, 235, 1162-1171.
- 10) Grandjean, P., & Budtz-Jorgensen, E. (2013). *Immunotoxicity of perfluorinated alkylates: calculation of benchmark doses based on serum concentrations in children*. *Environmental Health*, 12, 35.
- 11) US EPA. <https://tdb.epa.gov/tdb/home> (Erişim Tarihi: 24.01.2026).
- 12) Susmann, H.P., Schaidler, L.A., Rodgers, K.M., et al. (2019). *Dietary habits related to food packaging and population exposure to PFASs*. *Environmental Health Perspectives*, 127(10), 107003.
- 13) Marchiandi, J., Alghamdi, W., Dagnino, S., et al. (2024). *Exposure to endocrine disrupting chemicals from beverage packaging materials and risk assessment for consumers*. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133314, 2024.
- 14) Nian, M., Luo, K., Luo, F., et al. (2020). *Association between prenatal exposure to PFAS and fetal sex hormones: Are the short-chain pfas safer?* *Environmental Science & Technology*, 54, 8291-8299.
- 15) Lesmeister, L., Lange, F.T., Breuer, J., et al. (2021). *Extending the knowledge about PFAS bioaccumulation factors for agricultural plants – A review*. *Science of the Total Environment*, 766, 142640.
- 16) Calafat, A.M., Wong, L.Y., Kuklenyik, Z., et al. (2007). *Polyfluoroalkyl chemicals in the U.S. population: Data from the national health and nutrition examination survey (NHANES) 2003-2004 and comparisons with NHANES 1999-2000*. *Environmental Health Perspectives*, 115, 1596-1602.
- 17) Nicole, W. (2013). *PFOA and cancer in a highly exposed community: New findings from the C8 science panel*. *Environmental Health Perspectives*, 121, A340.
- 18) Winkvist, A., Lally, C., Shin, H.M., et al. (2013). *Design, methods, and population for a study of PFOA health effects among highly exposed Mid-Ohio Valley community residents and workers*. *Environmental Health Perspectives*, 121, 893-899.
- 19) Fenton, S.E., Ducatman, A., Boobis, A., et al. (2021). *Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40, 606.
- 20) Manojkumar, Y., Pilli, S., Rao, P.V., et al. (2023). *Sources, occurrence and toxic effects of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. *Neurotoxicology and Teratology*, 97, 107174.
- 21) Cousins, I.T., Johansson, J.H., Salter, M.E., et al. (2022). *Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)*. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11172-11179.
- 22) Nnabuchi, M.A., & Duru, C.E. (2025). *PFAS toxicity and female reproductive health: A review of the evidence and current state of knowledge*. *Substantia*, 9, 7-22.
- 23) Dobrzyńska, E., Wasilewski, P., & Pośniak, M. (2025). *Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): A comprehensive review of environmental distribution, health impacts, and regulatory landscape*. *Applied Sciences*, 15(22), 11884.
- 24) DeLuca, N.M., Minucci, J.M., Mullikin, A., et al. (2022). *Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review*. *Environment International*, 162, 107149.
- 25) Ural, G.N., Topuz, O.K., Ünlüsayın, M. (2025). *Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) on aquatic food products*. *Toxin Reviews*, 44, 129-136.
- 26) ECHA (2025). *Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas> (Erişim Tarihi: 24.01.2026).
- 27) Su Politikaları Demeği. <https://supolitikalaridermegi.org/avrupa-birligi-uye-devletleri-icme-suyunda-pfas-izlemeye-basliyor> (Erişim Tarihi: 23.01.2026).
- 28) Paustenbach, D., McCauley, K., Siracusa, J., et al. (2025). *United States Environmental Protection Agency's Perfluorooctanoic Acid, Perfluorooctane Sulfonic Acid, and Related Per- and Polyfluoroalkyl Substances 2024 Drinking Water Maximum Contaminant Level: Part 2 – Fifteen Misconceptions About the Health Hazards*. *Critical Reviews in Toxicology*, 55(3), 368-415.