

Sonsuza kadar kalıcı kimyasallar, PFAS ve çevre sağlığı

Prof. Dr. Mustafa Öztürk



1953 yılında Hatay'ın Dörtöyl ilçesi Çaylı Mahallesi'nde doğdu. İstanbul Üniversitesi Kimya Fakültesinden mezun olduktan sonra Niğde Çimento Fabrikasında çalıştı, askerlik görevini Kara Harp Okulunda yaptı ve İstanbul Teknik Üniversitesinde doktora eğitimini tamamladı. 1985 yılında Yıldız Teknik Üniversitesinde akademik göreve başladı, 1995 yılında Prof. Dr. ünvanını aldı. Hava, su ve toprak kirliliği, katı atıkların geri kazanımı ve atık su arıtımı konularında çok sayıda yayın yaptı, doktora ve yüksek lisans öğrencileri yetiştirdi. İyi derecede İngilizce bilen Öztürk, evli ve iki çocuk babasıdır. 1990'lı yıllardan itibaren çeşitli idari görevlerde bulundu; YTÜ Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı Başkanlığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesinde çevre yönetimi görevleri, Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşar Yardımcılığı, AK Parti Hatay Milletvekiliği ve TBMM Çevre Komisyonu Başkan Vekilliği ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Müsteşarlığını yürüttü.

Büyük ve heterojen kimyasal grubu, kabaca polimerik ve polimerik olmayan formlara ayrılabilen 10 binlerce ayrı maddeden oluşur. Perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS), polimerik ve polimerik olmayan formlar olarak ikiye ayrılabilir. PFAS polimerleri, Avrupa Birliği (AB) pazarındaki toplam PFAS hacminin yüzde 24-40 gibi önemli bir kısmını oluşturmaktadır. PFAS polimerleri tüketici ürünlerinde, endüstriyel üretimde ve giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır.

PFAS polimerleri, yaşam döngüleri boyunca ciddi ve geri döndürülemez etkilere sahip olabilir. Bunlar arasında toksik etkilerin yanı sıra iklim değişikliği ve ozon tabakasının incilmesi gibi etkiler de yer alır. Ayrıca ürünlerin geri dönüştürülebilirliğini de engelleyebilirler. Ancak bu etkilerin çoğu henüz tam olarak anlaşılamamıştır.

Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Yönetmeliği (REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) kapsamında önerilen bir kısıtlama, AB içinde PFAS kullanımını önemli ölçüde azaltabilir. Bu, PFAS polimerlerini de kapsamaktadır. PFAS polimerlerinin etkilerini değerlendirirken ve gelecekteki kullanımlarına karar verirken tam bir yaşam döngüsü perspektifini benimsemek önemlidir.

PFAS aynı zamanda kalıcı kimyasallar olarak da bilinir; son 20 yılda giderek artan bir ilgi görmektedir. Bunun nedeni, bu maddelerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerine ilişkin farkındalığın artmasıdır. AB, PFAS'ı bir grup olarak kısıtlamaya yönelik devam eden çabalar, belirli PFAS alt gruplarında bulunan yüksek kalıcılıkları ve diğer endişe verici özellikleriyle haklı çıkarılmıştır. Bunlar arasında insanlarda ve yaban hayatında birikmeleri, yüksek hareketlilikleri (çevrede dolaşım içme suyu kaynaklarını kirlitebilirler), uzun menzilli taşınma potansiyelleri (emisyon kaynaklarından uzak alanları kirlitebilirler), bitkilerde birikmeleri (gıda kaynaklarını kirlitebilirler), insanları ve çevreyi etkileyebilecek (eko) toksikolojik etkileri yer almaktadır.

PFAS Üretimi

PFAS tek bir kimyasal değil, 10 binlerce ayrı maddeden oluşan bir ailedir; esasen, sadece flor ile bağlanmış karbon atomu içeren (kimyasal yapılarda CF₃ veya CF₂ grupları) herhangi bir kimyasaldır. Karbon-flor bağı, bilinen en güçlü kimyasal bağlardan biridir ve PFAS'ı en zorlu ortamlarda bile çok kararlı hâle getirir.

- PFAS'lar, organik kimyadaki en güçlü kimyasal bağlardan biri olan karbon-flor bağları içerir.
- Telomerizasyon (Reomerizasyon):

1970'lerden itibaren yaygınlaşan bu yöntem, tetrafloroetilen (TFE) gibi daha küçük florokarbon birimlerinin birleştirilmesiyle perfloroalkil iyodürlerin (PFAI) üretilmesine dayanır. Bu yöntem, ECF'den farklı olarak daha çok doğrusal zincirli yapılar üretir.

- PFAS, yaklaşık bir asırdır elektrokimyasal florlama işlemi kullanılarak üretilmektedir.
- PFAS'lar, doğrudan florlama (örneğin elektrokimyasal) ve oligomerizasyon (örneğin florotelomerizasyon) olmak üzere iki işlemle sentezlenir.
- PFAS'lar, çeşitli uzunluklarda karbon zincirlerine sahip, hidrojen atomlarının flor atomları ve sülfonat, karboksilat, sülfonamid, alkoller ve fosfonat gibi çeşitli terminal fonksiyonel grupları ile tam (perflorlanmış) veya kısmi (poliflorlanmış) yer değiştirmesi olan, genel formülü C_nF_{2n+1} olan alifatik organik bileşiklerdir.
- PFAS'lar, hidrojen atomlarının (karbonun doğal bağ ortağı) flor atomlarıyla değiştirilmesiyle oluşturulan insan yapımı maddelerdir.

PFAS; hidrojen, klor, brom veya iyot atomları içerenler hariç, en az bir perflorometil (CF₃) veya perflorometilen (CF₂) karbon atomu içeren bileşiklerdir ifade eder. Polimerler, güçlü (kovalent) kimyasal bağlarla birbirine bağlı tekrarlayan birimlerden oluşan büyük moleküllerdir. Polimerlerin yapı taşları olan tekrarlayan birimlere monomer denir. Çok çeşitli



PFAS polimerleri mevcuttur. Üç ana türü yan zincirli florlu polimerler, floropolimerler ve perfloropolieterlerdir.

Dünyada Üretilen PFAS Miktarı

Küresel PFAS kimyasalları pazar hacmi 2024 yılında 788,70 bin ton olarak hesaplanmış, 2025 yılında 832 bin tona yükselmiş ve 2034 yılına kadar yaklaşık 1.347,10 bin tona ulaşması öngörülmektedir. Pazar, 2025 ile 2034 yılları arasında yüzde 5,50'lik bir bileşik yıllık büyüme oranıyla genişlemektedir.

PFAS kimyasallarının çevrede ve gıda, ticari, tüketici ile endüstriyel ürünlerde yaygın kullanımı, bu kimyasalların uzun ömürlü özelliklerinden kaynaklanmaktadır; bu özellikler aynı zamanda PFAS pazarında araştırma ve geliştirmeyi de teşvik etmektedir.

Yetkililer, önlem alınmazsa önümüzdeki 30 yıl içinde yaklaşık 4,4 milyon ton PFAS'ın çevreye karışacağını tahmin etmektedir.

Ulusal Sağlık ve Beslenme Araştırması (NHANES) ve Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri (CDC) tarafından sağlanan verilere göre, PFAS bulaşmış su veya gıda yoluyla yoğun PFAS maruziyeti nedeniyle Amerikalıların %97'sinin kanında PFAS bulunmuştur. Bu veriler, PFAS kimyasallarının piyasanın her alanında büyük ölçüde kullanıldığını göstermektedir.

Eylül 2024'te Amerikan Kimya Konseyi (ACC), Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA), Merkezi Veri Değişimi (CDX) sisteminin kapsamlı bir şekilde test edilmesini sağlamak amacıyla endüstriler ve PFAS kimyasallarının son kullanıcılarıyla iş birliği yapma çabalarını takdir etti.

PFAS Kimyasalları Pazarına Genel Bakış

PFAS kimyasalları pazarı; havacılık, inşaat, otomotiv ve elektronik en-

düstrileri gibi çeşitli sektörlerde PFAS kimyasal ürünlerinin yaygın olarak benimsenmesi etrafında dönmektedir. PFAS kimyasalları, birçok tüketici ürününde yaygın olarak kullanılan geniş bir sentetik kimyasal grubuna aittir.

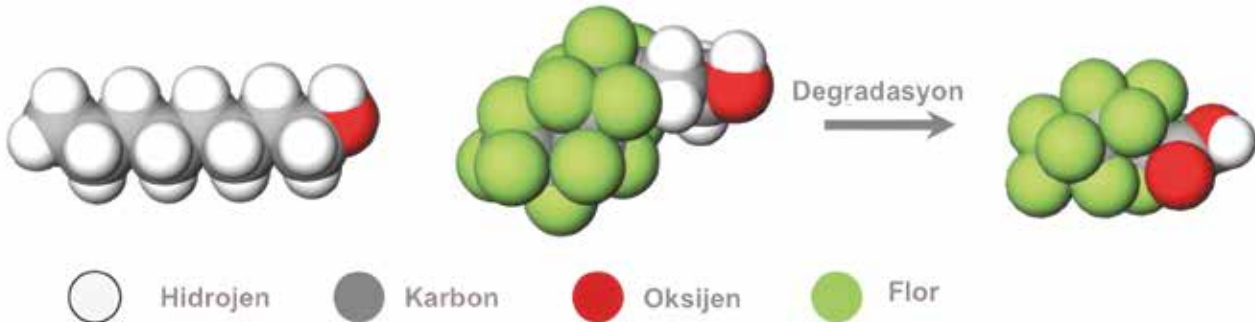
Uygulama Alanları

Uygulama bazında, TULAC (Tekstil, Döşemelik, Deri, Giyim ve Halı) segmenti, 2024 yılında PFAS kimyasalları pazarına hâkim oldu. PFAS, en fazla TULAC, takiben yangın söndürmede, boyalarda ve kaplamalarda ve plastik, kâğıt ve karton üretiminden kullanılmaktadır. Bu malzemeler, uzun vadede lüks bir konfor sunarken kolay bakım ve temizlik imkânı da sağlıyor. Bu malzemelerin çevre dostu ve sürdürülebilir tercihleri, küresel nüfus arasında benimsenmelerini artırıyor.

Kısaca her yerde PFAS kullanıldığı için insan sağlığı için ciddi risk oluşturmaktadır.

ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), kamu su sistemlerinde PFAS testi ve PFAS arıtımının uygulanması için eyaletlere ve bölgelere 1 milyar dolarlık yardım sağlayacağını duyurdu. Ayrıca, özel kuyu sahiplerinin PFAS kirliliğini gidermelerine yardımcı olmaya da odaklandı. EPA'nın bu çabaları, topluluklardaki PFAS kirliliğinin temizlenmesinde şeffaflık ve hesap verebilirliği sağladı.

EPA, atık su, yüzey suyu, yer altı suyu, toprak vb. alanlarda PFAS'ı test etmek için üç yöntem tanıttı. EPA tarafından sunulan diğer yöntem, atık suda PFAS dâhil olmak üzere karbon-flor bağları içeren kimyasal maddelerin varlığını geniş çapta tarayabiliyor. EPA'nın üçüncü yöntemi ise havada 30 uçucu florlu bileşiği ölçebiliyor.



Şekil 1. PFAS üretimi

Mart 2024'te Singapur, Stockholm Sözleşmesi kapsamında listelenen per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS) içeren yangın söndürme köpüklerinin kullanımını aşamalı olarak sona erdirmeye planlarını açıkladı.

PFAS'a Maruz Kalma

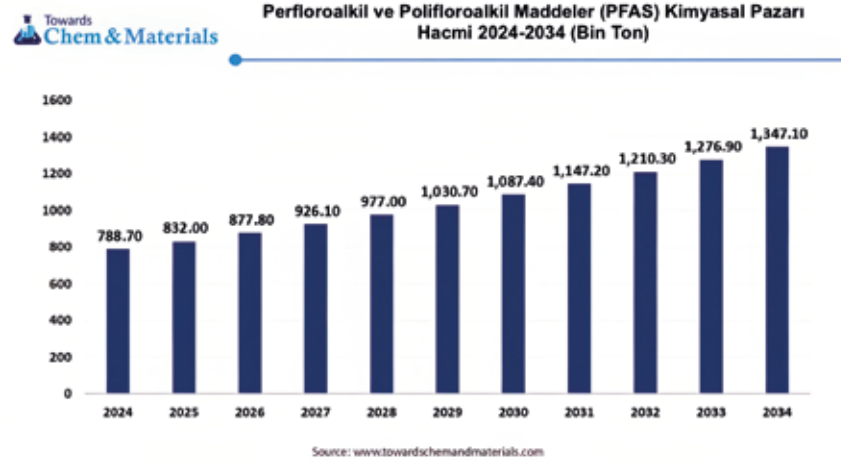
Maruziyet, bir kişinin bu tür kimyasal solunması, yemesi, içmesi veya dokunması ve bunun vücuduna girmesiyle gerçekleşir. Maruziyet şu şekilde meydana gelebilir: 1) Kirli hava, toprak veya içme suyu bulunan yerlerin yanında ve yakınında yaşamak. 2) PFAS üretilen ve kullanılan yerlerin yakınında yetiştirilen sebze ve meyveleri yemek. 3) PFAS (özellikle PFOS) ile kirlenmiş balık veya yabani av hayvanlarını tüketmek. 4) Kirlenmiş toprak veya partikül madde tozunu kazara yutmak. 5) PFAS içeren malzemelerle paketlenmiş gıdaları tüketmek. 6) Leke tutmayan halı veya su tutmayan kıyafet gibi ürünler kullanmak. 7) Kimyasal madde üretimi veya yangın söndürme köpüğü kullanmak.

PFAS'a maruz kalan annelerin bebekleri; 1) doğmadan önce, 2) emzirirken 3) PFAS ile kirlenmiş su ile karıştırılmış içme suyuna maruz kalabilir.

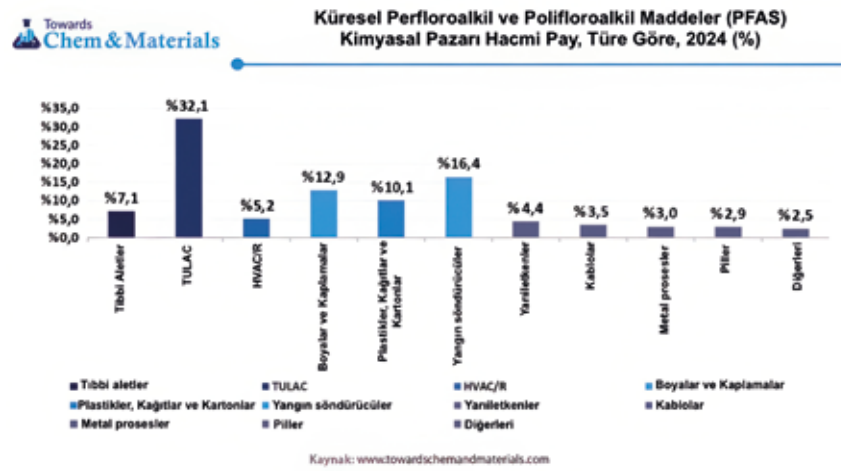
İçme Suyunda PFAS Sınırlaması

Geçtiğimiz yıl, içme suyundaki iki kimyasala maruz kalmanın hiçbir seviyesinin güvenli olmadığını göstermesinin ardından, EPA, PFOA ve PFOS için sırasıyla 0,02 ppt (trilyonda bir kısım veya 0,02 nanogram/litre, ng/l) ve 0,004 ppt (0,004 nanogram/l, ng/l)'lik uygulanabilir olmayan tavsiye edilen sağlık sınırları belirlemiştir.

AB Yenilenen İçme Suyu Direktifi 2020/2184 sayılı Direktif (EUTWRL), içme suyundaki toplam PFAS miktarını (toplam PFAS) 0,5 µg/l (500 ng/l) ile 20 PFAS grubu (PFAS-20) için ise 0,1 µg/l'lik (100 ng/l) katı bir sınırı uygulamaya koydu; PFOA, PFOS, PFNA ve PFHxS için ise 2028'de daha da sıkı bir "PFAS-4 Toplamı" sınırı (0,02 µg/L) yürürlüğe girecek. Üye devletler, uyumluluğu sağlamak için gerekli önlemleri almalıdır. İçme suyunda PFAS giderim tekniklerinin yaygın olarak kullanılabilmesi için bir dizi teknik ve ekonomik zorluğun ele alınması gerekmektedir. Direktif 12 Ocak 2021 tarihinde yürürlüğe girmiştir. AB üye ülkeleri, 12 Ocak 2026 tarihine kadar bu parametrelere uymakla yükümlüdür.



Şekil 2. PFAS üretimi ve gelecekte üretilcekler



Şekil 3. PFAS kullanım alanları

İç su yüzey suları, geçiş suları ve kıyı sularında PFOS (perflorooktan sülfonat) için sınır değerleri belirleyen Çevre Kalite Standartları (AB ÇKS) Direktifi 2008/105/EC'dir. Yıllık ortalama standartlar (AAD-UQS), iç sular için 0,65 ng/L, geçiş ve kıyı suları için 0,13 ng/L'dir. Maksimum konsantrasyonlar, iç sular için 36.000 ng/L, geçiş ve kıyı suları için 7.200 ng/L'dir.

20 Ocak 2025 tarihinden itibaren, Komisyon Tüzüğü (AB) 2024/3190, AB genelinde gıda temas malzemelerinde Bisfenol A (BPA), tuzları ve diğer tehlikeli bisfenoller ile tehlikeli bisfenol türevlerinin kullanımını ve ticaretini yasaklamaktadır.

AB Komisyonu, potansiyel olarak zararlı sağlık etkileri nedeniyle, 2025 yılında gıda ile temas eden malzemelerde Bisfenol A (BPA) kullanımının yasaklanmasını kabul etti. BPA, bazı plastiklerin ve reçinelerin üretiminde kullanılan bir kimyasal maddedir. Yasak, BPA'nın aşağıdaki gıda temas malzemeleri ve ürünlerinin üretiminde kullanılmasına uygulanır: yapıştırıcılar, kauçuklar, iyon değişim reçineleri, plastikler, baskı mürekkepleri,

silikonlar, boyalar, kaplamalar, vernikler ve kaplamalar gibi yiyecek ve içeceklerle temas eden ürünler.

BPA, AB'de bebek biberonları ve benzeri ürünlerde zaten yasaktır. Çoğu ürün için, endüstrinin uyum sağlaması ve gıda zincirinde aksamaların önlenmesi için 18 aylık bir aşamalı kullanımdan kaldırma süresi ve alternatifi olmayan çok sınırlı istisnalar olacaktır. Yasak, üreme ve endokrin sistemlerine zararlı diğer bisfenoller de kapsıyor.

2025 yılında ABD'nin iki eyaleti, yangın söndürme kıyafetlerinde PFAS maddelerinin kullanımını yasakladı. Diğer yerler de bunu takip edecek mi?

Gıda zincirinde oluşabilecek olası aksaklıkların önüne geçmek ve endüstrinin uyum sağlamasına imkân sağlamak için geçiş hükümleri uygulanacaktır:

- (AB) 2024/3190 sayılı tüzüğün yürürlüğe girdiği tarihten önce geçerli olan kurallara uygun olan ancak yeni kurallara uymayan tek kullanımlık ve



tekrar kullanılabilir son gıda temaslı maddelerin 20 Temmuz 2026 tarihine kadar Birlik pazarına arz edilmesine izin verilir.

- Meyve, sebze ve işlenmiş balık ürünlerini muhafaza etmek için kullanılan ambalajlar başta olmak üzere, BPA ile üretilen vernik ve kaplamalar kullanılarak üretilen tek kullanımlık, son gıda temasına sahip ürünler, 20 Temmuz 2028 tarihine kadar AB'de pazarlanmasına devam edilecektir.
- Eski düzenlemelere göre piyasaya arz edilen tek kullanımlık, son gıda temasına maruz kalan maddeler, geçerli geçiş süresinin bitiminden itibaren 12 ay boyunca gıda ile doldurulup kapatılabilir ve elde edilen ambalajlı gıda, stoklar tükeninceye kadar piyasaya arz edilebilir.
- (AB) 2024/3190 sayılı Yönetmeliğin yürürlüğe girdiği tarihten önce yürürlükte olan kurallara uygun olan ancak yeni kurallara uymayan, profesyonel gıda üretim ekipmanı olarak kullanılan

tekrar kullanılabilir, son gıda temasına dayanıklı ürünler, 20 Ocak 2028 tarihine kadar ilk kez piyasaya arz edilebilir.

- Eski düzenlemelere uygun olarak piyasaya ilk kez arz edilen tekrar kullanılabilir son gıda teması maddeleri en geç 20 Ocak 2029 tarihine kadar piyasada kalabilir.

Türkiye'de PFAS (sonsuz kimyasallar), özellikle Marmara Bölgesi başta olmak üzere içme suyu, nehirler ve şişelenmiş sularda tespit edilmiştir. Türkiye'de henüz içme suyuna özel spesifik yasal PFAS sınır değerleri tanımlanmamıştır.

Yangın Söndürme Köpüklerinde PFAS Yasaklanması

Nisan 2025'te AB Üye Devletleri, yangın söndürme köpüklerinde PFAS'ı yasaklayan sektöre özgü bir kısıtlamayı resmen kabul etti. Bu, bugüne kadarki en gelişmiş PFAS kısıtlamasıydı.

Ulusal önlemler de ortaya çıkıyor; Fransa, PFAS'ı 2026'dan itibaren kozmetik, tekstil ve kayak mumlarında yasaklayan ve yasağı 2030 yılına kadar tüm tekstil ürünlerini kapsayacak şekilde genişleten bir yasayı kabul ediyor.

Yangın köpüklerinde kullanma kısıtlaması olmasaydı, her yıl AB ülkelerinde yaklaşık 470 ton bu tür kimyasal çevreye salınmaya devam edecek ve toprak ile suyu kirliletecekti. Ayrıca, itfaiyeciler de kullanılan köpüklerde bulunan PFAS'a maruz kalmaya devam edecekti. Piyasada PFAS içermeyen yangın söndürme köpükleri mevcuttur.

Kirleticiler PFAS Polimerinin Yaşam Döngüleri Boyunca Yayılır

PFAS polimerlerinin yapımında kullanılan kimyasallar ve PFAS polimerlerinin yaşam döngüleri boyunca yayılan kimyasallar (Şekil 4) önemli etkilere ve kirliliğe yol açmıştır.



Şekil 4. PFAS polimerlerinin üretimden atık aşamasına kadar yaşam döngüsü

PFAS Polimerlerinin Üretimi

PFAS polimer üretim aşaması genellikle 'kapalı sistemlerde' gerçekleşir. Bununla birlikte, kapalı sistemlerden sızan PFAS'tan dolayı işçilerin ve fabrikaların çevresindeki çevre ve toplulukların ağır şekilde kirlendiğine dair tekrarlayan vakalar mevcuttur. 'Teflon grip ateşi', işçilerin PFAS polimeri politetrafloroetilenden (PTFE) çıkan dumanlara yüksek oranda maruz kaldıktan sonra yaşadıkları semptomları tanımlamak için kullandıkları bir terimdir. Avrupa ve ABD genelinde, PFOA ve GenX gibi polimerizasyon yardımcılarının ve çeşitli sentez yan ürünlerinin toprağı, içme suyunu, yiyecekleri ve fabrikalara yakın yaşayan insanları kirlettiği vakalar mevcuttur.

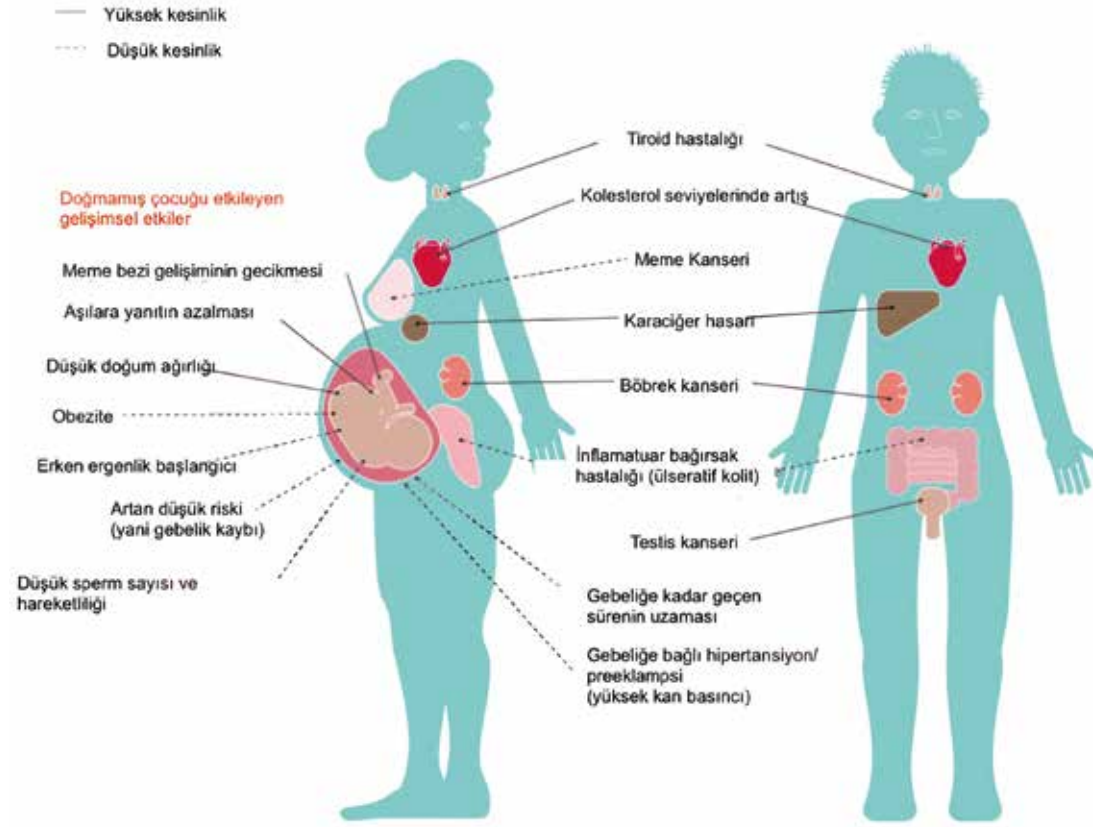
Daha az çalışılmış bir konu ise uçucu florlu maddelerin emisyonudur. Bunlar ozon tabakasına zarar verebilen güçlü iklim gazları veya maddelerdir. Bazı floropolimerleri üretmek için ham madde kimyasalları olarak kullanılırlar veya sentez yan ürünleri olarak oluşabilirler. Örneğin sera gazı triflorometan (HFC-23) ve ozon tabakasını incelten madde dikloroflorometan (HCFC-22), PTFE üretiminde yan ürün olarak oluşur. HFC-23'ün küresel ısınma potansiyeli karbondioksitten (CO₂) 12 bin 400 kat daha fazladır. Tahminler, 2018'de 1.800 ton HFC-23'ün yan ürün olarak salındığını göstermektedir; bu rakam yalnızca PTFE üretiminden kaynaklanmaktadır.

PFAS Polimerleri İçeren Ürünlerin Üretimi

Ürünlerin üretim aşamasında, PFAS polimerleri ürün hâline getirilir veya diğer ürünler üzerine film olarak uygulanır ya da ürünlere karıştırılır. Bu noktada, polimerler veya PFAS katkı maddeleri, safsızlıklar, sentez yan ürünleri veya bozunma ürünleri açığa çıkabilir. PFAS polimerleri, örneğin işçileri maruz bırakabilecek veya alternatif olarak hava ile havalandırılabilir yüzey kaplamaları olarak uygulandığında veya yeterince temizlenmemiş atık su veya dökülmeler yoluyla emisyonlar meydana gelebilir.

PFAS Polimerleri İçeren Ürünlerin Kullanımı

Kullanım aşamasında, florlu polimerler performans açısından belirgin avantajlar sunabilir; bu, dayanıklılık, iticilik,



Şekil 5. PFAS sağlık üzerine etkileri

sürtünmenin azaltılması, ısı direnci ayrıca örneğin yağ ve su emülsiyonlarını stabilize etme kabiliyetleriyle ilgilidir. Bu avantajlar, florlu polimerlerin çok çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, toplumumuzda kritik roller üstlenen bazı ürün türlerine bağımlı hâle gelmiştir. Ayrıca, PFAS polimerleri iklim değişikliğiyle mücadelede önemli kabul edilen ürünlerde kullanılmaktadır; bunlar arasında yakıt hücreleri, lityum iyon piller, güneş panelleri ve yarı iletkenler bulunmaktadır. Dijital ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi destekleyen uygulamalarda florlu polimerlerin kullanılmasının gerekliliği konusunda birçok iddia bulunmaktadır. Uygun alternatifleri bulunmayan bu kullanımları belirlemek zor olabilir. Aynı zamanda, PFAS polimerleri kirliliğe yol açabilen ve uygun alternatifleri bulunan birçok günlük üründe bulunmaktadır. Örneğin PFAS polimerleri atık su yoluyla nehirlere, göllere ve barajlara girebilir; örneğin PFAS içeren tekstil ürünlerinin yıkanması sırasında. PFAS, atık su arıtma tesislerinden deşarj suyu yoluyla su ortamına salınabilir veya kanalizasyon çamuruna karışarak bazen (tarımsal) topraklara yayılabilir. Klasik arıtma yöntemleri ile PFAS gidermek mümkün değildir.

PFAS Nelerde Bulunur?

Üretim, kullanım ve bertaraf sırasında atmosferik ve sulu kaçak salınımlar, bu bileşiklerin küresel dağılımına neden olmuştur. Uçucu PFAS'lar, genellikle karmaşık dönüşüm şemaları izleyen uzun mesafelere taşınabilir ve bu dönüşüm şemaları, çevre koşullarında bozulmayan, böylece çevrede dağılan ve biyotada birden fazla yolla biriken dirençli terminal PFAS'lara dönüşür.

PFAS'lar hem yağ hem de suyu itme kabiliyetleri nedeniyle çok çeşitli tüketici ürünlerinde kullanılır. PFAS olarak bilinen perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler anlamına gelen bir yapay kimyasal sınıfı, bu tüketim mallarını suya, lekeye ve yağa dayanıklı hâle getiren unsurlardan biridir.

Su geçirmez, leke tutmaz ve yüzeyi kayganlaştıran sonsuza dek kalıcı sentetik kimyasallar olarak bilinen PFAS; kâğıt ve karton gıda ambalajlarında (örneğin paket servis kapları, patlamış mısır poşetleri, pizza kutuları, hazır kekler vb.), yapışmaz tencere ve tavalarda, leke tutmaz mutfak eşyalarında, tekstilde (örneğin su geçirmez dış giyim ve ekipmanlar, halılar, yataklar vb.), halı, döşeme, koltuk ve diğer kumaşlarda

kullanılan leke tutmaz kaplamalarda, kozmetiklerde (örneğin saç kremi, fondöten, güneş kremi vb.), elektronik ekipmanlarda (örneğin akıllı telefonlar), temizlik ürünlerinde, yağmurluk, şemsiye ve çadır gibi suya dayanıklı kumaşlarda, yağa dayanıklı gıda ambalajlarda, şampuan, diş ipi, oje ve göz makyajı gibi kişisel bakım ürünlerinde, pipetlerde, yangın söndürme köpüklerinde, itfaiye giysilerinde, su geçirmez giysilerde, bazı giysilerde, ayakkabılarda ve aksesuarlarda, leke tutmayan ceketlerde veya daha nefes alabilen ancak suya dayanıklı spor şortlarında, askerî üstlerin çevresinde, tek kullanımlık plastik kaplarda ve plastik şişelerde, sızdırmazlık uygulamalarında, baskı uygulamalarında, askerî uygulamalarda, soğutma ve ısı pompası sistemleri dâhil florlu gazların uygulamalarında, elektronik ve yarı iletkenlerde, metal kaplama ve metal ürünlerin imalatında ve kayak mumlarında bulunur. PFAS'lar, evlerimizde, ofislerimizde, süpermarketlerimizde kısacası hemen hemen her yerde bulunabilir.

İçme Suları, Atık Su ve Atık Depolama

PFAS kaplı ürünler, kullanım sırasında tüketicileri doğrudan PFAS'a maruz bırakabilir. Yıkayıp sonunda çöplüklere atılan veya yakılan PFAS uygulanmış giysiler de yaşam döngüsünün sonunda çevreye kimyasallar sızdırır. Uzaklarda oluşan kirlilik de, örneğin denizlerde ve okyanuslarda veya yağmur yoluyla dünyayı sararak geniş kapsamlı etkilere neden olur. Ve; I) İçme sularında, II) Yüzeysel su kaynaklarında, III) Çöp depolama alanlarında, IV) Evsel atık sularında, V) Endüstriyel atıksularda, VI) Arıtma çamurlarında, VII) Kirlenmiş toprakta, VIII) Kirlenmiş yangın alanlarında (hava alanları gibi), IX) Yangın eğitim alanlarında, X) Çöp depolama alanı sızıntı sularında, XI) Yer altı su kaynaklarında, XII) Muhtemelen ithal ve ihraç edilen tarımsal topraklarda, XIII) Kirlenmiş topraktan yağmur suyunun akışı ile alıcı ortamlarda, XIV) Balıklarda PFAS bulunmaktadır. Bu yüzden tüm göl, gölet, baraj ve yer altı sularında PFAS taraması yapılmalı ve özellikle PFAS içeren içme suları ve tarım alanlarında kullanılan sular ileri kademe arıtılmalı.

PFAS ve İnsan Sağlığı

PFAS ile ilişkili sağlık etkileri riski şunlara bağlıdır: 1) Maruz kalma faktörleri (örne-

ğin doz, sıklık, yol ve süre). 2) Bireysel faktörler (örneğin duyarlılık ve hastalık yükü). 3) Sağlığın diğer belirleyicileri (örneğin güvenli suya erişim ve kaliteli sağlık hizmeti).

Kan testlerinin nasıl yorumlanacağı 2022 Ulusal Bilim ve Tıp Akademisi (NASEM) raporunda kısaca şöyle özetlenmiştir: PFAS maruziyetine bağlı olumsuz sağlık etkileri; I) 2 ng/ml (nanogram/mililitre)'nin altında olumsuz sağlık etkisi olması beklenmemektedir. II) Özellikle hassas popülasyonlarda, 2 ile 20 ng/mL arasında olumsuz etkiler görülebilir. III) 20 ng/ml'nin üzerinde olumsuz etkiler görülme riski artmaktadır.

Serum PFAS konsantrasyonu 2 ng/ml (nanogram/mililitre) veya daha yüksek ve 20 ng/ml'den düşük olan hastalar için, klinisyenler, maruz kalma kaynağı tespit edildiğinde, özellikle hamile kadınlar için PFAS maruziyetinin azaltılmasını teşvik etmelidir.

Klinisyenler, maruz kalan hastaların klinik bakımını bilgilendirmek için PFAS toplamının serum veya plazma konsantrasyonlarını kullanmalı.

PFAS'ların kanser, kısırlık, doğum kusurları ve bağışıklık sistemi bozuklukları gibi bir dizi ciddi sağlık sorunuyla bağlantılı olduğu belirtiliyor.

Zararlı maddeler ayırım gözetmez. Herkes maruz kalabilir, nerede ve nasıl yaşarsa yaşasın, hiç kimse kimyasal kirliliğe karşı bağışık değildir.

Epidemiyolojik ve toksikolojik çalışmalar, PFAS'ı üreme, endokrin ve nörogelişimsel hastalıkların yanı sıra bazı kanser türleriyle ilişkilendirmiştir. Bu kimyasalların; kısırlık, preeklampsi, düşük bebek doğum ağırlığı, Tip 2 diyabet, erken ergenlik, tiroid hastalığı, aşıya karşı zayıf tepki, çocuklarda nörobilişsel bozukluk (IQ düşüklüğü), gebelikte hipertansif bozukluklar dışında üreme etkileri, meme kanseri riskinin artması ile böbrek ve testis kanserleri de dâhil olmak üzere malignitelerle ilişkili olduğu bilinmektedir.

Ve aşağıdaki hastalıklar ve sağlık sonuçları için bir ilişkiye dair sınırlı veya düşündürücü kanıt buldu:

- Böbrek, meme kanseri riskinin artması,
- Karaciğer enzim değişiklikleri (yetiş-

- kinlerde ve çocuklarda) artması,
- Gebelik kaynaklı hipertansiyon (gestasyonel hipertansiyon ve pre-eklampsi) riskinin artması,
- Testis kanseri riskinin artması (yetişkinlerde),
- Tiroid hastalığı ve disfonksiyonu (yetişkinlerde), (Tiroid hormon düzeyleri dışındaki endokrin bozuklukları) artması,
- Antikor yanıtının azalması ve ülseratif kolit riskinin artması (yetişkinlerde),
- Solunum etkilerinin artması,
- Hematolojik etkiler,
- Nörolojik etkiler.

Rahim içinde veya erken çocukluk döneminde maruz kalmanın sağlık üzerindeki etkileri yıllar sonra bile ortaya çıkmayabilir.

AB Komitesi, aşağıdaki hastalıklar ve sağlık sonuçları için bir ilişkiye dair yeterli kanıt buldu:

- Azalmış antikor yanıtı (yetişkinlerde ve çocuklarda),
- Dislipidemi (yetişkinlerde ve çocuklarda),
- Bebek ve fetal büyümenin azalması.

PFAS'a maruz kalmanın toplumsal maliyeti önemlidir. İskandinav Konseyi, PFAS maruziyetinden kaynaklanan yıllık Avrupa sağlık maliyetlerini 52-84 milyar avro olarak tahmin ederken, daha yeni bir analiz, Avrupa ve İngiltere'de PFAS kirliliğinin temizlenmesinin 20 yıl içinde 1,6 trilyon sterlinden fazla maliyete yol açabileceğini öne sürmüştür.

PFAS maruziyetinin çok çeşitli olumsuz sağlık etkilerine yol açtığını ileri sürmektedir, bunlar arasında şunlar yer almaktadır: I) Zayıflamış bağışıklık sistemi fonksiyonu, II) Karaciğer hasarı, III) Yüksek kolesterol seviyeleri, IV) Astım riskinin artması, V) Doğurganlık sorunları.

Anneler ve bebekler için maruziyet aynı zamanda şu riskleri de artırır: I) Hamilelikte hipertansiyon, II) Daha düşük doğum ağırlığı, III) Gebelik diyabeti, IV) Çocukluk çağı obezitesi, preeklampsi, V) Fetal büyüme kısıtlaması, VI) Kemik gelişimindeki farklılıklar.

2023 yılında, Dünya Sağlık Örgütü'nün kanser ajansı, PFOA'yı insan kanserojeni (kansere neden olan madde), PFOS'u ise potansiyel kanserojen ilan etti. ABD ve Avrupa'daki zirve kuruluşlar, bu kim-



yasallardan bazılarının düşük doğum ağırlığı, yüksek kolesterol, azalmış böbrek fonksiyonu, tiroid hastalığı ve çeşitli kanserler gibi sağlık sorunlarıyla bağlantılı olduğunu bulmuştur.

Maruz Kalanlar

Yangın söndürme görevlileri, başkalarını korumak için yanan binalara giren insanlar, mesleki kanser vakalarında artışla karşı karşıyadır. Giderek artan sayıda araştırma, bunu PFAS ile doyurulmuş yangın söndürme kıyafetleriyle ilişkilendiriyor.

Şu ana kadar en ciddi şekilde etkilenen topluluklar ve çalışanlar, kimyasal üretim tesisleri, askerî tesisler, havaalanları ve PFAS katkılı yangın söndürme köpüğünün kullanıldığı diğer tesislerde veya yakınında yaşayanlardır. Kışın havaalanlarında uçakların uçmadan önce buzlanmasını önlemek için kullanılan sulu film oluşturan köpükler PFAS katkı maddesi içerir.

PFAS, havaalanlarında ve askerî tesislerde petrol bazlı yangınları söndürmek için kullanılan yangın söndürme köpüklerinin bir bileşenidir. Böbrek ve testis kanseri risklerinin artması da dâhil olmak üzere PFAS'a maruz kalmanın olası sağlık etkileri konusunda endişeler vardır.

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), "sonsuz kadar kimyasallar" (forever chemicals) olarak da bilinen; çevrede ve insan vücudunda uzun süre kalabilen

endüstriyel kirleticiler olup, AB 2020 revizyonunda ilk kez PFAS toplamı için 0,5 µg/L ve yirmi belirli PFAS bileşiği toplamı için 0,1 µg/L limitleri getirmiştir.

PFAS İçeren Atıklar ve Geri Dönüşüm

Kullanım ömrü sonu aşamasında, PFAS polimerleri tekrar insan ve ekosistem sağlığına ve ozon tabakasına zarar verme potansiyeli olan ve/veya sera gazı olan maddelere parçalanabilir. Bu, atıkların düzenli depolama veya yakma yoluyla bertaraf edilmesi yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, çevrede polimerik PFAS'ın varlığı, polimerik olmayan PFAS'ın önemli bir uzun vadeli kaynağı olabilir. PFAS polimerlerinin çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılması - ve her üründe oldukça küçük miktarlarda olması - tüm bu ürünler için toplama ve ayrı imha şemaları oluşturma zor ve maliyetli olduğu anlamına gelir. Atık aşamasındaki ürünlerdeki PFAS içeriğinin izlenmesi veya tanımlanması şu anda yalnızca ayrı toplama sistemlerine sahip belirli ürün tipleri için mümkündür.

PFAS içeren malzemelerin geri dönüşümü, uzun süreli maruziyete yol açabilir. Örneğin tekstil ürünlerinin geri dönüşümünde, PFAS, amaçlanmadığı hâlde yeni ürün türlerine dâhil edilebilir. Dolayısıyla, kullanım ömrü sonunda PFAS içeren ürünler, geri dönüşüm sonucunda insanlarda kontrolsüz

maruziyete ve çevreye salınma neden olabilir. Alternatif olarak, malzemeleri döngüsellikten çıkarıp çöplüklere veya yakma tesislerine göndererek geri dönüşüme engel teşkil edebilirler.

PFAS polimerleri içeren ürünlerin çöpe atılması, PFAS'ın kirlenici sızıntı sularına yol açmasına neden olabilir. Tüm PFAS polimerleri çevrede son derece kalıcıdır. Şimdiye kadar, zaman içinde daha küçük moleküllere bozunma potansiyelleri tam olarak anlaşılmamıştır. Ancak, ana PFAS polimer türlerinden biri olan yan zincirli florlu polimerlerin çevrede bozunarak polimerik olmayan PFAS oluşturmaları beklenmektedir. Son derece dirençli floropolimerler bile zamanla hava koşulları ve fiziksel stres nedeniyle daha küçük moleküllere parçalanacak ve bu da PFAS'ın canlı organizmalar tarafından emilimini artırabilir.

PFAS İçeren Atıkların Yakılması

PFAS içeren atıklar kontrolsüz şekilde yakılamaz. Yakılırsa ciddi oranda çevreye kalıcı kirleticiler salınır.

Laboratuvar çalışmaları ve malzeme performans testleri, yaklaşık 1.000°C'nin altındaki sıcaklıklarda çeşitli florlu gazların ve trifloroasetik asit (TFA) gibi asitlerin oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu çalışmalar, hidrojen florüre (HF) tamamen parçalanmanın yüksek sıcaklıklarda (1.050-1.400°C) ve 2-3 saniye

bekleme süresinde meydana geldiğini işaret etmektedir. Ancak AB Atık Yakma Direktifi tehlikesiz atıklar için >850°C sıcaklık gerektirmektedir; bu da PFAS polimerlerinin atık yakma tesislerinde tam olarak parçalanamayabileceğini düşündürmektedir. Bir çalışma, belirli floropolimerlerin yakılmasının yağmur suyundaki TFA yükünün yüzde 14'üne kadarını oluşturabileceğini bildirmektedir. Başka bir çalışma, 860°C ve 1.095°C'lik iki sıcaklık ayarında optimum koşullar altında yakma sırasında PFAS polimerlerinin çok yüksek oranda mineralizasyonunun (tamamen parçalanması) bulunduğunu iddia etmiştir.

Sonuç olarak, PFAS polimerlerinin Avrupa genelindeki atık yakma tesislerinde yakıldığında ne ölçüde daha küçük ve potansiyel olarak daha biyoyararlanımlı PFAS bileşiklerine parçalandığı hâlâ bilinmiyor ve çalışmalar devam ediyor. Bu yüzden atık yakma tesislerinin çevresinde TFA artık dünya genelinde yağmur suyunda ve içme suyunda yaygın olarak bulunmaktadır. Dolayısıyla PFAS içermesi muhtemel atıkların yakma tesislerinde 1.100°C ve üzerinde ve 2-3 saniye bekleme süresinde yakılması neredeyse tam PFAS mineralizasyonuna ulaşabileceği ve yüzde 99,99'u aşan imha verimlilikleri elde edileceği belirtiliyor.

Avustralya'da Üç Tür PFAS Yasaklandı

Avustralya'da üç tür "kalıcı kimyasalın" ithalatı, kullanımı ve üretimi yasaklandı. Bu kimyasallar - PFOA, PFOS ve PFHxS - uzun ömürlüdür ve parçalanmaya karşı dirençlidirler.

- Ulusal Sağlık ve Beslenme İnceleme Anketi'ne (NHANES) ile Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri (CDC) tarafından sağlanan verilere göre, PFAS ile kirlenmiş su veya gıdalar yoluyla yoğun PFAS maruziyeti nedeniyle Amerikalıların yüzde 97'sinin kanında PFAS tespit edilmiştir. Bu veriler, PFAS kimyasallarının pazarın her alanında yoğun bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.
- Eylül 2024'te Amerikan Kimya Konseyi (ACC), Çevre Koruma Ajansının (EPA) Merkezi Veri Değişimi (CDX) sisteminin kapsamlı testlerini sağlamak için PFAS kimyasallarının endüstrileri ve alt kullanıcıları ile iş birliği yapma çabalarını takdir etti.

Sonuç ve Sonraki Adımlar

PFAS polimerlerinin sentezi kapalı sistemlerde gerçekleşse de kanıtlar polimerik olmayan PFAS emisyonlarının yaşam döngüsü boyunca meydana gelebileceğini göstermektedir. Bileşen üretiminden polimerin üretimine; ürünün yeniden şekillendirilmesinden ürünün kullanımına; ürünün geri dönüştürülmesinden veya yeniden kullanılmasından çöp depolama veya yakma yoluyla bertarafına kadar her aşamada PFAS emisyonu meydana gelebilir. Ortaya çıkan kirlilik geniş çapta yayılarak suda, havada, toprakta, insanlarda, biyotada ve gıdalarda birikebilir. Her ne kadar birçok kaynak iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesine yönlendirilse ve şüphesiz ilerleme kaydedilse de, mevcut tekniklerle kirliliği gidermek pratik ve ekonomik olarak imkânsızdır.

AB'nin sürdürülebilirlik için kimyasallar stratejisi (CSS), PFAS'ı bir kimyasal grubu olarak ele almayı öngören bir yaklaşım da dâhil olmak üzere PFAS polimerlerini hedef alan çeşitli eylemler içermektedir. Diğer eylemler arasında, kimyasalların ve ürünlerin yaşam döngüleri boyunca kirliliğe odaklanmak ve kalıcı ve hareketli kirleticileri (PMT/vPvM) CLP (sınıflandırma, etiketleme ve ambalajlama yönetmeliği) kapsamında bir tehlike kategorisi olarak dâhil etmek yer almaktadır.

PFAS yaşam döngüsü çevre ve insan sağlığını da etkileyebilir ve bazıları iklim değişikliğiyle de bağlantılıdır. Bu etkiler, genel faydalarını sorgulatmaktadır. Bu bilgilendirme ayrıca, PFAS polimer üretimi, kullanımı ve kullanım ömrü sonu gibi farklı yaşam döngüsü adımlarında ortaya çıkan farklı etki türlerinin ele alınması ve böylece önemli etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğinin altını çizmektedir.

Danimarka, Almanya, Hollanda, Norveç ve İsveç tarafından yakın zamanda REACH kapsamında önerilen evrensel bir PFAS kısıtlaması, belirli süreli muafiyetlere sahip kullanımlar dışında tüm PFAS'ların (PFAS polimerleri dâhil) yasaklanmasını amaçlamaktadır. Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) ve dosya sunanlardan gelen yakın tarihli bir bildirimde, yasaklama dışında kısıtlama seçeneklerinin de bazı kullanımlar için değerlendirildiği belirtilmiştir.

Önerilen REACH kısıtlaması kapsamında hâlihazırda yürütülen PFAS polimerlerinin gelecekteki kullanımının değerlendirilmesi, ikame olasılıklarını ele almanın yanı sıra, belirli kullanımların toplum açısından önemini de hesaba katma olanağını içermektedir. Öneri şu anda Avrupa Kimyasallar Ajansındaki (ECHA) bilimsel komiteler tarafından görüşülmekte olup, ardından karar için Avrupa Komisyonuna havale edilecektir.

Avrupa'da PFAS ile kirlenmiş toprak ve suyun iyileştirilmesinin 2 trilyon avroyu aşacağı tahmin ediliyor. PFAS emisyonları azaltılmazsa, yalnızca su arıtma maliyetinin 238 milyar avro olması öngörülmektedir.

Kaynaklar

- <https://chemtrust.org/pfas/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://eeb.org/european-citizens-alarming-high-chemical-exposure/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://eeb.org/high-level-european-politicians-polluted-by-pfas/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://eeb.org/work-areas/industry-health/pfas/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/05/uPFAS-restriction-10-page-explainer-1.pdf> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://hls.harvard.edu/today/the-impact-of-the-epas-first-ever-federal-pfas-rule-limiting-toxic-forever-chemicals-in-drinking-water/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://pfas-1.itrcweb.org/2-5-pfas-uses/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/about/index.html> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://www.bund.net/themen/aktuelles/detail-aktuelles/news/pfas-im-trinkwasser-bund-findet-ewigkeits-chemikalien-in-leitungs-und-mineralwasser/> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-chemicals-what-are-the-health-effects-of-pfas_6016910_8.html (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination_6016905_8.html (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK584702/#pz32-4> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://www.theguardian.com/environment/2024/apr/10/pfas-forever-chemicals-limits-drinking-water> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- <https://www.towardschemandmaterials.com/insights/per-and-polyfluoroalkyl-substances-chemicals-market> (Erişim Tarihi: 04.05.2026).
- https://www.waterboards.ca.gov/pfas/docs/master_pfas_faq_mar.pdf (Erişim Tarihi: 04.05.2026).