

PFAS ve çevre sağlığı: maruziyet-doz-yanıt, toksikokinetik / toksikodinamik ve çoklu maruziyet zorluklarına eleştirel bir bakış

Prof. Dr. Ersi Kalfoğlu



Adli bilimler alanında uzmanlaşmış, adli genetik, toksikoloji ve biyoetik gibi konularda çalışmalarını sürdürmektedir. Hâlen Ankara Medipol Üniversitesi Tıp Fakültesi Adli Tıp Ana Bilim Dalı Başkanlığı görevini sürdürmektedir. Balkan Adli Bilimler Akademisi Başkanı olan Kalfoğlu genetik kimliklendirme, toksikolojik risk değerlendirmesi ve uluslararası adli iş birliği alanlarında çalışmalar yürütmektedir. Çok sayıda bilimsel yayını bulunmakta olup, Birleşmiş Milletler ve INTERPOL programları kapsamında uluslararası düzeyde adli uzmanların eğitimine katkı sağlamaktadır.

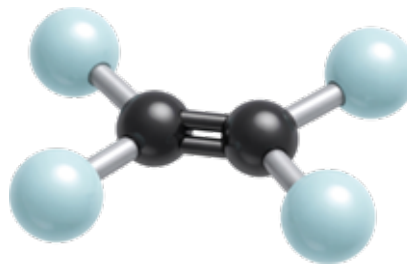
1 936 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), DuPont adı ile bilinen şirketin kimyacılarından Roy J. Plunkett, son derece kararlı bir kimyasal ürün sentezledi. Söz konusu ürün hiçbir şekilde tepkimeye girmeyen, dolayısı ile de sağlığa herhangi bir zararı olmadığı ifade edilen tetrafloroetilenin polimerleşmiş hâlidir (Şekil 1, 2).

Bu polimer daha sonra TEFLON (TEtraF-LORoetileN) adı ile piyasaya sürülmüştür (Plunkett, 1986; Fenton, 2021). Esasen molekülün çok güçlü karbon-flor bağları oksidasyona, yüksek ısıya, her türlü çözücüye, güçlü asit ve bazlara dayanıklı olmasına neden olmaktadır. Başta sentezlenen bu kimyasalın kullanım alanları tahmin edilmedi ise de, daha sonra aşırı dayanıklılık ve kimyasal direnç gerektiren savunma sanayii ve uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Bu aşamada aynı zamanda insan sağlığına etkileri de incelemeye alındı. O dönemde alınan sonuçlara göre herhangi bir tehlike söz konusu değildi.

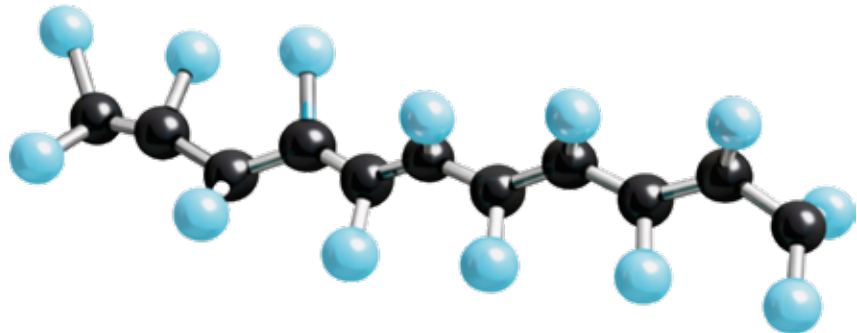
TEFLON kendi başına o denli tepkimesizdir ki organizma içinde hiçbir biyotransformasyona uğramaz ve olası maruziyetten sonra atılır. Aynı nedenle

günümüzde en yaygın kullanılan implantlar TEFLON ürünü olup, vücudumuzda hiçbir değişime uğramadan gerek ortopedik gerek kardiyovasküler gerekse de farklı alanlarda üst düzey yarar sağlar. Malzeme sadece 350 derecenin üstünde ısıtıldığında tehlikeli sayılabilecek hafif bir duman ortaya çıkar ancak günlük

yaşamda bu derecelere çıkmadığından tehlikeli olarak değerlendirilmez. Sonuç olarak TEFLON'un biyolojik olarak inert ve klinik olarak kabul edilebilir olduğu kanaatine varıldı. Günümüzde politetrafloroetilen (PTFE) membranları medikal alanda hâlen "altın standart" olarak ifade edilmektedirler. Ancak aynı zamanda son



Şekil 1. Tetrafloroetilenin ($\text{CF}_2=\text{CF}_2$) karbon ve flor atomları arasındaki bağları gösteren üç boyutlu moleküler temsili. Bu monomer, polimerizasyon süreci sonucunda politetrafloroetilen (PTFE, TEFLON) yapısını oluşturmaktadır.



Şekil 2. Tetrafloroetilen monomerlerinin ardışık bağlanmasıyla $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$ yapısında politetrafloroetilen zincirinin oluşumunu gösteren şematik ve üç boyutlu moleküler gösterim. Güçlü karbon-flor bağları, polimerin yüksek kimyasal kararlılığının temelini oluşturmaktadır.

çalışmalar PTFE implantlarının tromboz ve enflamasyon gibi bazı etkilerinin söz konusu olduğundan, mutlak güvenlikten ziyade genel klinik biyoyoumluluk ifadesinin daha doğru olduğu bildirilmektedir (Alaraby 2026, Li 2023, Zernitckaia 2025, Lima-Sánchez 2025).

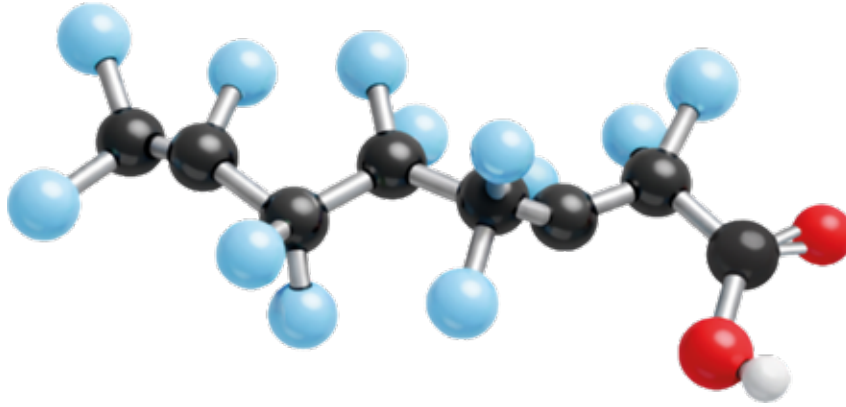
Ancak çevre ve halk sağlığı konularında TEFLON kullanımı ile gelişen tehlike tüm dünyayı tehdit etmektedir. Bu tehlike polimerin kendisinden kaynaklanmamakta olup, sentezlendiği süreçte kullanılan florlanmış ana kimyasallar nedeniyledir. Bu kimyasallar genel olarak per ve polifloroalkil (PFAS) olarak adlandırılır ve büyük ölçüde yakın geçmişte öngörülemediği bir çevresel yük oluşturlar.

Her ne kadar TEFLON tepkimesiz, suya ve her türlü çözücüye dayanıklı, su ve yağı geçirmez ise de, orijinal olarak

sentezlendiği şekli ile kullanıma elverişli değildir. Esasen bu özellikler polimerin mutfak ürünleri, tekstiller ve daha nice ürünün yüzeyine uygulanabildiği durumda anlam kazanır. Bu özelliği kazandırabilmek ve daha geniş endüstriyel kullanım sağlamak için, polimerizasyon sürecinde yüzey yapışmasını ve büyük ölçekli uygulamayı mümkün kılacak yardımcı maddelere ihtiyaç duyuldu. Gene ABD kaynaklı 3M şirketinin de deneysel katkıları ile polimerleştirmede perflorooktanoik asit (PFOA; C8) (Şekil 3) kullanılmaya başlandı. Bu yolla, esasen katı olan kimyasal özel bir çözelti hâline geldi ve püskürtme yolu ile yüzeylere aktarılabilir oldu (Pearson, 2023).

Bu gelişmeden sonra, DuPont ürünü ticarileştirerek piyasaya sürdü. 1960'lı yıllarda yapışmaz mutfak eşyaları, su geçirmez tekstiller, leke tutmaz halılar

ve benzer yüzlerce üründe TEFLON kullanılmaya başlandı. O zamandan beri yapılan retrospektif değerlendirmeler, temel çevresel endişenin TEFLON'un kendisinden değil, polimerizasyon başlatıcıları ve işleme ajanları olarak kullanılan florlu bileşiklerden (PFAS) kaynaklandığını göstermiştir (Gaines, 2023). Polimerleşmeyen ama polimerleşmeye katkıda bulunan bu florlu kimyasallar sentezden sonra arıtılmadıklarında doğaya atık olarak sürülürler. Çevreye katılımları özellikle endüstriyel kullanım, evsel ürün kullanımı, kanalizasyon yolu ile gerçekleşmekte, kararlılıkları nedeni ile de uzun süre çevrede kalır ve yayılırlar. Yüksek çözünürlük gösterdiklerinden topraktan sulara rahatlıkla aktarılabilen, böylece akuatik sistemleri etkileyebilmektedir. Çevreye dâhil olduklarında biyolojik ve kimyasal yıkıma uğramadıklarından ciddi bir birikim gerçekleşir. Genellikle organik çevre kirleticileri lipidlere bağlanırken, PFAS'lar proteinlere bağlanır. Böylece organizmalarda kan, karaciğer, böbrek, gibi dokularda birikir. Gerçekleştirilen araştırmalar ışığında çok küçük miktarların dahi karaciğer harabiyetine neden olduğu ve farklı organları etkilediği bildirilmektedir (Zahm, 2024). Bozunmamaları nedeni ile "Sonsuz Kimyasallar - Forever Chemicals" olarak gündeme gelmektedirler. Ancak C ve F den oluşan bu tür moleküllerin sadece perflorooktanoik asit (C8) C8'den ibaret değildir. Olası toksisite ortaya çıktığında 6, 7, 8 karbonlu, düz veya dallanmış binlerce sayıda alternatif alkil polimer sentezlerinde kullanılagelmıştır (Tablo 1).



Şekil 3. Katı olan TEFLON'un sıvılaştırılması için kullanılan perflorooktanoik asit (PFOA; C8). Bu kimyasalın kullanımı ile polimerleşme püskürtme yoluyla işlem yapılan yüzeylere aktarılabilir olmuştur.

Tablo 1. Per- ve polifloroalkillerin (PFAS) kimyasal formül temelinde sınıflandırılması

PFAS Sınıfı	Bileşik Örneği	Kapalı Formül
Perflorokarboksilik Asitler (PFCA)	Perflorooktanoik asit (PFOA)	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_6-\text{COOH}$
	Perfloroheksanoik asit (PFHxA)	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_4-\text{COOH}$
Perflorosülfonik Asitler (PFSA)	Perflorooktansülfonik asit (PFOS)	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_7-\text{SO}_3\text{H}$
Florotelomer Alkoller (FTOH)	8:2 Florotelomer alkol	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_7-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$
Florotelomer Asitler	8:2 Florotelomer karboksilik asit	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_7-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$
Perfloroalkil Sülfonamidler	FOSA	$\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_7-\text{SO}_2-\text{NH}_2$
Floropolimerler	Politetrafloroetilen (PTFE, Teflon)	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$
Perfloroeter Asitler (Yeni nesil PFAS)	GenX (HFPO-DA)	$\text{CF}_3-\text{CF}_2-\text{O}-\text{CF}(\text{CF}_3)-\text{COOH}$

Kapalı kimyasal formüllerine dayanarak başlıca per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS) yapısal bir sınıflandırması görülmektedir. PFAS'lar, perflorokarbonik asitler, perflorosülfonik asitler, florotelomer bileşikler, sülfonamid türevleri ve yüksek molekül ağırlıklı floropolimerler dâhil olmak üzere, terminal fonksiyonel gruplarına ve ana yapılarına göre gruplandırılmıştır.

Kullanımın bu tür benzer etkide ancak kısa zincirli “yeni nesil” alternatiflerle değiştirilmesi, riski ortadan kaldırılmaktan ziyade daha büyük sorun oluşturmaktadır. Bu döngü, kimyasal güvenliğin nasıl kavramsallaştırıldığı konusunu gündeme getirmektedir. Bu anlamda, PFAS’lar global bir çevre sorunu olduğu gibi bilim, politika, etik ve kamuoyu katılımı arasında disiplinlerarası bir diyalogu gerektiren toplumsal bir sorundur.

Küresel Dağılım ve Maruziyet

Günümüzde makyaj malzemelerinde, giysilerde, lenslerde, kalabalık şehirlerden Antarktika’ya hatta balta girmemiş ormanlara kadar her yerde ve her canlı organizmada bulunmaktalar. Söz konusu küresel çevre kirliliği ancak son yıllarda farkına varılmış bir durumdur (Alaraby ve ark., 2025).

PFAS’lar polimerler ve nonpolimerler olmak üzere iki ana gruba toplanarak incelenmektedir. Nonpolimerik olanlar tamamen florlanmış (perflorlanmış) veya kısmen florlanmış (poliflorlanmış) olarak tanımlanırlar. Üretim süreçleri doğaya bu tür yüksek miktarlarda nonpolimerik PFAS’ların salınmasına neden olmuştur (McCord ve ark., 2019). Özellikle ABD’de gerçekleştirilen nüfus tabanlı çalışmalar, genel nüfusun kan örneklerinin tamamında ölçülebilir PFAS derişimi göstermiştir (Botelho ve ark., 2025; Guelfo ve ark., 2018, Jain, 2018).

Maruziyet esas olarak içme suyu, gıda tüketimi, iç mekân tozu ve PFAS içeren ürünler yoluyla gerçekleşir. Maruz kalma oral alım, inhalasyon ve dermal temas yolu ile olur (National Academies of Sciences, 2022a). Daha önce ifade edilmiş PFAS moleküllerinden PFOA, PFOS, PFHxS ve PFNA’ların yaklaşık 2 ng/ml oranının insan organizması için önemli bir sorun oluşturmadığı ancak 20 ng/ml ve üzeri derişiminin ciddi bir sorun oluşturduğu bildirilmektedir (National Academies of Sciences, 2022b). Her ne kadar ülkemiz için yayınlanmış veri yok ise de sadece yangın söndürücüler ve tekstil üretimi düşünüldüğünde dahi kirliliğin boyutu hakkında varsayımda bulunmak mümkündür. Ancak konunun varsayımlardan ziyade ciddi inceleme gerektirdiği aşikârdır.

Moleküllerin organizmadaki yarı ömürlerinin çok uzun olduğu bilinmektedir. Biyobirikimleri anlamında da yıllarca

organizmada atılmadan kalmaları söz konusudur (Rogers ve ark., 2021). Toksikolojik açıdan inceleme zordur çünkü yukarıda da ifade edilen her bir farklı molekülün kendine ait bir etki mekanizması vardır. Ancak maruziyetin miktar, süre ve alış yoluna göre nükleer reseptörleri, tiroit hormonlarını, bağışıklık sistemini, kolesterol metabolizmasını ve hatta intrauterin büyümeyi de etkilediği bildirilmektedir (Bline, 2024). Hâlen karışımlarının etkileri hakkında kesin bilgiye sahip olmamakla birlikte, Budtz-Jørgensen’a göre 1.5 ng/ml tehlikeli olabilmektedir (Budtz-Jørgensen, 2023). Dolayısı ile fizyolojik temelli TK/TD modellerin oluşturulması şarttır.

PFAS’lara maruziyetin sağlığa etkileri ile ilgili olarak son yıllarda birçok çalışma yayınlanmıştır. Özellikle yüksek kolesterol düzeyleri, karaciğer enzimlerinde farklılaşma, böbrek veya testis kanseri riskinde artış, düşük doğum ağırlığı, hamile kadınlarda preeklampsisi riskinde artış ve çocuklarda aşı yanıtında azalma gibi yan etkiler bildirilmektedir (Botelho ve ark., 2025; Anderko ve ark., 2020; Dunder ve ark., 2022; Borghese ve ark., 2022; Crawford ve ark., 2023). Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), PFOA ile ilgili 2017’deki değerlendirilmesinde PFOA’nın insanlar için kanserojen ve PFOS’un insanlar için muhtemelen kanserojen olduğunu bildirmiştir (Zahm ve ark., 2024; Steenland ve ark., 2021).

“Sonsuz kimyasallar”la mücadele temelinde Nisan 2024’te ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA), PFOA ve PFOS’u tehlikeli maddeler olarak sınıflandırmıştır (USEPA, 2024). Öte yandan daha kısa alkil zincirleri (örneğin perfloroheksanoik asit (PFHxA)) veya farklı kimyasal fonksiyonel grupları (örneğin 2,3,3,3-tetrafloro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafloropropoksi)- propanoik asidin amonyum tuzunun (GenX) çevresel olarak kalıcı olsa da birçoğunun eski PFAS’lara göre daha az biyolojik birikime sahip olduğu ve daha kısa eliminasyon yarı ömrüne sahip olduğu görülmektedir (Renyer, 2024; Wang, 2013; Calafat, 2019; ATSDR, 2021; Wallis, 2023).

Karışım Hâlinde PFAS’ların Kümülatif Etkileri

İnsan organizması genel olarak birden fazla ve çeşitli yapıda PFAS’a maruz kalmaktadır. Bu durumdaki karışım etkilerini incelemek zordur (Goodrum,

2021). Genel olarak çalışmalar her bir molekülü ayrı ayrı ele alır ve etkilerini inceler. Ancak kimyasalların kümülatif risk çalışmaları farklı bir yaklaşım gerektirir.

Moleküllerin sinerjik veya antagonistik rollerinin hesaplanması farklı bir şekilde gerçekleştirilir. Hangi moleküllerin hâlen kullanıldığının bilinmemesi nedeni ile, bu tür risk hesaplamaları yapmak teknik olarak güçtür ve güvenilirlikleri sorgulanır. Ülkemizde bu tür incelemelere hızla geçilmesi ve karışımların biyokimyasal, toksikolojik ve metabolik etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Esasen bu tür incelemeler hâlen dünya üzerinde de yeni yeni ivme kazanmakta, konu ile ilgili veriler son zamanlarda yayınlanmakta, EPA ve EU düzenlemeler ve direktifler oluşturmaktadır (Official Journal of the European Union, 2024).

He Q (2025) ve arkadaşları ilk olarak PFAS karışımının nörotransmitterle ilgili yollar aracılığıyla nörotoksititeye neden olduğu, PFAS maruziyeti risklerini azaltmak için kamu sağlığı politikalarına ve önleyici stratejilere duyulan ihtiyacın altını çizmişlerdir. Du X (2024) ve arkadaşları ise, hayvan modeli çalışmaları ile, kombine PFAS maruziyetinin hepatositlerde iltihaplanma ve steatoz, karaciğer enzimlerinde yükselme, kolestatik ve safra kanalı tıkanıklığı gibi patolojik değişikliklere yol açtığını göstermişlerdir. Ayrıca çalışma sitokrom P450E1 ve glutatyon S-transferaz A1 sinyalizasyonunun aktivasyonu, PFAS kaynaklı hepatik lipid metabolizmasındaki bozulmalar için etkileri de vurgulamaktadır. Bu durumda karışım maruziyeti kesinlikle söz konusudur. Bu maruziyetin klinik etkilerini çalışmak ve potansiyel sağlık sorunlarını ortaya çıkarmak çok önemli ve oldukça zordur (Sunderland ve ark., 2018).

Elimizdeki metabolik veriler genel olarak tek tek PFAA’lar için geçerliyken, örneğin içme suyunda veya yer altı suyunda birden fazla PFAA’nın konsantrasyonlarının etkili olduğu bilinmemekte ancak veri temelinde değerlendirilememektedir. ABD’de kısıtlı veriler kapsamında kimyasalların eşit oral referans dozlarına sahip olduklarını bildirmektedir (USEPA, 2024). Oysa daha sonra yapılan çalışmalarda PFOA, PFOS, perfloronoik asit (PFNA), perfloroheksansülfonik asit (PFHxS) ve perfloroheptanoik asit (PFHpA) için benzer bir konsantrasyon toplanabilirliği varsayımını destekleyen veriler sağlan-



mamıştır (Buck, 2011). Avustralya Çevre Sağlığı Daimi Komitesi, PFHxS ve için PFOS ile aynı değeri kullanmanın makul olduğu görüşünü benimsemiştir. Ancak perfloralkil sülfonik asitler (PFSA'lar) ve perfloralkil karboksilik asitler (PFCA'lar) arasında, bu iki PFAA sınıfı arasında konsantrasyon toplanabilirliği varsayımını destekleyecek yeterli benzerlik bulamamışlardır. Bu nedenle, Avustralya ve Yeni Zelanda'da PFOS ve PFHxS konsantrasyonları toplanırken, PFOA ve PFOS konsantrasyonları toplanmaktadır (Goodrum, 2021).

ABD Toksik Maddeler ve Hastalıklar Ajansı (ATSDR-Agency for Toxic Substances and Disease Registry), PFAS kimyasalları arasındaki ve PFAS ile diğer kimyasallar arasındaki etkileşimlere ilişkin mevcut verilerin, toksisite değerlendirmesi kapsamında karışımları niceliksel olarak değerlendirmek için yetersiz olduğunu tespit etmiştir. Ajansın çalışmalarına göre, her bir kimyasalın maruz kalma konsantrasyonunun sağlık temelli kriterleriyle karşılaştırıldığında oranının toplanmasıyla elde edilen doz-toplanabilirlik tehlike indeksi (HI) yaklaşımını kullanılabileceği gösterilmektedir (ATSDR, 2021).

Özetle, PFAS karışımına maruz kalmayla ilişkili riskinin hesaplanma konusu hâlen açıklığa kavuşturulmuş değildir. Her durumda, PFAS'ların sağlığa etkileri geniş çapta araştırılmalı, tüm karışım toksisite çalışmaları sonuçlandırılana kadar karışım etkisinin tam olarak doğrulanmaması gerekmektedir.

Ülkemizde Durum

Uluslararası alanda artan ilgiye rağmen, Türkiye'de PFAS maruziyetine ilişkin nüfus düzeyindeki veriler oldukça yetersizdir. Ulusal çalışmalar, alerjik hastalık, kardiyovasküler risk ve moleküler toksisite mekanizmaları gibi belirli klinik bağlamlarda PFAS ile ilgili sonuçları incelemiş olsa da (Karakuş ve ark., 2024), genel nüfus için sistematik biyoizlem verileri eksiktir. Bu eksiklik, kanıta dayalı halk sağlığı karar alma süreçlerinde kritik bir boşluk anlamına gelir (Ünlü Endirlik, 2019).

Türkiye'nin endüstriyel profili, kentleşme modelleri ve yangın söndürme, tekstil ve tüketici ürünlerinde PFAS içeren malzemelerin kullanımı göz önüne alındığında, nüfus maruziyetinin ihmal edilebilir olduğu varsayılabilir. Bu nedenle stratejik ulusal planlama şarttır. Öncelikli eylem-

PFAS'lara maruziyetin sağlığa etkileri ile ilgili olarak son yıllarda birçok çalışma yayınlanmıştır. Özellikle yüksek kolesterol düzeyleri, karaciğer enzimlerinde farklılaşma, böbrek veya testis kanseri riskinde artış, düşük doğum ağırlığı, hamile kadınlarda preeklampsi riskinde artış ve çocuklarda aşı yanıtında azalma gibi yan etkiler bildirilmektedir. Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı, PFOA ile ilgili 2017'deki değerlendirmesinde PFOA'nın insanlar için kanserojen ve PFOS'un insanlar için muhtemelen kanserojen olduğunu bildirmiştir.



ler, kan ve idrar gibi biyolojik matrislerde ve içme suyu, gıda ve hava dâhil olmak üzere çevresel ortamlarda bireysel ve çoklu PFAS ölçümünü içermelidir.

Fizyolojik temelli toksikokinetik ve toksikodinamik modellerin entegrasyonu, doz-yanıt ilişkilerinin daha doğru tahmin edilmesini sağlayacak ve sağlık koruyucu maruz kalma sınırlarının geliştirilmesini destekleyecektir.

PFAS Kirliliğinin Adli Bilimsel Boyutu

Global önleme stratejileri anlamında PFAS genel bir toksikolojik konu olma dışında, ciddi bir hukuksal konu olarak ortaya çıkmaktadır. Çevre kirliliğine neden olan kuruluşların cezai sorumluluklarının tespitinde, kirleticinin kendisinin tespiti ile birlikte söz konusu kirleticinin kaynağının da saptanması şarttır. Bu anlamda adli bilimler kimyasal belirleme ile hukuksal boyut arasında bir köprü oluşturmaktadır. PFAS'ların kaynağının saptanması özellikle bu bileşiklerin kalıcılığı, hareketliliği ve üretim çeşitliliği göz önüne alındığında, düzenleyici yaptırımlar, iyileştirme maliyetlerinin tahsisi ve adli süreçlerde temel bir rol oynamaktadır (Anderson ve ark., 2018).

PFAS kirliliğinin kaynaklarının belirlenmesi, analitik kimya, mekansal modelleme ve bağlamsal endüstriyel değerlendirmenin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. PFAS'ların dallanma ve farklı fonksiyonel gruplar dâhil olmak üzere çok sayıda yapısal çeşitlilik, moleküler parmak izi oluşturmayı mümkün kılar; bu sayede çevresel örneklerde (yer altı suyu, toprak, yüzey suyu veya biyota) tespit edilen PFAS profilleri, bilinen endüstriyel formülasyonlar veya ürünlerle karşılaştırılır ve bu yolla kaynak tespiti gerçekleşmiş olur. Bu konu ile ilgili kullanılabilecek nitelikte çok çeşitli analitik kimya teknikleri mevcuttur.

Hidrojeolojik modelleme, kaynak atfını daha da güçlendirir. PFAS'lar yer altı suyu sistemlerinde oldukça hareketli olduklarından, kirlilik yollarını tespit için kirlilik yayılım haritalaması, hidrolik iletkenlik analizi ve stratigrafik değerlendirme gereklidir.

Ancak, kaynak tanımlaması, çevresel kalıcılık ve atık su arıtma sistemleri veya atmosferik çökeltme yoluyla ikincil yeniden dağıtım nedeniyle karmaşıktır. Dünya çapında PFAS ile ilgili davalar arttıkça, standartlaştırılmış yöntemlerin geliştirilmesi, düzenleyici uyumluluk

değerlendirmelerini, iyileştirme stratejilerini ve sorumluluğun yasal olarak belirlenmesini desteklemede kritik önem taşıyacaktır.

Gelecek Perspektifleri ve Stratejik Öncelikler

PFAS kirliliğinin ele alınması, bilimsel araştırmayı, düzenleyici eylemi ve kamuoyu katılımını entegre eden çok yönlü bir yaklaşım gerektirir. Temel öncelikler arasında biyolojik izleme programlarının genişletilmesi, karışım odaklı toksikolojik araştırmaların ilerletilmesi ve kümülatif maruz kalma gerçeklerini yansıtabilecek şekilde düzenleyici çerçevelerin uyumlaştırılması yer almaktadır.

PFAS araştırmalarına özel fon ayrılması ve şeffaf risk iletişim stratejilerinin teşvik edilmesi de eşit derecede önemlidir. Kamuoyu bilinçlendirme girişimleri, paydaşları tedirgin etmeden bilgilendirmeyi, bilinçli karar vermeyi ve önleyici davranışı teşvik etmeyi amaçlamalıdır. Buna paralel olarak, toksikologlar, klinisyenler, çevre bilimciler ve stratejistler arasında disiplinler arası iş birliği, bilimsel kanıtları etkili halk sağlığı eylemine dönüştürmek için gerekli olacaktır.

Sonuç olarak PFAS toksisitesini anlamak, tek bileşik paradigmalarının ötesine geçerek kronik, düşük dozlu, karışık maruziyetleri hesaba katan bütünüleyici çerçevelere doğru ilerlemeyi gerektirir. Türkiye için, kapsamlı maruziyet verilerinin yokluğu, ulusal biyoizlem ve araştırma girişimlerinin aciliyetini vurgulamaktadır. PFAS sorununu ele almak, bilimsel temelli düzenlemelere, sürdürülebilir araştırma yatırımlarına ve teknolojik faydayı çevresel sorumlulukla dengeleyen önleyici halk sağlığı stratejilerine bağlı olacaktır.

NOT: Şekillerde yer alan moleküler görseller, literatürde kabul gören kimyasal yapı bilgileri esas alınarak, yayın amaçlı dijital üç boyutlu moleküler illüstrasyon tekniği ile oluşturulmuştur.

Kaynaklar

Alaraby, M., Abass, D., Velázquez, A., Hernández, A., & Marcos, R. (2026). Polytetrafluoroethylene microplastic properties, pollution, toxicity and analysis: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-33.

Anderko, L., & Pennea, E. (2020). Exposures to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Potential risks to reproductive and children's health. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, 50(2), 100760.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2021). Toxicological profile for perfluoroalkyls. U.S. Department of Health and Human Services.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2022). Final report: Findings across ten exposure assessment sites. <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/activities/assessments/final-report.html>.

Anderson, R. H., Long, G. C., Porter, R. C., & Anderson, J. K. (2018). Occurrence of select perfluoroalkyl substances at US Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire training areas: Field validation of critical fate and transport properties. In *Perfluoroalkyl substances in the environment* (pp. 353-372). CRC Press.

Blane, A. P., DeWitt, J. C., Kwiatkowski, C. F., Pelch, K. E., Reade, A., & Varshavsky, J. R. (2024). Public health risks of PFAS-related immunotoxicity are real. *Current Environmental Health Reports*, 11(2), 118-127.

Borghese, M. M., Liang, C. L., Owen, J., & Fisher, M. (2022). Individual and mixture associations of perfluoroalkyl substances on liver function biomarkers in the Canadian Health Measures Survey. *Environmental Health*, 21(1), 85.

Botelho, J. C., Kato, K., Wong, L. Y., & Calafat, A. M. (2025). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure in the U.S. population: NHANES 1999–March 2020. *Environmental Research*, 270, 120916.

Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., de Voogt, P., Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A., & van Leeuwen, S. P. J. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), 513-541.

Budtz-Jørgensen, E., Grandjean, P. (2023). Benchmark dose calculations for PFAS exposure based on two data sets on immunotoxic effects. *Environmental Health*, 22, 40.

Calafat, A. M., Kato, K., Hubbard, K., Jia, T., Botelho, J. C., & Wong, L. Y. (2019). Legacy and alternative per- and polyfluoroalkyl substances in the U.S. general population. *Environment International*, 131, 105048.

Crawford, L., Halperin, S. A., Dzierlenga, M. W., Skidmore, B., Linakis, M. W., Nakagawa, S., & Longnecker, M. P. (2023). Systematic review and meta-analysis of epidemiologic data on vaccine response in relation to exposure to five principal perfluoroalkyl substances. *Environment International*, 172, 107734.

Du, X., Li, D. L., Xu, X., Wu, Y., Du, Z., Liang, G., ... Zheng, W. (2025). Effects of mixed exposure to PFAS on adolescent non-alcoholic fatty liver disease. *Journal of Hazardous Materials*, 485, 136854.

Dunder, L., Lind, P. M., Salihovic, S., Stubleski, J., Kärman, A., & Lind, L. (2022). Changes in plasma PFAS levels and plasma lipids: A longitudinal study. *Environmental Research*, 211, 112903.

Fenton, S. E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J. C., Lau, C., Ng, C., Smith, J. S., & Roberts, S. M. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health: Current state of knowledge. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 606-630.

Gaines, L. G. T. (2023). Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of Industrial Medicine*, 66(5), 353–378.

Goodrum, P. E., Anderson, J. K., Luz, A. L., & Ansell, G. K. (2021). Application of a framework for grouping and mixtures toxicity assessment of PFAS: A closer examination of dose-additivity approaches. *Toxicological Sciences*, 179(2), 262-278.

Guelfo, J. L., Adamson, D. T. (2018). Evaluation of PFAS in U.S. drinking water. *Environmental Pollution*, 236, 505-513.

He, Q., Yang, Q., Wu, L., He, Y., Zeng, N., & Wang, Z. (2025). Neurotoxic effects of PFAS mixture exposure in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 489, 137699.

Jain, R. B. (2018). Time trends over 2003–2014 in the concentrations of selected perfluoroalkyl substances among US adults aged ≥ 20 years: interpretational issues. *Science of the Total Environment*, 645, 946-957.

Karakuş, F., Kuzu, B. (2024). Predicting cardiovascular toxicity mechanisms of PFAS: An in silico network toxicology study. *Toxicology Research*, 13(6), tfae206.

Li, Z., Giarto, J., Zhang, J., Kulkarni, N., Mahalingam, E., Klipstine, W., & Tung, L. S. (2023). Anti-thrombotic poly (AAM-co-NaAMPS)-xanthan hydrogel-expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) vascular grafts with enhanced endothelialization and hemocompatibility properties. *Biomaterials advances*, 154, 213625.

Lima-Sánchez, B., Baus-Domínguez, M., Serrera-Figallo, M. A., & Torres-Lagares, D. (2025). Advances in synthetic polymer membranes for guided bone regeneration in dental implants: A scoping review. *Journal of functional biomaterials*, 16(5), 149.

McCord, J., Strynar, M. (2019). Identification of PFAS in the Cape Fear River. *Environmental Science & Technology*, 53(9), 4717-4727.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022a). Guidance on PFAS exposure, testing, and clinical follow-up. National Academies Press.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022b). PFAS testing and concentrations to inform clinical care. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK584705/>.

Official Journal of the European Union (2024). Technical guidelines regarding methods of analysis for monitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water intended for human consumption Document 52024XC04910 (C/2024/4910) <https://eur-lex.europa.eu/eli/C/2024/4910>.

Pearson, T. W., & Renfrew, D. (2023). When Toxic Heritage is Forever: Confronting PFAS Contamination and Toxicity as Lived Experience. In *Toxic Heritage* (pp. 50-61). Routledge.

Plunkett, R. J. (1986, April). The history of polytetrafluoroethylene: discovery and development. In *High Performance Polymers: Their Origin and Development: Proceedings of the Symposium on the History of High Performance Polymers at the American Chemical Society Meeting held in New York, April 15–18, 1986* (pp. 261-266). Dordrecht: Springer Netherlands.

Renyer, A., Ravindra, K., Wetmore, B. A., Ford, J. L., DeVito, M., Hughes, M. F., & MacMillan, D. K. (2023). Dose-response and metabolic evaluations of replacement PFAS HFPO-TeA. *Toxics*, 11(12), 951.

Rogers, R. D., Reh, C. M., & Breyse, P. (2021). Advancing PFABu S research: ATSDR and NCEH activities. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 31(6), 961-971.

Steenland, K., Winquist, A. (2021). PFAS and cancer: A scoping review. *Environmental Research*, 194, 110690.

Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C., & Allen, J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to PFAS. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(2), 131-147.

U.S. Environmental Protection Agency. (USEPA) (2024). Designation of PFOA and PFOS as CERCLA hazardous substances. <https://www.epa.gov/superfund>.

Ünlü Endirlik B, Bakır E, Boşgelmez İl, Eken A, Narin İ, Gürbay A. Assessment of perfluoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey. *Chemosphere*. 2019 Nov;235:1162-1171. Epub 2019 Jul 2. PMID: 31561307.

Wang, Z., Cousins, I. T., Scheringer, M., & Hungerbühler, K. (2013). Fluorinated alternatives to long-chain PFAS. *Environment International*, 60, 242-248.

Wallis, D. J., Kotlarz, N., Knappe, D. R. U., Collier, D. N., Lea, C. S., Reif, D., McCord, J., Strynar, M., DeWitt, J. C., & Hoppin, J. A. (2023). Estimation of the half-lives of per- and polyfluorinated alkyl ethers. *Environmental Science & Technology*, 57(41), 15348-15355.

Zahm, S., Bonde, J. P., Chiu, W. A., Hoppin, J., Kanno, J., Abdallah, M., ... Schubauer-Berigan, M. K. (2024). Carcinogenicity of PFOA and PFOS. *The Lancet Oncology*, 25(1), 16-17.

Zernitckaia, E. A., Lozada, J. L., Yaremenko, A. I., Reutova, A. P., Markova, M. A., & Lyutova, Z. B. (2025). In Vitro Analysis of Biodegradation Properties and Sterilization Stability of PLA Membranes for Bone Regeneration. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 1-14.