

Çevredeki Per ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: Tarihçesi, Kaynakları, Analizi, Riskleri ve İlgili Düzenlemeler

Meral YURTSEVER^{1*} 

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü 54187, Sakarya

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: mevci@sakarya.edu.tr

Derleme Makalesi/Review Article
Geliş Tarihi/Received: 20.08.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 30.12.2024

Öz

İnsan nüfusu ile insan faaliyetlerinin artmasına bağlı olarak ortaya çıkan etkiler, dünyayı hızla kirletmekte ve doğal ortamları da giderek kimyasallaştırmaktadır. Per-ve polifloroalkil maddeler (PFAS'lar), 1940'tan sonra üretilmeye başlanan kimyasal bileşiklerdir. Bu maddeler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda ve tüketici ürünlerinde yaygın olarak kullanılan, yüksek kimyasal ve termal dirence sahip kimyasallardır. “Sonsuz Kimyasallar” olarak adlandırılan PFAS’lar kalıcılıkları sebebiyle dünyayı kimyasallaştıran insan yapımı maddelere iyi bir örnek teşkil eder. Çok geniş bir ürün yelpazesinde kullanıma sahip olduklarından dolayı insan sağlığına ve çevreye etkilerini değerlendirmek zor olabilmektedir. Bunun için, PFAS’lara maruziyetin kaynaklarını ve sürekliliğini özel bir dikkatle ortaya çıkarmak gerekir. PFAS'lar, keşiflerinden itibaren geniş çapta üretilmeleri ve kullanılmaları, bu kimyasalların çevresel olarak dayanıklı doğası, canlılarda biyobirikimi, potansiyel toksisiteleri, uzak bölgelere taşınımı ve uzun vadede oluşturabileceği diğer olumsuz etkileri nedeniyle ciddi endişelere yol açmaktadır. İlk sentezlerinden, üretimine ve yaygınlaşmasına kadar geçen sürede PFAS’ların tehlikesi nispeten ihmal edilirken, PFAS'ların çevresel varlığı, dağılımı ve potansiyel sağlık riskleri, 21. yüzyılın başından itibaren artan bilimsel araştırmalar ve ileri analitik teknolojilerin geliştirilmesi ile daha detaylı bir şekilde ortaya konulmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, PFAS’ların keşfinden günümüze kadar gelişen süreçler, kullanıldığı alanlar, PFAS’ların yapıları, kaynakları, türleri, analizleri, sınıflandırılmaları ve sınırlandırılmaları araştırılmıştır. Yaygınlık, kalıcılık, biyobirikebilirlik, yüksek hareketlilik ve toksisite gibi önemli özellikleri barındıran bu kirleticilerin çevre ve insan üzerinde oluşturduğu riskler açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrokirletici, kalıcı, florokimyasallar, sonsuz kimyasallar, toksik

Per and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) Pollution in the Environment: Its History, Sources, Risks and Related Regulations

Abstract

The effects arising from the increase in human population and activities are rapidly polluting the world and increasingly chemicalizing natural environments. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) are chemical compounds that started to be produced after 1940. These substances are chemicals with high chemical and thermal resistance and are widely used in various industrial applications and consumer products. PFASs, the so-called "Forever Chemicals," are a good example of man-made substances that chemicalized the world due to their persistence. Because they are used in a wide range of products, it can be difficult to assess the effects of PFASs on human health and the environment. Therefore, it is necessary to identify the sources and continuity of exposure to PFASs with particular attention. PFASs have raised serious concerns due to their widespread production and use since their invention, the environmentally resistant nature of these chemicals, their bioaccumulation in living organisms, their potential toxicity, their transport to remote areas and other long-term adverse effects. While the hazards of PFASs were relatively neglected during the period from their invention to their production and widespread use, the environmental presence, distribution and potential health risks of PFASs have started to be revealed in more detail with the increasing scientific research and development of advanced analytical technologies since the beginning of the 21st century. In this study, the processes that have evolved since the discovery of PFASs until today, the areas where they are used, the structures, sources, types, analyses, classification and restrictions of PFASs have been investigated. The risks these pollutants pose, which have significant characteristics such as widespread, persistence, biodegradability, high mobility and toxicity, on the environment and humans are explained.

Keywords: Micropollutants, persistent, fluorochemicals, forever chemicals, toxic

Cite as;

Yurtsever, M. (2025). Çevredeki per ve polifloroalkil madde (PFAS) kirliliği: Tarihçesi, kaynakları, analizi, riskleri ve ilgili düzenlemeler. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 403-427. Doi: 10.53501/rteufemud.1536329

1. Giriş

Per ve poliflorlu alkil maddeler (PFAS'lar), en az bir tam florlu karbon atomu ($-CF_2-$) içeren yüksek oranda florlu alifatik maddeler için genel bir terim olarak kullanılmaktadır. PFAS'lar, karbon zincirlerindeki hidrojen atomlarının tamamının veya bir kısmının flor ile değiştirildiği kimyasal bileşiklerdir. Tamamen veya kısmen florlanmış alkil zincirine ek olarak, madde genellikle bir karboksilat, sülfonamid, fosfonat, sülfonat veya alkol gibi bir terminal fonksiyonel grup içerir. Ne yazık ki, yüksek C tek bağ ile F bağının enerjisi (485 kJ/mol) PFAS'ları, termodinamik olarak kararlı ve hidroliz, metabolizma, fotoliz ve diğer bozunma biçimlerine karşı da dirençli bir hale getirmektedir (Al Amin vd., 2020).

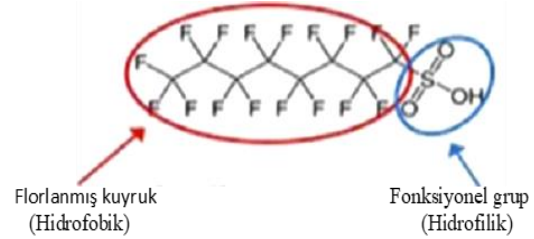
PFAS'lar (Per-ve Polifloroalkil Maddeler), ilk olarak 20. yüzyılın ortalarında (1938 yılında) ortaya çıkmıştır. İlk olarak Amerikan kimya şirketi DuPont tarafından üretilen ve özellikle 1940'lar ve sonrasında üretimi artmaya başlayan bu kimyasal bileşenlerin günümüzdeki binlerce türevi, endüstriyel ve tüketici ürünlerin üretimiyle yakından ilişkilidir (Gaber vd., 2023). Suya ve yağa dayanıklılık özellikleri nedeniyle bu kimyasal bileşikler, yapışmaz pişirme kapları, yangın söndürme köpüğü, gıda ambalajı su geçirmez giysiler, leke tutmaz halılar, temizlik ürünleri ve daha fazlası gibi çok çeşitli üretim süreçlerinde ve tüketici ürünlerinde onlarca yıldır yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Örneğin, Teflon'un ana bileşeni olan perflorooktanik asit (PFOA) PFAS ailesine dahildir ve özellikle teflon kaplı mutfak eşyalarında kullanılmıştır. Binlerce türevleri bulunan PFAS'lar, kalıcı organik kirleticilerdir. PFAS'lar, çevrede ve insan vücudunda uzun süre kalıcı olmaları nedeniyle genellikle "forever chemicals" yani "sonsuz kimyasallar" olarak anılmaktadırlar. Öncelikle 2009 yılında, PFOS, tuzları ve perflorooktanesülfonil florür, her yerde bulunan, kalıcı, biyoakümülatif ve toksik yapıları nedeniyle Stockholm Sözleşmesi kapsamında "kalıcı organik kirleticiler" olarak listelenmiştir (Ali vd., 2021; Torres vd., 2022). Daha sonrasında ise çevresel gruplar, bilim insanları ve medya tarafından, PFAS'ların çevredeki ve biyolojik

sistemlerdeki uzun ömürlülüğü yüzünden sonsuz kimyasallar teriminin kullanımı daha popüler hale gelmiştir.

2. PFAS'ların İsimlendirilmesi ve Ana Grupları

PFAS'lar (Per- ve Polyfluoroalkyl Substances), per- ve poliflorlu alkil grupları içeren kimyasal bileşiklerin genel adıdır. OECD/UNEP (2022) Küresel PFC Grubu'ndaki "PFC" terimi, perflorokarbonları değil, "per- ve poliflorlanmış kimyasalları" ifade etmektedir. Per- ve poliflorlu kimyasallar (PFC'ler) daha önceleri yaygın olarak kullanılmakta idi. Ancak, Buck ve arkadaşları tarafından 2011 yılında, kesin bir terim olan "Per- ve polifloroalkil maddeler" önerilmiştir ve bu kullanım şekli kabul görerek yaygınlaşmıştır (OECD, 2022).

PFAS'ların yapısal çeşitliliği, florlanmış hidrofobik bir kuyruk ve hidrofilik bir fonksiyonel grup içeren kısa ve uzun zincirli bileşikler (Şekil 1) kapsamaktadır. PFAS moleküllerinin fonksiyonel baş grupları (örneğin, $-COOH$ ve $-SO_3H$) tipik olarak elektrostatik bağlanma ve hidrofobik etkileşimler yoluyla pozitif yüklü adsorbentler tarafından adsorbe edilebilmektedir (Zhou vd., 2024).



Şekil 1. PFAS'ların yapısal özellikleri (Rehman vd., 2023)

Figure 1. Structural properties of PFASs (Rehman vd., 2023)

PFAS kimyasal sınıfı sülfonatlar, karboksilatlar, fluorotelomerler, alkol etoksilatlar, sülfonamidler ve fosfonatlar gibi çeşitli türevleri içerir. Aşağıdaki listede, Haziran 2018- Haziran 2021 arasında, OECD/UNEP Küresel PFC Grubu tarafından hazırlanan, per- ve polifloroalki

maddelerin (PFAS'ler) ana grupları sıralanmıştır (OECD, 2022).

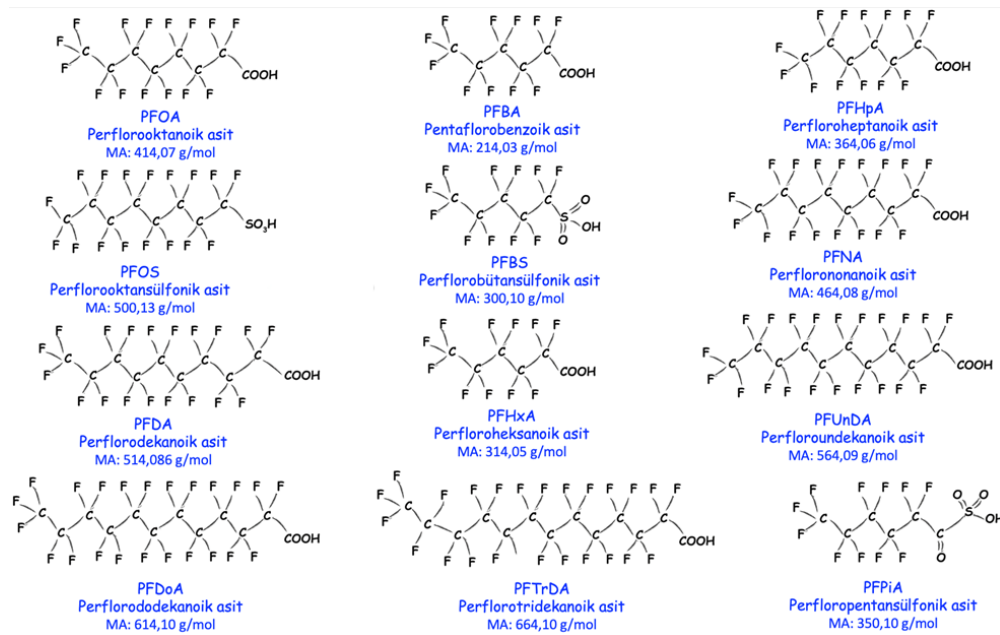
PFAS'ların ana grupları

- Perfloroalkil fosfonik (a) ve fosfinik asitler (b) (PFPA'lar ve PFPiA'lar)
- Perfloroalkil karboksilik (a) ve dikarboksilik (b) asitler
- Perfloroalkan sülfonik (a) ve sülfonik (b) asitler
- Per- ve polifloroalkil eter karboksilik (a) ve sülfonik (b) asitler
- Perfloroalkanoil florürler (a) ve türevleri (b)
- Perfloroalkansülfonil florürler (a) ve türevleri (b)
- n:2 Florotelomer bazlı bileşikler
- n:1 Florotelomer bazlı bileşikler
- Perfloroalkil eterler (a), epoksitler (b) ve vinil eterler (c) (polimer olmayanlar)
- Perfloroalkanlar (a) ve türevleri (b)
- Spesifik hidrofloro-karbonlar (a), -eterler (b) ve -olefinler (c)
- Yan zincirli florlu aromatikler
- Floropolimerler
- Floroelastomerler
- Perfloropolietler

Bazıları diğerlerinden daha yaygın olarak kullanılan ve üzerinde çalışılan binlerce farklı

PFAS vardır. Örneğin Perflorooktanoik asit (PFOA) ve Perflorooktan sülfonat (PFOS), PFAS grubunda en yaygın olarak kullanılan ve üzerinde çalışılan kimyasallardan ikisidir. PFOS'un (perfluorooctane sulfonic acid) ham maddesi, POSF'dur (perfluorooctane sulfonyl fluoride). Perflorobütan sülfonik asit (PFBS), perfloroheksan sülfonat potasyum tuzu ve perflorooktan sülfonik asit gibi PFAS'lar sülfonik asit veya tuzlarıdır. Perfloroheksanoik asit (PFHxA), perflorooktanoik asit (PFOA) perflorononanoik asit (PFNA) ve perflorodekanoik asit (PFDA) karboksilat türevleridir.

Şekil 2'de bazı önemli PFAS bileşiklerinin yapısı ve molekül ağırlıkları (MA) gösterilmiştir. Toplam Florlu Organik Bileşikler (Total Organic Fluorine, TOF) ise, organik bileşiklerde bulunan toplam flor miktarını ifade eder. PFAS'lar, TOF (Toplam Organik Flor) içinde bir alt grup bileşiklerdir. Toplam Florlu Organik Bileşikler (TOF), bir grup flor içeren organik bileşiği içerir. Bu bileşikler arasında florlu surfaktanlar, organik çözücüler, pestisitler (sülfürlü florür, SO_2F_2) gibi diğer organoflorlu bileşikler yer alabilir. Bunun yanı sıra, PFAS'lar da TOF kapsamındadır



Şekil 2. Bazı PFAS'ların yapısı ve molekül ağırlığı (PFOA, PFBA, PFHpA, PFOS, PFBS, PFNA, PFDA, PFHxA, PFUnDA, PFDoA, PFTrDA, PFPiA), (Dadashi Firouzjaei vd., 2022).

Figure 2. Structure and molecular weight of some PFASs (PFOA, PFBA, PFHpA, PFOS, PFBS, PFNA, PFDA, PFHxA, PFUnDA, PFDoA, PFTrDA, PFPiA), (Dadashi Firouzjaei et al., 2022).

Per- veya polifloroalkil maddelerin karakteristik bir özelliği, stabilite, kalıcılık ve bozunmazlıktan sorumlu olan perflorokarbon kısmıdır; bu özellikler bu bileşiklere "sonsuz kimyasallar" adını kazandırır. PFAS'lar ayrıca C omurgasının dallanması nedeniyle izomer serileri olarak da mevcuttur (Rehman vd., 2023). PFAS'lar iki ana gruba ayrılan bileşiklerdir: Birincisi: toksik, kalıcı, biyolojik olarak birikebilen, hareketli ve ciddi kısıtlamalar ve sıkı düzenlemeler altında olan düşük molar kütleli PFAS'lar (florlu telomerler, perflorokarboksilik asitler, oligomerler ve yüzey aktif maddeler dahil) ve İkincisi: polimerik olanlardır (Ameduri, 2023). İkincisi arasında bulunan florlanmış yan kısımlar taşıyan polimerler de birinci gruptakilere benzerdir. Ancak floropolimerler (FP'ler), termal, kimyasal olarak ve UV'ye ve yaşlanmaya karşı dayanıklı, özel biyo-atıl ve güvenli polimerlerdir. Floropolimerler, yalnızca karbondan oluşan omurgalarına flor bağlı olan yüksek molekül ağırlıklı (MA) polimerler olan per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS) farklı bir sınıfıdır (Korzeniowski vd., 2023). Floropolimerler, çok çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda tercih edilen değerli malzemeler haline getiren dikkate değer bir özellik ve fonksiyonel karakteristik kombinasyonuna sahiptir. Bundan dolayı Floropolimerlerin önemli, benzersiz bir toplumsal değere sahip olduğu bildirilmektedir (Henry vd., 2018; Korzeniowski vd., 2023). Floropolimerlerin (FP'ler) belgelenmiş güvenlik profilleri vardır; termal, biyolojik ve kimyasal olarak kararlıdır, hareketsizdir, biyoyararlı değildir, biyobirikimli değildir, toksik değildir ve suda ihmal edilebilir derecede çözünürler. Floropolimerler PFAS yapısal tanımına uysa da diğer PFAS'larla karşılaştırıldığında çok farklı fiziksel, kimyasal, çevresel ve toksikolojik özelliklere sahiptirler (Korzeniowski vd., 2023).

PFAA'lar (perfloroalkil asitler) 4-14 karbonlu iskelet ile karboksilat, sülfonat veya fosfonat gibi işlevsel gruplara sahip bileşiklerdir. "Zonyl" adı, genellikle perfloroalkil asitler (PFAA'lar) ve bunların türevleri gibi PFAS kimyasalları ile

ilişkilendirilir. PFAA'ların amfifilik yapısı (hidrofilik başlı hidrofobik kuyruk) geleneksel yüzey aktif maddeler gibi davrandıklarını, hidrofobik kuyrukları havada, hidrofilik baş grupları ise suda olacak şekilde hava-su sınırı boyunca kendilerini yönlendirerek sıvı-sıvı arayüzlerinde (örneğin, hava-su veya NAPL-su) biriktiklerini işaret etmektedir. Yüzey agregasyonunu doğrulayan çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen, moleküler birleşimlerin gerçek yapısı henüz aydınlatılamamıştır. Bununla birlikte, PFAS'ın agregasyonel şeklinin geleneksel yüzey aktif maddelerden daha karmaşık olabileceğine ve florlu kuyruğun uzunluğuna bağlı olabileceğine dair bazı teoriler sağlamıştır (ITRC, 2023).

Florotelomerler, perflorokarbonlar gibi karbon zincirlerinde bulunan hidrojen atomlarının yerine flor atomları içeren organik bileşiklerdir (Bokkers vd., 2019). Florotelomer alkoller (FTOH'ler), 4 ila 14 karbon arasında değişen florlanmış bir kuyruk ve bir alkol baş grubu ile PFAS'ın ana sınıflarından biridir (Habib vd., 2023), Bunlar m:n FTOH terminolojisi ile gösterilir; burada 'm', polar olmayan kuyruğun uzunluğu ve 'n', florlanmamış karbon bağlantısının uzunluğudur.

PFAS'lar, toplumdaki çok çeşitli uygulamalarda kullanılan 4700'den fazla ayrı bileşiği kapsamakta olup (Cousins vd., 2020), yapısal çeşitlilikleri nedeniyle kimyasal gruplandırılmaları ve değerlendirmeleri önemli zorluklar yaratmaktadır. Mevcut veriler, PFAS'ların kimyasal bazda kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini kolaylaştıracak düzeyde değildir. Bu kimyasal bazındaki eksikliği gidermek için detaylı veri toplanması büyük kaynak gerektirdiğinden, benzer özelliklere sahip PFAS gruplarının tanımlanması ve birlikte değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, PFAS'ların gelecekteki kimyasal değerlendirilmesi ve yönetimi için etkin bir gruplandırma yaklaşımı veya birden fazla yöntemin entegre edilmesi gerekli görülmektedir.

3. Florokimyasalların Keşfi, Üretimi, Ticarileştirilmesi, İlgili Yasak ve Sınırlamalar

PFAS'lar ilk olarak, 1938'de soğutucu akışkanlarla ilgili gazlar üzerinde çalışan DuPont kimyageri Roy J. Plunkett tarafından keşfedilmiştir (Blake ve Fenton, 2020). Plunkett, bir başka kimyasal soğukta depolamak için kullanılan tetrafloroetilen (TFE) gazının bir silindir içinde donmuş ve mumsu beyaz bir katı halinde polimerleşmiş olduğunu görmüştür, böylece yüksek ısıya dayanıklı ve düşük sürtünmeli politetrafloroetileni (PTFE), ticari adıyla Teflon'u icat etmiştir. Bu çalışmada PFAS'ların tarihindeki önemli olayların bir zaman çizelgesi oluşturulmuş ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Çizelge, Lindstrom ve arkadaşları (2011), ATSDR (2021) ve Améduri (2023) şemalarından adapte edilerek geliştirilmiş ve güncellenmiştir. Zaman çizelgesinde, tarihler düzensiz ölçekte verilse de, önemli tarihler sırayla ve kronolojik olarak belirtilmiştir. Genel olarak per- ve polifloroalkil bileşiklerinin üretimi, ticarileştirilmesi ve bu kirleticilerin potansiyel toksisitelerinin küresel ölçekte anlaşılmasından sonra alınan önemli kararlar görülmektedir.

Şekil 3'te, PFAS'ların çevredeki konsantrasyonlarının artmasına neden olmuş olabilecek olaylar, eylemler ve önemli bulgular kırmızı renk ile gösterilmiştir. İlgili tarihlerdeki sorumlu üretici firmalar, ülkeler, örgütler ve ilgili yasaklar da görülmektedir. PFAS türevlerinin toksisitesinin farkedilmesi ile çevredeki konsantrasyonların azalmasıyla sonuçlanabilecek aşamalı çıkışlar, düzenleyici girişimleri ve alınan tedbirlerle kararlar ise mavi renk ile belirtilmiştir. Şemada per-ve polifloroalkil maddeler' in ilk üretimi, yaygınlaşması, markalaşması (DuPont, 3M, Teflon, Scotchgard, Hoechst, Tefal, AFFF köpüğü, Zonyl, GORE-TEX) ve daha sonrasında potansiyel tehlike ve risklerin fark edilmesiyle birlikte alınan tedbir ve yasaklar gösterilmiştir. Şema dikkatle incelendiğinde, özellikle 1950'lerde DuPont'un Teflon ürünlerindeki perflorooktanoik asit' in (PFOA) potansiyel toksisitesinin farkedilmesi ve Taves' in 1968 yılında, insan serumunda florun organik bağlı formlarını tespit ettiği görülmektedir (Taves, 1968). Bunlara ilaveten, 1976 yılında Taves ve arkadaşları tarafından, insan kanında PFOA tespit edilmiş (Taves vd., 1976) olsa da; PFAS

toksitesine ilişkin ilk bilimsel rapor 1981'de, PFAS bileşiklerinden biri olan Amonyum perflorooktanoat'ın (APFO) neden olduğu toksite ile ilgili olarak yayınlanmıştır. Bu toksik bileşiklerle ilgili gerçek anlamda yasaklamalar ise, ne yazık ki bundan yaklaşık yirmi yıl sonra, 2000 yılında, 3M raporu ABD EPA'ya sunulmasıyla tetiklenmiştir. Böylece 3M, PFAS ürünlerinin (C6, C8 ve C10 bazlı) aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması başlatılmıştır. Konuyla ilgili farkındalık büyük ölçekte artmaya başlamış ve özellikle 2000'lerden sonra ABD EPA üreticilerle ECA (Uygulanabilir Onay Anlaşması) sürecini başlatmış (2003), uzun zincirli (C8-C14) PFAS'lar yasaklanmıştır (2004). 2006' da, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), PFOA'yı "insanlarda kanserojen olması muhtemel" (Grup 2B) olarak sınıflandırmış ve ABD EPA ile sekiz büyük floropolimer (FP) ve florotelomer (FT) üreticisi de, 2010/2015 PFOA yönetim programını başlatmıştır. 2008 itibariyle Kanada PFOS'a yasak koymuş, AB yarı mamul ürünlerde PFOS yasağını kabul etmiştir. 2009' da Stockholm Sözleşmesi'nde, PFOS ve ilişkili bileşikler Kalıcı Organik Kirleticiler (POPs) listesine (EK B) eklenmiş ve bundan sonra da birtakım yasaklamalar ve 2012 yılından itibaren de PFAS türevi kimyasalların REACH'e (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması) dahil edilmesi kuralı getirilmiştir. Böylece küresel ölçekte farklı üretici firmaların yavaş yavaş PFAS türevi kimyasal üretimini bırakmaya başlaması söz konusu olmuştur.

Avrupa Birliği tarafından yürürlüğe konulan ve kimyasal maddelerin çevre ve insan üzerindeki etkilerini düzenlemek amacıyla oluşturulmuş kapsamlı bir yasal çerçeve olan REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals); kimyasalların kaydı, değerlendirilmesi, izin verilmesi ve kısıtlanması anlamına gelen bir kimyasal maddeler düzenlemesidir. Bu düzenleme, insan sağlığını ve çevreyi kimyasal maddelerin olası zararlı etkilerinden korumak için şirketlerin kullanmakta olduğu kimyasalların güvenli kullanımını ve bu maddeler hakkında ayrıntılı bilgileri sağlamasını gerektirir.



Şekil 3. İlk keşif tarihinden (1938) günümüze (2023) kadar PFAS'larla ilgili önemli detayları içeren zaman çizelgesi. PTFE: Politetrafloroetilen; C8: 8 karbonlu florlu bileşikler; POSF: Perflorooktansülfonilflorür; PFOA: Perflorooktanoik asit; APFO: Amonyum perflorooktanoat; FDA: ABD Gıda ve İlaç İdaresi; AFFF: Sulu Film Oluşturan Köpük; FT: Florotelomer; EPA: Çevre Koruma Ajansı; ECF: Elektrokimyasal florlama; PFOS: Perflorooktansülfonik asit; IARC: Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı; POP: Kalıcı Organik Kirleticiler; REACH: Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması; PFNA: Perfloronanoik asit; PFBS: Perflorobutansülfonat; NPDWR: Ulusal Birincil İçme Suyu Mevzuatı.

Figure 3. Timeline covering important details about PFASs from its first discovery (1938) to the present day (2023). PTFE: Polytetrafluoroethylene; C8: 8-carbon fluorinated compounds; POSF: Perfluorooctansulfonylfluoride; PFOA: Perfluorooctanoic acid; APFO: Ammonium perfluorooctanoate; FDA: US Food and Drug Administration; AFFF: Aqueous Film Forming Foam; FT: Fluorotelomer; EPA: Environmental Protection Agency; ECF: Electrochemical fluorination; PFOS: Perfluorooctansulfonic acid; IARC: International Agency for Research on Cancer; POP: Persistent Organic Pollutants; REACH: Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals; PFNA: Perfluoronanoic acid; PFBS: Perfluorobutanesulfonate; NPDWR: National

Primary Drinking Water Regulations.

REACH düzenlemesi, kimyasal maddelerin güvenliği hakkında daha fazla şeffaflık ve sorumluluk getirerek, şirketleri kimyasal maddelerin kaydını yapmaya, bunları değerlendirmeye, onaylatmaya ve gerektiğinde kullanımını kısıtlamaya teşvik eder. Bu çerçevede, kimyasallarla ilgili risklerin yönetimine ilişkin bilgi sağlama yükümlülüğü, maddeleri üreten, ithal eden veya kullanıcı olan şirketlere aittir. PFAS'lar gibi zararlı kimyasalların kullanımını denetlemek ve kısıtlamak için REACH düzenlemesi kritik bir araçtır. REACH, potansiyel olarak zararlı kimyasalların piyasaya sürülmeden önce değerlendirilmesini ve belirli şartlar altında kullanımlarının onaylanmasını ya da yasaklanmasını sağlamaktadır. Bu yüzden, PFAS içeren ürünler REACH düzenlemeleri kapsamında kaydedilip, değerlendirilmekte ve gerekli durumlarda kullanım sınırlamalarına tabi tutulmaktadır. REACH' e benzer şekilde (Buck vd., 2011), Zehirli Maddeler Kontrol Yasası (TSCA) ve Japon Mevcut Yeni Kimyasal Maddeler Envanteri (ENCSI) gibi düzenleyici kurumlar, büyük endişe veren kimyasal maddelerin düzenlenmesini amaçlayan girişimleri desteklemiş ve bu maddeler üzerinde yapılan geniş ve karmaşık bilimsel, teknik ve aynı zamanda ekonomik tartışmalara katkıda bulunmuşlardır. ABD Çevre Koruma Ajansı, içme suyundaki PFOA ve PFOS konsantrasyonlarının tek tek veya birleşik konsantrasyonları için 70 ng/L'lik bir sağlık tavsiye limit yayınladıktan sonra, endüstriler önemli ölçüde kısa zincirli alternatiflere (örneğin, perflorobütanoik asit (PFBA), perflorobütan sülfonik asit (PFBS)) ve diğer ikame analoglara (örneğin, GenX, ADONA ve F-53B) doğru kaymıştır (Ateia vd., 2019). Ancak, GenX, her ne kadar PFOA'nın ikamesi olarak tanıtılsa da, bulgular GenX ve F-53B'nin sırasıyla PFOA ve PFOS'tan daha yüksek toksisiteye sahip olduğunu göstermiştir.

2021'de, EPA, PFAS'ların sağlık üzerindeki potansiyel zararlarını göz önünde bulundurarak

(Post, 2021), içme suyundaki PFOA ve PFOS'ları düzenlemek için nihai bir karar yayınlamıştır. 2023 Mart'ında, EPA altı PFAS için Ulusal Birincil İçme Suyu Mevzuatını (National Primary Drinking Water Regulations, NPDWR) önermiştir. Halk sağlığını korumayı hedefleyen bu düzenlemede, PFAS'lar için yasal olarak uygulanabilir limitlerin belirlenmesi, kamu su sistemlerinde PFAS seviyelerinin izlemesi ve limiti aşabilecek konsantrasyonların azaltılması önerilmektedir. EPA 2023'te önerilen bu düzenlemeler hakkında toplulukları ve paydaşları bilgilendirme faaliyetleri yürütmüştür. Yine 2023'te Avrupa Birliği (AB), insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle PFAS maddelerinin kullanımını sınırlamak için daha katı kısıtlamalar getirmiştir. Tüm bu düzenlemeler ve kısıtlamalar, PFAS içeren ürünlerin üretimini, ithalatını ve kullanımını düzenleyerek, PFAS'a maruziyetin azaltılmasını amaçlamaktadır.

4. PFAS'ların Kullanıldığı Alanlar

Günümüzde çeşitli sektörde kullanılan malzemeler, PFAS türevlerini içermektedir (Gaber vd., 2023). Günlük hayatta insanların kullandığı PFAS içeren ürünler arasında, yapışmaz mutfak gereçleri, fast-food yiyecek kapları, gıda ambalaj malzemeleri, su ve leke itici kumaşlar, leke dirençli halılar, su geçirmez dış giyim, kozmetik ve kişisel bakım ürünleri bulunurken; endüstriyel alanda kullanılan PFAS içerikli malzemeler yangın söndürme köpükleri, endüstriyel yağlayıcılar, sızdırmazlık ürünleri, yüzey aktif maddeler, yüzey koruyucu kaplamalar ve yüksek performanslı kabloları içerir. PFAS'ları içeren endüstri ve uygulamalar detaylıca ele alındığında aşağıdaki Tablo 1'deki liste ortaya çıkmaktadır (Gaines, 2023). PFAS'lar, aşağıda alfabetik sırayla ele alınan 25 endüstri ve uygulama şeklinde genel olarak özetlenen çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Gaines, 2023). Tablo 2'de ise PFAS maddelerinin kullanıldığı alanlar ve malzemeler bazında daha özel detaylar verilmiştir.

Tablo 1. PFAS'ları içeren endüstri ve uygulamalar.**Table 1.** PFAS containing industries and its applications.

No	Endüstri ve Uygulama Sektör Adı	No	Endüstri ve Uygulama Sektör Adı
1	Ambalaj, kâğıt ve karton	14.	Petrol ve gaz endüstrisi
2	Aşındırma, gravür	15.	Plastikler, reçineler ve kauçuk
3	Bilimsel, genel kullanım	16.	Seramik ve nanoyapı sentezi
4	Elektronik endüstrisi	17.	Soğutucu Akışkanlar
5	Fotoğrafçılık ve litografi endüstrileri	18.	Taşımacılık sektörü
6	Geri dönüşüm ve malzeme geri kazanımı	19.	Tekstil
7	Kaplamalar, balmumu, boya, vernik ve mürekkepler	20.	Temizlik ürünleri
8	Kozmetik ve kişisel bakım	21.	Tıbbi kullanımlar
9	Kuru temizleme	22.	Yangın söndürme köpüğü
10	Madencilik endüstrisi	23.	Yapı ve inşaat sektörü
11	Metal kaplama ve finisaj	24.	Yapıştırıcılar
12	Patlayıcılar, itici gazlar ve mühimmat	25.	Yarı iletken endüstrisi
13.	Pestisitler ve gübreler		

Bu tablolarda örneğin, tekstil malzemeler tıbbi kullanım için PFAS ile kaplanmaktadır ve bu nedenle bu kullanım hem tekstil hem de tıbbi kullanım bölümlerinde belirtilmiştir. Birkaç endüstri, örneğin aşındırma gibi diğer

endüstrilerle birleştirilebilecekken, çeşitli endüstrilerin PFAS'a özgü kullanımlarını daha iyi tanımlamak ve detaylandırmak için ayrı tutulmuştur.

Tablo 2. PFAS kullanılan sektörler ve malzemeler (Gaines, 2023).**Table 2.** Industries and materials using PFAS (Gaines, 2023).

Bina ve inşaat sektörü	Metal kaplama ürünleri	Ulaşım
Hava emisyon filtreleri, Çimento fayansları, Beton karışımları, Sera/kış bahçesi pencereleri, Ev kapıları, Ev panjurları, Ev dış cephe kaplaması, Ev pencereleri, Deniz yapıları, Çatı kaplama, Çatı kumaşları (mimari), Gökdelen metal duvar kaplaması, Güneş enerjili uygulama filmleri	Uçak parçaları (kanatlar ve iniş takımları gibi), Mimari yapılar (Yüksek gerilime ve korozyon koşullarına maruz), Otomotiv kaplamaları, Bisikletler, Motor parçaları, El aletleri, Hidrolik silindirler ve çubuklar, İnşaat ekipmanları, matbaa silindirleri, end. Rulolar, Denizcilik donanımı, Metal mobilyalar, Plastik kalıplar, Sıhhi tesisat armatürleri, Çinko dökümler	Otomotiv fren hatları ve yakıt hatları kaplaması, Otomotiv tekstilleri, Otomobil döşeme, Havacılık hidrolik sıvı katkısı, Yakıt hücresi ayırıcılar, Yakıt tankları ve yakıt tankı mesaneleri, Contalar (düz veya tornada kesilmiş), Hortumlar, Yolcu uçaklarının iç kaplamaları, O-/V-halkalar, Vana gövdesi ve contaları, Vana gövdesi ve contaları, Kablo kılıfı ve izolasyonu
Ambalaj, kâğıt ve karton	Patlayıcılar, itici gazlar ve mühimmat kullanımları	Elektronik
Korozyon önleyici astar, Fırın	Ajan yenilgi savaş başlıkları, Hava aracı	Havacılık ve uzay uygulamaları,

kâğıdı, Tereyağı ambalajları, Karbonsuz formlar, Kaplamalı ham kâğıt, Katlanır kartonlar, Gıda kapları (tabakları, kaseler vb.), Genel astar ve oluk, Kraft kâğıdı, Maskeleme kâğıtları, Mikroalga patlamış mısır poşeti sensörleri, Nötr astar, Nötr beyaz rol kâğıdı, Kompozit kâğıt (Metal, ahşap ve plastik içeren), Pet gıda poşetleri, Pizza kutuları, Kâğıt gıda pipetleri, Alçı levha için ham kâğıt, Paket yemek kapları ve gıda sarma kâğıdı, Duvar kâğıdı	karşı önlem işaret fişekleri, Mermi ve mermi izleyiciler, Doküman imhası, Gaz jeneratörleri ateşleyici pirolanlar, Ateşleme peletleri, Ateşleyiciler, Maden imha meşaleleri, İtici gaz şarjları ateşleyici pirolanlar, İtici gazlar, Roket motorları ateşleyici pirolanlar, Av tüfeği için atış, Duman bombaları	Otomotiv, İletişim tesisleriyle ilişkili kablolar ve teller, Cep telefonları, Çeşitli kablo yalıtımı (Koaksiyel, elektrik), Bilgisayar kabloları ve ağları, Dijital kameralar, Disk sürücüler, Disketler, Piller (Lityum, çinko), Düşük frekanslı plenum kabloları, Manyetik kayıt cihazları, Manyetik bant, Optik fiberler, Baskılı devre kartları, Yazıcılar, Radar sistemleri, Uydu iletişim sistemleri, Tarayıcılar, Güneş kolektörleri kaplaması
--	--	---

PFAS'ın temizlik için kullanıldığı malzeme türleri	Tekstil	Kozmetik ve kişisel bakım ürünleri
Alkalın temizleyiciler, ATV'ler, Otomobil cilaları, Bisiklet zincirleri, Bıçaklar ve uçlar, Kamyonlar ve kasnaklar, Araba yıkama ürünleri, Halı leke temizleyicileri, Beton, Konveyör kayışları, Montaj tezgâhları, Çamaşır yıkama sıvıları, Zemin cilası, Döşemeler, Cam, Genel olarak sert yüzeyler, Menteşeler, Duvarcılık, Metal yüzeyler (uçaklar gibi), Motosiklet zincirleri, Güçlü alet ve ekipmanlar, Silindirler, Şampuanlar, Kaydıraklar, Halatlar, Ahşap	Otomobil iç parçaları, Tente tekstilleri, Halılar, Giyim eşyaları, İtfaiyecilerin koruyucu giysi ve donanımları, Eldivenler, Ev tekstilleri, Endüstriyel ortam tekstilleri, Ceketler, Deri, Tıbbi giysiler, Dış mekan tekstilleri, Yelkenler, Ayakkabılar, Çadırlar, Şemsiyeler, Plaj şemsiyeleri, Döşemeler, Mayo, bikini, yüzücü kıyafetleri, Spor ve performans kostümleri, Yatak örtüleri, Yatak koruyucu (alez), Mutfak uygulamaları için yapışmaz kumaş kaplamaları, Su tutmaz kumaş ve döşemeler, Su itici kıyafetler (mont, kayak pantolonu, yağmurluk, gömlek vb.), Dalış ve dalış kıyafeti	Akne bakımı, Allık, Kaş ürünleri, Kremler, Diş ipi, Diş plağı çıkarıcılar, Göz kremi, Göz farları, Parlaticı (highlighter), Fondöten, Saç kremleri, Şampuanlar, El dezenfektanı, Dudak kremi, Dudak koruyucu/parlaticı, Rujlar, Losyonlar, Maskara/Rimel, Kırpık ürünleri, Tırnak cilası, Traş kremi, Güneş kremi, Saç şekillendirici cilalar, Makyaj pudrası, Deodorant/antiperspirant ürünler, Saç spreyleri

Plastikler, reçineler ve kauçuk	Tıbbi malzemeler ve parçalar	PFAS ile kaplanmış kaplama ürünü veya malzemesi (Günlük kullanım ürünleri)
Aerospace ekipmanları, Tarımsal kimyasal kaplar, Mimari kaplamalar, Mimari kumaşlar, Otomobil bileşenleri, Otomotiv yakıt	Çantalar, Kan temas yüzeyleri, Kan ikameleri, Meme protezleri ve yumuşak doku yerine geçebilen diğer cihazlar, Kanüller, Kateterler, Kontak lensler, Konteynerler, Cihaz yüzey kaplamaları,	Yapıştırıcılar, Tarımsal cam ve plastik kapaklar (örn. seralar), Otomotiv kaplamaları, Dolgular ve kalafatlar, Selüloz, Çimentolar, Seramikler, Kimyasal işleme

hortumları, Kaustik potas elektrolizör membranları, Kaustik soda elektrolizör membranları, Kimyasal kaplar, taşıma parçaları, Kimyasal tesis ekipmanları, Klor-alkali hücre membranları, Narenciye ürün kapları, Temizlik kimyasal kapları (Evsel, tıbbi ve endüstriyel), Tencereler, Kordonlar, Korozif astarlar, Elektrik kablo yalıtımı ve kılıfı, Elektronik kimyasal kaplar, Emisyon kontrol cihazı membranları, Genleşme derzleri/körükler, Balıkçılık olta misinası, Lezzet, koku ve uçucu yağ kapları, Gıda işleme ekipmanları, Yakıt hücresi membranları, Contalar, Geotekstiller, Yüksek kalite borular, Hidrokarbon kapları ve tankları, Enstrüman telleri, Astarlama (örn. kaplar, valfler, borular), Tıbbi işleme ekipmanları, Petrol ve gaz sondaj ekipmanları, Kağıt ve kağıt hamuru endüstrisi bileşenleri, Pestisit kapları/ilaç işleme bileşenleri, Fotoğrafçılık kimyasal kapları, Cila kapları, Raket telleri, Halatlar, Sızdırmazlar, Yarı iletken borular, Dikiş ipliği, Taş ve fayans bakım ürünü kapları, Sütürler, Hortumlar, Su elektrolizörü membranları, Mum, Cila kapları	Drenaj tüpleri, Endoprotezler, Kumaş astarlar, Contalar, Greftler, Kılavuz teller, Hernia yamalar, Hipotüpler, İnhaler itici gaz, Eklem değiştirme veya onarımı, Eklem ara parçaları, Lensler, Mandriller, İğneler, İğne kanülleri, Oral kapsüller, Oral tabletler, Perikardiyal yamalar, Portlar, Sealler (contalar), Şantlar, Uzay doldurma veya büyütme cihazları, Stent-greftler, Stentler, Stiller, Supozituarlar, Cerrahi çarşafklar, Sütürler, İskele oluşturmak için kullanılan sentetik kafesler, Sentetik spinal diskler, Transdermal yamalar, Tüpler, Vasküler greftler, Vasküler protezler, Çalışma yüzeyi veya temiz oda yüzey kaplamaları, Yara bakımı	endüstrisi ekipmanları (Kanallar, reaktörler, pervaneler, tanklar, borular, bağlantı elemanları vb.), Şeffaf kaplamalar, Tencere/fırın kapları (ev, endüstriyel, ticari), Kurutucu varilleri (ticari), Olta çubukları ve makaraları, Zemin cilaları, Cam (otomobil ön camları, otomobil farları, banyo aynaları, gözlükler, vb.), Tabancalar, Derz dolguları, Mürekkepler, Metaller, Müzik aleti telleri, Doğal taşlar, Pim ve mafsallar dahil piyano parçaları, Pigmentler, Plastikler ve elastomerler, Cilalar, Reçineler, Sızdırmazlık malzemeleri, Dikiş makinesi baskı ayakları, Kayak cilası (kar kayakları, snowboardlar), Spor ekipmanları telleri (tenis raketi, vb.), Boyalar (duvar, zemin, ahşap, vb.), Renklendiriciler, Vernik, Mumlar, Ahşap
--	--	---

5. PFAS Analizleri ve Kromatografik Teknikler

PFAS analizi için yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC), ultra yüksek performanslı sıvı kromatografisi/veya ultra performanslı sıvı kromatografisi (UHPLC/UPLC), kapiler sıvı kromatografisi

(CLC) ve gaz kromatografisi (GC) dahil olmak üzere sıvı kromatografisi (LC) gibi farklı kromatografik teknikler kullanılmaktadır. Geleneksel HPLC düzenli olarak iyonik PFAS (örn. PFCA, PFSA) analizi için kullanılırken, uçucu ve yarı uçucu PFAS'ların analizi (örn. FTOH, FOSE, FOSA) için ise gaz kromatografisi (GC) uygun bir araçtır (Jahnke ve Berger, 2009).

İyonize ve polar PFAS analizi için kapiler elektroforez (CE) de uygulanmış olsa da, hassasiyet ve tespit limiti HPLC ile karşılaştırılabilir değildir (Jahnke vd., 2007).

LC-MS tekniği ile analitler, kromatografik aralıklar dahilinde farklı LC dedektör tiplerine göre tanımlanır (Al Amin vd., 2020). Analizör ve dedektör olarak; tek/üçlü dörtdü (kuadrupol) MS, uçuş süresi (ToF), iyon tuzağı, ToF ve MS ile birleştirme uygulanır. GC-EI-MS teknikleri ile FTOH'ler (florotelomer alkoller), FOSE'ler (perfloroalkil sülfonamidoetanoller) ve FOSA'lar (perfloroalkil sülfonamidler) gibi uçucu, yarı uçucu ve nötr PFAS'lar tespit edilir ve miktarları belirlenir. Analizör ve dedektör olarak; çift/dört kutuplu- Kütle Spektrometrisi (MS), negatif ve pozitif kimyasal iyonizasyon modları/Alev iyonizasyon dedektörü/Termal iletkenlik dedektörü

(NCI/PCI/FID/TCD) kullanılır (Padilla-Sánchez vd., 2017). Havadaki florlu telomer alkollerin (FTOH'ler) yanı sıra florlu sülfonamidler ve sülfonamidoetanoller (FOSA'lar/FOSE'ler), yüksek hacimli hava örnekleyiciler aracılığıyla farklı filtreler (cam elyaf filtreler (GFF'ler), poliüretan köpükler (PUF'ler)) ve reçine (XAD-2) üzerinde zenginleştirilerek hazırlanabilir. Gaz kromatografisi/kimyasal iyonizasyon-kütle spektrometresi (GC/CI-MS) kullanılarak hassas ve seçici belirleme yapılır (Jahnke vd., 2007).

Şekil 4'te farklı katı, sıvı, hava (iç ve dış ortam havası ve atmosferik toz) (Al Amin vd., 2020) örnekleri ile insan, hayvan, bitki dokuları gibi biyolojik örneklerde yapılmış (Liu vd., 2023; Xing vd., 2023; Rehman vd., 2023) PFAS'ların analiz işlemleri ve kullanılan teknikler görülmektedir (Al Amin vd., 2020; Dhore ve Murthy, 2021). Çevre ve gıda örneklerinin ekstraksiyon (Seçici Basıncılı Sıvı Ekstraksiyonu-SPLE) ve analizinde, çevre dostu otomatik ekstraksiyon ile modifiye ve yeni analiz teknikleri geliştirilmektedir (Soriano vd., 2024). PFAS analiz yöntemleri; kromatografik teknikler, sensör tabanlı tespit teknikleri ve alternatif yöntem ve teknikler şeklinde üç kategoride değerlendirilebilir. Yapılmış çalışmalarda

özellikle son beş yılda PFAS'ları tespit ve analiz etmek için yeni yöntem ve teknolojilerin geliştirilmesine daha fazla odaklanıldığı anlaşılmaktadır (Nahar vd., 2023).

Ayrıca, PFAS kirliliğini potansiyel arıtma ve bertaraf teknolojileri incelendiğinde, arıtma süreci yıkıcı olan ve yıkıcı olmayan teknikler özetlenebilir (Abunada vd., 2020). Yıkıcı olan teknikler arasında, ileri oksidasyon süreçleri, elektrokimyasal oksidasyon, yakma, sono-kimyasal, biyodegradasyon, fotoliz ve yıkıcı olmayan teknikler arasında adsorpsiyon, iyon değişimi, fraksiyonasyon sayılabilir (Abunada vd., 2020).

6. Taşınım

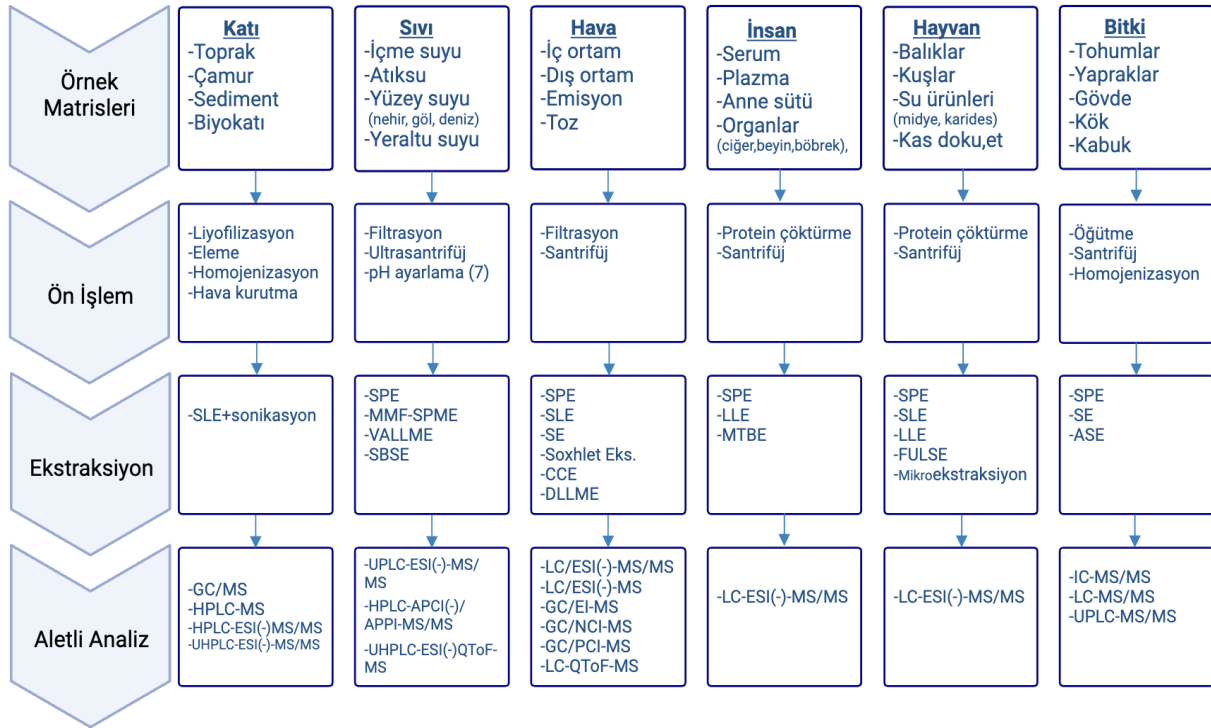
PFAS'ların çevresel taşınımı ve dağılımı, bu bileşiklerin eşsiz fizikokimyasal özellikleri nedeniyle karmaşık ve çok yönlü bir süreçtir. Bu maddeler, çevrede uzun süre kalıcı olabilme ve farklı ekosistemlere yayılabilme kapasiteleriyle, hava, su, toprak ve biyota arasında taşınım yollarını izler (Li vd., 2024; Golosovskaia vd., 2024). PFAS'ların çevresel taşınım dinamikleri, özellikle havadan suya, sudan toprağa ve bu ortamlardan biyolojik sistemlere geçiş süreçleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu süreçlerin anlaşılmasında aşağıdaki fizikokimyasal parametreler kritik öneme sahiptir (Schumacher vd., 2024; Mudlaff vd., 2024).

- Hava-su dağılım katsayısı (KH)
- n-oktanol/su dağılım katsayısı (Kow)
- Suda çözünürlük
- Toprak-su dağılım katsayısı (Kd/Koc)
- Yarı ömür ($t_{1/2}$)
- Moleküler yapı ve zincir uzunluğu
- Sıcaklık ve pH koşulları
- Atmosferik taşınım ve yağış
- Yüzey aktiflik
- Karışım ve difüzyon özellikleri

PFAS'ların taşınımında en önemli parametrelerden biri, hava-su dağılım katsayısı (KH, Henry yasası sabiti) olarak bilinir. KH, PFAS'ların su yüzeyinden atmosfere buharlaşma potansiyelini belirler. Yüksek KH değerine sahip

PFAS'lar, hava yoluyla uzun mesafeli taşınımına daha yatkındır. Bu özellik, bu bileşiklerin atmosferik yayılımını ve uzak ekosistemlere taşınmasını kolaylaştırır. Benzer şekilde, n-Oktanöl/su dağılım katsayısı (Kow) da PFAS'ların taşınım mekanizmalarını etkileyen önemli bir parametredir. Kow, bu bileşiklerin hidrofobik ve lipofilik özelliklerini tanımlayarak biyolojik birikim potansiyellerini belirler. Yüksek

Kow değerine sahip PFAS türleri, lipofilik özellikleri nedeniyle yağ dokularında birikme eğilimi gösterirken, düşük Kow değerine sahip PFAS bileşikler suda daha yüksek çözünürlük göstererek sucul ortamlarda daha geniş bir dağılım sergiler (Hu vd., 2024; Nayak vd., 2023). Bu farklılıklar, PFAS'ların çevresel davranışlarını ve potansiyel ekotoksikolojik etkilerini belirlemede kritik öneme sahiptir.



Şekil 4. Katı, sıvı, hava ve biyolojik örneklerde (insan, hayvan, bitki) PFAS'ların İncelenmesi. SLE: Katı-Sıvı Ekstraksiyonu; SPE: Katı Faz Ekstraksiyonu; LLE: Sıvı-Sıvı Ekstraksiyonu; MMF-SPME: Çoklu monolitik fiber katı faz mikro ekstraksiyonu; VALLME: Vorteks Destekli Sıvı-Sıvı Mikro Ekstraksiyon; MTBE: Metil-tert-bütıl eter; FUSLE: Odaklanmış Ultrason Katı-Sıvı Ekstraksiyonu; SBSE: Karıştırma Çubuklu Sorptif Ekstraksiyon; SPLE: Seçici Basıncılı Sıvı Ekstraksiyonu; PLE: Basıncılı Sıvı Ekstraksiyonu; DLLME: Dağıtılmış Sıvı-Sıvı Mikro Ekstraksiyonu; Sıvı Kromatografisi (LC); GC: Gaz Kromatografisi; HPLC: Yüksek Basıncılı Sıvı Kromatografisi; UHPLC: Ultra yüksek performanslı sıvı kromatografisi; IC: İyon Kromatografisi; MS: Kütle Spektrometresi; ESI(-) Negatif Elektro Sprey İyonizasyonu; APCI: Atmosfer Basıncında Kimyasal İyonizasyon; APPI: Atmosfer Basıncında Fotoiyonizasyon İyonizasyonu (APPI); QToF: Dört kutuplu Uçuş Süresi kütle analizörü

Figure 4. Investigation of PFASs in solid, liquid, air and biological samples (human, animal, plant).SLE:Solid-Liquid Extraction; SPE:Solid Phase Extraction; LLE: Liquid-Liquid Extraction; MMF-SPME: Multiple monolithic fiber solid phase micro extraction; VALLME: Vortex Assisted Liquid-Liquid Microextraction; MTBE: Methyl-tert-butyl ether; FUSLE: Focused Ultrasound Solid-Liquid Extraction; SBSE: Stir Bar Sorptive Extraction; SPLE: Selective Pressurized Liquid Extraction; PLE: Pressurized Liquid Extraction; DLLME: Dispersive Liquid-Liquid Microextraction; LC: Liquid Chromatography; GC: Gas Chromatography; HPLC: High Pressure Liquid Chromatography; UHPLC: Ultra-high performance liquid chromatography; IC: Ion Chromatography; MS: Mass Spectrometry; ESI(-): Negative Electrospray Ionization; APCI: Atmospheric Pressure Chemical Ionization; APPI: Photoionization Ionization at Atmospheric Pressure; QToF: Quadrupole Time-of-Flight mass analyzer

Taşıyım mekanizmalarını etkileyen bir diğere önemli faktör, suda çözünürlük derecesidir. PFAS'ların su ortamlarında çözünme kapasitesi, sucul ekosistemlerde yayılımını ve taşıyımını doğrudan etkiler. Yüksek çözünürlük, bu bileşiklerin yüzey ve yer altı sularında geniş bir alana yayılmasına olanak tanır (Rasmusson ve Fagerlund, 2024). Bunun yanında, toprak-su dağılım katsayısı (Kd/Koc), PFAS'ların toprak parçacıklarına adsorpsiyon kapasitelerini belirler. Düşük Kd/Koc değereeri, PFAS'ların yer altı suyuna geçişini kolaylaştırır ve bu da yer altı suyu kirliliği açısından önemli bir risk oluşturur.

PFAS'ların çevredeki kalıcılıkları ise, kimyasal yapılarına ve yarı ömürlerine bağlıdır. Uzun yarı ömre sahip PFAS türleri, bozunmaya karşı direnç göstererek çevrede uzun süre taşıyım yollarında etkin kalır. Ayrıca, moleküler yapı ve zincir uzunluğu, bu bileşiklerin fizikokimyasal özelliklerini ve çevresel taşıyım mekanizmalarını etkiler. Uzun zincirli PFAS türleri, kısa zincirliye göre çevrede daha karardır ve biyolojik birikim potansiyelleri daha yüksektir. Çevresel koşullar da PFAS'ların taşıyımında belirleyicidir. Sıcaklık ve pH koşulları, bu bileşiklerin çözünürlük, volatilite ve kimyasal kararlılık özelliklerini etkiler. Özellikle sıcaklık, buharlaşma hızını artırarak PFAS'ların atmosferdeki taşıyımını teşvik eder. Bunun yanı sıra, PFAS'ların atmosferden karasal ve sucul ortamlara geçiş, atmosferik taşıyım ve yağış süreçleriyle ilişkilidir. Bağlı nem ve yağış, bu bileşiklerin havadan suya ve toprağa çökmesini hızlandıran temel etkenlerdir.

PFAS'ların yüzey aktif özellikleri ve difüzyon davranışları da taşıyım süreçlerinde etkili olmaktadır. Yüzey aktiflik, bu bileşiklerin suyun yüzey gerilimini azaltarak su ortamında daha hızlı yayılmasına olanak tanır. Karışıklık ve difüzyon özellikleri ise PFAS'ların sıvı ve gaz fazlarındaki taşıyım kinetiğini belirleyerek farklı ekosistemler arasında geçişlerini kolaylaştırır (Atoufi ve Lampert, 2023), bu süreçler, özellikle durağan sular veya atmosferik mikroortamlarda PFAS birikim potansiyelini şekillendiren önemli faktörlerdir. Karışıklık (mixing), PFAS'ların

çevresel taşıyımında sıvı ve gaz fazlarında dağılımını hızlandıran temel bir fiziksel süreçtir; özellikle akışkan dinamiklerinin yoğun olduğu nehir, okyanus ve atmosfer gibi ortamlarda PFAS'ların yayılımını artırır. Difüzyon, PFAS moleküllerinin konsantrasyon gradyanı boyunca hareketini tanımlar ve moleküler büyüklük ile ortamın viskozitesine bağlı olarak PFAS'ların taşıyım kinetiğini etkiler.

Sonuç olarak, PFAS'ların çevresel taşıyım ve dağılım mekanizmalarını anlamak, bu bileşiklerin neden olduğu risklerin değereendirilmesi ve etkili yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için temel bir gerekliliktir. Fizikokimyasal parametreler, PFAS'ların çevresel kaderine yönelik bilimsel çalışmalarda dikkate alınması gereken başlıca faktörlerdir. Çevredeki PFAS kirliliğinin yönetiminde yenilikçi çözümler için tüm bu parametrelerin bütüncül ve entegre bir yaklaşımla ele alınması gerekli görünmektedir.

Uzun mesafeli atmosferik taşıyım ve bölgesel birikme potansiyeli ve muhtemel ek kaynakların birleşimi, ortamlardaki PFAS konsantrasyonunu değıştirmektedir. Dünyanın zirvesi Everest Dağı'nda (8440 m) yapılan çalışmalarda da PFAS konsantrasyonları tespit edilmiştir. PFAS seviyeleri örneklenen bölgeye, örneğin özelliklerine ve taşıyımına göre değışebilir. Örneğin, buzulun altındaki erimiş su numunelerinde daha düşük PFAS konsantrasyonu görülmüştür. Bu eriyik su, çevredeki dağlardan gelen eriyik ile birleşerek aşağı havzadaki PFAS'ı seyreltici etki yapabilir (Miner vd., 2021). Tibet Platosu'nun Orta ve Kuzey bölgelerinde yapılan çalışmalarda Everest Dağı'nda bulunanlardan daha düşük PFOS ve PFOA konsantrasyonları tespit edilmiştir (Chen vd., 2019). Norveç'te yapılan bir çalışmada (Kwok vd., 2013), Svalbard kentinde mekansal bir eğim boyunca toplanan iki buz karotunda (n = 26), yüzey karında (n = 9) ve yüzey suyu örneklerinde (n = 14) 17 PFAS konsantrasyonu ölçülmüştür. PFAS'ın kökenlerini ve kaynaklarını takip etmek için seçilen iyonların (Na^+ , SO_4^{2-} , vb.) konsantrasyonlarının da belirlendiği çalışmada, perflorobütanoat (PFBA), perflorooktanoat (PFOA) ve perflorononanoat

(PFNA), buz karotu örneklerinde baskın bileşikler olarak tespit edilmiştir. PFOA, PFNA ve perflorooktan-sülfonat (PFOS) örnek alındığında, 1997–2000 dönemini temsil eden buz karotlarının orta katmanlarında daha yüksek konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Kanada Kuzey Kutbu'ndaki bir buz karotunda daha önce ölçülen konsantrasyonlarla karşılaştırıldığında (Stock vd., 2007), daha düşük C8-C12 perflorokarboksilat (PFCA'lar) konsantrasyonları tespit edilmiş olup; bu durumun, Avrupa Kuzey Kutbu'ndaki kirlenme seviyelerinin daha düşük olduğuna işaret olduğu vurgulanmıştır. Kwok ve diğerleri (2013) tarafından Avrupa Kuzey Kutbu'ndaki kar, erimiş buzul suyu ve nehir suyu örneklerinde yapılan araştırmada, Ortalama PFAS konsantrasyonlarının yüzey karı ve erimiş buzul suyu örneklerinde daha düşük olduğu, kıyı bölgesine yakın nehir suyunda ise artan konsantrasyonlar gözlenmiştir. Aşağı akış konumlarında Perflorohekzansülfonat (PFHxS) tespit edilmiş, ancak buzulda tespit edilmemiştir. Bu durum, bu bileşiğin yerel kaynaklarının varlığını akla getirmektedir. PFAS'ın uzun menzilli atmosferik taşınması, buzullar için ana biriktirme yolu iken, aşağı akış konumlarında yerel kaynaklar (örneğin kayak faaliyetleri) etkili olabilir.

Norveç Arktik Bölgesi, Svalbard takımadalarındaki Spitsbergen'in batı kıyısı boyunca alınan su, kar, sediment ve toprak örneklerinde PFAS'ların çevresel dağılımı belirlenerek, potansiyel yerel birincil kaynakların (atık su, Svalbard havaalanındaki yangın söndürme eğitim sahası, çöp sahası) PFAS konsantrasyonlarına ve uzun menzilli taşınımına (atmosfer, okyanus akıntıları) katkısı, ölçülen PFAS seviyeleri ve bileşim profillerine dayalı olarak karşılaştırılmıştır (Ahrens vd., 2023). Spitsbergen'in uzak kıyı ve iç bölgelerinde, erimiş su en yüksek ortalama Σ PFAS konsantrasyonuna sahipken ($6,5 \pm 1,3 \text{ ng L}^{-1}$), bunu yüzey karı ($2,5 \pm 1,7 \text{ ng L}^{-1}$), tatlı su ($2,3 \pm 1,1 \text{ ng L}^{-1}$), deniz suyu ($1,05 \pm 0,64 \text{ ng L}^{-1}$), göl çökeltileri ($0,084 \pm 0,038 \text{ ng g}^{-1}$ kuru ağırlık (dw)) ve deniz çökeltileri ($<\text{yöntem tespit sınırı (MDL)}-0,46 \text{ ng g}^{-1} \text{ dw}$, medyan $0,015 \text{ ng g}^{-1} \text{ dw}$) izlemiştir. Yerel kaynaklardan etkilenen su ve toprak örneklerinde

perfloroalkil sülfonatlar (PFSA) ve 6:2 florotelomer sülfonat (FTSA) baskınken, Svalbard'ın uzak kıyı ve iç bölgelerinden gelen su ve sedimentte ise perfloroalkil karboksilatların (PFCA) baskın olduğu anlaşılmıştır. Uzak bölgelerde gözlemlenen PFAS bileşim profilleri, uçucu öncüllerin atmosferik taşınmasının ve oksidasyonunun Svalbard'daki önemli bir PFCA kaynağı olduğunu göstermiştir.

Endüstriyel veya kentsel atıksulardan çevreye dağılabilecek PFAS'ları önleme konusunda, uzun zincirli PFAS'ın kısa zincirli PFAS ile değiştirilmesinin yanı sıra tekstil işlemede kullanılan PFAS'ın azaltılması gibi stratejiler önerilmektedir (Cantoni vd., 2024). Olası riskler, tekstil işlemede PFAS azaltımı/değiştirilmesi, tekstil fabrikaları tarafından deşarj edilen atık suyun kanalizasyona deşarj edilmeden önce membran ayırıştırma yoluyla arıtılması ve ozonlama aşamasından sonra aktif karbon adsorpsiyonu yoluyla AAT'nin iyileştirilmesi kombinasyonu ile risk kabul edilebilir eşiğin (Risk Katsayısı=0,9) altına düşürülebilir. Atıksu kaynaklı PFAS'ın çevreye yayılmasını önlemek, yüzey sularında oluşabilecek çevresel riski azaltmak için önleme ve giderme stratejileri, hem tekstil fabrikalarını hem de belediye atık su arıtma tesislerini (AAT) kapsayacak şekilde birden fazla düzeyde uygulanmalıdır.

PFAS'lar, olası noktasal kaynaklardan uzak yerler de dahil olmak üzere dünyanın her yerinde tespit edilmişlerdir (Kavusi vd., 2023). PFAS'ın uzun menzilli taşınımı için bir mekanizma, atmosferdeki aerosol partiküllerine sorpsiyon yoluyla olmaktadır (Faust, 2023). PFAS, dalga kırılması ve kabarcık patlaması yoluyla deniz yüzeyinden deniz spreyi aerosol partiküllerine aktarılabilir ve gaz fazında atmosfere yayılan PFAS, gaz-partikül bölünmesi yoluyla partikül maddeye sorlanabilir.

PFAS'ların mobilizasyonu ve taşınımı konusunda yapılmış çalışmalar halen yetersiz düzeydedir. Perfloroalkil maddeler (PFAS) küresel olarak çeşitli çevresel matrislerde tespit edilmiştir, ancak bunların akıbeti ve taşınımı, birçok bölge için hala belirsizdir. PFAS'ların uzun menzilli atmosferik

taşınması birçok uzak kutup bölgelerindeki birikimini açıklayabilir. Ancak çevredeki konsantrasyonlarda, atmosferik taşınımından başka, su yolları, kirleticiliğine ve kaynağına olan mesafe de oldukça önemli rol oynamaktadır.

7. Tartışma ve Öneriler

PFAS maddelerinin çevresel bozunma karşısındaki dayanıklılığı nedeniyle çevrede geniş yayılım gösterdikleri ve organizmalarda biyobirikim yapabildikleri, aynı zamanda maruziyetlerinin insanlarda çeşitli sağlık sorunlarına yol açabileceği aşıkardır (Khan vd., 2023). Bilindiği üzere, per- ve polifloroalkil maddeler veya PFAS'lar, endüstrinin neredeyse tüm sektörlerinde ve birçok tüketici ürünüde kullanılan bir kimyasal sınıftır. Çevredeki FPAS kirliliği endüstriyel-teknolojik-kimyasal kirlilik olmakla beraber daha çok toplumsal konularla da ilgili bir kirliliktir. Çünkü PFASların endüstriyel ürünlerde üretimini ve yaygınlaşması tetikleyen ana faktörlerden en önemlisi “hızlı yaşayan toplumdur”.

İyice antropize hale gelmiş ortamlarda insanların ihtiyaçlarını ve konforunu hızlı şekilde temin etmenin faturası, bu malzemedan salınan kimyasalların çevrede birikmesiyle sonuçlanmaktadır. Antroposentrizm (Anthropocentrism, İnsanmerkezci yaklaşım), çevre etiğindeki orijinal anlamında, değerin insan merkezli olduğu ve diğer tüm varlıkların insani amaçlar için araç olduğu inancıdır (Kopnina vd., 2018; Fortuna vd., 2023; Rogers ve Maloney, 2023). Bir ideoloji olarak insanmerkezcilik egoist ve kendicidir, yalnızca insanlara takıntılıdır (Kopnina vd., 2018). Çevre söz konusu olduğunda ise bu insanmerkezçiliğin etik açıdan yanlış olduğu, antroposentrik yaklaşımın ekolojik krizlerin ve kirliliğin kökenindeki esas sorun olduğu bellidir. İnsanmerkezcilik açıkça ekoloji katliamının ve çevre krizinin önemli bir itici gücüdür; çünkü toplum, insanlığın sonuçta tamamen doğaya bağımlı olduğunu düşünmeden çılgınca 'insan gezegeni' projesini takip etmektedir (Washington, 2013). İnsanmerkezcilik algısı toplumları sürdürülebilir bir geleceğe götüremez. Ekosentrik (çevremerkezcilik)

yaklaşım ise bunun aksine, doğanın bir parçası olduğumuzu ve yaşam ağına saygı duyma ve insanmerkezçiliğin ideolojik hakimiyetinin neden olduğu hasarı iyileştirme sorumluluğumuz olduğunu kabul eder (Washington vd., 2017; Kopnina vd., 2018). Bu sebeple, bu araştırmada da küresel alanda yaygınlığı, türevleri, çevre ve insanlar için olası tehlikeleri anlatılan PFAS'ların yalnızca endüstriyel uygulama ve insani kullanımlar için gerekliliğinin değil, bu toksik kimyasalların gelecek ve çevre için oluşturduğu risklerin de ele alınması gerekliliği vurgulanmaktadır.

PFAS'lar gibi maddelerin dünyayı giderek kimyasallaştırdığı gerçeği kabul edilerek; çevre ve insana birçok zararı olan maddelerin bu kadar yaygın kabul görmesinin önüne geçilmeli, üretim ve kullanımı konusunda ise gerekli sınırlandırma ve yasaklama mekanizmaları devreye girmelidir. PFAS'larla ilgili risklerin ve düzenlemelerin topluma duyurulması, üreticilerin ürünlerinde ve satın alma kararlarında tüm PFAS'lardan kaçınıp kaçınmadığına dair bilgilerin verilmesi gerekli görünmektedir. PFAS'ın zorunlu olmayan kullanımları ortadan kaldırılmalı, mevcut ve birikmeye devam eden PFAS kirliliğini çevreden kaldırmak için güvenli alternatifler ve yöntemler geliştirilmeli, hükümetler, sanayiciler gibi önemli tüm paydaşlar sorumluluk almalıdır.

Tüm PFAS'ların ortak bir özelliği, moleküler yapılarında son derece kararlı perflorokarbon kısımlarına sahip olmalarıdır. Bu yapının sonucu olarak, çevrede ve biyotada uzun süre kalıcıdır ya da kalıcı türevlerine dönüşebilirler. Araştırmalar, perfloroalkanlar gibi bazı PFAS bileşiklerinin binlerce yıllık kalıcılığa sahip olduğunu tahmin etmektedir (Kwiatkowski vd., 2020; Brunn vd., 2023). Sonuç olarak, biyoakümülatif ve toksik PFAS'ları, poliklorlu bifeniller, klorobenzenler veya polisiklik aromatik hidrokarbonlar gibi bilinen kalıcı organik kirleticiler listesinde değerlendirmek ve önceliklendirmek doğru olacaktır (Sanchez-Vidal vd., 2015; Johnson vd., 2021). Bununla beraber, PFAS'lar için şu anda mevcut olan veriler PBT (Persistent Bioaccumulative Toxic - Kalıcı

Biyokümülatif Toksik) maddelerini tanımlamak için yeterli görülmemekte ve PFAS'ların tehlike değerlendirmesinde, hareketliliğin (Mobile) de REACH (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması), kapsamına dahil edilmesinin oldukça etkili ve faydalı olacağı önerilmektedir (Rudin vd., 2023). PFAS'ların tehlike değerlendirmesinde PBMT (Persistent Bioaccumulative Mobile Toxic - Kalıcı Biyokümülatif Hareketli Toksik) maddeleri olarak dikkate alınması önemlidir. Bu yaygın kullanışlı "sonsuz kimyasalları" düzenlemek üzere bilime dayalı politikaları geliştirebilmek için, bozunma, iyileştirme, maruziyet dozları ve toksikolojik açıdan güvenli maruziyet sınırlarının anlaşılmasına ihtiyaç vardır.

Türkiye'deki çalışmalar incelendiğinde musluk ve şişe sularında (Endirlik vd., 2019), Sakarya ve Ergene nehirlerinden, Terkos, Küçükçekmece, Büyükçekmece, Eğirdir ve Beyşehir göllerinden alınan sularda ve bu sulardan ticari olarak temin edilen bazı balıklarda PFOA ve PFOS konsantrasyonlarının incelendiği (İkizoglu, 2024) görülmektedir. PFAS bileşiklerinin giderilmesi konusunda yapılan bir çalışmada (Üner vd., 2022), plazma ve bor katkılı elmas (BDD) elektrotları kullanılarak yapılan elektrokimyasal degradasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır. Çalışma, plazmanın sadece katot, BDD'nin ise yalnızca anot olarak etkili olduğunu, plazmanın daha yüksek voltaj ancak daha düşük akım gerektirdiğini, kinetik kontrolün BDD için sıfırıncı derece reaksiyonlar, plazma için ise kütle transferi ile sınırlı olduğunu ve her iki yöntemin enerji verimliliğinin benzer olduğunu ortaya koymaktadır. Karataş ve arkadaşlarının (2023) yaptıkları araştırma ise, PFOS ile kirlenmiş yeraltı suyu ve atıksuların arıtımı için bor katkılı elmas (BDD) anotlu elektrooksidasyon (EO) yönteminin etkinliğini değerlendirerek, optimize edilen pH, akım yoğunluğu ve başlangıç konsantrasyonları ile simüle edilmiş yeraltı suyunda %79 ve gerçek çöplük sızıntı suyunda %84 toplam organik karbon (TOC) giderim verimi elde etmiş ve PFOS'un parçalanmasıyla 8.78 mg/L F⁻ iyonu açığa çıktığını göstermiştir. Barisci ve Suri (2023), farklı sınıflardaki yeni

nesil kısa zincirli PFAS bileşiklerinin elektrokimyasal plug flow reaktörü (EPFR) ile kinetik analizler doğrultusunda yüksek verimlilikle parçalanabildiğini, parçalanma süreçlerinin pH, doğal organik madde ve bikarbonat varlığına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ve düşük enerji tüketimiyle deflorinasyon ürünlerinin oluştuğunu bildirmiştir.

Bilindiği üzere, biyolojik birikim yetenekleri ve zararlı etkileri nedeniyle çevre için önemli bir tehdit oluşturan PFAS'ları hızlı ve etkili bir şekilde analiz etmek, özellikle de ultra düşük seviyelere kadar ölçmek son derece zor olmaktadır. Bu sebeple temsili bir PFAS olan perflorooktanesülfonik asidi (PFOS) 5 dakika içinde katrilyonda bir (ppq) düzeyinde ölçebilen düşük maliyetli bir sensörün geliştirilmesi hedeflenen bir çalışmada, PFOS ve diğer uzun zincirli PFAS bileşiklerini, gümüş nanopartiküller (AgNPs) ile zenginleştirilmiş Ti₃C₂ tabanlı MXene malzemesi kullanarak elektrostatik ve F-F etkileşimleriyle bağlayarak ölçülebilmesi planlanmıştır (Khan vd., 2024). Bu sensör, 50 ppq ila 1,6 ppt (trilyonda bir) arasında doğrusal bir aralık sergileyerek 33 ppq gibi alt tespit sınırı ve 99 ppq'luk bir miktar belirleme limitiyle, su numunelerindeki PFAS içeriğinin düşük maliyetli tarama çalışmalarının geliştirilebilmesi açısından umut verici görünmektedir. Emerce ve Çetin (2018), çevresel kalıcılığı ve biyobirikimi yüksek olan PFOS, PFOA, PFNA ve PFHxA bileşiklerinin 0.1–1 mM konsantrasyonlarında ve 32°C'de 1 saatlik maruziyet sonrası insan sperm hücrelerinde anlamlı düzeyde sitotoksisteye veya DNA hasarına yol açmadığını, ancak erkek üreme sistemi üzerindeki dolaylı toksik etkilerin araştırılmasının gerekli olduğunu bildirmektedir. Arredondo Eve ve arkadaşlarının (2024) yaptığı çalışma, postmenopozal kadınlarda PFOA ve PFOS maruziyetinin kardiyovasküler hastalık riskini artırdığını ve bu maddelerin inflamasyonla ilişkili amino asitler ve proteinlerle bağlantılı olduğunu, böylece PFAS maruziyeti ile kardiyovasküler hastalıklar arasında mekanistik bir ilişki olabileceğini ileri sürmektedir.

PFAS maruziyetinin kardiyovasküler hastalıklara (KVH) yol açan moleküler mekanizmalarını in

silico analizlerle incelendiği bir çalışmada (Karakuş ve Kuzu, 2024), PFAS ve KVH'ler arasında 10 ortak genin varlığını, özellikle PPARA ve PPARG genlerinin merkezi rolünü, PPAR sinyal yolları, yağ asidi metabolizması ve lipid bağlanmasıyla ilişkili biyolojik süreçleri, ayrıca hsa-miR-130b-3p, hsa-miR-130a-3p ve hsa-miR-129-5p gibi mikroRNA'ların düzenleyici etkilerini ortaya koymaktadır. Çalışma, PFAS ile indüklenen KVH'lerde yeni potansiyel hedefleri ortaya çıkarabilir. GenX (HFPO dimer asidi) maruziyetinin nörodejeneratif etkilerinin bir meyve sineği türünde incelendiği bir çalışmada (Abu-Salah vd., 2024), *Drosophila melanogaster*'da motor davranış bozuklukları, beyin proteomunda değişiklikler ve metabolik ağ analizleriyle GABA ilişkili yollar ve bağışıklık sistemi düzenlemeleriyle bağlantılı nöroinflamasyon ve mitokondriyal disfonksiyon oluşabileceğini, ayrıca Parkinson hastalığı modelinde benzer moleküler etkiler gözlemlendiği bildirilmiştir.

Türkiye'deki PFAS araştırmaları oldukça sınırlı olmakla birlikte, bu kimyasalların çevresel ve sağlık etkilerine yönelik farkındalık giderek artmaktadır. PFAS'ların içme suyu, atıksu ve endüstriyel kaynaklardaki varlığını tespit etmeye yönelik kapsamlı bir ulusal izleme programı bulunmamaktadır, ancak bu alandaki çalışmaların teşvik edilmesi kritik öneme sahiptir. Türkiye'de, Avrupa Birliği düzenlemelerine paralel olarak PFAS kullanımını sınırlandırmaya yönelik bazı girişimler bulunsada, bu konuda daha spesifik ve bağlayıcı yasal düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle tekstil ve kimya endüstrisi gibi PFAS kullanımı yüksek olan sektörlerde, çevresel kirliliği azaltmaya yönelik daha sıkı denetim ve kontrol mekanizmalarının devreye alınması gereklidir (TİM, 2024). Ayrıca, akademik düzeyde PFAS'ların çevresel taşınım yollarını ve biyolojik birikim potansiyellerini inceleyen disiplinler arası araştırmaların desteklenmesi ve bu çalışmaların sonuçlarının düzenleyici politikalara entegre edilmesi gerekli görünmektedir. Türkiye'nin PFAS kirliliğiyle mücadelede başarılı olabilmesi için hem üretimde hem de yasal düzenlemelerle bilimsel alanlarda

daha kapsamlı ve bütüncül bir yaklaşım geliştirilmelidir. Avrupa Birliği ülkelerinin PFAS yönetimi konusundaki stratejik yaklaşımlarından faydalanarak, REACH düzenlemelerinden esinlenerek, benzer düzenleyici politikalar geliştirilebilir. Örneğin, PFAS üretimi ve kullanımı üzerinde daha sıkı yasal kısıtlamalar getirilmeli ve bu kimyasalların alternatiflerinin araştırılması teşvik edilmelidir. Bunun yanı sıra, Türkiye'deki su kaynaklarının ve endüstriyel bölgelerin PFAS kirliliği açısından haritalandırılması, risk değerlendirmesi için önemli bir adım olacaktır. Toplumda PFAS farkındalığını artırmaya yönelik eğitim ve iletişim programları düzenlenmeli ve bireylerin PFAS içeren ürünlerin tüketimi konusunda daha bilinçli kararlar alması sağlanmalıdır. Bu kapsamlı yaklaşım, PFAS kirliliğinin azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için ulusal bir yol haritası oluşturabilir.

8. Sonuç

Her an her yerde rastlanabilen insan yapımı kimyasallardan olan PFAS'lar, aşağıda genel olarak sıralanan önemli özellikleri nedeniyle çevre ve sağlık açısından büyük endişe kaynağı mikrokirleticiler olmaya devam edecektir.

- Yaygınlık (Çok çeşitli endüstriyel ve tüketici kullanımları)
- Kalıcılık (Uzun yarılanma ömürleri)
- Biyoakümülatiflik (Canlılarda biyolojik olarak birikebilirlik)
- Yüksek hareketlilik (daha kısa zincirli PFAS'lar oldukça hareketli olma eğilimindedir, daha uzun zincirli PFAS daha az hareketlidir)
- Toksisite (kanserojenik, kısırlık, endokrin bozucu etkileri gibi çoklu sağlık tehlikeleri)

Bu çalışma, PFAS'ların tarihsel gelişimini, çevresel ortamlardaki mevcudiyetini, kaynaklarını, sınıflandırmalarını, çevresel taşınım ve birikim süreçlerini, ekosistem ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerini, mevcut düzenleyici çerçeveleri ve bu kimyasalların yönetimi ile kalıcılığını azaltmaya yönelik yenilikçi stratejileri kapsamlı bir şekilde özetlemektedir. PFAS'lar, endüstriyel üretim,

tüketici ürünleri, yangın süreçleri ve atık bertarafı gibi çeşitli kaynaklardan çevreye salınabilir. Hava yoluyla da taşınabilen PFAS'lar, su, toprak ve biyolojik sistemlerde geniş bir dağılım göstermektedir.

PFAS'lar yerinde analiz yapmanın ya da en azından ön eleme yapmanın mümkün olamadığı toksik kirleticilerdendir. PFAS'ların çevresel dağılımını incelemek için kullanılan mevcut yöntemlerin sınırlı hassasiyeti ve spesifikliği, sonuçların doğruluğunu etkileyebilir. PFAS'larla ilgili önemli bir analiz ve değerlendirme zorluğu; yapılan çalışmalarda genel olarak sınırlı sayıda (yaklaşık 28) PFAS niceliksel olarak analiz edilebiliyorken, küresel pazarda 5000 civarında PFAS bileşiği bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bununla beraber, çeşitli çevresel matrisler göz önüne alındığında, numune hazırlama, son zamanlarda önemli ölçüde ilerlemiş olan analiz başarısı için hayati bir rol oynamaktadır. Ancak, bu alanda kritik bir araştırma veya değerlendirme bulunmamaktadır. Yapısında 8 veya daha fazla karbon atomu içeren uzun zincirli PFAS'ların, kısa zincirli PFAS'lara göre çevrede daha fazla kalıcı olduğu bilinmekte ve buna çözümler aranmaktadır. Uzun zincirli PFAS'ların aşamalı olarak kaldırılması ve kısa zincirli PFAS'ların kullanıma sunulması bile, binlerce türevi bulunan PFAS'ların izlenmesi ve iyileştirilmesi açısından zaten zor olan duruma ilave karmaşıklıklar getirmiştir. Bununla beraber PFAS bileşiklerinin doğada binlerce yıllık kalıcı olacağı dikkate alındığında; PFAS'ların çevreye salımı hemen durdurulsa bile, çevredeki PFAS bileşiklerinin gelecek yüzyıllar boyu veya daha uzun süre mevcut olacağı açıktır. PFAS'ların sürdürülebilir bir çevresel yönetim kapsamında ele alınması, sıkı tedbir ve sınırlandırmaların getirilmesi hem çevre hem de insan sağlığı açısından son derece önemlidir.

PFAS'ların çevresel varlığını, dağılımını ve potansiyel sağlık etkilerini daha derinlemesine anlamak için kapsamlı ve sistematik bir yaklaşımın gerektiği anlaşılmaktadır. Sonuçlar, Türkiye'de PFAS kirliliğine ilişkin mevcut sınırlı verilerin genişletilmesi ve bu kimyasalların etkilerini azaltmaya yönelik daha etkili politikalar

ve düzenlemelerin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, PFAS'ların çevresel izleme, yönetim ve düzenleme süreçlerinde ulusal ve uluslararası düzeyde ortak bir standart oluşturulması, bu kimyasalların neden olduğu risklerin etkin bir şekilde azaltılmasına katkıda bulunabilir. Kısacası, ulusal ölçekte izleme, düzenleme, teknoloji geliştirme ve farkındalığı birleştiren bütüncül bir strateji geliştirilmesi, PFAS kirliliğiyle mücadelede sürdürülebilir bir yol haritası sunacaktır. Bu stratejilerin uygulanması, çevre ve insan sağlığını koruma hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır.

Yazar Katkısı

Çalışmanın planlanması, kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, yönetimi, veri toplama, veri analizi, değerlendirme, yorumlama, yazım vb. gibi tüm ögeler yazar Yurtsever, M. tarafından gerçekleştirilmiştir.

Finansman Beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

Etik Standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Abunada, Z., Alazaiza, M.Y., Bashir, M.J. (2020). An overview of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Source, fate, risk and regulations. *Water*, 12(12), 3590. <https://doi.org/10.3390/w12123590>
- Abu-Salah, A., Cesur, M. F., Anchan, A., Ay, M., Langley, M. R., Shah, A., Sarkar, S. (2024).

- Comparative Proteomics Highlights that GenX Exposure Leads to Metabolic Defects and Inflammation in Astrocytes. *Environmental Science and Technology*, 58(46), 20525-20539.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05472>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2021). Toxicological profile for Perfluoroalkyls. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
<http://dx.doi.org/10.15620/cdc:59198>.
- Ahrens, L., Rakovic, J., Ekdahl, S., Kallenborn, R. (2023). Environmental distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) on Svalbard: Local sources and long-range transport to the Arctic. *Chemosphere*, 345, 140463.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140463>
- Al Amin, M., Sobhani, Z., Liu, Y., Dharmaraja, R., Chadalavada, S., Naidu, R., Fang, C. (2020). Recent advances in the analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)—A review. *Environmental Technology and Innovation*, 19, 100879.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100879>
- Ali, A.M., Langberg, H.A., Hale, S.E., Kallenborn, R., Hartz, W.F., Mortensen, Å.K., Breedveld, G.D. (2021). The fate of poly- and perfluoroalkyl substances in a marine food web influenced by land-based sources in the Norwegian Arctic. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 23(4), 588-604.
<https://doi.org/10.1039/D0EM00510J>
- Améduri, B. (2023). Fluoropolymers as unique and irreplaceable materials: Challenges and future trends in these specific per or polyfluoroalkyl substances. *Molecules*, 28(22), 7564.
<https://doi.org/10.3390/molecules28227564>
- Ameduri, B. (2023). Fluoropolymers: A special class of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) essential for our daily life. *Journal of Fluorine Chemistry*, 267, 110117.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2023.110117>
- Arredondo Eve, A., Tunc, E., Mehta, D., Yoo, J. Y., Yilmaz, H. E., Emren, S. V., Madak Erdogan, Z. (2024). PFAS and their association with the increased risk of cardiovascular disease in postmenopausal women. *Toxicological Sciences*, 200(2), 312-323.
<https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae065>
- Ateia, M., Arifuzzaman, M., Pellizzeri, S., Attia, M.F., Tharayil, N., Anker, J.N., Karanfil, T. (2019). Cationic polymer for selective removal of GenX and short-chain PFAS from surface waters and wastewaters at ng/L levels. *Water Research*, 163, 114874.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114874>
- Atoufi, H. D., Lampert, D. J. (2023). Analysis of a Passive Sampling Device to Assess the Behavior of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(10), 2171-2183.
<https://doi.org/10.1002/etc.5705>
- Barisci, S., Suri, R. (2023). Degradation of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) using an electrochemical plug flow reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132419.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132419>
- Blake, B.E., and Fenton, S.E. (2020). Early life exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and latent health outcomes: A review including the placenta as a target tissue and possible driver of peri- and postnatal effects. *Toxicology*, 443, 152565.
<https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152565>
- Bokkers, B., Van de Ven, B., Janssen, P., Bil, W., Van Broekhuizen, F., Zeilmaker, M., Oomen, A.G. (2019). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in food contact materials.
<http://dx.doi.org/10.21945/RIVM-2018-0181>
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K.G., Valentin, I. (2023). PFAS:

- forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 1-50. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00730-7>
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., De Voogt, P., van Leeuwen, S.P. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated environmental assessment and management*, 7(4), 513-541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- Cantoni, B., Bergna, G., Baldini, E., Malpei, F., Antonelli, M. (2024). PFAS in textile wastewater: An integrated scenario analysis for interventions prioritization to reduce environmental risk. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.005>
- Chen, M., Wang, C., Wang, X., Fu, J., Gong, P., Yan, J., Nawab, J. (2019). Release of perfluoroalkyl substances from melting glacier of the Tibetan Plateau: Insights into the impact of global warming on the cycling of emerging pollutants. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(13), 7442-7456. <https://doi.org/10.1029/2019JD030566>
- Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Glüge, J., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Wang, Z. (2020). Strategies for grouping per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to protect human and environmental health. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(7), 1444-1460. <https://doi.org/10.1039/D0EM00147C>
- Dadashi Firouzjaei, M., Zolghadr, E., Ahmadelipour, S., Taghvaei, N., Akbari Afkhami, F., Nejati, S., Elliott, M.A. (2022). Chemistry, abundance, detection and treatment of per-and polyfluoroalkyl substances in water: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 661-679. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01340-6>
- Dhore, R., Murthy, G.S. (2021). Per/polyfluoroalkyl substances production, applications and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 341, 125808. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125808>
- Emerce, E., Çetin, Ö. (2018). Genotoxicity assessment of perfluoroalkyl substances on human sperm. *Toxicology and Industrial Health*, 34(12), 884-890. <https://doi.org/10.1177/0748233718799191>
- Endirlik, B. Ü., Bakır, E., Boşgelmez, İ. İ., Eken, A., Narin, İ., Gürbay, A. (2019). Assessment of perfluoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey. *Chemosphere*, 235, 1162-1171. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.228>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Our Current Understanding of the Human Health and Environmental Risks of PFAS. <https://www.epa.gov/pfas/our-current-understanding-human-health-and-environmental-risks-pfas>, 12 Aralık 2023.
- Faust, J.A. (2023). PFAS on atmospheric aerosol particles: A review. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 25(2), 133-150. <https://doi.org/10.1039/D2EM00002D>
- Fortuna, P., Wróblewski, Z., Gorbaniuk, O. (2023). The structure and correlates of anthropocentrism as a psychological construct. *Current Psychology*, 42(5), 3630-3642. <https://doi.org/10.1007/s12144-021-01835-z>
- Gaber, N., Bero, L., Woodruff, T.J. (2023). The devil they knew: chemical documents analysis of industry influence on PFAS Science. *Annals of Global Health*, 89(1), 37. <https://doi.org/10.5334/aogh.4013>
- Gaines, L.G. (2023). Historical and current usage of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of*

- Industrial Medicine*, 66(5), 353-378.
<https://doi.org/10.1002/ajim.23362>
- Golosovskaia, E., Örn, S., Ahrens, L., Chelcea, I., Andersson, P. L. (2024). Studying mixture effects on uptake and tissue distribution of PFAS in zebrafish (*Danio rerio*) using physiologically based kinetic (PBK) modelling. *Science of the Total Environment*, 912, 168738.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168738>
- Habib, A., Landa, E.N., Holbrook, K.L., Walker, W.S., Lee, W. Y. (2023). Rapid, efficient, and green analytical technique for determination of fluorotelomer alcohol in water by stir bar sorptive extraction. *Chemosphere*, 338, 139439.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139439>
- Henry, B.J., Carlin, J.P., Hammerschmidt, J.A., Buck, R.C., Buxton, L.W., Fiedler, H., Hernandez, O. (2018). A critical review of the application of polymer of low concern and regulatory criteria to fluoropolymers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(3), 316-334.
<https://doi.org/10.1002/ieam.4035>
- Hu, J., Yang, X., Song, X., Miao, Y., Yu, Y., Xiang, W., Liu, H. (2024). Bioaccumulation mechanisms of perfluoroalkyl substances (PFASs) in aquatic environments: Theoretical and experimental insights. *Journal of Hazardous Materials*, 136283.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136283>
- ITRC, (2023). PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances. Physical and Chemical Properties <https://pfas-1.itrcweb.org/4-physical-and-chemical-properties/>, 7 Ekim 2023.
- İkizoglu, B. (2024). PFOA and PFOS Pollution in Surface Waters and Surface Water Fish. *Water*, 16(16), 2342.
<https://doi.org/10.3390/w16162342>
- Jahnke, A., Berger, U. (2009). Trace analysis of per-and polyfluorinated alkyl substances in various matrices—how do current methods perform?. *Journal of Chromatography A*, 1216(3), 410-421.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.08.098>
- Jahnke, A., Ahrens, L., Ebinghaus, R., Berger, U., Barber, J. L., Temme, C. (2007). An improved method for the analysis of volatile polyfluorinated alkyl substances in environmental air samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387, 965-975.
<https://doi.org/10.1007/s00216-006-1008-y>
- Johnson, M.S., Buck, R.C., Cousins, I.T., Weis, C.P., Fenton, S.E. (2021). Estimating environmental hazard and risks from exposure to per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Outcome of a SETAC focused topic meeting. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 543-549.
<https://doi.org/10.1002/etc.4784>
- Karakuş, F., Kuzu, B. (2024). Predicting the molecular mechanisms of cardiovascular toxicity induced by per-and polyfluoroalkyl substances: an In Silico network toxicology perspective. *Toxicology Research*, 13(6), .
<https://doi.org/10.1093/toxres/tfae206>
- Karatas, O., Khataee, A., Kobya, M., Yoon, Y. (2023). Electrochemical oxidation of perfluorooctanesulfonate (PFOS) from simulated soil leachate and landfill leachate concentrate. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104292.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104292>
- Kavusi, E., Ansar, B.S.K., Ebrahimi, S., Sharma, R., Ghoreishi, S.S., Nobaharan, K., Astatkie, T. (2023). Critical review on phytoremediation of polyfluoroalkyl substances from environmental matrices: Need for global concern. *Environmental Research*, 217, 114844.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114844>
- Khan, B., Burgess, R.M., Cantwell, M.G. (2023). Occurrence and bioaccumulation patterns of

- per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the marine environment. *ACS Environmental Science and Technology Water*, 3(5), 1243-1259.
<https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00296>
- Khan, R., Uygun, Z. O., Andreescu, D., Andreescu, S. (2024). Sensitive Detection of Perfluoroalkyl Substances Using MXene–AgNP-Based Electrochemical Sensors. *ACS sensors*, 9, 6, 3403–3412.
<https://doi.org/10.1021/acssensors.4c00776>
- Kopnina, H., Washington, H., Taylor, B., J Piccolo, J. (2018). Anthropocentrism: More than just a misunderstood problem. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 31(1), 109-127. <https://doi.org/10.1007/s10806-018-9711-1>
- Korzeniowski, S.H., Buck, R.C., Newkold, R.M., Kassmi, A.E., Laganis, E., Matsuoka, Y., Musio, S. (2023). A critical review of the application of polymer of low concern regulatory criteria to fluoropolymers II: Fluoroplastics and fluoroelastomers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(2), 326-354.
<https://doi.org/10.1002/ieam.4646>
- Kwok, K.Y., Yamazaki, E., Yamashita, N., Taniyasu, S., Murphy, M.B., Horii, Y., Lam, P.K. (2013). Transport of perfluoroalkyl substances (PFAS) from an arctic glacier to downstream locations: Implications for sources. *Science of the Total Environment*, 447, 46-55.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.091>
- Li, L., Han, T., Li, B., Bai, P., Tang, X., Zhao, Y. (2024). Distribution Control and Environmental Fate of PFAS in the Offshore Region Adjacent to the Yangtze River Estuary—A Study Combining Multiple Phases Analysis. *Environmental Science and Technology*, 58(35), 15779-15789.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03985>
- Lindstrom, A.B., Strynar, M.J., Libelo, E.L. (2011). Polyfluorinated compounds: past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, 45(19), 7954-7961.
<https://doi.org/10.1021/es2011622>
- Liu, D., Tang, B., Nie, S., Zhao, N., He, L., Cui, J., Jin, H. (2023). Distribution of per-and polyfluoroalkyl substances and their precursors in human blood. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129908.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129908>
- Miner, K.R., Clifford, H., Taruscio, T., Potocki, M., Solomon, G., Ritari, M., Mayewski, P.A. (2021). Deposition of PFAS ‘forever chemicals’ on Mt. Everest. *Science of the Total Environment*, 759, 144421.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144421>
- Mudlaff, M., Sosnowska, A., Gorb, L., Bulawska, N., Jagiello, K., Puzyn, T. (2024). Environmental impact of PFAS: Filling data gaps using theoretical quantum chemistry and QSPR modeling. *Environment International*, 185, 108568.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108568>
- Nahar, K., Zulkarnain, N.A., Niven, R.K. (2023). A review of analytical methods and technologies for monitoring per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water. *Water*, 15(20), 3577.
<https://doi.org/10.3390/w15203577>
- Nayak, S., Sahoo, G., Das, I. I., Mohanty, A. K., Kumar, R., Sahoo, L., Sundaray, J. K. (2023). Poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS): do they matter to aquatic ecosystems?. *Toxics*, 11(6), 543.
<https://doi.org/10.3390/toxics11060543>
- OECD, 2022a, Risk management, risk reduction and sustainable chemistry, <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/aboutpfass/Figure1-classification-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances%20-PFASs.pdf>, 15 Aralık 2023.

- OECD, 2022b, Fact Cards of Major Groups of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs), [https://one.oecd.org/document/env/cbc/mono/\(2022\)1/en/pdf](https://one.oecd.org/document/env/cbc/mono/(2022)1/en/pdf), 15 Aralık 2023.
- Padilla-Sánchez, J.A., Papadopoulou, E., Poothong, S., Haug, L.S. (2017). Investigation of the best approach for assessing human exposure to poly-and perfluoroalkyl substances through indoor air. *Environmental Science and Technology*, 51(21), 12836-12843. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03516>
- Post, G.B. (2021). Recent US state and federal drinking water guidelines for per-and polyfluoroalkyl substances. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 550-563. <https://doi.org/10.1002/etc.4863>
- Rasmusson, K., Fagerlund, F. (2024). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as contaminants in groundwater resources—A comprehensive review of subsurface transport processes. *Chemosphere*, 142663. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142663>
- Rehman, A.U., Crimi, M., Andreescu, S. (2023). Current and emerging analytical techniques for the determination of PFAS in environmental samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 37, e00198. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00198>
- Rogers, N. and Maloney, M. (Eds.). (2023) The Anthropocene Judgments Project: Futureproofing the Common Law, (1st Ed), Routledge, ISBN: 9781003389569, New York, 328 s.
- Rudin, E., Glüge, J., Scheringer, M. (2023). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) registered under REACH—What can we learn from the submitted data and how important will mobility be in PFASs hazard assessment?. *Science of the Total Environment*, 877, 162618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162618>
- Sanchez-Vidal, A., Llorca, M., Farré, M., Canals, M., Barceló, D., Puig, P., Calafat, A. (2015). Delivery of unprecedented amounts of perfluoroalkyl substances towards the deep-sea. *Science of The Total Environment*, 526, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.080>
- Schumacher, B. A., Zimmerman, J. H., Williams, A. C., Lutes, C. C., Holton, C. W., Escobar, E., Warrier, R. (2024). Distribution of select per-and polyfluoroalkyl substances at a chemical manufacturing plant. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 133025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133025>
- Soriano, Y., Andreu, V., Picó, Y. (2024). Pressurized liquid extraction of organic contaminants in environmental and food samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117624. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117624>
- Stock, N.L., Furdui, V.I., Muir, D.C., Mabury, S.A. (2007). Perfluoroalkyl contaminants in the Canadian Arctic: evidence of atmospheric transport and local contamination. *Environmental Science and Technology*, 41(10), 3529-3536. <https://doi.org/10.1021/es062709x>
- Taves D, Guy W, Brey W. (1976). Organic fluorocarbons in human plasma: Prevalence and characterization. In: *Biochemistry Involving Carbon-Fluorine Bonds* (Eds. Filler, R), Washington DC: American Chemical Society, ISBN: 9780841203358, pp 117–134.
- Taves, D.R. (1968). Evidence that there are two forms of fluoride in human serum. *Nature*, 217(5133), 1050-1051. <https://doi.org/10.1038/2171050b0>
- Torres, F.B.M., Guida, Y., Weber, R., Torres, J.P.M. (2022). Brazilian overview of per-and polyfluoroalkyl substances listed as persistent organic pollutants in the stockholm convention. *Chemosphere*, 291, 132674.

- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132674>
- Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM), 2024. PFAS Kimyasal Maddelerinin Kısıtlanması <https://tim.org.tr/tr/pfas-kimyasal-maddelerinin-kisitlanmasi>, 1 Ekim 2024.
- Üner, N. B., Baldaguez Medina, P., Dinari, J. L., Su, X., Sankaran, R. M. (2022). Rate, Efficiency, and Mechanisms of Electrochemical Perfluorooctanoic Acid Degradation with Boron-Doped Diamond and Plasma Electrodes. *Langmuir*, 38(29), 8975-8986. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c01227>
- Washington, H., Ehrlich, P.R. (2013). Human Dependence on Nature: How to help solve the environmental crisis (1st edition), Routledge, eBook ISBN: 9780203095560, London, 184. <https://doi.org/10.4324/9780203095560>
- Washington, H., Taylor, B., Kopnina, H., Cryer, P., Piccolo, J.J. (2017). Why ecocentrism is the key pathway to sustainability. *The Ecological Citizen*, 1(1), 35-41. <http://is.gd/ecocentrism>
- Xing, Y., Zhou, Y., Zhang, X., Lin, X., Li, J., Liu, P., Huang, Z. (2023). The sources and bioaccumulation of per-and polyfluoroalkyl substances in animal-derived foods and the potential risk of dietary intake. *Science of the Total Environment*, 905, 167313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167313>
- Zhou, T., Li, X., Liu, H., Dong, S., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, Q. (2024). Occurrence, fate, and remediation for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sewage sludge: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133637. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133637>