

Ağır metaller, mikroplastikler, nanoplastikler ve PFAS etkileşimleri: Türkiye için olası riskler, veri boşlukları ve öncelikli halk sağlığı yaklaşımı

Prof. Dr. Mustafa Necmi İlhan



Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı ve İş-Meslek Hastalıkları Bölümleri öğretim üyesidir. Çok sayıda ulusal–uluslararası projede görev aldı, sağlık politikaları, halk sağlığı, iş sağlığı ve bağımlılık alanlarında önemli katkılar sundu, dört bine yakın atıf aldı. Tıp Fakültesi ve Sağlık Bilimleri Fakültesi Dekanlıkları ve Kurum Başkanlığı yaptı; YÖK, ÜAK ve YÖKAK'ta görev aldı.

Doç. Dr. Sultan Pinar Çetintepe



Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesinde öğretim üyesi olup iş sağlığı, meslek hastalıkları ve toksikoloji alanlarında uzmandır. Ulusal ve uluslararası projelerde görev aldı; çok sayıda SCI kapsamında yayını bulunmaktadır. ICOH-Neurotoxicology & Psychophysiology komitesinde başkan yardımcısıdır.

Türkiye, çeşitli türlerdeki kalıcı ve yeni ortaya çıkan kirlenmeler nedeniyle artan çevresel sorunlarla karşı karşıyadır. Ağır metaller, mikroplastikler (MP), nanoplastikler (NP) ve Perfluoroalkil ve polifluoroalkil maddeler (PFAS), nadiren tek başına ortaya çıkan ancak karmaşık etkileşimlerle çevresel kalıcılıklarını, biyoyararlanımlarını ve toksisitesini artıran dört ana kirlenici grubunu temsil eder. Türkiye açısından Marmara Denizi'nde gözlenen müsilaj krizi, Ege Bölgesi'nde tekstil ve endüstriyel atık yükü, yoğun tarımsal faaliyetlerin bulunduğu Gediz ve Büyük Menderes havzaları ile büyük şehirlerin atık su baskısı, PFAS, mikro/nanoplastikler ve ağır metallerin birlikte değerlendirilmesi gereken öncelikli çevresel senaryoları oluşturmaktadır. Bu olaylar doğrudan PFAS veya mikropplastik kaynaklı olarak tanımlanamasa da, organik yük, endüstriyel deşarj, deterjan/tekstil kimyasalları, plastik lifler ve atık

su girdileri üzerinden bu kirlenicilerle ilişkili hipotezlerin kurulmasına olanak sağlamaktadır.

Avrupa'da per- ve polifluoroalkil maddelere (PFAS) maruz kalma durumu ayrıntılı bir şekilde tanımlanmışken, Türkiye'den gelen veriler yetersiz ve dağınıktır. Avrupa'da, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi tarafından gerçekleştirilen kapsamlı risk değerlendirmesi sonucunda, insanlarda gözlemlenen immünotoksik etkilere dayalı olarak dört ana PFAS'ın (perfluorooktansülfonik asit, perfluorooktanoik asit, perfluoroheksansülfonik asit ve perfluorononanoik asit) toplamı için 4,4 ng/kg vücut ağırlığı kabul edilebilir haftalık alım (AWI) değeri belirlenmiştir (1). HBM4EU (Human biomonitoring data on PFAS exposure in Europe) Girişimi sırasında toplanan insan biyomonitöring verileri, genel Avrupa nüfusunun serumundaki PFAS seviyelerinin 2-20 ng/mL olduğunu gösterirken, endüstriyel merkezlerin yakınında yaşayan

nüfuslarda önemli ölçüde daha yüksek konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Avrupa Komisyonu, içme suyundaki tek tek PFAS'lar için 0,1 µg/L ve toplam PFAS içeriği için 0,5 µg/L parametre değerini belirlediğinden, PFAS kirliliğine ilişkin düzenleme güçlendirilmiştir (2). Ayrıca, Avrupa Çevre Ajansı tarafından yürütülen tamamlayıcı değerlendirmeler, besin alımı (özellikle deniz ürünleri tüketimi), içme suyu, iç mekan tozu ve mesleki ortamlar gibi çeşitli maruz kalma yollarını ortaya koymuştur. Yüzey suları, atık sular ve kanalizasyon çamurundaki PFAS konsantrasyonunu ng/L düzeyinde ortaya koyan çok az sayıda çevresel çalışma mevcuttur.

Kirlenicilere Genel Bakış

Ağır Metaller: Endüstriyel, tarımsal ve kentsel kaynaklardan kaynaklanan kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), çinko (Zn) ve cıva (Hg) gibi eski kirlenicileri içermektedir.



Resim 1. Çevresel kirlenme riskleri
(ChatGPT 5 ile tasarlanmıştır.)

Mikroplastikler ve Nanoplastikler:

Daha büyük plastiklerin parçalanması, sentetik tekstiller, lastik aşınması ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan <5 mm küçük plastiklere Mikroplastik (MP) ve <1 µm'den küçük plastiklere Nanoplastik (NP) terimi kullanılmaktadır.

Perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS):

Yangın söndürme köpüklerinde, tekstillerde, gıda ambalajlarında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan, karbon-flor bağları içeren, aşırı kalıcılık ve biyolojik birikim potansiyeli ile karakterize edilen "sonsuz kadar kalıcı kimyasalları" ifade etmektedir.

Coğrafi Bağlam: Türkiye

Türkiye'nin Avrupa ve Asya'yı birbirine bağlayan eşsiz konumu, Akdeniz, Ege, Karadeniz ve Marmara Denizi boyunca uzanan geniş kıyı şeridi, hızlı sanayileşme ve kentleşme ile birleşerek, kirlenme riski maddelerin çevre matrislerine girmesine yönelik çok sayıda yol oluşturmaktadır. Ülkenin tekstil endüstrisi, tarım sektörü, kıyı turizmi ve büyüyen kent merkezleri,

sistemik araştırma gerektiren potansiyel sorunlu alanları temsil etmektedir.

Varlığı ve Dağılımı

Türkiye'de ağır metaller, mikroplastikler, nanoplastikler ve PFAS'ın birlikte varlığına ilişkin sistemik ve çoklu kirlenme odaklı çalışmalar sınırlıdır, literatürde belgelenen küresel modeller, Türkiye'deki olası kirlenme senaryolarını anlamak için önemli bir bağlam sağlar (3):

Kentsel ve Endüstriyel Alanlar:

Kentsel merkezler, endüstriyel bölgeler ve atık su arıtma tesislerinin yakınındaki sular ve topraklar genellikle dört kirlenme sınıfının tümünde yüksek seviyelerde kirlenme göstermektedir.

Uzun Menzilli Taşınma: Atmosferik birikim, okyanus akıntıları ve trofik transfer mekanizmaları nedeniyle, el değmemiş alanlar bile etkilenebilmektedir.

Atık Su Yolları: Belediye ve endüstriyel atık sular, tüm kirlenme sınıfları için önemli bir birleşme noktasıdır.

Anne karnındaki erken gelişim sürecinde genlerin transkripsiyonunu değiştirerek çocukluk döneminde kardiyometabolik ve nörogelişimsel hasarlara yol açan PFAS tehdidi, sanayimizin kalbi olan üretim sahalarında da karşımıza çıkıyor. Avrupa'dan ithal edilen plastik atıkların geri dönüşüm süreçleri hem işçiler hem de çevre halkı için kronik riskler barındırırken, Türkiye'nin küresel pazardaki tekstil gücü bu mesleki maruziyeti çok daha kritik bir boyuta taşıyor.

Tablo 1. Ağır metaller, mikro/nanoplastikler ve PFAS için çevresel matrisler ve temsili literatür bulguları

Kirletici Sınıf	Çevresel Matrisler	Temsili Bulgular
Ağır Metaller	Su, sediment, toprak, biyota	MP'lerle birlikte bulunur; plastiğe adsorpsiyon hareketliliği ve biyoyararlanımı etkiler (4, 5)
Mikroplastikler/ Nanoplastikler	Su, sediment, toprak, hava, biyota	Her yerde yaygın olarak bulunur; metaller ve PFAS için vektör görevi görür; tespit aralıkları analiz yöntemine göre değişir (3, 6)
PFAS	Su, atık su arıtma tesisi katıları, toprak, biyota	Atık su arıtma tesisi katıları: MP'lerde 122–166 ng/g PFAS; sulu sızıntılar: deneysel sistemlerde 10,4 ng/mL'ye kadar (4, 6, 7)

Tablo 1, Türkiye'deki ortamlarda beklenebilecekler için bağlam sağlayan küresel çalışmalardan elde edilen tipik konsantrasyonları ve matrisleri özetlemektedir.

Türkiye'deki Risk Altındaki Popülasyonlar

Ülkemizdeki risk altındaki popülasyonlara bakıldığında; tüm popülasyonun risk altında olduğu düşünülebilir. Öncelikli olarak gelişim süreci devam eden çocuklar, gebeler ve mesleki maruziyetin değerlendirilmesi uygun olacaktır.

PFAS maruziyetinin erken gelişim sürecinde epigenetik mekanizmalar aracılığıyla büyüme, sinir sistemi ve metabolizmayla ilişkili genlerin transkripsiyonunu değiştirebildiği bildirilmiştir. PFAS maruziyetinin doğumsal anomaliler, düşük doğum ağırlığı, bağışıklık yanıtının zayıflaması ve çocukluk döneminde kardiyometabolik sorunlarla ilişkisi belgelenmiş; son yıllarda nörogelişimsel etkiler konusundaki kanıtlar da birikmiştir. Yapılan çalışmalar PFAS maruziyetinin bebeklik ve erken çocukluk döneminde bilişsel, motor ve dil gelişimini olumsuz etkileyebileceğini desteklemektedir (8).

Mesleki maruziyeti en kritik olarak plastik sektöründe ve geri dönüşümünde çalışan işçiler öne çıkmaktadır. Avrupa Birliğinde yer alan ve diğer ülkelerden alınan plastik atıklarının geri dönüştürülmesi hem bu işte çalışan işçiler hem de çevrede yaşayan insanlar için risk oluşturmaktadır (9). Mesleki PFAS maruziyetine ilişkin veriler oldukça sınırlı olmakla beraber tekstil, krom kaplama, kâğıt üretimi sektörleri öne çıkmaktadır. Türkiye'nin tekstil ihracatındaki payı göz önüne alındığında bu sektör özel bir önem taşımaktadır (10).

Eş Zamanlı Oluşum Kalıpları

Araştırmalar, bu kirleticilerin tek başına bulunmadığını tutarlı bir şekilde belgelemektedir (4, 11):

- **Atık Su Arıtma Sistemleri:** Mikroplastikler ve PFAS, atık su arıtma tesislerinin katı maddelerinde ve atık sularında birlikte dağılımlar göstermektedir.
- **Deniz Ortamları:** Tatlı su ve deniz besin zincirlerinde tespit edilen dört kirletici sınıfının tümü bulunmaktadır.
- **Sediment Matrisleri:** Ağır metaller ve mikroplastikler, plastik yüzeylere adsorbe olan metallerle birlikte sucül sedimentlerde sıklıkla birlikte görülür.

Kirletici Maddelerin Birbirleriyle İlişkileri

Literatür, bu kirletici maddelerin etkileşime girerek birbirlerinin etkilerini sinerjistik olarak arttırabileceğini göstermektedir (5, 12, 13). Mikroplastiklerin ağır metaller için taşıyıcı olarak davranması yüzey kompleksleşmesi, Elektrostatik çekim, İyon değişimi, Hidrojen bağı, Polimer Spesifik Davranış üzerinden gerçekleşmektedir (5). Aşınmış plastikler, artan yüzey alanı ve fonksiyonel gruplar nedeniyle daha fazla metal bağlama özelliği göstermektedir. Desorpsiyon dinamikleri, nanoplastiklerin metalleri hızla adsorbe edip daha sonra serbest bırakabileceğini ve desorpsiyon verimliliğinin metal türüne göre değiştiğini göstermektedir. Örneğin, Pb²⁺ için yaklaşık yüzde 31, Cu²⁺ için yüzde 40 ve Cd²⁺ için yüzde 97'ye kadar. Bu salım süreci, tuzluluk, pH ve partikül agregasyonu gibi çevresel faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenmektedir (3). PFAS bileşikler mikroplastik yüzeylere adsorbe olabilir ve bu adsorpsiyon, daha küçük parçacık boyutu, aşınmış polimer-

ler ve biyofilm oluşumu ile artar, PFAS taşınmasını, trofik transferi ve organizma maruziyetini değiştirir; atık su arıtma tesislerinden elde edilen kanıtlar, hem katı hem de sıvı fazlarda mikroplastiklerin ve PFAS'ın ilişkili dağılımlarını gösterir, bu da mikroplastiklerin arıtma sistemlerinde PFAS için hem kaynak hem de havuz görevi görebileceğini gösterir (4, 11). Pb²⁺, Cu²⁺ ve Zn²⁺ gibi ağır metal katyonlarının varlığı, metal konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte dağılım katsayılarının artmasıyla da görüldüğü gibi, uzun zincirli anyonik PFAS'ların toprak parçacıklarına sorpsiyonunu artırabilir; bu etki, esas olarak yük nötralizasyonu ve pH modifikasyonu tarafından yönlendirilir ve sonuçta PFAS'ların katı ve sıvı fazlar arasındaki dağılımını değiştirir (9). Plastikler, metaller ve PFAS arasındaki belgelenmiş etkileşimlerin, partikülleri yutan organizmalarda biyolojik olarak kullanılabilir kirletici yüklerinin artması, sorpsiyon ve sedimentasyonun neden olduğu kirletici hareketliliğindeki değişiklikler ve katkı maddelerinden sinerjik etkilere kadar değişen modifiye toksisite profilleri gibi kritik ekolojik etkileri vardır. Bu etkiler, mikro ve nanoplastiklerin besin ağları aracılığıyla konsantre kirleticileri taşıdığı ve kirletici türüne ve türüne bağlı olarak biyomagnifikasyonu artırabileceği trofik transfer ve biyobirikimi nihai olarak etkiler (3, 5, 11, 13).

Belgelenmiş Biyolojik Etkiler

Belgelenmiş biyolojik etkiler, mikroplastikler, metaller ve PFAS'a birden fazla maruz kalmanın, büyüme ve üreme bozukluğu, oksidatif stres, nörotoksisite, genotoksisite, bağışıklık bozukluğu ve belirgin histopatolojik değişiklikler dahil olmak üzere deneysel sistemlerde birçok olumsuz sonuca yol açabileceğini göstermektedir. Mikroplastikler ve bunlarla ilişkili kimyasallar çok çeşitli gıda maddelerinde, özellikle deniz ürünlerinde, içme suyunda ve paketlenmiş ürünlerde tespit edildiğinden, insan maruziyeti öncelikle besin alımıyla gerçekleşmektedir. Bu parçacıklar, ağır metaller ve PFAS gibi kirleticilerin plastiklerden organizmalara geçişini kolaylaştırarak besin zincirinin kirlenmesine katkıda bulunur. Küresel vaka çalışmalarından elde edilen kanıtlar, insan doku ve organlarında mikroplastiklerin ve ilgili kimyasal kalıntıların varlığını da göstermekte ve gıda kaynaklı maruz kalma yollarının insan sağlığı riskiyle olan ilgisinin giderek arttığını vurgulamaktadır (3, 11, 14).



Ortaya çıkan kanıtlar, PFAS maruziyetini embriyonik gelişim biyobelirteçlerinde değişiklikler, anne sağlığı üzerinde olumsuz etkiler, endokrin bozuklukları, bağışıklık sistemi işlev bozuklukları ve belirli PFAS bileşikleri için potansiyel kanserojenlik dahil olmak üzere birçok insan sağlığı sorunuyla ilişkilendirmiştir. Gelişmiş arıtma teknolojileri, kirlenmiş sistemlerden PFAS kütlesinin önemli bir kısmını giderebilse de, kısa zincirli PFAS genellikle kalıcıdır ve eksik mineralizasyon toksik dönüşüm ürünleri oluşturabilir, bu da giderme verimliliği ile yan ürün oluşumu arasında denge kurmanın süregelen zorluğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, plastiklere ve bunların adsorbe ettiği kirleticilere (metaller veya PFAS gibi) eşzamanlı maruz kalma, çeşitli mekanizmalar yoluyla toksisiteyi artırabilir: plastikler yüksek konsantrasyonlu kimyasal yükler taşıyabilir, gastrointestinal bariyer bütünlüğünü bozabilir, bağırsak mikrobiyomunu değiştirebilir ve çakışan hücresel stres yollarını tetikleyebilir. Bu fenomenler birlikte, eşzamanlı maruz kalma senaryolarının tek başına kirleticilerden daha büyük riskler oluşturduğunu ve hem çevre hem de insan sağlığı bağlamında kombine toksikolojik etkilerin değerlendirilmesinin acil bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. Son araştırmalar, PFAS maruziyetini embriyonik gelişim biyobelirteçlerindeki değişiklikler, anne sağlığı üzerindeki etkiler, endokrin bozuklukları, bağışıklık sistemi disfonksiyonu ve potansiyel kanserojenlik (belirli PFAS bileşikleri için) ile ilişkilendirmektedir (7).

Plastikler ve bunların adsorbe ettiği kirleticiler (ağır metaller veya PFAS gibi) ile aynı anda maruz kalmak, tek bir kirleticinin etkisinin ötesinde toksisiteyi artırabilir. Plastikler, konsantrasyon taşıyıcıları olarak işlev görebilir ve biyolojik dokulara yerel olarak yüksek dozda ilgili kimyasalları taşıyabilir. Mikro veya nanoplastik parçacıklar, sindirim sistemine girdikten sonra gastrointestinal bariyerin bütünlüğünü bozabilir ve bu kirleticilerin emilimini ve sistemik dağılımını artırabilir. Ek olarak, hem plastikler hem de adsorbe ettikleri kimyasallar bağırsak mikrobiyomunu bozarak yararlı mikrobiyal toplulukları ve ilgili metabolik veya bağışıklık fonksiyonlarını bozabilir. Hücresel düzeyde, birden fazla kirleticiye aynı anda maruz kalmak, örtüşen stres yanıt yollarını aktive ederek oksidatif ve enflamatuvar hasarı artırabilir. Bu mekanizmalar birlikte, tek tek kirleticilerden daha büyük riskler oluşturan kombine maruziyetlerin toksikolojik önemini vurgulamaktadır (5, 11).

Türkiye için Acil Eylemler

Kapsamlı bir izleme programı, Kızılırmak, Sakarya, Gediz, Büyük Menderes, Seyhan ve Ceyhan gibi büyük nehir havzaları ile Akdeniz, Ege, Karadeniz ve Marmara Denizi kıyı suları, göller, rezervuarlar ve yer altı su kaynakları dahil olmak üzere önemli çevre bölgelerinde koordineli araştırmaları birleştirmelidir. Atık su sistemleri, endüstriyel deşarj noktaları ve kombine kanalizasyon taşmalarına ek

Uluslararası kanıtlar; ağır metaller, mikro ve nanoplastikler ile PFAS'ların küresel çevre matrislerinde bir arada bulunduğunu, taşınım, biyoyararlanım ve toksisiteyi artıran şekillerde etkileşime girdiğini ve ekosistemler ile insan sağlığı için önemli riskler oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum, entegre izleme ve yönetim stratejilerini gerekli kılmaktadır. Türkiye'de bu kirleticilerin oluşumu, dağılımı veya etkilerini karakterize eden yayınlanmış sistematik çalışmalar bulunmamaktadır.

olarak, arıtma tesislerinden gelen giriş suyu, çıkış suyu ve biyolojik katı atıklar aracılığıyla da değerlendirilmelidir. Biyolojik katı atıklarla gübrelenen tarım toprakları, kentsel topraklar ve tozlar ile endüstriyel alan toprakları dahil olmak üzere karasal matrisler de bir başka önemli odak noktasıdır. Ayrıca, izleme, ticari açıdan önemli balık ve kabuklu deniz ürünleri, tarım ürünleri ve içme suyu kaynakları gibi biyota ve besin zinciri bileşenlerini de kapsamalıdır. Verilerin karşılaştırılabilirliğini ve doğruluğunu sağlamak için, analitik gereklilikler arasında C4–C14 perfloroalkil asitleri kapsayan uyumlu PFAS panelleri, polimer düzeyinde tanımlama içeren standartlaştırılmış mikroplastik protokolleri, çok elementli ağır metal analizi ve öncelikli matrisler genelinde hedeflenen nanoplastik taraması yer almalıdır.

Önerilen izleme programının etkin biçimde hayata geçirilebilmesi için kurumsal sorumlulukların net olarak tanımlanması gerekmektedir. Ulusal düzeyde koordinasyon görevi; çevre kalitesi ve endüstriyel deşarj denetimi açısından Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesindeki Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğüne, su kaynakları ve havza yönetimi açısından ise Tarım ve Orman Bakanlığı bünyesindeki

Su Yönetimi Genel Müdürlüğüne aittir. İnsan sağlığı bileşeninin planlanması ve yürütülmesi Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü'nün sorumluluk alanına girmektedir. Analitik altyapı ve metodolojik standardizasyon süreçlerinde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi teknik liderlik rolü üstlenebilir; üniversiteler ve araştırma hastaneleri ise biyoizleme çalışmaları ile sağlık etki değerlendirmelerinde zorunlu araştırma ortakları olarak programa dahil edilmelidir. Bu çok bileşenli yapının işlevsel kılınması, kurumlar arası koordinasyonun başından itibaren protokole bağlanmasını gerektirmektedir.

Etkili kaynak kontrol stratejileri, PFAS üreten veya kullanan sektörler (tekstil terbiye, elektrokaplama tesisleri, yangın söndürme köpüğü depolama alanları ve gıda ambalaj üreticileri gibi) ile plastik üretim ve işleme endüstrileri, lastik üretimi ve geri dönüşüm faaliyetleri ve atık yönetim tesisleri gibi önemli endüstriyel katkıları hedef almalıdır. Madencilik, eritme, elektrokaplama, pil üretimi ve tarım kimyasalları uygulamaları gibi ağır metal kaynakları da odaklanmış bir azaltma gerektirir. Önerilen kontroller arasında endüstriyel atıkların zorunlu ön arıtması, gereksiz PFAS kullanımlarının aşamalı

olarak kaldırılması, plastik atık toplama ve yönetiminin iyileştirilmesi ve metal ile ilgili endüstrilerde mevcut en iyi teknolojilerin benimsenmesi yer almaktadır. Atık su arıtma iyileştirmeleri, PFAS, mikroplastikler ve metallerin biriktiği biyolojik katıların daha sıkı yönetiminin yanı sıra, gelişmiş fiziksel-kimyasal süreçleri (örneğin aktif karbon adsorpsiyonu, membran filtrasyonu, pıhtılaşma-flokülasyon), gelişmiş oksidasyon teknolojilerini ve membran biyoreaktörleri veya hedefe yönelik biyolojik güçlendirme gibi gelişmiş biyolojik sistemleri entegre etmelidir (7, 15, 16).

Biyokömür bazı sorbentler, metal-organik çerçeveler, yeşil sentezlenmiş nanopartiküller ve gelişmiş adsorbanlara sahip yapay sulak alanlar gibi entegre yaklaşımlar, çoklu kirlenici maddelerin giderilmesi için umut verici seçenekler sunmaktadır, ancak Türkiye'nin iklim koşulları altında saha doğrulaması gerekmektedir. Ulusal araştırma eksikliklerinin giderilmesi için tüm matrislerde standartlaştırılmış numune alma protokolleri, kapsamlı kirlilik haritalama, gerçekçi konsantrasyonlar ve Türk türleri kullanılarak yapılan karışım ekotoksikoloji çalışmaları, tatlı su ve deniz sistemlerinde trofik transfer analizi ve biyomagnifikasyon değerlendirmeleri



Resim 2. Türkiye riskli havzalar
(ChatGPT 5 ile tasarlanmıştır.)

ÖNCELİK 1 (Acil / 1-2 yıl) 1. Ülke çapında temel durum araştırması 2. Analitik kapasite geliştirme 3. Riskli bölgelerin belirlenmesi ve ön risk değerlendirme	ÖNCELİK 2 (Kısa vadeli / 2-4 yıl) 1. İnsan biyomonitörleme programı oluşturulması 2. Kaynak belirleme ve karakterizasyon 3. Arıtma teknolojisi pilot çalışmaları 4. Düzenleyici çerçeve geliştirme	ÖNCELİK 3 (Orta vadeli / 4-7 yıl) 1. Kapsamlı ekotoksikoloji programı 2. Uzun vadeli izleme ağları 3. İyileştirme teknolojisi uygulaması 4. Sağlık sonuçları çalışmaları
---	---	---

Şekil 1. Önerilen araştırma öncelikleri (Sıralı)

gerekecektir. Analitik kapasitenin genişletilmesi de önemlidir; buna PFAS için LC-MS/MS tesisleri, polimer tanımlama için FTIR/Raman, metaller için ICP-MS ve yeni nanoplastik tespit araçları dahildir ve bunlar yöntem doğrulama, hızlı tarama teknolojileri ve eğitim programları ile desteklenmelidir. Son olarak, düzenleyici araştırmalar AB standartlarıyla uyumu değerlendirmeli, ileri arıtma teknolojilerinin uygulanabilirliğini değerlendirmeli, biyokatıların yeniden kullanımı için kirlenici sınırları belirlemeli, plastik atık politikasını ve genişletilmiş üretici sorumluluğunu güçlendirmeli ve ulusal envanter, temel kullanım belirlemesi ve kısıtlamalar için zaman çizelgeleri içeren aşamalı bir PFAS eliminasyon stratejisi geliştirmelidir (Şekil 1) (5, 11, 12, 15, 16).

Sonuçlar

Uluslararası kanıtlar, ağır metaller, mikro ve nanoplastikler ile PFAS'ların küresel çevre matrislerinde bir arada bulunduğunu, taşınım, biyoyararlanım ve toksisiteyi artıran şekillerde etkileşime girdiğini ve ekosistemler ile insan sağlığı için önemli riskler oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum, entegre izleme ve yönetim stratejilerini gerekli kılmaktadır. Dünya çapında kapsamlı araştırmalara rağmen, Türkiye'de bu kirlenicilerin oluşumu, dağılımı veya etkilerini karakterize eden yayınlanmış sistematik çalışmalar bulunmamaktadır. Bu durum, risk değerlendirmesi, düzenleyici karar alma, iyileştirme önceliklendirme ve halk sağlığının korunmasını zayıflatan kritik bir bilgi boşluğu yaratmaktadır. Kirlenici sınıfları arasında belgelenmiş sinerjik etkileşimler, tek bir kirleniciye odaklanan izleme çabalarının yetersiz olduğunu, arıtma ve risk değerlendirme çerçevelerinin eşzamanlı maruz kalma senaryolarını dikkate alması gerektiğini ve araştırma programlarının birleşik toksikolojik etkileri değerlendirmesi gerektiğini göstermektedir. Dört kirlenici grubunun tümünü tespit etmek için yerleşik analitik metodolojiler mevcut olsa da, Türkiye'de standartlaştırma, kapasite geliştirme ve nanoplastik tespiti ve hedef dışı PFAS taraması gibi yeni tekniklerin uygulanması acilen gereklidir. Gıda zinciri kirliliği, içme suyu kirliliği, mesleki maruziyet, çevresel adalet endişeleri ve savunmasız nüfuslar üzerindeki etkiler dâhil olmak üzere küresel olarak tanınan maruziyet yolları, insan sağlığına yönelik doğrudan tehditleri vurgulamaktadır.

Türkiye'de hızlı sanayileşme, PFAS ve mikroplastiklerin önemli bir kaynağı olan büyük tekstil sektörü, hassas kıyı ekosistemleri, topraktan gıdaya geçiş potansiyeli olan yoğun tarım, atık su baskısını artıran nüfus artışı, turizme bağımlı kıyı suyu kalitesi ve Avrupa Birliği çevre standartlarına uyum için veri ihtiyacı gibi birçok ulusal koşul, acil eylem gerekliliğini artırmaktadır.

Kaynaklar

- 1) Chain EPoCitF, S+chrenk D, Bignami M, Bodin L, Chipman JK, Del Mazo J, et al. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA J.* 2020;18(9):e06223.
- 2) DeLuca NM, Minucci JM, Mullikin A, Slover R, Cohen Hubal EA. Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. *Environ Int.* 2022;162:107149.
- 3) Boahen E, Owusu L, Adjei-Anim SO. A comprehensive review of emerging environmental contaminants of global concern. *Discov Environ.* 2025;3(1).
- 4) Islam MS, Kekre KM, Shah TA, Tsai PC, Ponnusamy VK, Andaluri G. Unraveling the complexities of microplastics and PFAS synergy to foster sustainable environmental remediation and ecosystem protection: A critical review with novel insights. *J Hazard Mater Adv.* 2025;17.
- 5) Ma M, Coulon F, Tang ZW, Hu ZY, Bi Y, Huo MX, et al. Unveiling the Truth of Interactions between Microplastics and Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Wastewater Treatment Plants: Microplastics as a Carrier of PFASs and Beyond. *Environ Sci Technol.* 2025;59(4):2211-21.

6) Prasath AR, Sudhakar C, Selvam K. Microplastics in the environment: Types, sources, and impact on human and aquatic systems. *Bioresour Tech Rep.* 2025;29.

7) Fenton SE, Ducatman A, Boobis A, DeWitt JC, Lau C, Ng C, et al. Per- and Polyfluoroalkyl Substance Toxicity and Human Health Review: Current State of Knowledge and Strategies for Informing Future Research. *Environ Toxicol Chem.* 2021;40(3):606-30.

8) Ames JL, Sharma V, Lyall K. Effects of Early-Life PFAS Exposure on Child Neurodevelopment: A Review of the Evidence and Research Gaps. *Curr Environ Health Rep.* 2025;12(1):9.

9) 'It's As If They're Poisoning Us' The Health Impacts of Plastic Recycling in Turkey <https://www.hrw.org/report/2022/09/21/its-if-theyre-poisoning-us/health-impacts-plastic-recycling-turkey>.

10) Lucas K, Gaines LG, Paris-Davila T, Nylander-French LA. Occupational Exposure and Serum Levels of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): A Review. *Am J Ind Med.* 2023;66(5):379-92.

11) Junaid M, Liu SL, Yue Q, Wei MC, Wang J. Trophic transfer and interfacial impacts of micro(nano) plastics and per-and polyfluoroalkyl substances in the environment. *J Hazard Mater.* 2024;465.

12) Alsadik A, Akintunde OO, Habibi HR, Achari G. PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. *Environ Syst Res.* 2025;14(1).

13) Bhavya G, Belorkar SA, Mythili R, Geetha N, Shetty HS, Udikeri SS, et al. Remediation of emerging environmental pollutants: A review based on advances in the uses of eco-friendly biofabricated nanomaterials. *Chemosphere.* 2021;275:129975.

14) Adeleye AT, Bahar MM, Megharaj M, Fang C, Rahman MM. The Unseen Threat of the Synergistic Effects of Microplastics and Heavy Metals in Aquatic Environments: A Critical Review. *Curr Pollut Rep.* 2024;10(3):478-97.

15) Dong ZT, Ji GW, Wang FY, Wang FH. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Current prevalence, regulatory frameworks, and safe drinking water guidelines in the United States. *J Environ Chem Eng.* 2025;13(5).

16) Zahmatkesh S, Bokhari A, Karimian M, Zahra MMA, Sillanpaa M, Panchal H, et al. A comprehensive review of various approaches for treatment of tertiary wastewater with emerging contaminants: what do we know? *Environ Monit Assess.* 2022;194(12):884.