TERCİHE
%25
BAŞARI
İNDİRİMİ

Yarının Başladığı Yer

444 20 10 | ankaramedipol.edu.tr

MEDİPOL
UNV-ANKARA
ANKARA MEDİPOL ÜNİVERSİTESİ

Hocaların Hocasının Ardından

Prof. Dr. Osman Erol Hayran'ın Aziz Hatırasına

Bu sayfayı hüzünle fakat derin bir şükran ve hürmetle yazıyoruz. Dergimizin kuruluşundan bu yana bir mektep olma idealimize gönülden destek veren, SD Platform'un en velût kalemi, "hocaların hocası" Prof. Dr. Osman Erol Hayran fani dünyadan ebediyete göç etti.

Aramızdan ayrılan yalnızca bir akademisyen değil; bir geleneğin, bir duruşun, bir mektebin ta kendisidir. Hacettepe'de başlayan, Dünya Sağlık Örgütünün Ankara Ofisinden geçen, Marmara'da kurucu dekanlıkla taçlanan, Yeditepe'de ve nihayet İstanbul Medipol'de süren ilim yolculuğu, aynı zamanda bu ülkede halk sağlığının ve sağlık yönetiminin kurumsallaşmasının da hikâyesidir. Epidemiyolojinin ve biyoistatistiğin çetin yöntem bilgisini sade ve duru bir Türkçeyle nesillere aktardı; kaleme aldığı Sağlık Bilimlerinde Araştırma ve İstatistik Yöntemleri ile Güncel Epidemiyoloji, bugün hâlâ genç araştırmacıların başucundadır. Onu bizzat tanımadan, yetiştirdiği öğrencilerin tanıklıklarıyla sevenlerimiz çoktu; tanıdıkça anladık ki duyduklarımız, o derinliğin yalnızca yüzeyiymiş. Bir ön sözüne nakşettiği "En iyi, iyinin düşmanıdır." düsturu hem bilim anlayışının hem tevazusunun özeti gibiydi.

COVID-19 günlerinde ülkemizin epidemiyoloji bilimine ihtiyacı bütün çıplaklığıyla ortaya çıktığında, yaşına bakmadan büyük bir şevkle lisansüstü programın kuruluşuna öncülük etti; son nefesine dek genç halk sağlığı uzmanları ve epidemiyologlar yetiştirdi.

Ama onu çağdaşlarından ayıran, asıl mirası, tıbba bakışındaki derinlikti. Hekimliği salt bilgi ve teknik beceriye indirgemedi; insanı, toplumu ve vicdanı merkeze alan bir irfan nazarıyla baktı mesleğine. Fikir sahibi olmadan önce bilgi sahibi olmayı önceledi. İnsanı sevmeyi, kanıt yerine kanaate dayalı kararlar vermemeyi, öz saygı yerine öz güven peşinde koşmamayı öğütledi öğrencileri olan hekim adaylarına.

Bilimsel çerçevede eleştiriye açıktı ancak düşüncesini özgürce ifade etmesine müdahaleye tepki vermekten çekinmezdi. Doğru bildiğini söyler, kendi görüşüne aykırı da olsa, başkalarının doğru bildiğini söylemesini savunurdu. İnsanların düşüncesinden, kıyafetinden ayrımcılığa tabi tutulduğu, eğitim hakkının elinden alındığı akademinin ayıplı yıllarında o hep özgürlükten yana tavır koydu.

Sağlığı temel bir insan hakkı bildi; sağlıktaki eşitsizliklerin tesadüf değil, önlenebilir bir adaletsizlik olduğunu yorulmadan hatırlattı. Hayatın tıplaştırıldığı, tıbbın metalaştığı bir çağda haysiyetli duruşundan hiç taviz vermedi; en olumsuz şartlarda bilim insanı vakarıyla susmamayı seçti. Bu derginin sayfalarına emanet ettiği her yazı, bilimle irfanın buluştuğu birer köşe taşı olarak elinizde duruyor.

Ağırbaşlı bilgeliğinin yanında, kendisiyle ironi yapabilen ince bir mizahı, mütevazı bir kişiliği ve sıcak bir yüreği vardı. Geride binlerce öğrenci, onlarca bilim insanı, sayısız eser ve hepsinden kıymetlisi bir duruş bıraktı.

Bizlere düşen, en güzel vefayı göstermektir: Öğrettiği yöntemi titizlikle uygulamak, savunduğu hakkaniyeti sağlıkta gözetmek ve merkeze daima insanı koymak. Tamamlamaya ömrünün vefa etmediği eserleri ise emaneti devralan öğrencilerinin elinde yaşamaya devam edecek.

Aziz hocamıza Allah'tan rahmet ve mağfiret diliyoruz. Ruhu şâd, mekânı cennet olsun.

Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi

SD

2025 / 2
SAYI: 68
ISSN: 1307-2358

TÜRKİYE EĞİTİM, SAĞLIK VE ARAŞTIRMA VAKFI (TESA) ADINA SAHİBİ
Dr. Fahrettin Koca

SORUMLU YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ
Prof. Dr. Naci Karacaoğlan

EDİTÖR
Prof. Dr. Recep Öztürk

YAYIN KURULU
Prof. Dr. Mustafa Altındiş
Prof. Dr. Yüksel Altuntaş
Prof. Dr. Ayşegül Çopur Çiçek
Prof. Dr. Lütfü Hanoğlu
Prof. Dr. Fahri Ovalı
Prof. Dr. Hanefi Özbek
Prof. Dr. Gürkan Öztürk
Prof. Dr. Haydar Sur
Prof. Dr. Muzaffer Şeker
Prof. Dr. Mustafa Taşdemir
Prof. Dr. Türkan Yiğitbaşı
Doç. Dr. Ömer Ataç
Doç. Dr. İlker Köse
Doç. Dr. Volkan Kara
Doç. Dr. Ahmet Murt
Dr. Bülent Özaltay
Dr. Öğr. Üye. Ayşe Güliz Dirimen Arıkan
Dr. Öğr. Üye. Duygu İlhan
Dr. Öğr. Üye. Ayşe Seval Palteki
Dr. Öğr. Üye. Salih Kenan Şahin
Dr. Öğr. Üye. Mahmut Tokaç
Dr. Öğr. Üye. Ayşe Nur Balcı Yapalak
* Soy isimlere göre alfabetik sırayla

YAYIN KOORDİNATÖRÜ
Emel Murtezaoğlu

GRAFİK TASARIM
Sertan Vural

YAPIM
M Pozitif

YÖNETİM ADRESİ
Koşuyolu Mah. Alidede Sk. Demirli Sitesi
A Blok No: 7 / 3 Kadıköy–İstanbul
Tel: 444 85 44 - 1540

BASKI
Rumi Matbaa Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi
Maltepe Mah. Fazılpaşa Cad. No: 8/B
Zeytinburnu / İstanbul
info@rumimatbaa.com
Sertifika No: 51196

YAYIN TÜRÜ
Ulusal Süreli Yayın
SD'ye gönderilen makaleler, alıntı tespit programı ithenticate'te tarandıktan sonra kabul edilmektedir. Yazıların içeriğinden yazarları sorumludur. Tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında, yayımcının yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

WEB
www.sdplatform.com

E-POSTA
bilgi@sdplatform.com

Sevgili okurlar,

Tıbbın sağlık arayışına odaklı teknik bir alan olmanın ötesinde, kadim bir sanat ve köklü bir felsefi duruş olduğunu hatırlatmak isteriz. İnsanla birlikte var olmuştur; odağında sadece ve sadece her yönüyle insan vardır. Bu sayımızda, insanı salt biyolojik bir varlık değil, kültürel ve manevi bir özne olarak gören yayın politikamız doğrultusunda sesimizi yükseltmek ve varoluşumuzu tehdit eden sinsi bir sessizliği bozmak istiyoruz. Bilginin âdeta dijital bir gürültünün gölgesine sığındığı, hakikatin ise veri yığınları arasında nefes almada zorlandığı bir çağda imdat sirenini çalıyoruz. Sorumluluğumuzun bilinciyle birikimimiz çerçevesinde sesimizi yükseltiyor, uyarımızı yapıyoruz.

İnsanoğlunun değer yoksunu modern endüstri eliyle ürettiği ve kendi hücresel hafızasına bıraktığı en tehlikeli miraslardan birine ışık tutuyoruz. Mutfak, tekstil, kozmetik gıda ambalajları ve yangın köpükleri gibi aklımıza gelebilen daha birçok alanda rol alıp her biri günlük hayatımızda yer edinen binlerce insan yapımı kimyasaldan söz ediyoruz. Nesiller doğup yaşayıp bu dünyayı terk ederken bu kimyasallar karbon ve flor bağları nedeniyle doğada parçalanmıyor ve nesilden nesile birikerek aktarılmaya devam ediyor. Büyük tehlike arz eden bu kimyasallar ile sadece kendi sağlığımıza kast etmiyor, gelecek nesillerimizin de sağlık hakkına tecavüz ediyoruz.

Bu sayımızın omurgasını dünya durdukça var olmaya devam eden ve bu yüzden "sonsuz kimyasallar" denen per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS) ve bunların sağlığa etkilerini konu edinen "Çevre Sağlığı ve PFAS" başlıklı dosyamız teşkil ediyor. İnsanoğlunun bu tehlikeli mirasına mercek tutmak üzere hazırlanan dosya, editörlüğünü üstlenen Prof. Dr. Recep Öztürk ve Doç. Dr. Emrah Eroğlu hocalarımızın bilim adamı birikimi, insani hassasiyeti ve vizyoner liderliği sayesinde, salt bir laboratuvar çıktısı ve üretim kalemi olmaktan çıkarılarak düşünsel emeği yoğun disiplinler arası bir manifestoya dönüştürülmüştür.

Dosyanın felsefi zeminini, 1940'larda bir "mucize" olarak kutsanan karbon-flor bağının, bugün nasıl bir "moleküler istila" hâline geldiği gerçeği oluşturmaktadır. Yaklaşık 485 kJ/mol gibi olağanüstü bir enerjiyle kenetlenen bu bağlar, PFAS bileşiklerini doğada parçalanamayan "sonsuz kimyasallar" kılmış; onları Antarktika'nın buzullarından anne sütüne, yenidoğan kordon kanından içme sularına kadar her noktada karşımıza çıkan küresel bir risk odağı hâline getirmiştir. Uzman yazarlarımız, mikroplastiklerin ağır metallerle girdiği sinerjik etkileşimler ve bu parçacıkların gastrointestinal bariyeri aşarak dokulara nüfuz etmesi, immünotoksisiteden kanserojen etkilere kadar geniş bir yelpazede konuyu irdelemektedir. Özellikle ülkemizin sanayi havzalarındaki kontaminasyon haritaları ve yer altı suyu riskleri göz önüne alındığında, "Tek Sağlık" yaklaşımının bir tercih olmaktan öte, ne denli varoluşsal bir mecburiyet olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Meseleye inanç dünyamız açısından yaklaşan yazılarımızla, çevreyi bir "emanet" olarak gören ve israfı "kul hakkı" ihlali olarak değerlendiren ahlaki duruşu hatırlatıyoruz. Diğer taraftan modern analitik ve biyosensör teknolojileriyle "Bu maruziyet hücrede neye yol açıyor?" sorusuna mekanistik cevaplar arıyoruz. Nihayetinde "kirleten öder" ilkesinin ötesinde, "kirletmeme" iradesini bir kamu sağlığı savunusu olarak konumlandırma çabasındayız.

Dosya dışı yazılarımızda ise hekimliğin o kadim "şifa sanatı" ile modern tekniğin "mekanikleşme" sancıları arasındaki gerilimi yönetmeye gayret ediyoruz. ERAS protokollerinin multimodal iyileşme felsefesinden mikrobiyota çağının getirdiği "sistem biyolojisi" paradigmasına; yapay zekânın tıp eğitimindeki kişiselleştirilmiş öğrenme analitiğinden biyolojik afetlerde yoğun bakımın üstlendiği kritik role kadar geniş bir düşünce atlası sunuyoruz. Nurettin Topçu'nun tefekküründe vücut bulan "ruh amelesi" nitelemesi üzerinden hekimliğin bir "sefer şuuru" olarak yeniden inşasını önerirken, modern tıbbın otoyollarında "zafer ihtirasına" kapılmayan bir vicdanın pusulasını arıyoruz. Sosyal medyanın dayattığı kusursuz yaşam imajlarının yarattığı "sağlıklı yaşam anksiyetesi" ile modern insanın iç dünyasındaki yabancılaşmayı teşhis ediyor; Molière'den Ahmet Vefik Paşa'ya uzanan "Zoraki Tabip" analizimizle ise tıp otoritesinin cehalet ve istismar ile girdiği tarihsel sınavı sahneye taşıyoruz.

Yayın Kurulu olarak temennimiz, 68. sayımızdaki bu zengin birikimin okurlarımızda yalnızca bir farkındalık değil, aynı zamanda etik bir sorgulama ve eylem bilinci uyandırmasıdır. Bilginin hikmete, pratiğin kültüre dönüştüğü, her dokunuşun bir insani değer taşıdığı sağlıklı ve dingin günlerde buluşmayı diliyoruz.

Sağlık ve afiyet dileklerimizle.

68
PFAS VE İMMÜN SİSTEM: İMMÜNOTOKSİSİTE MEKANİZMALARI, AŞIYA CEVAPSIZLIK VE ENFEKSİYONLARA YATKINLIK
PROF. DR. RECEP ÖZTÜRK

76
PFAS'IN ENDOKRİN VE METABOLİK İZLERİ: KAN ŞEKERİ, TİROİD, LİPİDLER VE OBEZİTE
DOÇ. DR. MUHAMMED MASUM CANAT
PROF. DR. YÜKSEL ALTUNTAŞ

82
PFAS VE MALİGNİTELER: TÜRKİYE'DEN KÜRESEL PERSPEKTİFE GÖRÜNMEZ TEHLİKE
DOÇ. DR. YASİN KUTLU

86
MİKRO/NANOPLASTİK TESPİT TEKNOLOJİLERİ VE HALK SAĞLIĞI RİSKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ
PROF. DR. GÜLEDA ENGİN

90
MİKROPLASTİKLER VE NANOPLASTİKLER – MARUZİYET YOLLARI, ÖLÇÜM ZORLUKLARI VE HALK SAĞLIĞI ETKİLERİ
PROF. DR. SEDAT GÜNDOĞDU

96
PFAS VAR AMA NE ANLAMA GELİYOR? KİMYASAL TESPİTTEN BİYOLOJİK ETKİYE
DOÇ. DR. EMRAH EROĞLU

100
ÇOCUKLAR VE PESTİSİT MARUZİYETİ: NE BİLİYORUZ VE NE YAPABİLİRİZ?
PROF. DR. BURCU TOKUÇ
DR. M. BERFU TOKUÇ ÜLGEN

108
ÇEVRE ADALETİ: DEZAVANTAJLI BÖLGELERDEKİ ÇEVRESEL SAĞLIK RİSKLERİ
DR. HURİYE ÇOBAN
DOÇ. DR. MELİKE YAVUZ

114
YÜZEY VE YER ALTI SU KAYNAKLARI KİRLENMESİ İLE ÇEVRE ŞARTLARINA GÖRE SUYUN ETKİLERİ
ZEKÂİ ŞEN

120
ÇEVRE SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİ: TÜRKİYE'NİN MEVCUT DURUMU VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ
DR. A. ALP AKER

128
SU VE ATIK SULARDAN PFAS GİDERİMİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR
DR. ÖYKÜ MUTLU SALMANLI
DOÇ. DR. KÜBRA ULUCAN ALTUNTAŞ
DR. AYŞEGÜL DERYA ALTINAY
TUĞÇE AKÇA
PROF. DR. İSMAİL KOYUNCU

136
PFAS: TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK BİR ÇEVRE VE HALK SAĞLIĞI TEHDİDİ, AB MEVZUATI VE GELECEK PROJEKSİYONU
DR. BARAN BOZOĞLU

138
PROF. DR. ERSİ KALFOĞLU: PFAS ÇOK TEHLİKELİ BİR ZEHİR; BU GÖRÜNMEZ İSTİLA KARŞISINDA HİÇBİRİMİZ GÜVENDE DEĞİLİZ

146
NURETTİN TOPÇU DÜŞÜNCESİNİN TIP VE SAĞLIK ALANINA YANSIMALARI
PROF. DR. RECEP ÖZTÜRK

156
TIP EĞİTİMİNDE DİJİTALLEŞME VE YAPAY ZEKÂ
DOÇ. DR. AHMET MURT

160
"ERAS"IN BİLİMSEL KANITLARI: NEDİR, NE DEĞİLDİR, KİŞİSELLEŞTİRME GEREKLİ Mİ?
PROF. DR. SERDAR EPÖZDEMİR

164
KİMYASAL VE BİYOLOJİK AFETLERDE YÖNETİM: YOĞUN BAKIM PERSPEKTİFİ
PROF. DR. SERDAR EPÖZDEMİR

168
MİKROBİYOTA ÇAĞI VE FONKSİYONEL TIBBIN YÜKSELİŞİ: SAĞLIK SİSTEMİNİN SESSİZ DEVRİMİ
PROF. DR. MUSTAFA ALTINDİŞ

174
SAĞLIKLI YAŞAM ANKSİYETESİ
PROF. DR. MUSTAFA ALTINDİŞ

178
ISI DALGALARINDAN VEKTÖR KAYNAKLI SALGINLARA: TÜRKİYE'NİN SAĞLIK CEPHESİNDE DURUMU
DOÇ. DR. OKAN DERİN

182
MOLİÈRE'DEN AHMET VEFİK PAŞA'YA ZORAKİ TABİP
ZÜLEYHA ABDÜLBAKİOĞLU

184
KARİKATÜR

Görünmez istila: PFAS'ın tıbbi, çevresel ve yeni nesil toksisite değerlendirmesi açısından önemi

Doç. Dr. Emrah Eroğlu

İstanbul Medipol Üniversitesinde SABİTA'nın müdürü olarak görev yapmaktadır. Araştırmaları; genetik olarak kodlanmış biyosensörler, redoks biyolojisi, oksidatif stres ve hücre içi sinyal dinamiklerinin gerçek zamanlı izlenmesi üzerine odaklanmaktadır. İnsanla ilişkili, hayvan kullanımı içermeyen deneysel platformların geliştirilmesi temel çalışma alanları arasındadır. Bu kapsamda, Türkiye'de SABİTA bünyesinde ilk NAM (New Approach Methodologies) merkezinin kurulmasına öncülük etmekte, aynı zamanda Türkiye'nin ilk 3R merkezinin kurulması yönünde çalışmalar yürütmektedir. Ayrıca, transgenik hayvan teknolojilerinin geliştirilmesi amacıyla SABİTA bünyesinde yeni araştırma ve altyapı çalışmaları başlatmıştır. Deney hayvanı kullanılmadan ilaç tarama sistemleri geliştirmekte ve bu alanda SABİTA'da bir referans laboratuvarı kurulmasına yönelik çalışmalarını sürdürmektedir. Bunun yanında, kişiselleştirilmiş tıp alanında klinikle entegre ortak SABİTA'da bir birimin kurulması için çalışmalar yürütmektedir. PFAS ve diğer kalıcı çevresel kirleticilerin hücresel etkilerinin fonksiyonel olarak değerlendirilmesine yönelik yenilikçi test sistemleri geliştirmekte; analitik kimya, ileri görüntüleme teknikleri ve yapay zekâ destekli veri analizini bütünleştiren disiplinler arası çalışmalarıyla tanınmaktadır. Ulusal ve uluslararası araştırma projelerinde aktif rol almakta, translasyonel araştırma ve teknoloji transferine güçlü katkılar sunmaktadır. Ayrıca 3R ilkeleriyle uyumlu yeni nesil tarama, risk önceliklendirme ve karar destek platformlarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması yönünde öncü çalışmalar yürütmektedir.

Prof. Dr. Recep Öztürk

1962 yılında Rize İkizdere'de doğdu. Tulumpınar Köyü Mehmet Akif İlkokulu, İkizdere Ortaokulu, Rize Lisesini bitirdi. İstanbul Üniversitesi (İ.Ü.) Cerrahpaşa Tıp Fakültesinden 1984 yılında mezun oldu. Enfeksiyon hastalıkları ve klinik mikrobiyoloji uzmanlığını İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde yaptı. 1994'te doçent, 2000'de profesör oldu. İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Öğretim Üyeliğinden 2016'da emekli oldu. 2009-2013'te Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Üyeliği, 2011-2015'te Tıpta Uzmanlık Kurulu (TUK) üyeliği ve başkan vekilliği yaptı. Sağlık Bakanlığı Ulusal Enfeksiyon Önleme ve Kontrol Kurulu ile Bağışıklama Danışma Kurulu, Grip Bilim Kurulu ve Koronavirüs Bilim Kurulu üyesidir. Öncelikli uğraş alanları hastane enfeksiyonları, enfeksiyöz ishaller, enfeksiyon hastalıkları laboratuvar tanısı ile yükseköğretimde kalite ve akreditasyondur. Dr. Öztürk, hâlen İstanbul Medipol Üniversitesi Rektör Yardımcısı, Üniversite Kalite Koordinatörü, Tıp Fakültesi Enfeksiyon Hastalıkları ve Klinik Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalı Başkanıdır.

1. Giriş ve Tarihsel Perspektif

PFAS ailesi, 1940'larda floropolimer üretiminde, yüzey kaplamalarında ve sürfaktan uygulamalarında kullanılmaya başlanan ve geniş bir yapısal heterojenliğe sahip sentetik kimyasallardan oluşur (1, 2). Su, yağ ve lekeye dirençli özellikleri nedeniyle yapışmaz pişirme kapları, gıda ambalajı, halı ve tekstil, yangın söndürme köpükleri (AFFF), kişisel bakım ürünleri, elektronik ve inşaat malzemelerinde yaygın olarak kullanılmıştır (1, 3). Aynı özellikler PFAS'ın çevresel kalıcılığının da temelidir; literatürde "sonsuz kimyasallar" (forever chemicals) ifadesi tam olarak bu kalıcılığa atıfta bulunur. PFAS sorununun günümüzdeki önemi yalnızca bu maddelerin çevrede kalıcı olmasıyla sınırlı değildir. Asıl kritik nokta, düşük doz ve kronik maruziyetlerin insan hücrelerinde bağışıklık, endokrin, metabolik ve vasküler fonksiyonlar üzerinde ölçülmesi zor fakat biyolojik olarak anlamlı değişiklikler oluşturabilmesidir. Bu nedenle PFAS araştırmaları artık klasik analitik kimya ve epidemiyoloji çerçevesinin ötesine geçmekte; insan hücrelerine dayalı, mekanistik, canlı, fonksiyonel ve deney hayvanı kullanımını azaltan ya da ortadan kaldıran test sistemlerine ihtiyaç duymaktadır.

2. Kimyasal Yapı: C–F Bağı ve Çevresel Kalıcılık

PFAS bileşiklerinin merkezinde, organik kimyada bilinen en güçlü kovalent bağlardan biri olan C–F bağı yer alır; bağ enerjisi yaklaşık 485 kJ/mol düzeyindedir (2). Bu kararlılık; biyolojik, kimyasal ve termal parçalanmaya karşı olağanüstü direnç sağlar.

PFAS bileşiklerinin toplam sayısı, kullanılan kimyasal tanıma bağlı olarak farklılık gösterir: OECD'nin 2018 tanımına göre yaklaşık 4.730 madde tanımlanmışken, ABD Çevre Koruma Ajansının (EPA) daha kapsayıcı CompTox Chemicals Dashboard listesi 12.000'in üzerinde bileşik içermektedir (1). Atmosferik taşınım ve hidrolojik döngü aracılığıyla Antarktika buzulları ve uzak okyanus alanlarında dahi tespit edilmiş olmaları, küresel ölçekli bir kontaminasyonun varlığını ortaya koymaktadır (2, 3).

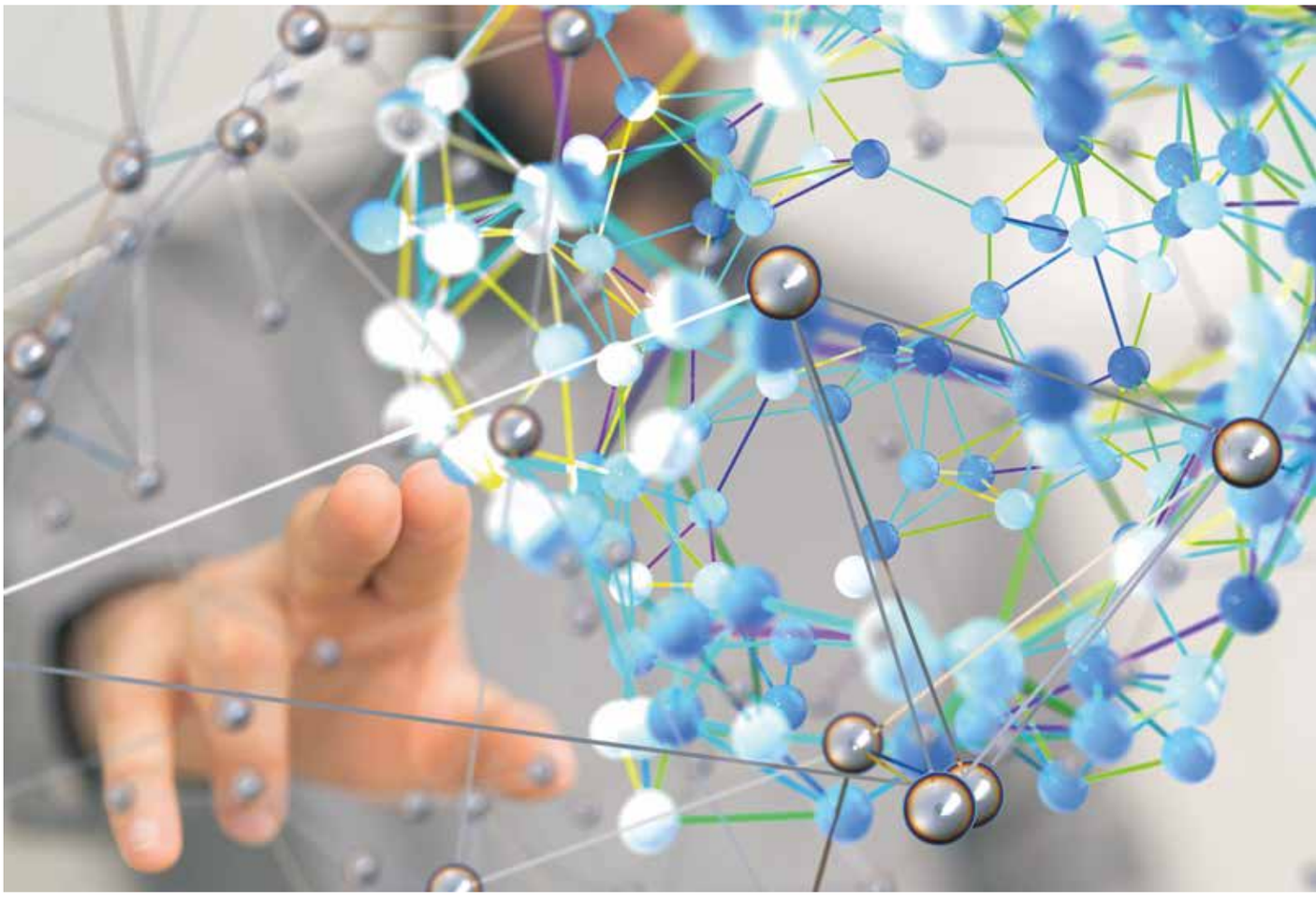
Karbon zincir uzunluğuna göre PFAS bileşikleri "uzun zincirli" (PFOA, PFOS gibi) ve "kısa zincirli alternatifler" (HFPO-DA/GenX, PFBS, PFHxA gibi) olarak ayrılır. Üretici endüstri uzun zincirli bileşikleri kademeli olarak terk etmiş, kısa zincirli alternatiflere yönelmiştir; ancak bu alternatiflerin de benzer çevresel kalıcılık ve potansiyel toksisite gösterdiğine dair veriler artmaktadır (2).

3. Maruziyet Yolları

İnsan maruziyeti çok yönlüdür ve baskın yol popülasyona özgüdür:

- **İçme suyu:** Konvansiyonel arıtma yöntemleri (koagülasyon, klorlama) PFAS giderimi için etkin değildir; granüler aktif karbon (GAC), iyon değişim reçineleri ve ters ozmoz başlıca etkili yöntemlerdir (1, 4).
- **Gıda ve ambalaj:** Yağlı ve sıcak gıdaların PFAS içeren karton/kâğıt ambalajlardan migrasyonla kontamine olduğu, yapışmaz pişirme kaplarının da bir geçiş kaynağı olabileceği gösterilmiştir. EFSA'nın 2020 görüşüne göre balık eti, meyve ürünleri ve yumurta, Avrupa popülasyonunda PFAS maruziyetine en çok katkıda bulunan gıda kategorileridir (5).
- **Biyobirikim ve biyomagnifikasyon:** PFOS ve uzun zincirli karboksilatlar besin zincirinde yukarı doğru zenginleşir (2).
- **İç ortam tozu ve tüketici ürünleri:** Leke tutmayan tekstil, mobilya ve kozmetikler kronik düşük doz inhalasyon ve dermal maruziyetin kaynaklarıdır (1).
- **Anneden çocuğa transfer:** Plasental geçiş ve laktasyon ile bebek serum PFAS yükü hızla yetişkin düzeylerine yaklaşabilir; bu nedenle gebelik ve erken çocukluk dönemi kritik bir maruziyet penceresi oluşturur (6, 7).

Mutfak gereçlerinden içme suyuna, kozmetikten anne sütüne kadar günlük yaşamın görünmez bir parçasına dönüşen PFAS kimyasalları, yalnızca çevrede kalmıyor; insan bedeninde de yıllarca birikiyor. "Sonsuz kimyasallar" olarak anılan bu maddeler bağışıklık sistemi, hormon dengesi, çocuk gelişimi ve kanser riski üzerindeki etkileri nedeniyle artık küresel halk sağlığı sorunu olarak görülüyor. Düşük dozda ve uzun süreli maruziyetlerin hücre düzeyinde oluşturduğu etkiler ise klasik toksikoloji yaklaşımlarının ötesinde yeni değerlendirme yöntemlerini zorunlu hâle getiriyor.



PFAS maruziyeti çoğu zaman sessiz ilerliyor: düşük doz, uzun süre ve fark edilmeden… Ancak bu görünmez maruziyet; aşı yanıtının zayıflamasından metabolik bozukluklara, nörogelişimsel etkilerden kanser riskine kadar geniş bir biyolojik tabloyla ilişkilendiriliyor. Son yıllarda geliştirilen biyosensör tabanlı canlı hücre sistemleri ise PFAS'ın insan biyolojisi üzerindeki etkilerini gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılıyor. Çevre, klinik tıp ve yeni nesil toksisite araştırmaları artık aynı ortak soruda buluşuyor: Bu görünmez kimyasallar insan sağlığını nasıl dönüştürüyor?

4. Toksikokinetik

PFAS bileşikleri, klasik lipofilik kalıcı organik kirleticilerden farklı olarak öncelikle proteinlere—özellikle serum albümini, karaciğer yağ asidi bağlayıcı protein ve organik anyon taşıyıcılarına—bağlanır (2). İnsanlarda yarı ömürler bileşiğe göre belirgin farklılık gösterir; rapor edilen geometrik ortalamalar yaklaşık olarak şöyledir (1, 2):

- **PFOA:** 2,3–3,8 yıl
- **PFOS:** 4,8–5,4 yıl
- **PFHxS:** 7,3–8,5 yıl

Bu uzun yarı ömürler kronik birikimi ve geç klinik etkileri açıklar; ayrıca emzirmenin maternal vücut yükünü azaltırken süt çocuğunun yükünü artırması, toksikokinetik açıdan önemli bir paradokstur.

5. Klinik Yansımalar

5.1. İmmünotoksisite

PFAS'ın en iyi belgelenmiş insan sağlığı etkisi, çocuklarda rutin aşılara verilen antikor yanıtının baskılanmasıdır. Grandjean ve ark.'nın Faroe Adaları doğum kohortunda yaptığı çalışmada 5 ve 7 yaşındaki çocuklarda serum PFAS konsantrasyonlarının iki katına çıkması, tetanos ve difteri antikor düzeylerinde anlamlı düşüşle ilişkilendirilmiş; 5 yaşındaki çocukların yaklaşık dörtte birinde tetanos için, yüzde 37'sinde ise difteri için klinik koruyucu eşiğin altında düzeyler saptanmıştır (7). Aynı kohortun ergen yaş grubunda yapılan takip değerlendirmesinde, PFOS maruziyetinin iki katına çıkmasının difteri antikor düzeyinde yaklaşık yüzde 25'lik bir azalmayla ilişkili olduğu gösterilmiştir (6).

EFSA Gıda Zincirindeki Kontaminanlar Paneli'nin (CONTAM) 2020 yılında belirlediği 4,4 ng/kg vücut ağırlığı/hafta düzeyindeki dört-PFAS grup tolere edilebilir haftalık alım (TWI) değeri, tam olarak bu immünotoksik son nokta üzerinden türetilmiştir; Avrupa popülasyonunun önemli bir bölümünün bu eşiği aştığı tespit edilmiştir (5). Bu bulgu, toplum düzeyinde sürü bağışıklığı eşiklerinin yorumlanmasında çevresel maruziyetin de bir değişken olarak göz önünde bulundurulması gerektiğini düşündürmektedir.

PFAS maruziyeti ile SARS-CoV-2 enfeksiyonu seyri veya COVID-19 aşı yanıtı arasındaki ilişki sınırlı sayıda epidemiyolojik çalışmada incelenmiştir; veriler henüz tutarsız ve doğrulanmamış düzeydedir.

5.2. Endokrin ve Metabolik Etkiler

PFOA maruziyeti ile total ve LDL kolesterol arasındaki pozitif ilişki, başta C8 Sağlık Çalışması olmak üzere birden çok büyük kohortta gösterilmiştir (8). Gestasyonel diyabet riski, tiroid disfonksiyonu (özellikle subklinik hipotiroidi) ve doğum ağırlığında küçük çaplı azalmalar literatürde tutarlı şekilde raporlanmaktadır (2, 8).

Mekanistik olarak PFAS'ın peroksizom proliferatörle etkinleşen reseptör-alfa aktivasyonu (PPAR-α agonizmi), tiroid hormon taşıyıcı proteinleriyle etkileşim ve östrojen reseptörü modülasyonu üzerinden etki gösterdiği öne sürülmektedir; ancak insan dokusundaki net mekanistik kanıt sınırlıdır.

Çocukluk çağı obezitesi ve erken pubertal başlangıçla ilişki hipotezi (obezojenik etki) literatürde tartışmalı olmaya devam etmektedir; mevcut kanıtlar gözlemsel olup nedensellik için yeterli değildir (2). Bu nedenle "kesin neden-sonuç" yerine "ilişkili risk" terminolojisinin kullanılması bilimsel olarak daha doğru olacaktır.

5.3. Nörogelişimsel ve Otoimmün Etkiler

Prenatal PFAS maruziyetinin nörogelişim üzerine etkileri, 2020'lerden itibaren prospektif doğum kohortlarından elde edilen kanıtlarla giderek daha netleşmektedir. Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'dan derlenen kohort verilerinin sentezlenmesi, anne kanındaki yüksek PFAS konsantrasyonlarının 7 yaşındaki çocuklarda hafif fakat istatistiksel olarak anlamlı IQ düşüşleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır; dikkat eksikliği ve hiperaktivite belirtileriyle de tutarlı ilişkiler tanımlanmıştır (9). Olası mekanizmalar arasında plasentayı geçen PFAS'ın tiroid ve seks steroid hormonu dengesini bozması, dopaminerjik ve GABAerjik nörotransmitter sistemlerini etkilemesi ve epigenetik modifikasyonlara yol açması sayılmaktadır; ancak bu mekanizmaların insan nörogenezine katkısı kesin olarak nicelendirilememektedir.

Otoimmün hastalık boyutunda ise PFAS maruziyetinin ülseratif kolit, tiroid hastalığı ve lupus gibi bağışıklık aracılı durumlarla epidemiyolojik ilişkisi raporlanmakta; son çalışmalar mikroRNA regülasyonundaki PFAS kaynaklı değişikliklerin bu ilişkinin olası epigenetik mekanizması olabileceğine dikkat çekmektedir (10). Bu veriler, PFAS'ın bilinen immünotoksik etkilerinin ötesinde beyin gelişimi ve otoimmün patoloji üzerindeki rolünü de araştırma ve klinik izlem gündemine taşımaktadır.

5.4. Karsinojenite

Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), Kasım 2023'te Lyon'da toplanan 30 uluslararası uzmandan oluşan çalışma grubunun değerlendirmesi sonucunda PFOA'yı insanlar için karsinojen (Grup 1) ve PFOS'u insanlar için olası karsinojen (Grup 2B) olarak sınıflandırmıştır (11, 12). PFOA için sınıflandırmanın dayandığı kanıt seviyeleri şunlardır:

- Deney hayvanlarında yeterli (sufficient) kanıt,
- Maruz kalmış insanlarda epigenetik değişiklikler ve immün baskılanma dâhil güçlü mekanistik kanıt,
- İnsanlarda renal hücreli karsinom ve testis kanseri için sınırlı epidemiyolojik kanıt (11, 12).

Tablo 1. PFAS değerlendirmesinde klasik ve yeni nesil yaklaşımların karşılaştırılması

Yaklaşım	Temel soru	Güçlü yönü	Sınırlılığı
Analitik kimya	Hangi PFAS bileşiği, hangi düzeyde mevcut?	Kesin kimyasal tespit ve kantifikasyon sağlar.	Biyolojik etkiyi doğrudan göstermez.
Epidemiyoloji	PFAS maruziyeti hangi hastalıklarla ilişkilidir?	Gerçek insan popülasyonlarını yansıtır.	Nedensellik ve mekanizma sınırlıdır.
Klasik toksikoloji	Yüksek dozda hücre veya organizma hasarı oluşuyor mu?	Regülasyon açısından yerleşik altyapıya sahiptir.	Düşük doz/kronik etkileri ve erken hücresel yanıtları kaçırabilir.
NAM ve biyosensör tabanlı testler	Canlı insan hücresinde hangi fonksiyonel yanıt oluşuyor?	Mekanistik, dinamik, hayvansız ve insan hücresine dayalı veri üretir.	Standardizasyon ve regülasyona entegrasyon süreci devam etmektedir.

Bu noktada klinisyenler için hayati bir ayrımın altını çizmeliyiz: IARC sınıflandırması bir ajanın kansere yol açma yeteneğini (hazard) gösterir; belirli bir maruziyet düzeyinde risk derecesinin sayısal ifadesini sağlamaz. ABD EPA'nın 2024 değerlendirmesinde PFOA "muhtemelen insanlar için karsinojen" olarak sınıflandırılmış olup IARC ile EPA arasındaki bu nüans, metodolojik çerçeve farkından kaynaklanmaktadır (4). Klinisyen bu farkı hastayla iletişiminde gözetmeli, kanser tehlikesinin tanınması ile bireysel risk tahmini arasındaki kavramsal ayrımı korumalıdır.

6. Tespit, Fonksiyonel Toksisite ve NAM-Temelli Risk Değerlendirmesi

PFAS'ın binlerce türevi olması ve özellikle ultra-kısa zincirli analitlerin (örn. trifloroasetik asit, TFA) klasik LC-MS/MS yöntemleriyle yakalanamaması, literatürde "karanlık flor" (dark fluorine) sorununa yol açmaktadır (1). Bu boşluğu kapatmak için ekstrakte edilebilir organik flor (EOF) ve toplam oksitlenebilir prekürsör (TOP) analizleri gibi toplam flor temelli yaklaşımlar geliştirilmektedir.

Genetik kodlanmış biyosensörlerle hücresel düzeyde fonksiyonel toksisite değerlendirmesi, 3R prensiplerine (replacement, reduction, refinement) dayanan hayvansız test yaklaşımlarının önemli bir kolunu oluşturmaktadır. Bu yaklaşımda amaç yalnızca bir kimyasalın ortamda bulunup bulunmadığını saptamak değil; o kimyasalın cilt, akciğer, kalp, karaciğer, bağışıklık sistemi veya beyin dokusunu temsil eden insan hücre modellerinde hangi biyolojik yanıtları tetiklediğini gerçek zamanlı ve nicel olarak izlemektir.

PFAS gibi düşük dozda, kronik ve çoğu zaman karışım hâlinde maruz kalınan kimyasallar için bu yaklaşım özellikle önemlidir. Çünkü klasik toksikoloji testleri çoğu zaman hücre canlılığı, yüksek doz sitotoksisite, apoptoz veya geç dönem hasar gibi uç noktalara odaklanırken; PFAS maruziyetinde oksidatif stres, mitokondriyal adaptasyon, enerji metabolizması, Nrf2 aracılı antioksidan yanıt, hücre içi pH dengesi, nitrik oksit biyolojisi ve bariyer fonksiyonu gibi daha erken ve ince biyolojik değişiklikler kritik olabilir.

İstanbul Medipol Üniversitesi / SABİTA'da geliştirilen ve kullanılan genetik kodlanmış biyosensörler, canlı hücrelerde hidrojen peroksit (H2O2), pH, kalsiyum, nitrik oksit, ATP ve metabolik durum gibi parametrelerin gerçek zamanlı ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür teknolojiler, PFAS'ın yalnızca varlığını değil, daha da önemlisi hücre fonksiyonu üzerindeki dinamik etkilerini de görünür kılabilir. Özellikle oksijen kontrollü canlı hücre görüntüleme, yapay zekâ destekli yüksek içerikli analiz ve biyosensör tabanlı tarama yaklaşımları, PFAS gibi çevresel kirleticilerin insan biyolojisi üzerindeki etkilerini daha fizyolojik koşullarda değerlendirmek için güçlü bir NAM platformu sunmaktadır.

Bu bağlamda SABİTA'da geliştirilen R3ACT (Redox and Antioxidant Capacity Tracker) gibi biyosensör tabanlı, oksijen kontrollü ve hayvansız tarama platformları, PFAS risk değerlendirmesine yeni bir boyut kazandırabilir. R3ACT yaklaşımı, kimyasal maruziyetin hücresel redoks dengesi, antioksidan kapasite ve canlılık üzerindeki etkilerini oksijen kontrollü koşullarda ve gerçek zamanlı olarak değerlendirmeyi hedefler. Bu tür sistemler henüz, klasik hayvan deneylerinin yerine geçebilecek tek başına nihai karar araçları olarak değil; fakat yeni nesil risk değerlendirmesinde kanıt ağırlığına katkı sağlayan, mekanistik ve insan hücresine dayalı erken uyarı sistemleri olarak görülmelidir.

PFAS özelinde böyle bir yaklaşım üç nedenle değerlidir: Birincisi, PFAS maruziyeti çoğunlukla düşük doz ve uzun süreli olduğu için erken hücresel stres yanıtlarının ölçülmesi önemlidir. İkincisi, insanlar çevrede tek bir PFAS bileşiğine değil, farklı PFAS türlerinin ve başka çevresel stres faktörlerinin karışımına maruz kalmaktadır. Üçüncüsü, PFAS'ın immün, endokrin, metabolik ve vasküler etkileri farklı hücre tiplerinde farklı mekanizmalar üzerinden gelişebilir. Bu nedenle keratinositler, hepatositler, bağışıklık hücreleri, endotel hücreleri ve özellikle kan-beyin bariyerini temsil eden beyin mikrovasküler endotel hücreleri gibi insan hücresine dayalı modeller, PFAS toksisitesinin daha hassas ve mekanistik olarak anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

7. Düzenleyici Çerçeve

PFAS konusunda uluslararası düzenleyici çerçeve son yıllarda hızla güçlenmektedir. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), Nisan 2024'te yayımladığı Ulusal Birincil İçme Suyu Düzenlemesi ile PFOA ve PFOS için içme suyunda maksimum kontaminant düzeyini 4,0 ng/L (4 ppt) olarak belirlemiş, bu iki madde için sağlık temelli hedef değeri ise sıfır kabul etmiştir. PFHxS, PFNA ve HFPO-DA için 10 ng/L sınırı tanımlanmış; PFHxS, PFNA, HFPO-DA ve PFBS karışımları için ise Hazard Index = 1 yaklaşımı benimsenmiştir. EPA, Mayıs 2025'te PFOA ve PFOS için belirlenen sınırların korunacağını açıklamış, buna karşılık PFHxS, PFNA ve HFPO-DA için belirlenen maksimum kontaminant düzeylerinin yeniden değerlendirilmesini ve olası kaldırılmasını gündeme almıştır (13). Halk içme suyu sistemleri açısından izleme yükümlülüğünün 2027'ye, tam uygulama sürecinin ise 2031'e kadar uzatılması planlanmaktadır. Avrupa Birliğinde içme suyu açısından da ayrı bir düzenleyici eşik tanımlanmıştır. Yeniden düzenlenen İçme Suyu Direktifi kapsamında, 12 Ocak 2026'dan itibaren üye ülkeler için "PFAS Total" parametresi için 0,5 µg/L, "Sum of PFAS" parametresi için ise 0,1 µg/L sınır değerleri zorunlu hâle gelmiştir (15).

Avrupa Birliğinde ise PFAS düzenlemeleri daha geniş bir kimyasal kısıtlama yaklaşımı üzerinden ilerlemektedir. Danimarka, Almanya, Hollanda, Norveç ve İsveç tarafından Ocak 2023'te sunulan ve 10.000'den fazla PFAS bileşiğini kapsayan "evrensel PFAS kısıtlaması" önerisi, 2023 yılındaki halk istişaresinde alınan 5.600'den fazla yorumun değerlendirilmesinin ardından Ağustos 2025'te güncellenmiştir (14). Avrupa Kimyasallar Ajansının bilimsel komiteleri olan RAC ve SEAC'ın nihai görüşlerini 2026 yılı sonunda tamamlaması beklenmektedir. Gıda kaynaklı maruziyet açısından ise EFSA, 2020 yılında PFOA, PFOS, PFNA ve PFHxS toplamı için 4,4 ng/kg vücut ağırlığı/hafta düzeyinde grup tolere edilebilir haftalık alım değeri belirlemiştir. Küresel düzeyde de Stockholm Sözleşmesi kapsamında PFOS 2009'da Ek B'ye, PFOA 2019'da Ek A'ya ve PFHxS 2022'de Ek A'ya alınarak kısıtlanmıştır. Bu gelişmeler, PFAS'ın artık yalnızca çevresel bir kirletici olarak değil, halk sağlığı, gıda güvenliği, içme suyu yönetimi ve kimyasal güvenlik politikalarının kesişiminde ele alınan öncelikli bir düzenleme alanı hâline geldiğini göstermektedir.

Okuyucu açısından farklı düzenleyici eşiklerin daha kolay karşılaştırılabilmesi için içme suyu temelli bazı güncel sınır değerler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. İçme suyunda PFAS için seçilmiş güncel düzenleyici sınır değerler

Bölge / kurum	Parametre	Sınır değer	Not
ABD EPA	PFOA	4.0 ng/L	Ulusal Birincil İçme Suyu Düzenlemesi kapsamında
ABD EPA	PFOS	4.0 ng/L	Ulusal Birincil İçme Suyu Düzenlemesi kapsamında
Avrupa Birliği	Sum of PFAS	0.1 µg/L	20 seçilmiş PFAS bileşiğinin toplamı
Avrupa Birliği	PFAS Total	0.5 µg/L	Toplam PFAS yükünü temsil eden parametre
EFSA	PFOA + PFOS + PFNA + PFHxS	4.4 ng/kg vücut ağırlığı/hafta	Gıda kaynaklı tolere edilebilir haftalık alım değeri

8. Türkiye'nin Konumu: Sürveyanstan NAM Kapasitesine

Türkiye Stockholm Sözleşmesi'ne taraftır ve PFOS/PFOA için sözleşme kaynaklı yasaklar ulusal mevzuata yansıtılmıştır (3). Ancak içme sularında, yer altı sularında, endüstriyel deşarjlarda ve gıda matrislerinde rutin PFAS sürveyansına ilişkin yayımlanmış kapsamlı bulgular sınırlıdır (3). Klinik tıp pratiğinde PFAS-ilişkili biyomonitörizasyon, mesleki maruziyet kayıtları ve toplum bazlı maruziyet çalışmaları için ulusal bir çerçeve henüz kurumsallaşmamıştır. Bu boşluk; halk sağlığı politikaları, klinik öneri rehberleri ve çevre mühendisliği uygulamaları açısından öncelikli bir araştırma ve düzenleme alanı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye açısından önümüzdeki stratejik ihtiyaç yalnızca PFAS varlığının ölçülmesi değildir. Gerekli olan, çevresel sürveyans,

insan biyomonitorizasyonu, klinik takip ve NAM-temelli fonksiyonel toksisite değerlendirmesini bir araya getiren bütünleşik bir ulusal çerçevedir. Bu çerçevede üniversiteler, araştırma merkezleri, halk sağlığı otoriteleri, çevre laboratuvarları ve klinisyenler birlikte çalışmalıdır.

SABİTA gibi ileri canlı hücre görüntüleme, genetik kodlanmış biyosensörler, yüksek içerikli analiz ve çoklu omik teknolojilere sahip araştırma merkezleri, Türkiye'de PFAS araştırmalarının yalnızca çevresel ölçüm boyutunda kalmaması; insan hücresine dayalı, mekanistik ve 3R uyumlu test sistemleriyle desteklenmesi, ülkemiz için aşılması gereken önemli bir eşiktir. Böyle bir yaklaşım, hem ulusal halk sağlığı politikalarına veri sağlayabilir hem de Türkiye'nin Avrupa'daki NAM, hayvansız test ve yeni nesil risk değerlendirmesi tartışmalarına bilimsel katkısını güçlendirebilir.

Bu bağlamda Türkiye'de yalnızca PFAS sürveyansının değil, aynı zamanda NAM ve 3R odaklı araştırma, eğitim ve farkındalık altyapısının geliştirilmesi de stratejik önem taşımaktadır. SABİTA'da yerel bir NAM merkezi oluşturulması stratejik hedefler arasında yer almakta; Avrupa'daki paydaşlarla iş birliği içinde Türkiye'de 3R prensiplerini araştırma, eğitim ve teknoloji geliştirme ekseninde kurumsallaştırmayı amaçlayan bir 3R Kampüsü yapılanmasının temelleri atılmaktadır. Ayrıca R3FINE girişimi kapsamında, Türkiye'de NAM, 3R prensipleri, biyosensör teknolojileri, hayvansız test sistemleri ve düzenleyici bilim ekseninde kapsamlı bir uluslararası bilimsel toplantının planlanması, bu alanda ulusal farkındalığın artırılması açısından önemli bir adımdır. Bu tür girişimler, PFAS gibi çevresel kirleticilerin yalnızca kimyasal ölçümlerle değil, insan hücresine dayalı fonksiyonel test sistemleriyle de değerlendirilmesini sağlayacak yeni bir araştırma ve düzenleme kültürünün gelişmesine katkı sunabilir.

9. Sonuç ve Klinik Uygulamaya Öneriler

Gelecekte PFAS risk değerlendirmesinin yalnızca maruziyet düzeyi ve epidemiyolojik ilişkilerle sınırlı kalmayıp; insan hücresine dayalı fonksiyonel testler, genetik kodlanmış biyosensörler, yüksek içerikli görüntüleme sistemleri ve NAM-temelli mekanistik kanıtlarla desteklenmesi beklenmektedir. Bu yaklaşım, hem hayvan deneylerine bağımlılığı azaltacak hem de düşük doz kronik maruziyetlerin erken biyolojik etkilerini daha hassas şekilde ortaya koyacaktır. NASEM 2022 kılavuzu; mesleki ya da çevresel maruziyet öyküsü bulunan hastalara serum PFAS testinin sunulmasını, yüksek serum düzeyleri saptandığında ise lipid profili, tiroid fonksiyonu, böbrek ve karaciğer fonksiyon parametreleri ile testis ve böbrek kanseri taramaları için periyodik klinik takip yapılmasını önermektedir (1). Klinisyen bu testin yararları (bilinçli karar verme, kişiselleştirilmiş takip) yanında sınırlılıklarını da (klinik müdahaleyi değiştirme kapasitesinin sınırlı olması, anksiyete) hastayla paylaşan "ortak karar verme (shared decision-making)" modelini benimsemelidir.

Halk sağlığı düzeyinde önleyici stratejinin omurgası kaynakta kontrol ilkesidir: zorunlu olmayan kullanımların yasaklanması, flor içermeyen alternatiflere geçiş, kontamine bölgelerde içme suyu altyapısının iyileştirilmesi ve mesleki maruziyetin (itfaiyeciler, AFFF kullanan askeri personel vd.) azaltılması.

PFAS sorunu; çevre, tıp, hukuk ve etik düzlemlerinin kesiştiği "Tek Sağlık (One Health)" yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Hekimler, toksikologlar, çevre mühendisleri, yasa koyucular ve sivil toplum arasında disiplinler arası iş birliği hem mevcut hastaların yönetimi hem de gelecek nesillerin biyolojik mirasının korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynaklar

1) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Guidance on PFAS exposure, testing, and clinical follow-up. Washington (DC): The National Academies Press; 2022.

2) 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.

3) Yurtsever M. Çevredeki Per- ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: tarihçesi, kaynakları ve düzenlemeler. Niğde Ömer Halisdemir Üniv Müh Bilim Derg. 2025;14(1).

4) U.S. Environmental Protection Agency. PFAS National Primary Drinking Water Regulation. Final Rule. Fed Regist. 2024 Apr 26;89(82):32532–757 (effective 25 June 2024; reaffirmed for PFOA/PFOS, May 2025).

5) EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Schrenk 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.

6) Grandjean P, Heilmann C, Weihe P, Nielsen F, Mogensen UB, Budtz-Jørgensen E. Serum vaccine antibody concentrations in adolescents exposed to perfluorinated compounds. Environ Health Perspect. 2017;125(7):077018.

7) Grandjean P, Andersen EW, Budtz-Jørgensen E, Nielsen F, Mølbak K, Weihe P, et al. Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds. JAMA. 2012;307(4):391–7.

8) Steenland K, Fletcher T, Stein CR, Bartell SM, Darrow L, Lopez-Espinosa MJ, et al. Evolution of evidence on PFOA and health following the assessments of the C8 Science Panel. Environ Int. 2020;145:106125.

9) Lagostena L, Magnelli V, Rotondo D, Dondero F. Persistent pollutants and the developing brain: the role of PFAS in neurodevelopmental disorders. Front Cell Neurosci. 2025;19:1696173.

10) Furlong MA, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and microRNA: An epigenome-wide association study in firefighters. Environ Res. 2025;279(Pt 2):121766.

11) Zahm S, Bonde JP, Chiu WA, Hoppin J, Kanno J, Abdallah M, et al. Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. Lancet Oncol. 2024;25(1):16–7.

12) International Agency for Research on Cancer. Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, Volume 135. Lyon: IARC; 2025.

13) U.S. Environmental Protection Agency. EPA Announces Updates on PFAS National Primary Drinking Water Regulation [Basın Açıklaması]. Washington (DC): EPA; Mayıs 2025.

14) European Chemicals Agency (ECHA). Annex XV restriction report: per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Helsinki: ECHA; January 2023 (updated August 2025). https://echa.europa.eu.

15) European Commission. Drinking water: PFAS Total and Sum of PFAS limit values under the recast Drinking Water Directive. Brussels: European Commission; 2026.

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 Pınar 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 kirleticiler nedeniyle artan çevresel sorunlarla karşı karşıyadır. Ağır metaller, mikroplastikler (MP), nanoplastikler (NP) ve Perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS), nadiren tek başına ortaya çıkan ancak karmaşık etkileşimlerle çevresel kalıcılıklarını, biyoyararlanımlarını ve toksisitesini artırabilen dört ana kirletici 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 büyükşehirlerin atık su baskısı, PFAS, mikro/nanoplastikler ve ağır metallerin birlikte değerlendirilmesi gereken öncelikli çevresel senaryoları oluşturmaktadır. Bu olaylar doğrudan PFAS veya mikroplastik kaynaklı olarak tanımlanamasa da, organik yük, endüstriyel deşarj, deterjan/tekstil kimyasalları, plastik lifler ve atık su girdileri üzerinden bu kirleticilerle 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 (perflorooktansülfonik asit, perflorooktanoik asit, perfloroheksansülfonik asit ve perflorononanoik 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 biyomonitoring 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.

Kirleticilere Genel Bakış

Ağır Metaller: Endüstriyel, tarımsal ve kentsel kaynaklardan kaynaklanan kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), bakır (Cu), çinko (Zn) ve cıva (Hg) gibi eski kirleticileri 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 "sonsuza 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, kirletici maddelerin çevre matrislerine girmesine yönelik çok sayıda yol oluşturmaktadır. Ülkenin tekstil endüstrisi, tarım sektörü, kıyı turizmi ve büyüyen kent merkezleri, sistematik araştırma gerektiren potansiyel sorunlu alanları temsil etmektedir.

Varlığı ve Dağılımı

Türkiye'de ağır metaller, mikroplastikler, nanoplastikler ve PFAS'ın birlikte varlığına ilişkin sistematik ve çoklu kirletici 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 kirletici 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 kirletici 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 sucul 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 metallar 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, Pb^{2+} için yaklaşık yüzde 31, Cu^{2+} için yüzde 40 ve Cd^{2+} için yüzde 97'ye kadar. Bu salım süreci, tuzluluk, pH ve partikül agregasyonu gibi çevresel faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenmektedir (3). PFAS bileşikleri mikroplastik yüzeylere adsorbe olabilir ve bu adsorpsiyon, daha küçük parçacık boyutu, aşınmış polimerler 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). Pb^{2+}, Cu^{2+} ve Zn^{2+} 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 sedimantasyonun 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 yolaklarını 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, konsantre taşıyıcılar 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 enflamatuar 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.

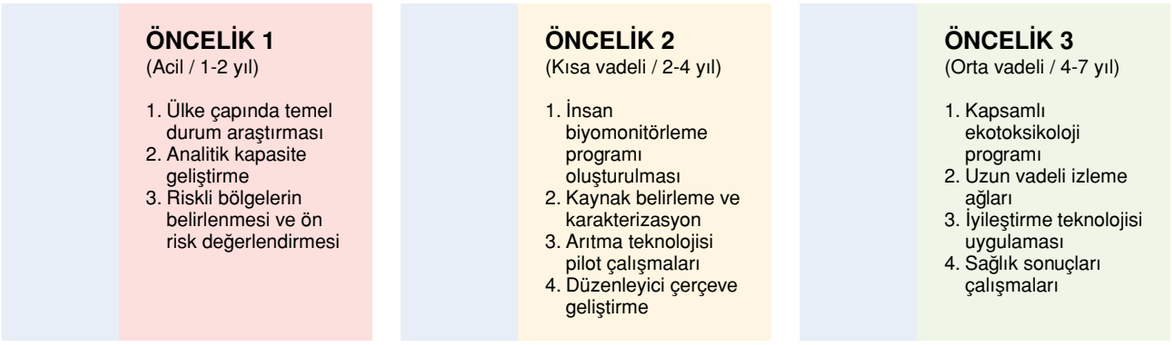
olarak, arıtma tesislerinden gelen giriş suyu, çıkış suyu ve biyolojik katı atıklar aracılığıyla da değerlendirilmelidir. Biyolojik katı atıklarla gübrelenen tarım toprakları, kentsel topraklar ve tozlar ile endüstriyel alan toprakları dahil olmak üzere karasal matrisler de bir başka önemli odak noktasıdır. 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 Müdürlüğünün 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 bazlı sorbentler, metal-organik çerçeveler, yeşil sentezlenmiş nanopartiküller ve gelişmiş adsorbanlara sahip yapay sulak alanlar gibi entegre yaklaşımlar, çoklu kirletici 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.)



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 kirletici 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 kirleticilerin 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. Kirletici sınıfları arasında belgelenmiş sinerjik etkileşimler, tek bir kirleticiye 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 kirletici 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.

Ağır metaller ve PFAS maruziyeti: insan ve çevre sağlığı açısından riskler ve önlemler

Furkan Berk Oğuzer

Arş. Gör. Ecz. Furkan Berk Oğuzer, 2021 yılında Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesinden mezun oldu. 2024 yılında aynı fakültenin Farmasötik Toksikoloji Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Başkent Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Akademik çalışmalarını ağırlıklı olarak in silico toksikoloji, moleküler modelleme ve hesaplamalı yaklaşımlar üzerine yoğunlaştırmaktadır.

İzem Bilinmiş

Arş Gör. Uzm. Ecz. İzem Bilinmiş, 2021 yılında Marmara Üniversitesi Eczacılık Fakültesinden mezun oldu; aynı yıl Hacettepe Üniversitesi Farmasötik Toksikoloji Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. "Doğal ve Sentetik Endokrin Bozucu Kimyasal Maddelerin 3T3-L1 Hücrelerinde Adipojenezle İlgili Proteinler Üzerindeki Toksik Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi" başlıklı tez çalışmasıyla yüksek lisans eğitimini 2024 yılında tamamladı ve aynı ana bilim dalında doktora eğitimine başladı. 2022 yılından itibaren Başkent Üniversitesi Farmasötik Toksikoloji Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

Prof. Dr. A. Nurşen Başaran

Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Farmasotik Toksikoloji Ana Bilim Dalından 1980 yılında yüksek lisans, 1987 yılında da doktora derecesini aldı. British Industrial Biological Research Association (BIBRA, Birleşik Krallık) Genetik and Reprodüktif Toksikoloji Departmanında (1991, 1996), Karlsruhe Üniversitesi (Almanya), Gıda Kimyası Departmanında (1999) ve Dortmund Üniversitesi (Almanya) Fizyoloji Enstitüsünde (2002, 2003) doktora sonrası misafir araştırmacı olarak çalıştı. Türk Toksikoloji Derneği, EUROTOX ve IUTOX gibi ulusal ve uluslararası derneğin üyesidir ve bu derneklerde aktif olarak görev aldı. Şu anda Başkent Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Farmasotik Toksikoloji Ana Bilim Dalında öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

Kurşun (Pb), cıva (Hg), kadmiyum (Cd), arsenik (As) ve krom (Cr) gibi zehirli ağır metallerin çevreye atılarak kirliliğe neden olduğu bilinmektedir. Bu ağır metaller, insanlarda kardiyovasküler hastalıklar, nörolojik bozukluklar, böbrek, akciğer ve deri hastalıkları ile kanser gibi bir dizi istenmeyen hastalıklara ve zehirlenmelere neden olabilmektedir. İnsanlar meslekleri nedeniyle farklı endüstrilerde toksik ağır metallere maruz kalabilirler. İş yerlerinde zararlı kimyasal maddelerin maruziyetinin azaltılması çevre ve işçi sağlığı açısından çok önemlidir.

Ağır metaller organizmaya deri, solunum ve yutma yoluyla girerler. Maruziyet yolu, maruz kalma süresi ve doz, potansiyel sağlık riskini ve hasar derecesini belirler. Metal toksisitesi, metalin değerlik durumu, oksidasyon/indirgeme kapasitesi, metal iyonunun çözünürlüğü, metalin lipofilik/hidrofilik özelliği, ligand ortamıyla etkileşim yeteneği ve diğer yapısal özellikler dâhil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

Her metalin kendine özgü bir toksisite mekanizması olsa da belirli ağır metal grupları için Reaktif Oksijen Türleri (ROT) aracılı oksidatif stres, antioksidan mekanizmalarının bozulması ve enzimlerin inaktivasyonu gibi ortak toksisite özellikleri bulunabilir. Pb, Hg, Cd, As ve Cr, antioksidan enzimlerin (ör. SOD, katalaz, GPx) ve antioksidanların (ör. GSH) tiyol grupları (–SH) ile etkileşerek etkinliklerini inhibe edebilirler ve ROT üretimini artırarak mitokondriyal fonksiyonu bozabilirler. Ayrıca, artan ROT oluşumu, DNA hasarına neden olabilir ve kanser de dâhil olmak üzere kronik hastalıklara yol açabilir. Artan ROT oluşumu lipidlerin peroksidasyonundan, membran akışkanlığının değişmesinden ve malondialdehit (MDA) ve hidroksinonenal (HNE) oluşumundan da sorumludur. Ağır metaller, DNA dizisini değiştirmeden gen aktivitesini ve ardından protein ekspresyonunu etki-

leyen epigenetik modifikasyonlara neden olabilir. Pb, As, Hg ve kromun neden olduğu epigenetik değişiklikler, DNA metilasyonu ve histon modifikasyonunu içerir. Ek olarak, toksik metaller vücuttaki eser metallerle etkileşime girebilir onların etkilerini ortadan kaldırabilirler. Ağır metallerin, Perfloroalkil ve polifloroalkil maddelerin maruziyet yolları, biyobirikim eğilimleri, temel patofizyolojik etkileri ve Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC) sınıflandırmaları dikkate alınarak oluşturulan karşılaştırmalı toksikolojik değerlendirme Tablo 1'de sunulmuştur.

Kurşun

İnsanlar ve çevre için yüksek derecede toksik olan Kurşun (Pb) kemiklerde, dişlerde, karaciğer ve böbreklerde birikir. Başlıca maruziyet kaynakları akü yapımı gibi endüstriyel faaliyetler, madencilik ve fosil yakıt kullanımıdır. Soluma, Pb zehirlenmesinin en önemli yollarından biridir. Benzinden kurşunun çıkarılması da dâhil olmak üzere çeşitli düzenlemelerle, son 40 yılda havadaki Pb seviyeleri önemli ölçüde azalmıştır. Plazmada bulunan inorganik Pb çeşitli formlarda mevcuttur: (i) serum albüminine veya diğer taşıma proteinlerine düşük afiniteli bölgelerden gevşek şekilde bağlanmış hâlde; (ii) amino asitler, karboksilik asitler veya antioksidanlar gibi düşük moleküler ağırlıklı ligandlarla kompleks oluşturmuş hâlde; (iii) metaloproteinlere bağlı hâlde veya (iv) serbest (bağlanmamış) Pb^{2+} formunda. Vücuttaki kurşunun yaklaşık yüzde 90'ı mineralize dokularda depolanır. Yumuşak dokulardaki kurşunun çoğu karaciğerde depolanır. Kemiklerdeki Pb konsantrasyonu yaşla birlikte artma eğilimindedir. Maruz kalma yolu ne olursa olsun, Pb

Tablo 1. Pb, Hg, Cd, As, Cr (VI) ve PFAS bileşiklerinin karşılaştırmalı toksikolojik özellikleri ve IARC kanserojenite sınıflandırmaları

Parametre	Pb (Kurşun)	Hg (Cıva)	Cd (Kadmiyum)	As (Arsenik)	Cr (VI)	PFAS
Başlıca Maruziyet Yolu	Solunum, oral	Oral (Gıda-MeHg), solunum	Solunum (sigara), Oral (gıda)	Oral (İçme suyu, gıda)	Solunum (mesleki), Gıda (su)	Oral (Gıda, içme suyu)
Yarı Ömür	Kemikte 20–30 yıl	MeHg: ~50 gün (kan), beyinde daha uzun	15-20 yıl	Gün–hafta (metabolitlere bağlı)	Hücresel indirgenmeye bağlı	2-8 yıl (PFOA/PFOS)
Ana Toksisite Mekanizması	ROT artışı, NO baskılanması	Tiyol (-SH) bağlanması, nörotoksisite	Antioksidan sistem inhibisyonu	DNA onarım baskılanması, epigenetik değişim	Hücre içi redüksiyon → ROT üretimi	İmmünotoksisite, endokrin bozucu
Kanserojenite (IARC)	İnorganik Pb: Grup 2A Organik Pb: Grup 3	Metilcıva: Grup 2B Elementel Hg: Grup 3	Cd ve İnorganik Cd Bileşikleri: Grup 1	İnorganik As: Grup 1	Cr (VI) Bileşikleri: Grup 1	PFOA: Grup 1 PFOS: Grup 2B
Öne Çıkan Hedef Organ	MSS (özellikle çocuklarda)	MSS (prenatal risk)	Böbrek	Deri, akciğer, mesane	Akciğer	Bağışıklık sistemi
Epigenetik Etki	DNA metilasyonu	Histon değişiklikleri	DNA metilasyonu	Belirgin DNA hipometilasyonu	DNA hasarı + epigenetik değişim	Gelişmekte olan kanıtlar
Türkiye'de Risk Kaynağı	Eski binalar, akü geri dönüşüm	Kömür, balık	Sigara, fosfatlı gübre	Yer altı suyu (özellikle jeojenik)	Deri tabaklama, metal kaplama	İçme suyu, tekstil sektörü

** Pb: Kurşun; Hg: Cıva; Cd: Kadmiyum; As: Arsenik; Cr (VI): Altı değerlikli krom; PFAS: Per- ve polifloroalkil maddeler; MeHg: Metilcıva; PFOA: Perflorooktanoik asit; PFOS: Perflorooktan sülfonat; ROT: Reaktif oksijen türleri; NO: Nitrik oksit; MSS: Merkezi Sinir Sistemi; DNA: Deoksiribonükleik asit; IARC: Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı.*

ağırlıklı olarak idrar ve dışkı ile, daha az ölçüde ise tükürük, ter ve meni sıvıları ile atılır. Pb toksisitesi büyük ölçüde oksidatif stres aracılıdır. Pb^{2+} iyonları proteinlerin tiyol (-SH) gruplarına bağlanarak SOD, katalaz ve glutatyon peroksidaz gibi antioksidan enzimleri inhibe eder. Bu durum ROT artışına ve hücresel hasara yol açar. Bu nedenle, kurşuna maruz kalmak antioksidan savunma sistemine zarar verebilir ve vücudun en önemli detoksifikasyon organı olan karaciğerin genel antioksidan kapasitesini baskılayabilir. Ayrıca nitrik oksit (NO) üretimini baskılayarak kardiyovasküler ve nörolojik fonksiyonları bozar. Pb kan-beyin bariyerini aşabilir ve özellikle gelişmekte olan sinir sistemi üzerinde kalıcı hasara neden olur. Kurşuna maruz kalan işçilerde DNA hasarının artması, Pb^{2+} ile hücre içi GSH ve SOD, katalaz ve GPx gibi antioksidan enzimlerin sülfhidril gruplarının etkileşimi nedeniyle aşırı ROT oluşumu ile ilişkilendirilmektedir. En savunmasız grup, kalıcı olumsuz sağlık etkileri yaşayabilen 6 yaşın altındaki çocuklardır.

Kronik maruziyet; hipertansiyon, böbrek fonksiyon bozukluğu, nörolojik eksiklikler ve üreme sistemi bozuklukları ile ilişkilidir. Yetişkinlerde yüksek düzeyde Pb zehirlenmesi ölümcül olabilir. Pb zehirlenmesinin belirtileri arasında kilo kaybı, hipertansiyon, baş ağrısı, karın ağrısı, nörolojik ve zihinsel sorunlar, böbrek sorunları, üreme sorunları, gastrointestinal sorunlar, kardiyovasküler bozukluklar ve diğer organ sistemlerinde bozulma sayılabilir. Pb, tüm organ sistemleri arasında sinir sistemini en önemli şekilde etkileyen bir kimyasal olarak kabul edilir. Pb maruziyeti, üreme sisteminde birçok fizyolojik ve biyokimyasal hasarla ilişkilendirilmiştir. Erkeklerde, inorganik Pb maruziyeti, semen kalitesi, sperm morfolojisi, sperm sayısında azalma ve hareketlilikte değişikliklerle ilişkilendirilmiştir. Kadınlarda Pb maruziyeti, doğurganlık, gebelik komplikasyonları, gebelik hipertansiyonu, düşük doğum ağırlığı ve diğer birçok faktörü etkileyebilir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) sınıflandırmasına göre inorganik kurşun bileşikleri Grup 2A kategorisinde yer almakta olup insanlar için muhtemelen kanserojen olarak değerlendirilmektedir. Metalik kurşun ise Grup 2B'de sınıflandırılmakta ve insanlar için olası kanserojen olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık organik kurşun bileşikleri Grup 3'te yer almakta olup insanlarda kanserojen olarak sınıflandırılamamaktadır.

Doğada yok olmadığı için "sonsuz kimyasallar" olarak adlandırılan PFAS ve sanayi atığı ağır metaller, modern yaşamın ayrılmaz ama tehlikeli bir parçası hâline geldi. Balıktaki cıvadan tekstil ürünlerindeki leke tutmaz kaplamalara, eski akülerden jeojenik yer altı sularına kadar risk her yerde. Ancak doğru filtrasyon, bilinçli gıda tüketimi ve sıkı yasal denetimlerle bu zinciri kırmak mümkün. Gelecek kuşakların sağlığı, bugün bu kimyasal döngüye karşı alacağımız kararlı önlemlere bağlıdır.

Cıva

Cıva (Hg), periyodik tablonun 80. elementi olup doğada elementel (Hg^0), inorganik (Hg^+, Hg^{2+}) ve organik (özellikle metilcıva, MeHg) formlarda bulunur. Oksidasyon durumu +2 olan bileşikler daha yaygındır. Elementel Hg oda sıcaklığında sıvı hâlde bulunan, kolayca buharlaşarak renksiz ve toksik buhar oluşturan tek metaldir. Günümüzde ampul ve termometre gibi ürünlerde kullanımı büyük ölçüde sınırlandırılmıştır. İnorganik Hg bileşikleri çevrede mineraller ve mineral safsızlıkları şeklinde bulunur. Kömürle çalışan santraller ve endüstriyel deşarjlar çevresel Cıva (Hg) salınımının başlıca kaynaklarıdır. İnsanlarda organik Hg maruziyetinin temel kaynağı balık ve kabuklu deniz ürünleridir.

Elementel Hg buharı solunum yoluyla yaklaşık yüzde 80 oranında emilir ve kan dolaşımına geçer. Eritrositlerde katalaz enzimi aracılığıyla iki değerlikli inorganik forma oksitlenir. İnorganik Hg esas olarak böbreklerde birikir ve bu organ üzerinde belirgin toksisite oluşturur. Merkezi sinir sistemine geçişi ise sınırlıdır. MeHg gastrointestinal sistemden etkin biçimde emilir, lipofilik yapısı nedeniyle biyolojik membranları kolaylıkla geçer ve özellikle beyin, karaciğer ve böbreklerde birikir. Amino asit taşıma sistemleri aracılığıyla hücre içine alınır ve hücre içi tiyol (-SH) gruplarına bağlanarak protein fonksiyonlarını bozar. Organik Hg lipofilik özelliği nedeniyle hem kan-beyin bariyerini hem de plasentayı geçerek fetal gelişim üzerinde ciddi risk oluşturur.

Cıva, özellikle prenatal dönem ve erken çocuklukta ciddi nörotoksik etkilere neden olur. Metilcıva maruziyeti nöroinflamasyon, mikroglia ve astrosit aktivasyonu ile karakterizedir, proinflamatuar sitokin üretimini artırır. Bu süreçler nörodejeneratif hastalıkların gelişiminde rol oynayabilir. Klinik olarak; tremor, konuşma ve işitme bozuklukları, motor disfonksiyon ve baş ağrısı görülebilir. Hg, ayrıca kardiyovasküler sistemi etkileyerek kalp hızı değişkenliğinde azalma, hipertansiyon ve ateroskleroz riskinde artış ile ilişkilendirilmiştir. Mesleki maruziyet ile kanser riski arasında ilişki bildirilmiş olmakla birlikte, epidemiyolojik veriler henüz kesin değildir.

Kadmiyum

Kadmiyum periyodik tablodaki 48. elementtir; Hg ve çinkoya benzer fizikokimyasal özelliklere sahip, yumuşak, gümüşi-beyaz renkde, suda çözünürlüğü az, yanıcı bir metaldir. Korozyona dayanıklı olduğundan aşındırıcı özelliği olan pek çok metalin yüzeylerini koruyucu amaçla kaplamada ve boya sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Nikel-Kadmiyum pilleri, plastik ve elyaf sanayinde stabilizatör ve alaşım amaçlı üretilmektedir. İnsan faaliyetleri, yılda yaklaşık 5.000-15.000 ton kadmiyumun çevreye salınmasına neden olmaktadır. Kadmiyumla kirlenmiş alanlar, potansiyel bir Cd kaynağı oluşturmaktadır. Cd maruziyetinin ana yolu akciğerler ve kısmen de gastrointestinal sistemdir. İnsanlardaki yarı ömrü yaklaşık 15-20 yıldır. Cd içeren cevherlerin yakılması veya volkanik faaliyetler gibi doğal ve endüstriyel işlemler sonucu rüzgarla havaya karışır. Madenlere yakın su kaynakları, pil geri dönüşüm tesisleri, çöplükler, tehlikeli atık alanları, fosil yakıtların yakılması, aşırı gübre kullanımı, Cd kullanan endüstriyel faaliyetler su ve topraktaki Cd düzeyleri artırabilir.

Fosforlu gübreler nispeten yüksek miktarda Cd içerebildiğinden aşırı kimyasal gübre kullanımı ve insan faaliyetleri, besin zincirindeki Cd konsantrasyonunu artırabilir. Bireylerin kanındaki Cd konsantrasyonunun maksimum 1 µM'ye ulaşabileceği, genellikle 1-10 nM aralığın-

da olduğu belirtilmiştir. Emilen Cd miktarı yaşa, cinsiyete, fiziksel duruma ve diğer faktörlere bağlıdır. Parçacık boyutuna ve çözünürlüğüne bağlı olarak, solunan kadmiyumun yaklaşık yüzde 10-50'si, ağız yoluyla alınan kadmiyumunda ise sadece yüzde 6'sı emilir, büyük bir kısmı eritrositler, albümin ve diğer taşıma proteinleri yoluyla kan dolaşımına geçer ve karaciğerde, böbreklerde, bağırsakta birikir. Cd böbrekler, idrar ve tükürük ile atılır.

Böbrek ve karaciğer Cd toksisitesine karşı hassastır. Kalsiyum taşıma sistemlerini etkileyerek sıvı geri emilimini azaltır ve böbrek proksimal tüpü boyunca pasif Ca2+ emilimini ve böbrek tüpünden geri taşınan ultrafiltrattaki çözünen maddelerin toplu taşınmasını olumsuz etkiler. Uzun süreli Cd maruziyeti özellikle böbrek tübüler hasarlarını içeren ve sonuçda böbrek tübüler kanallarının ve taşıyıcılarının işlev bozukluğuna, sıvı kaybına ve elektrolit homeostazında dengesizliğe yol açabilir.

Kadmiyum redoks aktif bir metal değildir ve bu nedenle doğrudan ROT oluşumuna neden olmaz ancak dolaylı olarak çeşitli antioksidan enzimlerin ve hücresel proteinlerin aktivitesini olumsuz etkileyerek ROT seviyelerini artırabilir. Protein ve protein olmayan tiyoller biyolojik sistemlerde yaklaşık 3:1 oranında bulunur ve her ikisi de Cd iyonlarını bağlama kapasitesine sahiptir. Cd2+ iyonları hücrelerde tiyoller ile kovalent protein-SH-Cd bağları oluştururlar. Cd proteinlerin sistein kısımlarına değil, diğer amino asitlere de kovalent olarak bağlanabilir ve bu da peptit bağlarının parçalanmasına yol açabilir. Bu durum, SOD, katalaz ve glutatyon peroksidaz gibi antioksidan enzimlerin aktivitesinin baskılanmasına ve oksidatif stresin artmasına neden olur; bu olay hücresel redoks homeostazını etkileyerek DNA, proteinler ve membranların fosfolipid kısımları dâhil olmak üzere tüm önemli biyomoleküllere hasar verir. Kadmiyum, endojen metalleri depolama yerlerinden veya taşıma proteinlerinin metal bağlama bölgelerinden uzaklaştırarak, ROT seviyelerini ve oksidatif stresi artıran redoks aktif metallerin (bakır veya demir) miktarının yükselmesine neden olur.

Mesleki Cd maruziyeti çeşitli kronik hastalıklar da dâhil olmak üzere istenmeyen sağlık etkilerine yol açabilir. Yüksek dozda oral Cd alımı sonucu bulantı, kusma, salivasyon, metabolik asidoz, abdominal kramplar ve kanlı ishal oluşabilir. Solunum ile akut Cd teması sonucu grip benzeri belirtiler (ateş, vücut ağrısı) gözlenir ve kronik maruziyet ise çoğunlukla akciğer ve böbrek hastalıklarına neden olur. Cd solunması sonucu kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) anfizem ve bronşit gözlenebilir. Cd kaynaklı hava kirliliği ve sigara KOAH'ın tipik nedenleridir. Sigara içenlerde akciğer fonksiyonundaki azalma, diğer faktörlerin yanı sıra, sigara dumanında bulunan kadmiyumla (~ 2 µg kadmiyum/sigara) da ilişkili olabilmektedir. Uzun süre havada düşük düzeyde Cd maruziyeti KOAH ve muhtemelen akciğer kanserine neden olabilir. Cd maruziyeti ile kardiyovasküler hastalıklar, kalp yetmezliği, hipertansiyon ve inme riski arasında pozitif ilişkiler bildirilmiştir.

Kadmiyum, kalsiyum akışını ve elektrolit dengesini etkiler, böylece düz kas hücrelerinde toksisiteye neden olur ve kan damarı duvarlarında lipid birikimine yol açarak aterosklerozun etkisini artırır. Uzun süreli Cd maruziyeti toplam kolesterol seviyelerini artırır ve kolinerjik gevşemeyi azaltır; bu da nitrik oksit sentezini olumsuz etkileyerek kan basıncının düzenlenmesinde bozulmaya yol açar. Cd kemikte birikir. İnsanlarda uzun süre Cd içeren yiyecek ve içeceklerin tüketilmesi kalsiyum metabolizmasının bozulmasına, osteoporoz ve osteomalaziye neden olabilir. Japonya'da kadmiyumla kontamine olmuş pirinci tüketen insanlarda gözlenen 'itai-itai' hastalığı kronik Cd zehirlenmesinin en belirgin örneğidir.

Kadmiyum ve Cd bazlı inorganik bileşikler IARC tarafından insanlarda Grup 1 insan kanserojeni olarak sınıflandırılmıştır. Kadmiyuma mesleki olarak maruz kalan işçilerde akciğer kanseri riskinde artış olduğuna dair yeterli kanıt bulunmaktadır.

Arsenik

Arsenik (As), periyodik tablonun 33. elementidir. Doğada metaloid özelliklere sahip olup; +3 (arsenit) ve +5 (arsenat) oksidasyon durumlarında bulunabilir. As yer kabuğunda jeolojik birikintilerin yıkanması, volkanik faaliyetler ve orman yangınları gibi doğal yollarla çevreye salınırken, insan faaliyetleri bu döngüyü yaklaşık on kat artırmaktadır. Endüstriyel olarak As; cam üretimi, tekstil, mühimmat, kâğıt ve ahşap koruyucuların yanı sıra yarı iletken cihazların yapımında kullanılır. İnsanlar arseniğe içme suyu, gıda ve hava yoluyla maruz kalırlar. Akut zehirlenmeler en sık ağız yoluyla meydana gelirken, kronik maruziyet solunum, deri teması ve kontamine su/gıda tüketimiyle oluşur. İçme sularındaki inorganik As maruziyeti dünya genelinde yaklaşık 200 milyon insanı etkileyen küresel bir sağlık sorunudur. As maruziyetinin klinik belirtileri doz ve süreye bağlı olarak değişmektedir. Kronik maruziyet; ciltte hiperpigmentasyon ve hiperkeratoza (deri kalınlaşması) neden olabilir. Meslekleri gereği arseniğe maruz kalan işçilerde bronşit, öksürük ve nefes darlığı gibi solunum sistemi bozuklukları ile karıncalanma ya da batma hissi gibi nörolojik semptomlar gözlenir. Akut yüksek dozlarda ise vasküler geçirgenliğin artmasıyla dolaşım kolapsı tetiklenebilir.

İnorganik arsenik bileşikleri, organik formlarına göre vücutta daha kolay emilir ve daha toksiktir. Emilimden sonra karaciğerde "biyometilasyon" adı verilen bir dönüşüm sürecinden geçer. Bu süreçte arsenik önce daha reaktif ve toksik ara formlara dönüşür, ardından vücudun kullandığı metil gruplarının eklenmesiyle monometilarsenat (MMA) ve dimetilarsinat (DMA) gibi bileşiklere çevrilir. Dönüşüm sırasında oluşan bazı ara ürünler, hücre proteinlerinin sülfhidril (-SH) gruplarına güçlü biçimde bağlanarak enzimlerin çalışmasını bozur. Bunun sonucunda hücrenin enerji üretimi ve metabolik işlevleri olumsuz etkilenir.

Arsenik, insanlar için kesin karsinojen bileşikler arasında yer almaktadır. IARC, arseniği ve inorganik As bileşiklerini Grup 1 karsinojen olarak sınıflandırmıştır. Uzun süreli maruziyetin akciğer, deri, mesane, karaciğer ve böbrek kanserlerine neden olduğu kanıtlanmıştır. Kanser oluşum mekanizması; ROT aşırı üretimiyle indüklenen oksidatif stres, DNA onarım mekanizmalarının baskılanması ve epigenetik modifikasyonları (DNA metilasyonu ve histon değişiklikleri) içerir.

Krom

Krom, periyodik tablonun 24. elementidir. Doğada başka elementlerle bileşik olarak, -2 ile +6 arasında değişen oksidasyon durumlarında bulunabilir. Kromun ana formları Cr(0) (elementel Cr), Cr (III) ve Cr (VI)'dır. Cr, kayalarda, volkanik emisyonlarda, suda ve toprakta doğal

olarak bulunan bir metaldir. Cevherde bulunan Cr çoğunlukla üç değerlikli (Cr3+) olarak bulunur ancak endüstriyel işleme sırasında Cr, ya Cr0'a indirgenir ya da altı değerlikli krom Cr6+'ya oksitlenir. Cr; kaplama, paslanmaz çelik üretimi, ahşap koruyucularda, deri tabaklama işlemlerinde, boya sanayinde kullanılır. Kentsel ve kirlenmiş alanlarda hava Cr konsantrasyonu 10 ng/m³ ile 450 ng/m³ arasında değişmektedir. Üretim ve kullanım yerlerinden kaynaklanan Cr hava su ve toprağı kirletir. Doğal gaz, petrol veya kömürün yanması sonucunda da çevre Cr ile kirlenebilir. İnsanlar; içme suyu, gıda ve hava yoluyla kroma maruz kalırlar. Akut zehirlenme en sık oral yolla meydana gelirken, kronik zehirlenme solunum ve deri teması yoluyla meydana gelir. Cr (VI) bileşikleri ciltle temas ettiğinde dermatit ve cilt ülserlerine neden olabilir. Solunan Cr türleri solunum yolunu tahriş eder ve akciğer kanseri riskini artırabilir. Meslekleri nedeniyle kroma maruz kalan işçilerde nefes darlığı, öksürük, bronşit, farenjit, nazal septum perforasyonu gibi belirtiler gözlenir. Solunum yoluyla zehirlenmenin şiddeti, parçacık boyutuna bağlıdır. Krom trioksit (CrO_3), sodyum kromat (Na_2CrO_4), potasyum kromat (K_2CrO_4) ve dikromat ($K_2Cr_2O_7$) gibi altı değerlikli Cr bileşikleri deride yanık, iltihap, ödem ve nekroza neden olabilir.

Genel olarak, Cr (VI) bileşikleri, Cr (III) bileşiklerinden daha kolay emilir. Mide suyu alınan Cr (VI)'yı kolayca Cr (III) türlerine indirger. Yüksek miktarlarda Cr (VI) maruziyetiyle ilişkili gastrointestinal sorunlar karın ağrısı, bulantı, kusma, ishal, ateş, duodenum ülseri, mide ağrısı ve ateş, anemi, siroz gibi belirtiler bildirilmiştir. Ortalama bir yetişkin için ağızdan alınabilen ölümcül doz yaklaşık 1-3 g Cr (VI) bileşiğidir. Solunum yolu zehirlenmesiyle karşılaştırıldığında, ağız yoluyla maruz kalma, Cr (VI)'nın gastrointestinal sistemde Cr (III)'e indirgenmesi nedeniyle, hedef hücrelere daha az Cr (VI) girmesine neden olur. Bununla birlikte, yutulan Cr (VI)'nın bir kısmı midede hücre dışı indirgenmeden kurtulabilir ve bunun yerine hücrelere girebilir. Hücrelere nüfuz eden az miktarda Cr (VI) bile, çeşitli mekanizmalar yoluyla tümör gelişimini tetikleme kapasitesine sahiptir.

Krom (VI) bileşikleri, insan karsinojenidir. Özellikle Cr alaşımı, üretim, kaplama ve pigment endüstrilerinde Cr (VI) maruziyetinin, insanlarda akciğer, burun ve sinüs kanserlerine neden olabileceği gösterilmiştir. IARC, Cr (VI) bileşiklerini Grup 1 karsinojen olarak sınıflamıştır. Kanser oluşumunun olası mekanizmasına ilişkin olarak, içme suyundan kaynaklanan düşük seviyelerdeki Cr (VI) maruziyeti, yüksek ROT seviyelerinin oluşumunu tetikleyebilir; bu da DNA mutasyonları nedeniyle tümör oluşumunu tetikleyebilir, hücre çoğalmasını artırabilir, hücre ölümünü önleyebilir ve tümör büyümesini hızlandırabilir. İçme suyunda bulunabilecek maksimum Cr konsantrasyonu 0.1 mg/L olarak belirlenmiştir. Riskli bölgelerdeki içme suyundaki Cr seviyeleri, halkı koruyacak seviyelerde belirlenmelidir.

Per- ve Polifloroalkil Maddeler (PFAS)

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), 1950'li yıllardan bu yana endüstriyel üretimde ve tüketici ürünlerinde yaygın olarak kullanılan, 4.000'den fazla sentetik kimyasaldan oluşan heterojen bir kimyasal grubudur. PFAS'lar literatürde "kalıcı" ya da "sonsuz kimyasallar" olarak tanımlanmaktadır. PFAS'lar; tekstil ürünlerinde leke tutmaz kaplamalar, gıda ambalajlarında oleofobik yüzeyler, yangın söndürme köpükleri (aqueous film-forming foams, AFFF) ve yapışmaz pişirme gereçleri gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Yaygın kullanım ve çevresel kalıcılık sonucunda PFAS bileşikleri yüksek oranda insan maruziyetine yol açmaktadır. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) tarafından yapılan kapsamlı risk değerlendirmeleri, gıdalar ve içme suyunu başlıca maruziyet kaynakları olarak tanımlanmıştır. EFSA CONTAM Paneli'nin 2020 tarihli bilimsel görüşünde, özellikle perflorooktanoik asit (PFOA), perflorooktan sülfonat (PFOS), perflorononanoik asit (PFNA) ve perflorohekzan sülfonat (PFHxS) için bağışıklık sisteminin baskılanması ve çocukluk döneminde aşılara karşı antikor yanıtının azalması gibi önemli sorunlara yol açtığı belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda EFSA, bu dört PFAS için birleşik tolere edilebilir haftalık alım (TWI) değerini 4,4 ng/kg vücut ağırlığı/hafta olarak belirlemiştir.

Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesini kapsayan ve 33 farklı ilden toplanan musluk suyu örneklerinde yapılan analizlerde, perflorohekzanoik asit (PFHxA), perflorobütan sülfonat (PFBS) ve perfloropentanoik asit (PFPeA)'i en sık saptanan PFAS bileşikleri olarak rapor edilmiştir. Toplam PFAS konsantrasyonları 0,08-11,27 ng/L aralığında ölçülmüş ve musluk sularındaki düzeylerin şişelenmiş kaynak sularına kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Ölçülen değerler mevcut uluslararası içme suyu rehber limitlerinin altında kalsa da, EFSA raporunda vurgulanan uzun biyolojik yarı ömürler ve serumda birikim eğilimi dikkate alındığında, kronik düşük doz maruziyetin göz ardı edilmemesi gerektiği belirtilmektedir.

Güncel düzenleyici yaklaşımlar doğrultusunda Türkiye, 14 Ekim 2009 tarihinde Stokholm Sözleşmesi'ne taraf olmuş ve Sözleşme kapsamında Kalıcı Organik Kirleticiler (KOK) listesine alınan PFOS (2009; Ek B) ile PFOA (2019; Ek A) başta olmak üzere uzun zincirli PFAS'ların üretim, piyasaya arz ve kullanımına kısıtlamalar getirmiştir. Söz konusu yükümlülükler ulusal mevzuata; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen Kalıcı Organik Kirleticiler Hakkında Yönetmelik ile Avrupa Birliği REACH mevzuatına paralel biçimde hazırlanan ve 23 Haziran 2017 tarihinde yürürlüğe giren Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması Hakkında Yönetmelik (KKDIK) aracılığıyla aktarılmıştır. Bu düzenlemeler, endüstride kısa zincirli PFAS alternatiflerinin kullanımını artırmıştır. Ancak EFSA tarafından da belirtildiği üzere, kısa zincirli PFAS'ların daha yüksek çevresel mobilite göstermesi ve maruziyetin devam etmesi, bu bileşiklerin de toksikolojik açıdan dikkatle izlenmesini gerekli kılmaktadır. Türkiye'de gelecekte yapılacak çalışmaların, EFSA tarafından tanımlanan kritik sonlanım noktaları doğrultusunda biyoizleme verilerini ve maruziyet–etki ilişkilerini kapsayacak şekilde genişletilmesi, halk sağlığı risk değerlendirmeleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Kurşun, cıva, kadmiyum, arsenik, krom (VI) ve PFAS bileşikleri farklı kimyasal yapılara sahip olmakla birlikte; biyolojik kalıcılıkları, organlarda birikme eğilimleri, oksidatif stres ve epigenetik mekanizmalar üzerinden ortak toksik etkiler oluşturmaları ve büyük bölümünün IARC tarafından kanserojen ya da olası kanserojen olarak sınıflandırılmış olması nedeniyle ortak bir halk sağlığı sorununu temsil etmektedir. Maruziyetin tek bir kaynaktan değil; içme suyu, gıda, hava, tüketici ürünleri ve mesleki ortam gibi çok sayıda yoldan eş zamanlı olarak gerçekleşmesi, bu bileşiklerle savaşımın çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirmektedir.

Kurumsal düzeyde, içme suyu, gıda ve hava kalitesine ilişkin izleme programlarının ağır metaller ve PFAS bileşiklerini kapsayacak şekilde genişletilmesi; KKDIK ve Kalıcı Organik Kirleticiler Hakkında Yönetmelik başta olmak üzere mevcut mevzuatın etkin biçimde uygulanması ve düzenli olarak güncellenmesi; özellikle riskli bölgelerde (eski sanayi alanları, madencilik bölgeleri, jeojenik arsenik kaynaklı yer altı suları, deri ve metal kaplama tesisleri çevresi) hedefli biyoizleme çalışmalarının yapılması büyük önem taşımaktadır. Mesleki maruziyetin önlenmesinde iş yeri hijyeni, kişisel koruyucu donanım kullanımı ve periyodik sağlık kontrolleri belirleyici rol oynamaktadır. Ayrıca toplum sağlığı uzmanları, klinisyenler ve toksikologların ortak çalışacağı ulusal bir maruziyet–etki veri tabanının oluşturulması, risk değerlendirme süreçlerini güçlendirecektir.

Bireysel düzeyde alınabilecek temel önlemler arasında; içme ve kullanma suyu kaynağının niteliğinin bilinmesi ve gerektiğinde uygun filtrasyon sistemlerinin tercih edilmesi, dengeli ve çeşitlendirilmiş bir beslenme alışkanlığı ile özellikle büyük yırtıcı balıkların aşırı tüketiminden kaçınılması, sigara kullanımının bırakılması (kadmiyum maruziyetini doğrudan azaltır), eski boya, akü ve elektronik atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi, yapışmaz mutfak gereçleri ile leke tutmaz ve su geçirmez kaplama içeren tekstil ürünlerinin kullanımının sınırlandırılması ve mesleki ortamlarda koruyucu önlemlere özen gösterilmesi sayılabilir. Hassas gruplar olan gebeler, bebekler, çocuklar ve kronik hastalığı olan bireylerin korunması özel bir öncelik olmalıdır.

Sonuç olarak, çevresel kimyasallara maruziyetin azaltılması yalnızca düzenleyici otoritelerin değil; sağlık çalışanları, araştırmacılar, sanayi temsilcileri ve bireylerin paylaştığı ortak bir sorumluluktur. Türkiye'de bu alandaki bilimsel çalışmaların, mevzuat uygulamalarının ve halk sağlığı politikalarının uyum içinde geliştirilmesi, mevcut ve gelecek kuşakların sağlığının korunması açısından kritik bir gerekliliktir.

Kaynaklar

Adamu, A., Li, S., & Gao, F. (2024). The role of neuroinflammation in neurodegenerative diseases: Current understanding and future therapeutic targets. Frontiers in Aging Neuroscience, 16, 1347987.

Arredondo Eve, A., Tunc, E., Mehta, D., Yoo, J. Y., Yilmaz, H. E., Emren, S. V., Akyıldız Akçay, F., & Madak Erdogan, Z. (2024). PFAS and their association with the increased risk of cardiovascular disease in postmenopausal women. Toxicological Sciences, 200(2), 312-323.

Angrand, R. C., Collins, G., Landrigan, P. J., et al. (2022). Relation of blood lead levels and lead in gasoline: An updated systematic review. Environmental Health, 21, 138.

Dobrzyńska, E., Wasilewski, P., & Pośniak, M. (2025). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): A comprehensive review of environmental distribution, health impacts, and regulatory landscape. Applied Sciences, 15(22), 11884.

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel), Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L. R., Leblanc, J.-C., Nebbia, C. S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Vleminckx, C., Wallace, H., Barregård, L., Ceccatelli, S., Cravedi, J.-P., Halldorsson, T. I., Haug, L. S., Johansson, N., Knutsen, H. K., Rose, M., Roudot, A.-C., Van Loveren, H., Vollmer, G., Mackay, K., Riolo, F., & Schwerdtle, T. (2020). Scientific opinion on the risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal, 18(9), 6223, 391.

Jomova, K., Alomar, S. Y., Nepovimova, E., Chmielarz, P., Kuca, K., Rhodes, C. J., & Valko, M. (2025). Heavy metals: Toxicity and human health effects. Archives of Toxicology, 99, 153-209.

Lin, H. C., Hao, W. M., & Chu, P. H. (2021). Cadmium and cardiovascular disease: An overview of pathophysiology, epidemiology, therapy, and predictive value. Revista Portuguesa de Cardiologia (English Edition), 40(8), 611-617.

Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. Frontiers in Pharmacology, 12, 643972.

Rasin, P., & Sreekanth, A. (2023). Cadmium exposure and cardiovascular diseases. Chemical Research in Toxicology, 36(9), 1441-1443.

Reif, B. M., & Murray, B. P. (2024). Chromium toxicity. In StatPearls. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK59 9502/.

Riaz, R. M. Y., Murtaza, G., Farooqi, Z. U. R., Ali, S., Aziz, H., Mahboob, S., Al-Ghanim, K. A., Owens, G., Ahmad, H. R., & Riaz, U. (2022). Assessment of arsenic contamination in groundwater and associated human health risk. Sustainability, 14(19), 12460.

Shin, D. Y., Lee, S. M., Jang, Y., et al. (2023). Adverse human health effects of chromium by exposure route: A comprehensive review based on toxicogenomic approach. International Journal of Molecular Sciences, 24(4), 3410.

Tam, L. M., & Rand, M. D. (2024). Review: Myogenic and muscle toxicity targets of environmental methylmercury exposure. Archives of Toxicology, 98(6), 1645-1658.

Verbovaya, E. R., Kadnikov, I. A., Logvinov, I. O., Antipova, T. A., Voronin, M. V., & Seredenin, S. B. (2024). In vitro modelling of Parkinson's disease using 6-OHDA is associated with increased NQO2 activity. Toxicology in Vitro, 101, 105940.

Verzelloni, P., Urbano, T., & Wise, L. A. (2024). Cadmium exposure and cardiovascular disease risk: A systematic review and dose-response meta-analysis. Environmental Pollution, 345, 123462.

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

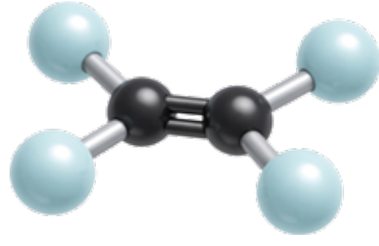
Prof. Dr. Ersi Kalfoğlu

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

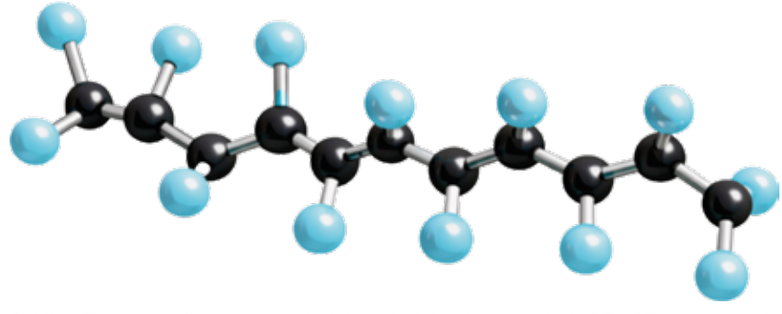
1936 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), DuPont adı ile bilinen şirketin kimyacılarından Roy J, Plunkett, son derece kararlı bir kimyasal ürün sentezledi. Söz konusu ürün hiçbir şekilde tepkimeye girmeyen, dolayısı ile de sağlığa herhangi bir zararı olmadığı ifade edilen tetrafloroetilenin polimerleşmiş hâlidir (Şekil 1, 2).

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

TEFLON kendi başına o denli tepkimesizdir ki organizma içinde hiçbir biyotransformasyona uğramaz ve olası maruziyetten sonra atılır. Aynı nedenle günümüzde en yaygın kullanılan implantlar TEFLON ürünü olup, vücudumuzda hiçbir değişime uğramadan gerek ortopedik gerek kardiyovasküler gerekse de farklı alanlarda üst düzey yarar sağlar. Malzeme sadece 350 derecenin üstünde ısıtıldığında tehlikeli sayılabilecek hafif bir duman ortaya çıkar ancak günlük yaşamda bu derecelere çıkılmadığından tehlikeli olarak değerlendirilmez. Sonuç olarak TEFLON'un biyolojik olarak inert ve klinik olarak kabul edilebilir olduğu kanaatine varıldı. Günümüzde politetrafloroetilen (PTFE) membranları medikal alanda hâlen "altın standart" olarak ifade edilmektedirler. Ancak aynı zamanda son



Şekil 1. Tetrafloroetilenin (CF_2=CF_2) karbon ve flor atomları arasındaki bağları gösteren üç boyutlu moleküler temsili. Bu monomer, polimerizasyon süreci sonucunda politetrafloroetilen (PTFE, TEFLON) yapısını oluşturmaktadır.



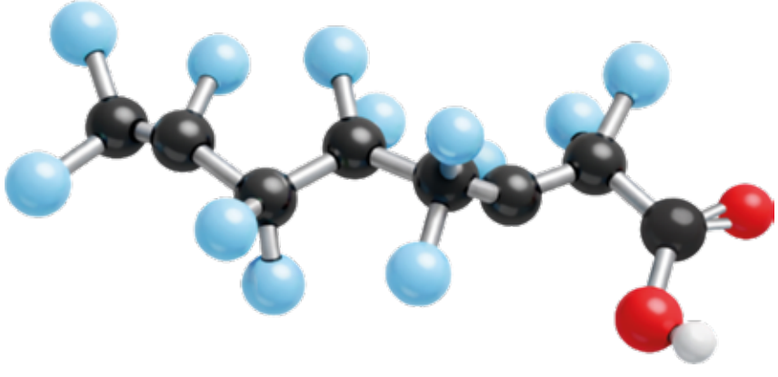
Şekil 2. Tetrafloroetilen monomerlerinin ardışık bağlanmasıyla (–CF_2–CF_2–)$_n$ yapısında politetrafloroetilen zincirinin oluşumunu gösteren şematik ve üç boyutlu moleküler gösterim. Güçlü karbon–flor bağları, polimerin yüksek kimyasal kararlılığının temelini oluşturmaktadır.

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

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

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

Bu gelişmeden sonra, DuPont ürünü ticarileştirerek piyasaya sürdü. 1960'lı yıllarda yapışmaz mutfak eşyaları, su geçirmez tekstiller, leke tutmaz halılar ve benzer yüzlerce üründe TEFLON kullanılmaya başlandı. O zamandan beri yapılan retrospektif değerlendirmeler, temel çevresel endişenin TEFLON'un kendisinden değil, polimerizasyon başlatıcıları ve işleme ajanları olarak kullanılan florlu bileşiklerden (PFAS) kaynaklandığını göstermiştir (Gaines, 2023). Polimerleşmeyen ama polimerleşmeye katkıda bulunan bu florlu kimyasallar sentezden sonra arıtılmadıklarında doğaya atık olarak sürülürler. Çevreye katılımları özellikle endüstriyel kullanım, evsel ürün kullanımı, kanalizasyon yolu ile gerçekleşmekte, kararlılıkları nedeni ile de uzun süre çevrede kalır ve yayılırlar. Yüksek çözünürlük gösterdiklerinden topraktan sulara rahatlıkla aktarılabilmekte, böylece akuatik sistemleri etkileyebilmektedir. Çevreye dâhil olduklarında biyolojik ve kimyasal yıkıma uğramadıklarından ciddi bir birikim gerçekleşir. Genellikle organik çevre kirleticileri lipidlere bağlanırken, PFAS'lar proteinlere bağlanır. Böylece organizmalarda kan, karaciğer, böbrek, gibi dokularda birikir. Gerçekleştirilen araştırmalar ışığında çok küçük miktarların dahi karaciğer harabiyetine neden olduğu ve farklı organları etkilediği bildirilmektedir (Zahm, 2024). Bozunmamaları nedeni ile "Sonsuz Kimyasallar - Forever Chemicals" olarak gündeme gelmektedirler. Ancak C ve F den oluşan bu tür moleküllerin sadece perflorooktanoik asit (C8) C8'den ibaret değildir. Olası toksisite ortaya çıktığında 6, 7, 8 karbonlu, düz veya dallanmış binlerce sayıda alternatif alkil polimer sentezlerinde kullanılagelmiştir (Tablo 1).



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

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

PFAS Sınıfı	Bileşik Örneği	Kapalı Formül
Perflorokarboksilik Asitler (PFCA)	Perflorooktanoik asit (PFOA)	$CF_3–(CF_2)_6–COOH$
	Perfloroheksanoik asit (PFHxA)	$CF_3–(CF_2)_4–COOH$
Perflorosülfonik Asitler (PFSA)	Perflorooktansülfonik asit (PFOS)	$CF_3–(CF_2)_7–SO_3H$
Florotelomer Alkoller (FTOH)	8:2 Florotelomer alkol	$CF_3–(CF_2)_7–CH_2–CH_2–OH$
Florotelomer Asitler	8:2 Florotelomer karboksilik asit	$CF_3–(CF_2)_7–CH_2–CH_2–COOH$
Perfloroalkil Sülfonamidler	FOSA	$CF_3–(CF_2)_7–SO_2–NH_2$
Floropolimerler	Politetrafloroetilen (PTFE, Teflon)	$(–CF_2–CF_2–)_n$
Perfloroeter Asitler (Yeni nesil PFAS)	GenX (HFPO-DA)	$CF_3–CF_2–O–CF(CF_3)–COOH$

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

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

Küresel Dağılım ve Maruziyet

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

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

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

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

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

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

Karışım Hâlinde PFAS'ların Kümülatif Etkileri

İnsan organizması genel olarak birden fazla ve çeşitli yapıda PFAS'a maruz kalmaktadır. Bu durumdaki karışım etkilerini incelemek zordur (Goodrum, 2021). Genel olarak çalışmalar her bir molekülü ayrı ayrı ele alır ve etkilerini inceler. Ancak kimyasalların kümülatif risk çalışmaları farklı bir yaklaşım gerektirir.

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

He Q (2025) ve arkadaşları ilk olarak PFAS karışımının nörotransmitterle ilgili yollar aracılığıyla nörotoksisiteye neden olduğu, PFAS maruziyeti risklerini azaltmak için kamu sağlığı politikalarına ve önleyici stratejilere duyulan ihtiyacın altını çizmişlerdir. Du X (2024) ve arkadaşları ise, hayvan modeli çalışmaları ile, kombine PFAS maruziyetinin hepatositlerde iltihaplanma ve steatoz, karaciğer enzimlerinde yükselme, kolestaz ve safra kanalı tıkanıklığı gibi patolojik değişikliklere yol açtığını göstermişlerdir. Ayrıca çalışma sitokrom P4502E1 ve glutatyon S-transferaz A1 sinyalizasyonunun aktivasyonu, PFAS kaynaklı hepatik lipid metabolizmasındaki bozulmalar için etkileri de vurgulamaktadır. Bu durumda karışım maruziyeti kesinlikle söz konusudur. Bu maruziyetin klinik etkilerini çalışmak ve potansiyel sağlık sorunlarını ortaya çıkarmak çok önemli ve oldukça zordur (Sunderland ve ark., 2018).

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

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

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

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

Ülkemizde Durum

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

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

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

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

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

PFAS Kirliliğinin Adli Bilimsel Boyutu

Global önleme stratejileri anlamında PFAS genel bir toksikolojik konu olma dışında, ciddi bir hukuksal konu olarak ortaya çıkmaktadır. Çevre kirliliğine neden olan kuruluşların cezai sorumluluklarının tespitinde, kirleticinin kendisinin tespiti ile birlikte söz konusu kirleticinin kaynağının da saptanması şarttır. Bu anlamda adli bilimler kimyasal belirleme ile hukuksal boyut arasında bir köprü oluşturmaktadır. PFAS'ların kaynağının saptanması özellikle bu bileşiklerin kalıcılığı, hareketliliği ve üretim çeşitliliği göz önüne alındığında, düzenleyici yaptırımlar, iyileştirme maliyetlerinin tahsisi ve adli süreçlerde temel bir rol oynamaktadır (Anderson ve ark., 2018). PFAS kirliliğinin kaynaklarının belirlenmesi, analitik kimya, mekansal modelleme ve bağlamsal endüstriyel değerlendirmenin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. PFAS'ların dallanma ve farklı fonksiyonel gruplar dâhil olmak üzere çok sayıda yapısal çeşitlilik, moleküler parmak izi oluşturmayı mümkün kılar; bu sayede çevresel örneklerde (yer altı suyu, toprak, yüzey suyu veya biyota) tespit edilen PFAS profilleri, bilinen endüstriyel formülasyonlar veya ürünlerle karşılaştırılır ve bu yolla kaynak tespiti gerçekleşmiş olur. Bu konu ile ilgili kullanılabilecek nitelikte çok çeşitli analitik kimya teknikleri mevcuttur.

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

Ancak, kaynak tanımlaması, çevresel kalıcılık ve atık su arıtma sistemleri veya atmosferik çökelme yoluyla ikincil yeniden dağıtım nedeniyle karmaşıktır. Dünya çapında PFAS ile ilgili davalar arttıkça, standartlaştırılmış yöntemlerin geliştirilmesi, düzenleyici uyumluluk değerlendirmelerini, iyileştirme stratejilerini ve sorumluluğun yasal olarak belirlenmesini desteklemede kritik önem taşıyacaktır.

Gelecek Perspektifleri ve Stratejik Öncelikler

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

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

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

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

Kaynaklar

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Çevre sağlığı sorunu olarak PFAS'lar

Dr. Zeynep Akdoğan

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

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

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

Yakın tarihli bir çalışma, bu yayılımın Türkiye için de geçerli olduğunu göstermiştir. Türkiye'nin farklı tatlı su kaynaklarında yürütülen bir araştırmada; Terkos, Küçükçekmece, Büyükçekmece, Eğirdir ve Beyşehir gölleri ile Ergene ve Sakarya nehirlerinden alınan su ve balık örneklerinde PFAS tespit edilmiştir (6). Bu durum, söz konusu maddelerin halk sağlığı açısından Türkiye'de de önemli bir risk unsuru oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Halk Sağlığına Etkileri ve İnsanlar Üzerinde Yapılan İncelemeler

PFAS kirliliğinin küresel ölçekte yayılım göstermesi ve su, toprak ile hava gibi hemen her çevresel ortamda tespit edilmesi, bu maddelerin hayvanlar, bitkiler ve insanlar üzerinde biyobirikimine yol açmaktadır. İnsanlar PFAS'lara içme suyu, hava, iç mekân tozu, toprak, gıda, gıda ile temas eden malzemeler ve pişirme kapları aracılığıyla maruz kalabilmektedir (7). Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kanada, Şili, Fransa, Japonya, Meksika ve Norveç gibi birçok ülkede gerçekleştirilen içme suyu analizlerinde PFAS bileşiklerinin konsantrasyonlarının, tespit limitinin altından 39 ng/L'ye kadar uzanan geniş bir aralıkta dağılım gösterdiği belirlenmiştir (8). Türkiye'de, süpermarketlerden temin edilmiş 18 farklı markaya ait şişe içme sularında yapılan bir araştırmaya göre ise, ortalama PFAS değeri 0,41 ng/L olarak tespit edilmiştir (9). Aynı araştırmaya göre, Türkiye'nin en büyük ve sanayileşmiş illerinden biri olan İstanbul'un musluk sularında Türkiye'nin diğer illerine kıyasla yüksek oranda PFAS (11,27 ng/L) bulunmuştur. İzmir, Eskişehir, Ankara, Gaziantep, Şanlıurfa ve Adana gibi diğer kalabalık ve sanayileşmiş şehirlerden alınan örneklerde de önemli miktarlarda PFAS tespit edilmiştir. Araştırmaya göre, bulgular, ABD Çevre Koruma Ajansı'nın içme suları için belirlediği PFAS sınır değerleriyle karşılaştırıldığında herhangi bir sağlık endişesi yaratmasa da çocuklar üzerinde yapılan immünotoksisite çalışmaları, içme suyunda, özellikle PFAS'ların sıkça rastlanan bileşikleri olan PFOS (Perflorooktansülfonat) ve PFOA (Perflorooktanoik asit) için çok daha düşük bir referans seviyesi (1 ng/L) önermiştir (9, 10). Bu bulgular ve araştırma sonuçlarına göre, içme sularında PFAS sınır değerleri için uygun standartların belirlenmesi hem Türkiye'de hem de küresel ölçekte gereklidir. Ancak PFAS'ların özellikle içme sularında çok düşük konsantrasyonlarda bulunmaları nedeniyle ölçülmesi ve geleneksel arıtma yöntemleriyle giderilmesi oldukça zordur. Buna karşın, son yıllarda geliştirilen yeni arıtma teknolojileri sayesinde ABD Çevre Koruma Ajansı, İçme Suyu Arıtılabilirlik Veritabanı'na 26 PFAS kimyasalının giderimini kapsayan yeni arıtma proseslerini dâhil etmiştir (11). Ancak çok sayıdaki PFAS türü ve bunların farklı toksisite seviyeleri göz önünde bulundurulduğunda bu maddelerin izlenmesi ve arıtılması yönünde daha kapsamlı yeni teknolojilere ihtiyaç olduğu açıkça görülmektedir.

Farklı gıda türleri üzerinde yapılan araştırmalarda et, süt, deniz ürünleri, yumurta, meyve ve sebzelerde ve hatta anne sütünde PFAS türleri tespit edilmiştir (2). Bu maddeler, insanlar tarafından doğrudan gıda yoluyla alınabildiği gibi, PFAS içeren ambalajlarda satılan gıdaların tüketilmesiyle dolaylı yoldan da bulaşabilmektedir. Çalışmalar, düzenli olarak ambalajlı gıda tüketen kişilerin kan örneklerinde daha yüksek PFAS seviyelerine rastlandığını göstermiştir (2, 12, 13). Ayrıca araştırmalar, PFAS'ların anneden fetüse ya da emzirme ile yenidoğanlara bulaştığını da ortaya koymuştur (7). Günümüzde insanlar üzerinde yapılan epidemiyolojik çalışmalar çoğunlukla uzun zincirli PFAS'lara yoğunlaşsa da (2), 2013-2016 yılları arasında, Çin'de, erken gebelik dönemindeki 752 kadın üzerinde yapılan bir çalışma, kısa zincirli PFAS'lara maruziyetin fetal üreme hormonları üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya çıkarmıştır (14). Tarım ürünleri üzerinde yapılan araştırmalarda da kısa zincirli PFAS'ların buğday, mısır, patates, pirinç, domates vb. birçok bitki tarafından kolayca alındığı ve yaprak, tohum, kök ve gövde kısımlarında birikerek toksik etkilere neden olduğu tespit edilmiştir (2, 15).

PFAS'ların doku ve organlardaki biyobirikimi uzun zamandır araştırılan kritik bir halk sağlığı sorunudur. İnsanlar üzerinde yapılan ilk çalışmalar öncelikle fabrika işçilerine ve PFAS maruziyetiyle ilişkili potansiyel toksik etkilere odaklanmıştır. Örneğin ABD'de yürütülen Ulusal Sağlık ve Beslenme Araştırması, 2003 ve 2004 yıllarında toplanan insan serum örneklerinin yüzde 98'inde eser miktarda PFAS bulunduğunu açıklamıştır (3, 8, 16). Öte yandan, PFOA'nın sağlık üzerindeki etkilerine odaklanan uzun vadeli bir epidemiyolojik çalışmada, 2005 ile 2013 yılları arasında 30.000'den fazla yerli ve fabrika işçisinin tıbbi izleme verileri incelenmiş ve PFOA maruziyeti ile yüksek kolesterol, ülseratif kolit, tiroid hastalığı, testis kanseri, böbrek kanseri ve gebeliğe bağlı hipertansiyon gibi sağlık sorunları arasında bağlantı olduğu bulunmuştur (3, 17, 18). PFAS maruziyeti ayrıca, steroid hormon bozukluğu, kısırlık, insülin direnci, karaciğer ve kardiyovasküler hastalıklar gibi başka sağlık riskleri de oluşturmaktadır (19, 20). Bebeklerde ve çocuklarda, PFAS maruziyeti büyüme parametrelerinde azalmaya, motor becerilerde düşüşe, dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğuna (DEHB), kabakulak ve kızamıkçık gibi hastalıklara

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

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

Tüm bu araştırmalara rağmen, PFAS'ların etkilerini kesin olarak değerlendirmek hâlâ zor bir süreç olarak kabul edilebilir çünkü potansiyel olarak farklı toksisite seviyelerine sahip binlerce PFAS bulunmaktadır. Örneğin farklı türdeki PFAS'ların göreceli etkileri çocuklar ve yetişkinler arasında değişiklik göstermektedir. İnsanlar çeşitli kaynaklardan bu maddelere maruz kalmakta ancak PFAS türleri ve kullanımları zaman içinde değişmekte, bu da maruziyet sonucu sağlık etkilerinin izlenmesini ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda, çoğu çalışma belirli türdeki ya da daha çok bilinen PFAS türlerine odaklanmıştır (23). Çok sayıdaki PFAS türü ve buna bağlı olarak ekosistemdeki kalıcılıkları ve biyobirikim potansiyelleri arasındaki olası farklılıklar PFAS'lara ilişkin toksisite verilerinde belirsizliğe sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, daha güvenilir verilerin elde edilmesi ve izlenmesi için bu karmaşık faktörlerin kapsamlı bir analizi gerekmektedir (24).

Dünyada ve Türkiye'deki Düzenlemeler

PFAS'ların ekosistemdeki birikimlerine dair kanıtların ortaya çıkmasıyla birlikte, 2000'li yılların başında ABD'de ve Tehlikeli Maddelerin Sınırlandırılması direktifi uyarınca, Avrupa'da ilk kısıtlamaların getirilmesiyle bu kirleticiler hakkında farkındalık artmaya başlamıştır. 2009 yılında, PFAS ile ilgili maddelerin Kalıcı Organik Kirleticilere İlişkin Stockholm Sözleşmesi kapsamına alınması ise önemli bir dönüm noktası olmuştur. Sözleşme, katılımcı ülkeler için bu maddelerin üretimini, kullanımını ve salınımını kısıtlamak için yasal olarak bağlayıcı yükümlülükler getirmiştir (3, 23, 25). Buna paralel olarak, Avrupa Birliği giderek daha kapsamlı bir düzenleyici çerçeve geliştirmiş; PFAS'lar Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanmasına İlişkin Tüzük (REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) yönetmeliğine dâhil edilerek üretimleri, pazarlamaları ve kullanımları üzerinde 2023 yılında geniş kapsamlı bir kısıtlama önerisi hazırlanmıştır (26). Yönetmeliğin amaçlarından biri 10.000'e yakın PFAS türünün üretimini ve kullanımını 2025 yılı itibarıyla aşamalı olarak yasaklamak olmuştur. Ayrıca 12 Ocak 2026 itibarıyla yürürlüğe giren kurallara göre üye devletler, İçme Suyu Direktifi kapsamında AB limit değerlerine uyumu sağlamak için içme suyundaki PFAS seviyelerini izlemek zorundadır. Limit değerler aşılırsa, üye devletler halk sağlığını korumak için kirlenmiş kuyuların kapatılması, PFAS giderimi için arıtma adımlarının eklenmesi veya aşım devam ettiği sürece içme suyu kaynaklarının kullanımının kısıtlanması gibi önlemler almalı ve halkı bilgilendirmelidir (27).

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

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

Sonuç ve Gelecek Planı

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

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

Kanun düzenleyiciler PFAS'ları çevresel ortamlardan uzaklaştırmak için çeşitli iyileştirme stratejileri ve uygun standartlar geliştirmelidir. Nitekim, PFAS'ların özellikle içme sularındaki konsantrasyonlarının azaltılması ve kullanımının sınırlandırılması amacıyla AB ülkeleri, ABD ve diğer birçok ülkede çeşitli düzenlemeler yürürlüğe girmiş ve uygulamaya yönelik önemli adımlar atılmıştır. Buna karşın, Türkiye'de PFAS'lara yönelik kapsamlı yasal düzenlemelerin sınırlı olduğu görülmekte olup, bu alanda somut adımların atılması çevre ve halk sağlığı açısından kaçınılmazdır. Bunun için PFAS'ların üretiminden bertarafına kadar olan kullanım, geri dönüşüm, çevreye salınım ve halk sağlığına etkileri gibi süreçler izlenerek risklerin kontrol edilmesi ve eylem planlarının hazırlanması gereklidir. Bu hedeflere ulaşmak için hem atık su hem de içme sularından PFAS'ların giderimine yönelik uygun maliyetli ve verimli yeni teknolojilerin geliştirilmesi desteklenmelidir. Bunun yanı sıra, PFAS maruziyeti ve bu maddelerin olası zararları konusunda kamuoyunun bilinçlendirilmesi, eylem planının önemli adımlarından biri olmalıdır. Aynı zamanda, farklı PFAS türlerinin etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi adına insan biyoizleme çalışmalarının yaygınlaştırılması ve bu maddelerin toksikolojik etkileri üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılması büyük önem taşımaktadır.

Kaynaklar

1) Alam, M.J., Habib, A., Hasan, M.M., et al. (2025). Industrial applications, environmental fate, human exposure, and health effects of PFAS. Pollutants, 5, 43.

2) Yurtsever, M., 2024. Per- ve polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasallar) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 412-423.

3) Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S.R., et al. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. Science of the Total Environment, 809, 151003.

4) Benskin, J.P., Muir, D.C.G., Scott, B.F., et al. (2012). Perfluoroalkyl acids in the Atlantic and Canadian arctic oceans. Environmental Science & Technology, 46, 5815-5823.

5) Miner, K.R., Clifford, H., Taruscio, T., et al. (2021). Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest. Science of the Total Environment, 759, 144421.

6) Ikizoglu, B. (2024). PFOA and PFOS pollution in surface waters and surface water fish. Water, 16, 2342.

7) Mišľanová, C., & Valachovičová, M. (2025). Health impacts of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): A comprehensive review. Life, 15, 1-35.

8) Kaboré, H.A., Vo Duy, S., Munoz, G., et al. (2018). Worldwide drinking water occurrence and levels of newly-identified perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances. Science of the Total Environment, 616-617, 1089-1100.

9) Ünlü Endirlik, B., Bakır, E., Boşgelmez, İ.İ., et al. (2019). Assessment of perfluoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey. Chemosphere, 235, 1162-1171.

10) Grandjean, P., & Budtz-Jorgensen, E. (2013). Immunotoxicity of perfluorinated alkylates: calculation of benchmark doses based on serum concentrations in children. Environmental Health, 12, 35.

11) US EPA. https://tdb.epa.gov/tdb/home (Erişim Tarihi: 24.01.2026).

12) Susmann, H.P., Schaider, L.A., Rodgers, K.M., et al. (2019). Dietary habits related to food packaging and population exposure to PFASs. Environmental Health Perspectives, 127(10), 107003.

13) Marchiandi, J., Alghamdi, W., Dagnino, S., et al. (2024). Exposure to endocrine disrupting chemicals from beverage packaging materials and risk assessment for consumers. Journal of Hazardous Materials, 465, 133314, 2024.

14) Nian, M., Luo, K., Luo, F., et al. (2020). Association between prenatal exposure to PFAS and fetal sex hormones: Are the short-chain pfas safer? Environmental Science & Technology, 54, 8291-8299.

15) Lesmeister, L., Lange, F.T., Breuer, J., et al. (2021). Extending the knowledge about PFAS bioaccumulation factors for agricultural plants – A review. Science of the Total Environment, 766, 142640.

16) Calafat, A.M., Wong, L.Y., Kuklenyik, Z., et al. (2007). Polyfluoroalkyl chemicals in the U.S. population: Data from the national health and nutrition examination survey (NHANES) 2003-2004 and comparisons with NHANES 1999-2000. Environmental Health Perspectives, 115, 1596-1602.

17) Nicole, W. (2013). PFOA and cancer in a highly exposed community: New findings from the C8 science panel. Environmental Health Perspectives, 121, A340.

18) Winquist, A., Lally, C., Shin, H.M., et al. (2013). Design, methods, and population for a study of PFOA health effects among highly exposed Mid-Ohio Valley community residents and workers. Environmental Health Perspectives, 121, 893-899.

19) Fenton, S.E., Ducatman, A., Boobis, A., et al. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research. Environmental Toxicology and Chemistry, 40, 606.

20) Manojkumar, Y., Pilli, S., Rao, P.V., et al. (2023). Sources, occurrence and toxic effects of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Neurotoxicology and Teratology, 97, 107174.

21) Cousins, I.T., Johansson, J.H., Salter, M.E., et al. (2022). Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Environmental Science & Technology, 56(16), 11172-11179.

22) Nnabuchi, M.A., & Duru, C.E. (2025). PFAS toxicity and female reproductive health: A review of the evidence and current state of knowledge. Substantia, 9, 7-22.

23) Dobrzyńska, E., Wasilewski, P., & Pośniak, M. (2025). Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): A comprehensive review of environmental distribution, health impacts, and regulatory landscape. Applied Sciences, 15(22), 11884.

24) DeLuca, N.M., Minucci, J.M., Mullikin, A., et al. (2022). Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. Environment International, 162, 107149.

25) Ural, G.N., Topuz, O.K., Ünlüsayın, M. (2025). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) on aquatic food products. Toxin Reviews. 44, 129-136.

26) ECHA (2025). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas (Erişim Tarihi: 24.01.2026).

27) Su Politikaları Derneği. https://supolitikalaridernegi.org/avrupa-birligi-uye-devletleri-icme-suyunda-pfas-izlemeye-basliyor/ (Erişim Tarihi: 23.01.2026).

28) Paustenbach, D., McCauley, K., Siracusa, J., et al. (2025). United States Environmental Protection Agency's Perfluorooctanoic Acid, Perfluorooctane Sulfonic Acid, and Related Per- and Polyfluoroalkyl Substances 2024 Drinking Water Maximum Contaminant Level: Part 2 – Fifteen Misconceptions About the Health Hazards. Critical Reviews in Toxicology, 55(3), 368-415.

Sonsuza kadar kalıcı kimyasallar, PFAS ve çevre sağlığı

Prof. Dr. Mustafa Öztürk

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

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

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

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

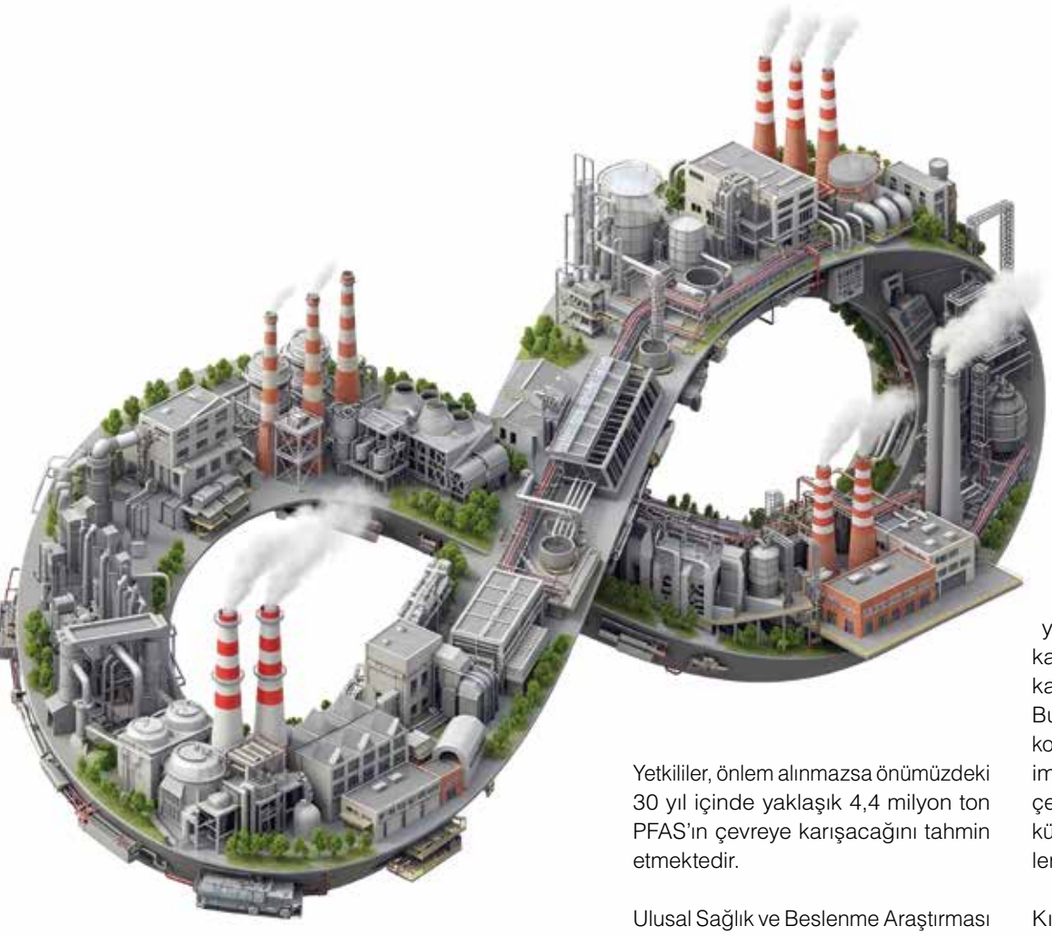
PFAS aynı zamanda kalıcı kimyasallar olarak da bilinir; son 20 yılda giderek artan bir ilgi görmektedir. Bunun nedeni, bu maddelerin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerine ilişkin farkındalığın artmasıdır. AB, PFAS'ı bir grup olarak kısıtlamaya yönelik devam eden çabalar, belirli PFAS alt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

PFAS Üretimi

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

- PFAS'lar, organik kimyadaki en güçlü kimyasal bağlardan biri olan karbon-flor bağları içerir.
- Telomerizasyon (Reomerizasyon): 1970'lerden itibaren yaygınlaşan bu yöntem, tetrafloroetilen (TFE) gibi daha küçük florokarbon birimlerinin birleştirilmesiyle perfloroalkil iyodürlerin (PFAI) üretilmesine dayanır. Bu yöntem, ECF'den farklı olarak daha çok doğrusal zincirli yapılar üretir.
- PFAS, yaklaşık bir asırdır elektrokimyasal florlama işlemi kullanılarak üretilmektedir.
- PFAS'lar, doğrudan florlama (örneğin elektrokimyasal) ve oligomerizasyon (örneğin florotelomerizasyon) olmak üzere iki işlemle sentezlenir.
- PFAS'lar, çeşitli uzunluklarda karbon zincirlerine sahip, hidrojen atomlarının flor atomları ve sülfonat, karboksilat, sülfonamid, alkoller ve fosfonat gibi çeşitli terminal fonksiyonel grupları ile tam (perflorlanmış) veya kısmi (poliflorlanmış) yer değiştirmesi olan, genel formülü $C_n F_{2n+1}$ olan alifatik organik bileşiklerdir.
- PFAS'lar, hidrojen atomlarının (karbonun doğal bağ ortağı) flor atomlarıyla değiştirilmesiyle oluşturulan insan yapımı maddelerdir.

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



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

Dünyada Üretilen PFAS Miktarı

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

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

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

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

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

PFAS Kimyasalları Pazarına Genel Bakış

PFAS kimyasalları pazarı; havacılık, inşaat, otomotiv ve elektronik endüstrileri gibi çeşitli sektörlerde PFAS kimyasal ürünlerinin yaygın olarak benimsenmesi etrafında dönmektedir. PFAS kimyasalları, birçok tüketici ürününde yaygın olarak kullanılan geniş bir sentetik kimyasal grubuna aittir.

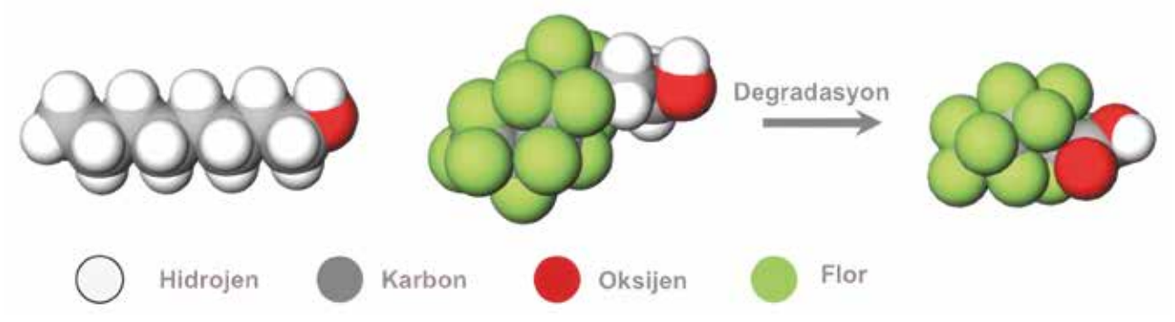
Uygulama Alanları

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

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

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

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



Şekil 1. PFAS üretimi

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

PFAS'a Maruz Kalma

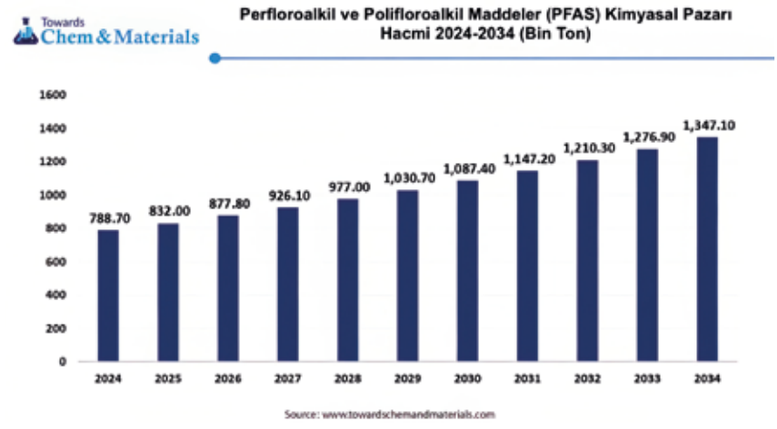
Maruziyet, bir kişinin bu tür kimyasalı soluması, yemesi, içmesi veya dokunması ve bunun vücuduna girmesiyle gerçekleşir. Maruziyet şu şekilde meydana gelebilir: 1) Kirli hava, toprak veya içme suyu bulunan yerlerin yanında ve yakınında yaşamak. 2) PFAS üretilen ve kullanılan yerlerin yakınında yetiştirilen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

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

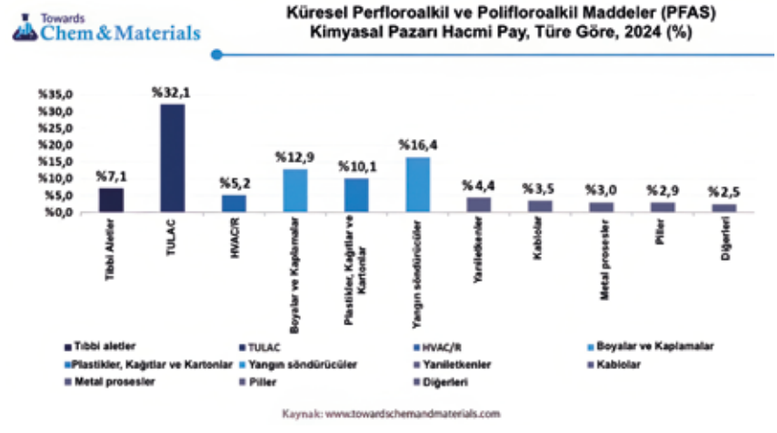
İçme Suyunda PFAS Sınırlaması

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

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



Şekil 2. PFAS üretimi ve gelecekte üretilecekler



Şekil 3. PFAS kullanım alanları

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

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

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

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

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

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

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

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

- Meyve, sebze ve işlenmiş balık ürünlerini muhafaza etmek için kullanılan ambalajlar başta olmak üzere, BPA ile üretilen vernik ve kaplamalar kullanılarak üretilen tek kullanımlık, son gıda temasına sahip ürünler, 20 Temmuz 2028 tarihine kadar AB'de pazarlanmasına devam edilecektir.
- Eski düzenlemelere göre piyasaya arz edilen tek kullanımlık, son gıda temasına maruz kalan maddeler, geçerli geçiş süresinin bitiminden itibaren 12 ay boyunca gıda ile doldurulup kapatılabilir ve elde edilen ambalajlı gıda, stoklar tükeninceye kadar piyasaya arz edilebilir.
- (AB) 2024/3190 sayılı Yönetmeliğin yürürlüğe girdiği tarihten önce yürürlükte olan kurallara uygun olan ancak yeni kurallara uymayan, profesyonel gıda üretim ekipmanı olarak kullanılan tekrar kullanılabilir, son gıda temasına dayanıklı ürünler, 20 Ocak 2028 tarihine kadar ilk kez piyasaya arz edilebilir.
- Eski düzenlemelere uygun olarak piyasaya ilk kez arz edilen tekrar kullanılabilir son gıda teması maddeleri en geç 20 Ocak 2029 tarihine kadar piyasada kalabilir.

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

Yangın Söndürme Köpüklerinde PFAS Yasaklanması

Nisan 2025'te AB Üye Devletleri, yangın söndürme köpüklerinde PFAS'ı yasaklayan sektöre özgü bir kısıtlamayı resmen kabul etti. Bu, bugüne kadarki en gelişmiş PFAS kısıtlamasıydı. Ulusal önlemler de ortaya çıkıyor; Fransa, PFAS'ı 2026'dan itibaren kozmetik, tekstil ve kayak mumlarında yasaklayan ve yasağı 2030 yılına kadar tüm tekstil ürünlerini kapsayacak şekilde genişleten bir yasayı kabul ediyor.

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

Kirleticiler PFAS Polimerinin Yaşam Döngüleri Boyunca Yayılır

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

Şekil 4. PFAS polimerlerinin üretimden atık aşamasına kadar yaşam döngüsü

PFAS Polimerlerinin Üretimi

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

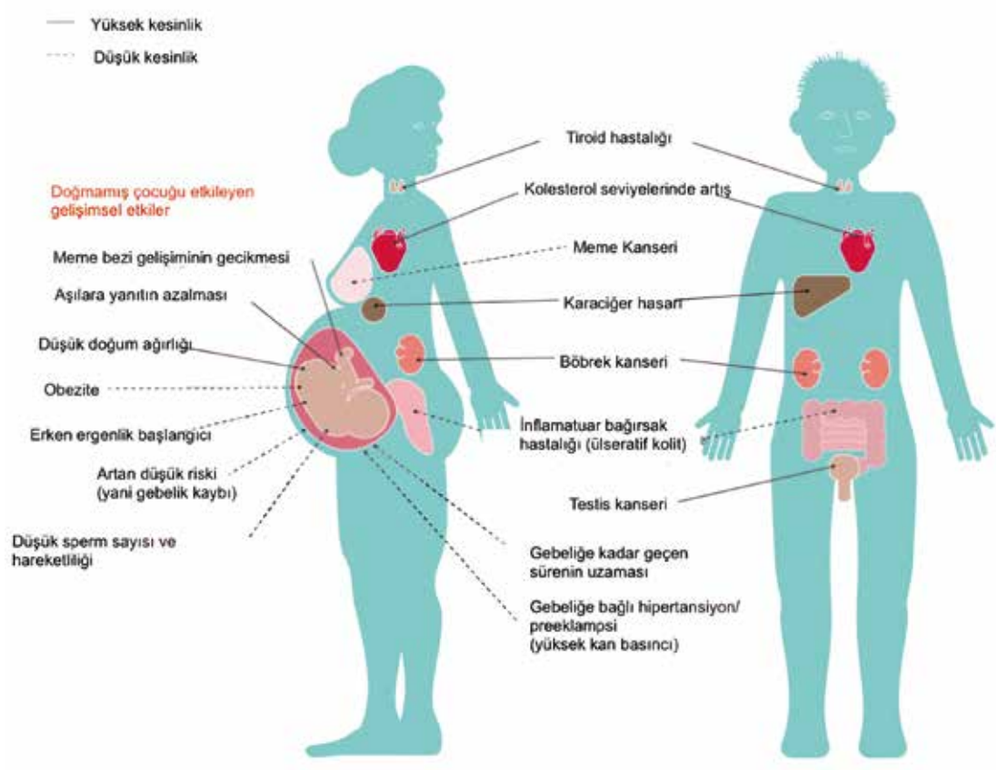
Daha az çalışılmış bir konu ise uçucu florlu maddelerin emisyonudur. Bunlar ozon tabakasına zarar verebilen güçlü iklim gazları veya maddelerdir. Bazı floropolimerleri üretmek için ham madde kimyasalları olarak kullanılırlar veya sentez yan ürünleri olarak oluşabilirler. Örneğin sera gazı triflorometan (HFC-23) ve ozon tabakasını incelten madde diklorofloromethan (HCFC-22), PTFE üretiminde yan ürün olarak oluşur. HFC-23'ün küresel ısınma potansiyeli karbondioksitten (CO_2) 12 bin 400 kat daha fazladır. Tahminler, 2018'de 1.800 ton HFC-23'ün yan ürün olarak salındığını göstermektedir; bu rakam yalnızca PTFE üretiminden kaynaklanmaktadır.

PFAS Polimerleri İçeren Ürünlerin Üretimi

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

PFAS Polimerleri İçeren Ürünlerin Kullanımı

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



Şekil 5. PFAS sağlık üzerine etkileri

PFAS Nelerde Bulunur?

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

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

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

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

İçme Suları, Atık Su ve Atık Depolama

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

PFAS ve İnsan Sağlığı

PFAS ile ilişkili sağlık etkileri riski şunlara bağlıdır: 1) Maruz kalma faktörleri (örneğin doz, sıklık, yol ve süre). 2) Bireysel faktörler (örneğin duyarlılık ve hastalık yükü). 3) Sağlığın diğer belirleyicileri (örneğin güvenli suya erişim ve kaliteli sağlık hizmeti).

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

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

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

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

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

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

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

- Böbrek, meme kanseri riskinin artması,
- Karaciğer enzim değişiklikleri (yetişkinlerde ve çocuklarda) artması,
- Gebelik kaynaklı hipertansiyon (gestasyonel hipertansiyon ve preeklampsi) riskinin artması,
- Testis kanseri riskinin artması (yetişkinlerde),
- Tiroid hastalığı ve disfonksiyonu (yetişkinlerde), (Tiroid hormon düzeyleri dışındaki endokrin bozuklukları) artması,
- Antikor yanıtının azalması ve ülseratif kolit riskinin artması (yetişkinlerde),
- Solunum etkilerinin artması,
- Hematolojik etkiler,
- Nörolojik etkiler.

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

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

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

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

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

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

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

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

Maruz Kalanlar

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

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

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

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), "sonsuza kadar kimyasallar" (forever chemicals) olarak da bilinen; çevrede ve insan vücudunda uzun süre kalabilen endüstriyel kirleticiler olup, AB 2020 revizyonunda ilk kez PFAS toplamı için 0,5 µg/L ve yirmi belirli PFAS bileşiği toplamı için 0,1 µg/L limitleri getirmiştir.

PFAS İçeren Atıklar ve Geri Dönüşüm

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

PFAS içeren malzemelerin geri dönüşümü, uzun süreli maruziyete yol açabilir. Örneğin tekstil ürünlerinin geri dönüşümünde, PFAS, amaçlanmadığı hâlde yeni ürün türlerine dâhil edilebilir. Dolayısıyla, kullanım ömrü sonunda PFAS içeren ürünler, geri dönüşüm sonucunda insanlarda kontrolsüz maruziyete ve çevreye salınıma neden olabilir. Alternatif olarak, malzemeleri döngüsellikten çıkarıp çöplüklere veya yakma tesislerine göndererek geri dönüşüme engel teşkil edebilirler.

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

PFAS İçeren Atıkların Yakılması

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

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

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

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

Avustralya'da Üç Tür PFAS Yasaklandı

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

- Ulusal Sağlık ve Beslenme İnceleme Anketi'ne (NHANES) ile Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri (CDC) tarafından sağlanan verilere göre, PFAS ile kirlenmiş su veya gıdalar yoluyla yoğun PFAS maruziyeti nedeniyle Amerikalıların yüzde 97'sinin kanında PFAS tespit edilmiştir. Bu veriler, PFAS kimyasallarının pazarın her alanında yoğun bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.

- Eylül 2024'te Amerikan Kimya Konseyi (ACC), Çevre Koruma Ajansının (EPA) Merkezi Veri Değişimi (CDX) sisteminin kapsamlı testlerini sağlamak için PFAS kimyasallarının endüstrileri ve alt kullanıcıları ile iş birliği yapma çabalarını takdir etti.

Sonuç ve Sonraki Adımlar

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

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

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

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

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

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

Kaynaklar

https://chemtrust.org/pfas/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://eeb.org/european-citizens-alarmingly-high-chemical-exposure/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://eeb.org/high-level-european-politicians-polluted-by-pfas/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://eeb.org/work-areas/industry-health/pfas/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/05/uPFAS-restriction-10-page-explainer-1.pdf (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://hls.harvard.edu/today/the-impact-of-the-epas-first-ever-federal-pfas-rule-limiting-toxic-forever-chemicals-in-drinking-water/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://pfas-1.itrcweb.org/2-5-pfas-uses/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/about/index.html (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.bund.net/themen/aktuelles/detail-aktuelles/news/pfas-im-trinkwasser-bund-findet-ewigkeits-chemikalien-in-leitungs-und-mineralwasser/ (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-chemicals-what-are-the-health-effects-of-pfas_6016910_8.html (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2023/02/23/forever-pollution-explore-the-map-of-europe-s-pfas-contamination_6016905_8.html (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK584702/#pz32-4 (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.theguardian.com/environment/2024/apr/10/pfas-forever-chemicals-limits-drinking-water (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.towardschemandmaterials.com/insights/per-and-polyfluoroalkyl-substances-chemicals-market (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

https://www.waterboards.ca.gov/pfas/docs/master_pfas_faq_mar.pdf (Erişim Tarihi: 04.05.2026).

Küresel PFAS krizi: sağlık riskleri ve düzenleyici yaklaşımlar

Prof. Dr. Meral Yurtsever

Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesidir. Uzmanlık alanları arasında, su kirliliği, su ve atık su arıtımı, ileri arıtma teknikleri, çevre kirliliği, çevre kontrolü ve yönetimi konuları yer almaktadır. 2014'ten bu yana çevrede ve farklı matrislerdeki mikroplastik kirliliği başta olmak üzere farklı mikrokirleticiler üzerinde çalışmakta olup, farklı ortam ve matrislerde kirleticilerin örneklenmesi, ekstraksiyonu ve analizleri konusunda öncü araştırmalar ve projeler yürütmektedir. 2000 yılında Araştırma Görevlisi olarak başladığı akademik hayatına, bilimsel çalışmalarıyla aktif olarak devam etmektedir.

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), yapılarındaki karbon-flor bağının kimyasal stabilitesi sayesinde zaman ve çevre koşulları karşısında neredeyse hiç bozunmayan, bundan dolayı da literatürde "sonsuz kimyasallar" (forever chemicals) olarak adlandırılan insan yapımı bileşiklerdir (Yurtsever, 2025a). 1950'li yıllardan itibaren, su ve yağ geçirmez kaplamalar, yüzey aktif maddeler, itfaiye köpükleri (AFFF), gıda ambalajları, tekstil, deri, elektronik ve sağlık teknolojileri dâhil olmak üzere küresel ölçekte yaklaşık >4.700 farklı PFAS bileşik türü kullanılmıştır (Yurtsever, 2025b; Samarasinghe vd., 2025). Bu kadar yaygın kullanım, PFAS'ları insan yaşamının her alanına taşımıştır.

PFAS'ların Çevresel Yayılımı ve Sağlıkla İlişkili Maruziyet Boyutu

Bugün arıtılmış içme suyunda (Sadia vd., 2023), toprakta (Costello vd., 2024), göl ve nehir sistemlerinde (Sims vd., 2025; Valsecchi vd., 2021; Sharma vd., 2016), atmosferik partiküllerde (Li vd., 2024; Persaud vd., 2024), ev içi tozlarda (Tan vd., 2024), anne sütünde (Su vd., 2025), serum örneklerinde (Belay vd., 2025) ve hatta yenidoğan kordon kanında (Liu vd., 2024) bile PFAS tespit edilmektedir. Bu durum, PFAS'ın hem çevresel ve biyolojik döngülerin neredeyse tüm aşamalarına nüfuz ettiğini hem de halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin çok yönlü olabileceğini ortaya koymaktadır.

PFAS, kimyasal açıdan karbon atomuna bağlı çoklu flor grupları içeren bir alkil zincirinden oluşur. C–F bağı, bilinen en güçlü kovalent bağlardan biridir. Bu nedenle PFAS oksidasyona, hidrolize, biyolojik bozunmaya, UV'ye ve termal parçalanmaya karşı olağanüstü dirençlidir.

Bu stabilite PFAS'ın kalıcılığını (persistence), biyobirikimini (bioaccumulation) ve toksisitesini (toxicity) artırır, yani üst düzey PBT özellikleri gösterir. Çevrede parçalanmadığı için, bir kez yayıldığında kirlenme kalıcıdır. Birçok PFAS türü, proteinlere bağlanarak serumda uzun süre kalır ve yarılanma ömürleri yılları bulabilir. CDC (Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri, 2019) raporları ABD nüfusunun yüzde 97'sinde tespit edilebilir serum PFAS seviyelerinin olduğunu bildirmiştir (CDC, 2019; Babayev vd., 2022). Dünya çapında yürütülen büyük sürveyans çalışmaları devam etmektedir (Lee vd., 2025).

Türkiye'de PFAS Kirliliği: Mevcut Durum ve Veri Eksiklikleri

Türkiye'de de benzer eğilimlerin görüldüğünü gösteren bilimsel bulgular artmaya başlasa da çalışmalar oldukça az ve yenidir. Ulusal çapta, düzenli ölçüm yapan bir PFAS sürveyans programı henüz bulunmamaktadır. Mevcut PFAS araştırmaları ise çoğunlukla tekil akademik çalışmalardır. Türkiye'de bazı PFAS seviyelerinin incelendiği sınırlı sayıdaki çalışmalarda, atık su arıtma tesislerinde (Koçlar vd., 2022), içme sularında (Endirlik vd., 2019) ve bazı su kaynaklarında (İkizoğlu, 2024; Özvardarlı vd., 2025) PFAS'lar tespit edilmiştir. Yüzeysel su kaynaklarında iki farklı mevsimde yapılan bir çalışmada PFOA ve PFOS düzeyleri ölçülmüş (İkizoğlu, 2024) ve yüzey sularında PFOA konsantrasyonları 1,77±0,1–6,71±2,9 ng/L, PFOS ise <LOQ–3,27±0,2 ng/L aralığında raporlanmıştır. İncelenen su kaynaklarında en yüksek PFOA Eğirdir Gölü (sonbahar: 6,7±2,9 ng/L), en düşük PFOA Sakarya Nehri (ilkbahar, 1,8±0,1), en yüksek PFOS Küçükçekmece Gölü (sonbahar: 3,3±0,2 ng/L), en düşük PFOS ise Beyşehir Gölü'nde <LOQ olarak bildirilmiştir. Musluk ve şişe suyu araştırmasında PFAS'lar 0,08–11,27 ng/L arasında tespit edilmiş ve şişe sularda genellikle daha düşük PFAS değerlerinin bulunduğu bildirilmiştir (Endirlik vd., 2019). Sanayi yoğunluğu yüksek Ergene Havzası'nda, PFOS 0,13–15,25 ng/L ve PFOA 0,26–26,40 ng/L aralığında bulunmuştur (Özvardarlı vd., 2025). Görüldüğü üzere bu araştırmaların çoğu yalnızca PFOA ve PFOS odaklıdır. Örneğin kısa zincir PFAS'lar ve yeni nesil bileşikler (GenX vb.) için Türkiye ölçeğinde veri neredeyse hiç bulunmamaktadır.

Küresel PFAS Krizi: Düzenlemeler, Gecikmeler ve Sorunlar

Kalıcılıkları ve uzun menzilli taşınım potansiyelleri nedeniyle bazı PFAS bileşikleri, Stockholm Kalıcı Organik Kirleticiler (KOK) Sözleşmesinde (2001), aşamalı olarak yasaklanan kimyasal gruplar kapsamında yer almaktadır (UNEP, 2009; UNEP, 2023; pops). PFOS (2009) ve PFOA (2019) küresel ölçekte yasaklanarak sözleşme kapsamına alınmış, PFHxS ise 2022 yılında Ek A listesine eklenerek üretim ve kullanımına yönelik tam yasaklama kararı alınmıştır (UNEP, 2024). PFAS sınıfına ait diğer bileşiklerin de benzer şekilde Stockholm Sözleşmesi kapsamına alınmasına yönelik değerlendirmeler devam etmektedir.

Maalesef PFAS'ların çeşitlilik, kalıcılık, hareketlilik, toksiklik ve biyobirikim gibi özelliklerinin bulunması, günümüzde ciddi bir PFAS krizinin ortaya çıkmasını tetiklemiştir. Ancak, PFAS sorununu küresel ölçekte derinleştiren unsurlar, yalnızca bu maddelerin kalıcılığı ve toksisitesi değil, aynı zamanda çevre mevzuatındaki belirsizlikler, yasal düzenlemelerdeki eksiklikler ve gecikmeler, kurumsal veri eksikliği, endüstri yanlısı lobi pratikleri, bilimsel bilginin bastırılması ve hukuki süreçlerin uzun yıllar sürmesidir (Richter vd., 2021). Bu bileşiklerin yüksek stabilitesi nedeniyle çevresel ortamlarda neredeyse bozunmadan kalmaları, atmosferik taşınım, okyanus akıntıları ve nehir drenaj ağları yoluyla uzun mesafelerde yayılmaları ve bu süreçlerin sonucunda farklı kıtalarda içme suyu, yüzey ve yer altı suları, toprak, sediman, balık ve deniz memelileri gibi biyota örnekleri ile insan kanında (Panieri vd., 2022), anne sütünde ve kordon kanında düzenli olarak tespit edilmeleri, PFAS krizinin küresel niteliğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Kurwadkar vd., 2022; Wee vd., 2023). OECD ve UNEP, PFAS'ları kalıcılık ve gıda zincirinde birikme eğilimleri nedeniyle "küresel ölçekte kaygı verici kirleticiler" olarak nitelendirmekte ve birçok ülkenin bu sınıf için bütüncül düzenleme arayışına girdiğini vurgulamaktadır (OECD, 2018; OECD, 2024; UNEP, 2024). Dünya Sağlık Örgütü ve EPA gibi kurumların içme suyu rehberleri, PFAS maruziyetinin kontrolü için giderek daha düşük sınır değerler önermekte; bu süreçte uzun süreli maruziyetin kanser, bağışıklık sistemi ve endokrin bozulması gibi sağlık sonuçlarıyla ilişkisini merkeze almaktadır (WHO, 2022; Alazaiza et al., 2025). Bu nedenle PFAS, yalnızca kalıcı bir kimyasal kirletici grubu olarak değil, aynı zamanda tehlikeli kimyasalların yönetimi, politik ekonomi, çevre adaleti, çevre sağlığı ve halk sağlığı yönetimi kapsamında dikkatle ele alınması gereken önemli bir risk konusu olarak değerlendirilmelidir.

Bugün arıtılmış içme suyunda, toprakta, göl ve nehir sistemlerinde, atmosferik partiküllerde, ev içi tozlarda, anne sütünde, serum örneklerinde ve hatta yenidoğan kordon kanında bile PFAS tespit edilmektedir. Bu durum, PFAS'ın hem çevresel ve biyolojik döngülerin neredeyse tüm aşamalarına nüfuz ettiğini hem de halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin çok yönlü olabileceğini ortaya koymaktadır.

Dünya'da PFAS Düzenlemeleri

PFAS ile ilgili regülasyon zemini son yıllarda hızla değişmektedir. Ancak ülkeler arasında oldukça belirgin yaklaşım farklılıkları bulunmaktadır. Avrupa Birliği, PFAS konusunda en sıkı kısıtlamaları uygulamaya başlamıştır. ECHA'nın yürüttüğü 2023 tarihli REACH PFAS kısıtlama teklifi, OECD tanımını esas alarak 10.000'den fazla PFAS türünü kapsayan kapsamlı bir yasaklama önermektedir (ECHA, 2023). Bu çerçevede "tek tek maddeler yerine tüm PFAS sınıfının birlikte düzenlenmesi" yaklaşımını yeni norm olarak benimsemektedir. Bu teklif, Almanya, Hollanda, Danimarka, İsveç ve Norveç yetkili otoritelerinin ortak başvurusu üzerine hazırlanmış olup, özellikle belirli endüstriyel ve kritik kullanımlar için zamana yayılan geçiş süreleri ve bazı muafiyetler öngörmektedir.

AB, İçme Suyu Direktifi (EU) 2020/2184 kapsamında, içme suyunda Ek III'te listelenen (Brandsch, 2022) 20 PFAS bileşiğinin toplamı için 0.10 µg/L'lik "Sum of PFAS" parametre değerini, tüm PFAS'ların toplamı için ise 0.50 µg/L'lik "PFAS Total" sınırını getirmiştir. Bu yaklaşım, tüm dünyadaki en düşük limit uygulamalarından biridir.

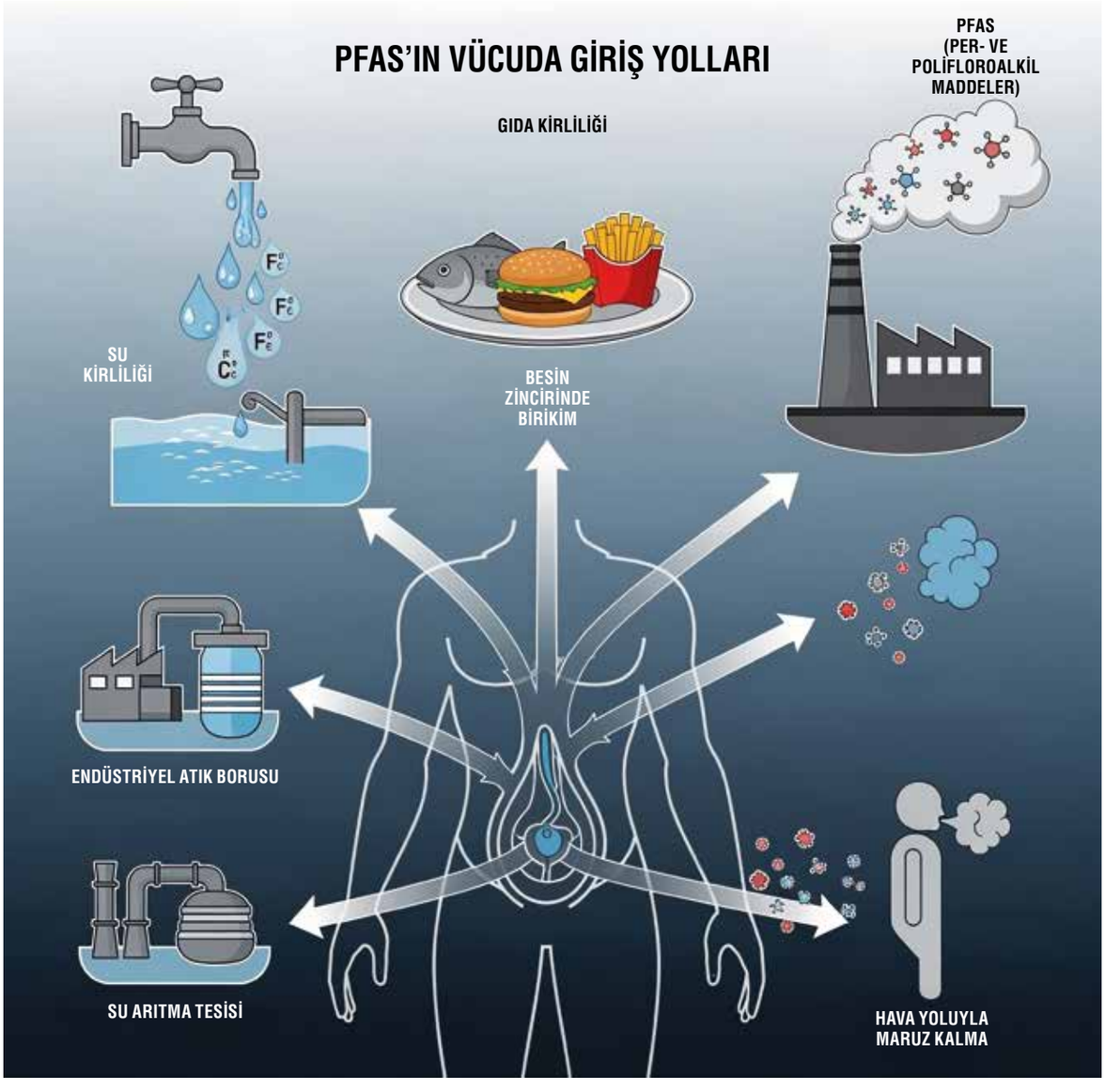
AB İçme Suyu Direktifi'ndeki (2020), "Sum of PFAS" parametresi, çoğu kısa ve orta zincirli (yaklaşık C4–C12) perfloroalkil karboksilik asitler (PFCA'lar) ile perfloroalkil sülfonik asitlerden (PFSA'lar) oluşan, içme sularında en yaygın ve düzenleyici açıdan öncelikli kabul edilen 20 PFAS bileşiğinden oluşan standart bir alt grubu ifade etmektedir. Bu grup, klasik PFOA ve PFOS'un yanı sıra PFBA, PFPeA, PFHxA, PFNA, PFDA, PFBS ve PFHxS gibi içme suyu çalışmalarında sık tespit edilen bileşikleri de kapsamaktadır.

Bunlara ilaveten Avrupa Birliğinde gıda ve yem yoluyla maruziyetlere ilişkin sağlık risklerini bilimsel olarak değerlendirme (Eurl, 2024), toksikolojik eşik değer belirleme ve sağlık temelli rehberler üretme işleri EFSA (European Food Safety Authority) kurumu tarafından yapılır (EFSA, 2025).

ABD'de sularda PFAS yönetiminin odağında, Çevre Koruma Ajansının (EPA) PFAS Strategic Roadmap (2021–2024) belgesi yer almaktadır. Bu yol haritası kapsamında ajans, ABD Güvenli İçme Suyu Yasası (Safe Drinking Water Act) uyarınca içme suyunda PFAS için bağlayıcı standartlar getirme, endüstriyel deşarjları kısıtlama ve kirlenmiş sahaların temizliğini hızlandırma taahhütleri üstlenmiştir (U.S. EPA, 2021). Nisan 2024'te EPA, PFOA, PFOS, PFHxS, PFNA ve GenX (HFPO-DA) için bireysel maksimum kirletici seviyesi (MCL) ve Azami Kirletici Seviyesi Hedefi (MCLG) belirleyen ilk ulusal birincil içme suyu standardını ve bazı PFAS karışımları için Tehlike İndeksi (Hazard Index, HI) temelli bir sınır değeri getirmiştir.

ABD içme suyu mevzuatında, MCL (Maximum Contaminant Level), bir kirleticinin sağlık riski, mevcut arıtma teknolojileri ve maliyetler birlikte değerlendirilerek belirlenen hukuken bağlayıcı azami konsantrasyon sınırını ifade eder. MCLG (Maximum Contaminant Level Goal) ise yalnızca toksikolojik ve epidemiyolojik verilere dayanarak, özellikle hassas grupları koruyacak biçimde tanımlanan ve ekonomik veya teknik kısıtlar gözetilmeksizin "sağlık açısından ideal" kabul edilen, bağlayıcı olmayan hedef düzeyi ifade eder. MCLG yalnızca sağlık temellidir ve içme suyunda PFOA ve PFOS için hiçbir düzey güvenli sayılmadığından, ideal hedef olarak MCLG = 0 ng/L kabul edilmiştir. Buna karşılık, 2024 tarihli nihai içme suyu standardında, içme sularında PFOA ve PFOS için teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir görülen en düşük bağlayıcı sınır olarak, MCL = 4 ng/L olarak belirlenmiştir. Bu standartta EPA, PFNA, PFHxS ve HFPO-DA (GenX) için maksimum kirletici seviyesi (MCL) değerini 10 ng/L olarak belirlemiştir. EPA, PFHxS, PFNA, HFPO-DA (GenX) ve PFBS'den en az ikisini içeren karışımlar için Tehlike İndeksi (Hazard Index), HI) = 1 (birimsiz) düzeyinde bağlayıcı bir MCL (ve aynı düzeyde MCLG) belirlemiştir. Buna paralel olarak, Düzenlenmemiş Kirleticiler İzleme Kuralı – 5 (Unregulated Contaminant Monitoring Rule – 5th Cycle, UCMR 5) kapsamında 2023–2025 yılları arasında ülke genelindeki içme suyu sistemlerinde 29 PFAS bileşiğinin izlenmesi zorunlu kılınmıştır, böylece ulusal ölçekte PFAS görülme sıklığı ve konsantrasyonları hakkında veri tabanı oluşturulması amaçlanmıştır. UCMR 5, ülkenin içme suyu sistemlerinde henüz federal düzeyde bir içme suyu standardı (MCL) bulunmayan 29 per- ve polifluoroalkil madde (PFAS) ile lityumun yaygınlığı ve miktarının ülke çapında izlenmesi için yürütülen EPA programıdır (U.S. EPA, 2024).

ABD'de PFAS düzenlemeleri uzun yıllar boyunca gecikmiş veya bölünmüştür. PFAS düzenlemelerinin bu kadar gecikmesinde, özellikle toksik maddelerin kontrolü çerçevesindeki düzenleyici kurumların endüstri etkisi altına girmesi, endüstrilerin verilerini kamuoyunu yanıltacak şekilde seçici sunması gibi endüstriyel çıkar gruplarının etkisi belirleyici olmuştur (Richter vd., 2021). Geçmiş irdelendiğinde, örneğin 3M firmasının, 1949'dan itibaren PFAS'ların çevrede parçalanmadığını ve toksik olduğunu gösteren şirket içi belgelerinin bulunduğu, buna rağmen ürünleri "biyolojik olarak parçalanabilir ve düşük toksisiteli" şeklinde pazarladığı açıkça görülmüştür (Salvidge ve Hosea, 2025). Ayrıca, PFAS üreticileri 3M ve DuPont Chemours grubuna ait ve dava süreçlerinde gün ışığına çıkarılan iç yazışmalar, şirketlerin



1960'lardan itibaren PFOS ve PFOA'nın kalıcılığı ve toksisitesine ilişkin çok önemli bulgulara sahip olduklarını, buna karşın bu bilgilerin düzenleyici kurumlara ve kamuoyuna tam ve zamanında yansıtılmadığını göstermektedir (Richter et al., 2021; Salvidge ve Hosea, 2025).

Bu tarihsel sürecin sonunda 3M şirketi, 2023 yılında, sulu film oluşturan yangın köpüğü (AFFF) kullanımına bağlı PFAS kirliliği nedeniyle kamu içme suyu sistemleri tarafından açılan davalar sonunda mahkemenin nihai onayına tabi olmak üzere yaklaşık 12,5 milyar ABD doları tutarında bir uzlaşma anlaşmasını kabul etmek zorunda kalmıştır (3M, 2024). DuPont, Chemours ve Corteva ise, PFAS kaynaklı içme suyu kirliliği nedeniyle kamu içme suyu sistemleri tarafından açılan davaları çözmek üzere, mahkeme onayına tabi olmak kaydıyla 1,185 milyar ABD doları tutarında ayrı bir uzlaşma fonu oluşturmayı kabul etmiştir (DuPont, 2023). Minnesota, Ohio, New Jersey gibi eyaletlerde yürütülen toplu ve eyalet düzeyindeki davalar, PFAS kirliliğinin kamusal maliyetlerinin en azından bir bölümünün kirletici şirketlere yüklenmesi açısından, çevre adaleti literatüründe kritik bir dönüm noktası olarak değerlendirilmektedir (Sukhram vd., 2025; Mueller vd., 2024).

ABD'de CDC tarafından yürütülen (CDC, 2023), toplumdan seçilen örneklerde (kan, serum dâhil) PFAS gibi kimyasallara maruziyetleri ve sağlık göstergelerini ölçen ulusal tarama çalışması yapan NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey) (Graber vd., 2019) ve kanıta dayalı rapor ve klinik rehber yayınlayan otorite kurum olan NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) bulunmaktadır (NASEM, 2022).

Ulusal biyomonitoring programları (NHANES) PFAS'ın popülasyon düzeyinde yaygın bir serum, kan vücut yükü oluşturduğunu gösterirken, NASEM'in klinik rehberi bu yükün belirli düzeylerde kolesterol, tiroid işlevi, gebelik/bebek büyümesi ve bazı kanser riskleri gibi sağlık sonuçları açısından klinik izlemle ilişkilendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Avustralya'da ise Avustralya Savunma Bakanlığı, askerî alanlarda PFAS temizliği için ulusal fon kurmuştur (Australian Government Department of Defence, 2023). Kanada Çevre Bakanlığı içme suyu rehber limiti belirlemiş ve PFAS'ı kanserojen şüpheli sınıfa almıştır. 2024 tarihli rehberde, içme suyunda tespit edilen 25 seçilmiş PFAS'ın toplamı için 30 ng/L'lik hedef değer belirlemiştir (Health Canada, 2024). Bu ülkeler özellikle

AFFF kaynaklı alan kirlenmesi üzerine düzenleme yapmaktadır.

Çin'de ise PFAS yönetiminde başta Stockholm POP yükümlülükleri geçerli olmak üzere, ulusal içme suyu standardında PFOA ve PFOS'lar parametre olarak yer almaktadır (MEE, 2007). Ayrıca PFAS türevleri, Çevre ve Ekoloji Bakanlığı (MEE, Ministry of Ecology and Environment) liderliğinde yeni kirleticiler listesine dâhil edilerek düzenlemeler ilerlemektedir (Zhang vd., 2025).

Türkiye'de PFAS Yönetimi

Türkiye'de PFAS'a ilişkin hukuki çerçeve, uluslararası sözleşmelerden etkilenmektedir. PFOS ve PFOA, Stockholm Sözleşmesi kapsamında yasaklıdır. Ancak geniş PFAS sınıfı için genel bir yasaklama veya kılavuz limit henüz oluşturulmamıştır.

Türkiye'de PFAS kullanımı özellikle tekstil ve deri kaplamalarında, yanmazlık ve su iticilik için kimyasal formülasyonlarda, gıda ambalajlarında, endüstriyel yüzey aktif sistemlerinde, yangın söndürmede kullanılan köpüklerde yoğunlaşmaktadır. PFAS kirliliği, sektörün coğrafi dağılımına göre bölgesel riskler yaratmaktadır. Ayrıca atık su arıtma tesisleri, PFAS'ı tam olarak gideremediği için, PFAS arıtılmış suyla alıcı ortama geçebilir. Organik çamurda biriken PFAS, tarım alanlarına taşınabilir. Bu durum çevre, gıda güvenliği ve sağlık açısından kritik bir risk konusudur. Türkiye'de PFAS kirliliğine bağlı sistematik sürveyans eksikliği bulunmaktadır. Bu nedenle ulusal rehber limitler, laboratuvar standardizasyonu, biyomonitoring programları ve risk değerlendirme stratejilerinin geliştirilmesi gerekli görünmektedir.

Türkiye'de PFAS'lara ilişkin mevcut bilimsel kanıtlar, ağırlıklı olarak içme suyu, yüzey suyu ve yüksek endüstriyel baskı altındaki havzalarda yürütülen çevresel ölçümlere dayanmaktadır. Ülke genelinde gerçekleştirilen musluk ve şişe suyu incelemeleri, bazı akarsularda ve sanayi yoğunluğu yüksek bölgelerde yapılan çalışmalar, PFOS, PFOA ve bazı kısa zincirli PFAS türlerinin sularda ve çevresel ortamlarda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, özellikle içme suyu kaynakları aracılığıyla toplumun uzun süreli PFAS maruziyetine sürekli olarak açık kalabileceğini göstermektedir. Bu durum kamu sağlığı açısından göz ardı edilemeyecek kronik bir risk faktörü oluşturmaktadır.

Tarım ve Orman Bakanlığı Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü (GKGM) tarafından yayımlanan "Gıda ve Yemlerde PFAS Belirlenmesi için Analitik Parametreler Rehberi" (Eurl, 2024; GKGM, 2024), gıda ve yem matrislerinde PFAS analizine yönelik ölçüm limitleri, validasyon ve performans kriterlerini tanımlayarak, Türkiye'de PFAS'ın resmî kontrol ve izleme çerçevesinde metodolojik olarak ele alınmaya başlandığını göstermektedir. Bu gelişme, ulusal düzeyde PFAS yönetimi için önemli bir kurumsal altyapı oluşturmakla birlikte, sağlık temelli risk değerlendirmesi açısından tek başına yeterli olmamaktadır.

Çalışmalar, PFAS sürveyansının artık tüm dünya genelinde çok sayıda ülke ve kurum tarafından sistematik biçimde yürütülmeye başlandığını göstermektedir. Çevrede ve insanlarda PFAS varlığını izlemeye yönelik uluslararası biyomonitoring programları kapsamında PFAS'lar düzenli olarak ölçülerek raporlanmaktadır. Nitekim Türkiye'de, ABD'deki NHANES veya NADES gibi otoritelerin programlarına benzer biçimde, PFAS maruziyetini doğrudan veya dolaylı olarak insan biyolojik örneklerinde değerlendiren ulusal ölçekli bir biyomonitoring programı henüz bulunmamaktadır. Türkiye'de PFAS'a ilişkin risklerin etkin biçimde yönetilebilmesi için bütüncül bir ulusal stratejiye ihtiyaç vardır. Bu stratejinin temeli, çevresel izleme verilerini (özellikle içme suyu ve alıcı ortamlar, gıda) insan biyomonitoring bulgularıyla (kan-serum, anne sütü, kordon kanı vb.) sistematik olarak birleştiren, düzenli raporlama ve erken uyarı bileşenleri içeren sürdürülebilir bir sürveyans altyapısının ivedilikle kurulması olmalıdır.

Sonuç ve Öneri

PFAS krizi, aynı anda bilimsel, çevresel, sosyolojik, hukuki ve ekonomik boyutlara sahip bir küresel sorundur. Sağlık etkileri açısından PFAS maruziyeti; serum lipit profili bozuklukları, tiroid hormon dengesizlikleri, bağışıklık yanıtında zayıflama, gebelik ve erken yaşam dönemlerinde büyüme-gelişme üzerindeki olumsuz etkiler ile bazı PFAS bileşikleri için artmış kanser riskiyle ilişkilendirilmektedir; bu etkilerin çoğu düşük dozlu ancak uzun süreli maruziyetler sonucunda ortaya çıkabilmektedir.

Türkiye için PFAS yönetiminde öncelik, çevresel ölçümleri insan biyomonitoring verileriyle (kan-serum, anne sütü, kordon kanı) entegre eden ulusal bir sürveyans programının kurulması olmalıdır. Bu verilere dayalı sağlık temelli limitler tanımlanarak ilgili rehberler (özellikle içme suyu ve yüksek riskli havzalar) oluşturulmalıdır. Bunu izleyen aşamada gıdalar, arıtma çamuru ve tarım uygulamaları gibi kritik maruziyet yolları için uygun analitik kapasite ve düzenli izleme ağı oluşturularak risk azaltım önlemleri kaynakta kontrol yaklaşımıyla devreye alınmalıdır. Kaynakta kontrol için ise özellikle AFFF, tekstil, deri, ambalaj üretimi yapan yüksek riskli sektörlerde kaynak kontrolünün kademeli olarak devreye alınması doğru olacaktır.

Kaynaklar

3M. (2024). 3M Settlement with Public Water Suppliers to Address PFAS in Drinking Water Receives Final Court Approval, https://investors.3m.com/news-events/press-releases/detail/1836/3m-settlement-with-public-water-suppliers-to-address-pfas (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Alazaiza, M. Y., Alzghoul, T. M., Ramu, M. B., Amr, S. S. A., Abushammala, M. F. (2025). PFAS contamination and mitigation: A comprehensive analysis of research trends and global contributions. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 101127.

Australian Government Department of Defence. (2023). PFAS Investigation and Management Program. Department of Defence. https://www.defence.gov.au/about/locations-property/pfas (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Babayev, M., Capozzi, S. L., Miller, P., McLaughlin, K. R., Medina, S. S., Byrne, S., Salamova, A. (2022). PFAS in drinking water and serum of the people of a southeast Alaska community: A pilot study. Environmental pollution, 305, 119246.

Belay, M. H., Robotti, E., Ghignone, A., Fabbris, A., Brandi, J., Cecconi, D., Marengo, E. (2025). Sensitive and accurate determination of 32 PFAS in human serum using online SPE-UHPLC-HRMS. Journal of Hazardous Materials, 485, 136780.

Brandsch, T. (2022). Determination of PFAS in Water According to EU 2020/2184 and DIN 38407-42 Using Online SPE–LC–MS/MS, https://www.chromatographyonline.com/view/determination-of-pfas-in-water-according-to-eu-2020-2184-and-din-38407-42-using-online-spe-lc-ms-ms (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Centers for Disease Control and Prevention. (2019). Fourth national report on human exposure to environmental chemicals: Updated tables (January 2019). U.S. Department of Health and Human Services. https://www.cdc.gov/exposurereport/ (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Centers for Disease Control and Prevention. (2023). National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). https://www.cdc.gov/nchs/nhanes/index.htm (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Costello, M. C. S., Lee, L. S. (2024). Sources, fate, and plant uptake in agricultural systems of per-and polyfluoroalkyl substances. Current Pollution Reports, 10(4), 799-819.

DuPont. (2023). Chemours, DuPont and Corteva reach comprehensive PFAS settlement with U.S. water systems, DuPont de Nemours, Inc. https://www.dupont.com/news/chemours-dupont-and-corteva-reach-comprehensive-pfas-settlement-with-us-water-systems.html (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

EFSA. (2025). European Food Safety Authority, Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS).

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.

European Chemicals Agency (ECHA). (2023). ECHA publishes PFAS restriction proposal. ECHA. https://echa.europa.eu/fr/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

European Union. (2020). Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Union, L 435, 1-62.

Graber, J. M., Alexander, C., Laumbach, R. J., Black, K., Strickland, P. O., Georgopoulos, P. G., Weisel, C. P. (2019). Per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) blood levels after contamination of a community water supply and comparison with 2013-2014 NHANES. Journal of exposure science & environmental epidemiology, 29(2), 172-182.

Health Canada. (2024). Objective for Canadian drinking water quality: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Government of Canada. https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/objective-drinking-water-quality-per-polyfluoroalkyl-substances.html (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

https://eurl-pops.eu/working-groups#_pfas (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

https://www.efsa.europa.eu/en/topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Ikizoglu, B. (2024). PFOA and PFOS Pollution in Surface Waters and Surface Water Fish. Water, 16(16), 2342.

Koçlar, A. D., Hüzün, A. Y., Yetik, S., Berktaş, Ş., Akgül, N. (2022). Possible PFAS sources in Istanbul: Wastewater treatment plants, landfills, and industries [Conference presentation]. Marmara University, Department of Environmental Engineering.

Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S. R., Nadagouda, M. N., Cawdrey, R. W., Ambade, B., Wilkin, R. (2022). Per-and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. Science of the Total Environment, 809, 151003.

Lee, J. C., Smaoui, S., Duffill, J., Marandi, B., Varzakas, T. (2025). Research progress in current and emerging issues of PFASs' global impact: long-term health effects and governance of food systems. Foods, 14(6), 958.

Li, X., Wang, Y., Cui, J., Shi, Y., Cai, Y. (2024). Occurrence and fate of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in atmosphere: size-dependent gas-particle partitioning, precipitation scavenging, and amplification. Environmental Science & Technology, 58(21), 9283-9291.

Liu, L., Yan, P., Liu, X., Zhao, J., Tian, M., Huang, Q., Shen, H. (2024). Profiles and transplacental transfer of per-and polyfluoroalkyl substances in maternal and umbilical cord blood: A birth cohort study in Zhoushan, Zhejiang Province, China. Journal of Hazardous Materials, 466, 133501.

MEE. (2007). The People's Republic of China National Implementation Plan for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, https://english.mee.gov.cn/Resources/Plans/Plans/202012/P020201211676710689694.pdf.

Mueller, R., Salvatore, D., Brown, P., Cordner, A. (2024). Quantifying disparities in per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) levels in drinking water from overburdened communities in New Jersey, 2019–2021. Environmental Health Perspectives, 132(4), 047011.

NASEM, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). Potential health effects of PFAS. In Guidance on PFAS Exposure, Testing, and Clinical Follow-Up. National Academies Press (US).

OECD. (2024). Risk management, risk reduction and sustainable chemistry: PFAS as a global concern. Organisation for Economic Co-operation and Development.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2018). Toward a new comprehensive global database of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Summary report on updating the OECD 2007 list of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). OECD.

Özvardarli, A., Güneş, Y., Hanedar, A., Güneş, E. (2025). Occurrence and treatment of PFOS and PFOA in surface waters of the Ergene River Basin, Türkiye. International Journal of Environmental Science and Technology, 22(15), 16167-16180.

Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Buha Djordjevic, A., Saso, L. (2022). PFAS molecules: a major concern for the human health and the environment. Toxics, 10(2), 44.

Persaud, D., Criscitiello, A. S., Spencer, C., Lehnherr, I., Muir, D. C., De Silva, A. O., Young, C. J. (2024). A 50 year record for perfluoroalkyl acids in the high arctic: implications for global and local transport. Environmental Science: Processes & Impacts, 26(9), 1543-1555.

Richter, L., Cordner, A., Brown, P. (2021). Producing ignorance through regulatory structure: The case of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Sociological Perspectives, 64(4), 631-656.

Sadia, M., Nollen, I., Helmus, R., Ter Laak, T. L., Been, F., Praetorius, A., van Wezel, A. P. (2023). Occurrence, fate, and related health risks of PFAS in raw and produced drinking water. Environmental science & technology, 57(8), 3062-3074.

Salvidge R., Hosea, L. (2025). 3M knew firefighting foams containing PFAS were toxic, documents show, the guardian, https://www.theguardian.com/environment/2025/jan/15/3m-firefighting-foams-pfas-forever-chemicals-documents (Erişim Tarihi: 24.12.2025).

Samarasinghe, S. V. A. C., Wijayawardena, A., Khan, A. U. H., Liu, Y. (2025). PFAS: an overview of their physicochemical properties and implications. Per-and Polyfluorinated Alkyl Substances: Occurrence, Toxicity and Remediation of PFAS, 13.

Sharma, B. M., Bharat, G. K., Tayal, S., Larssen, T., Bečanová, J., Karásková, P., Nizzetto, L. (2016). Perfluoroalkyl substances (PFAS) in river and ground/drinking water of the Ganges River basin: Emissions and implications for human exposure. Environmental pollution, 208, 704-713.

Sims, D. B., Monk, J. R., Woldetsadik, D., Hudson, A. C., Garner, M. C., Lindley, K., Moser, D. P. (2025). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the rivers of the Western United States. International Journal of Environmental Science and Technology, 22(10), 9319-9336.

Su, J., Gao, Y., Sun, Y., Bing, M., Liu, Q. S., Zhou, Q., Jiang, G. (2025). Burden of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human breast milk: Implications for maternal and infant health. Environment International, 109593.

Sukhram, S. D., Kim, J., Musovic, S., Anidugbe, A., Corte, E., Ahsan, T., Padilla, M. (2025). PFAS Exposure, Mental Health, and Environmental Justice in the United States: Impacts on Marginalized Communities. International Journal of Environmental Research and Public Health, 22(7), 1116.

Tan, H., Tang, S., Yang, L., Li, J., Deng, Y., Shen, H., Cai, Z. (2024). Global quantification of emerging and legacy per-and polyfluoroalkyl substances in indoor dust: Levels, profiles and human exposure. Science of the Total Environment, 927, 172132.

Tarım ve Orman Bakanlığı, Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü (GKGM). (2024). Gıda ve yemlerde per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS) belirlenmesi için analitik parametreler rehberi, https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Risk_Degerlendirme/Gida_ve_Yemlerde_PFAS_Rehber.pdf.

U.S. EPA, Environmental Protection Agency. (2021). PFAS strategic roadmap: EPA's commitments to action 2021–2024, https://www.epa.gov/pfas/pfas-strategic-roadmap-epas-commitments-action-2021-2024.

U.S. EPA, Environmental Protection Agency. (2024). Fifth Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR 5), https://www.epa.gov/dwucmr/fifth-unregulated-contaminant-monitoring-rule.

UNEP, United Nations Environment Programme, ICCM5, (2023). Global Framework on Chemicals – For a planet free of harm from chemicals and waste. UN Environment Programme. https://www.unep.org/resources/global-framework-chemicals-planet-free-harm-chemicals-and-waste.

UNEP, United Nations Environment Programme. (2009). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (text and annexes, as amended in 2009). Stockholm Convention Secretariat. https://www.pops.int/Implementation/IndustrialPOPs/PFAS/Overview/tabid/5221/Default.aspx.

UNEP, United Nations Environment Programme. (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). UN Environment Programme. https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/persistent-organic-pollutants-pops/and.

United Nations Environment Programme. (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). UNEP – Persistent Organic Pollutants and chemicals and health.

Valsecchi, S., Babut, M., Mazzoni, M., Pascariello, S., Ferrario, C., De Felice, B., Polesello, S. (2021). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in fish from European lakes: Current contamination status, sources, and perspectives for monitoring. Environmental Toxicology and Chemistry, 40(3), 658-676.

Wee, S. Y., Aris, A. Z. (2023). Revisiting the "forever chemicals", PFOA and PFOS exposure in drinking water. NPJ Clean Water, 6(1), 57.

World Health Organization. (2022). PFOS and PFOA in drinking-water: Draft background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality.

Yurtsever, M. (2025a). Çevredeki Per ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: Tarihçesi, Kaynakları, Analizi, Riskleri ve İlgili Düzenlemeler. Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 6(1), 403-427.

Yurtsever, M. (2025b). Per-ve Polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasalların) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 412-423.

Zhang, J., Liu, J., Jin, R., Qiao, Y., Mao, J., Wang, Z. (2025). Prevalent Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) Pollution in Freshwater Basins in China: A Short Review. Toxics, 13(2), 135.

PFAS ve gıda güvenliği: tarımdan sofraya gıda zincirindeki PFAS kontaminasyonu

Dr. Emine Olum

Gaziosmanpaşa Üniversitesinde Gıda Mühendisliği lisans derecesini tamamladıktan sonra, Ankara Üniversitesinde Et Teknolojisi alanında doktorasını aldı. 2019 yılından bu yana İstanbul Medipol Üniversitesi Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümünde akademik çalışmalarını sürdürmekte olup; et teknolojisi, yeni ürün geliştirme, duyusal analiz ve gıda ambalajlama konularında uzmanlaşmıştır.

PFAS (per- and polyfluoroalkyl substances) olarak kısaltılan perfloroalkil bileşenleri su ve yağ itici özellikleri sebebiyle tekstilden mutfak ekipmanlarına, gıda ambalajlarından askerî ürünlere ve yangın söndürücü aletlere kadar birçok tüketim ürününde kullanılmaktadır. Bu kimyasallar doğada bozulmadan varlığını sürdürebilmesi sebebiyle "sonsuz kimyasallar" olarak adlandırılmıştır. Bu da onların yok edilmesini ve bertarafını zorlaştırmakta; doğada, hayvan, bitki ve insanlarda birikimine sebep olmaktadır.

Yapılan bilimsel araştırmalar doğrultusunda PFAS yükünü artırmayı durduracak/yavaşlatacak önlemler alınsa da doğada özellikle de hayvansal dokularda oluşan mevcut birikim endişe vericidir. İnsanlar PFAS'ı başlıca gıda ve sudan alır, dolayısıyla bu kimyasallar çevresel bir problem olmasından çok bir gıda güvenliği problemine dönüşmüştür.

PFAS Kaynağı Olarak Gıdalar

Topraktan sızarak yer altı sularına karışan PFAS bitkiler ve hayvanlar tarafından alınarak biyolojik birikime uğrar ve besin zinciri yoluyla canlılar arasında aktarılır. İçilebilir su kaynakları, gıdalar ve gıda ile teması bulunan ekipman ve paketleme materyalleri ikincil PFAS kaynağı sayılabilir. Özellikle kontamine suyun tüketimi maruziyette öne çıkmaktadır. 2025 yılında yapılan bir çalışmada nehir ve göl tabanlarındaki en yüksek PFAS konsantrasyonu Çin'de, yüzey suyu ve balıklarda ise Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) ortaya çıkmıştır (1).

Hayvansal Gıdalar

PFAS su ve yemlerle hayvanlara aktarılması sebebiyle hayvansal gıdaların diyetle alımı insanlar için önemli bir bulaşı kaynağıdır. Özellikle proteince ve yağca zengin gıdalarda biriken PFAS, başta balık olmak üzere sırasıyla yumurta sarısı, sığır eti, av etleri, sakatatlar, domuz eti, kanatlı eti, süt, süt ürünleri gibi hayvansal gıdalarda oldukça fazladır. Balık etinden sonra en yüksek PFAS konsantrasyonu yumurta sarısında tespit edilmiştir (2).

Avrupa'da gençlerde yapılan bir araştırmada deniz ürünleri yumurta ve sakatat tüketiminin PFAS seviyelerini artırdığı ortaya konulmuştur (3). Bu tarz istatistiki artış verilerini incelerken birikimin yüzde kaç arttığından ziyade hangi seviyeden ne kadar yükseldiğine bakmak daha doğrudur. Bu çalışmada PFAS birikimi yüzde 7 civarından yüzde 8 civarına çıkmıştır. Öyle görünüyor ki mevcut durum zaten kötüyken hayvansal gıda alımı buna küçük bir katkı sağlamıştır. Dolayısıyla asıl çözüm bu kimyasallara maruziyeti azaltmak için bu gıdaları beslenmemizden çıkarmak değildir. Bu özellikle büyüme gelişme çağında olan çocuklar için ciddi gelişimsel riskler doğurur. Odaklanılması gereken konu çevre kirliliklerini bertaraf ederek tarladan sofraya daha temiz üretim yolları geliştirip toplumdaki tüm bireylerin bu temiz gıdaya ulaşmasını sağlamaktır.

Az gelişmiş ülkelerde veya sosyoekonomik seviyesi düşük olan yerleşim alanlarında PFAS kirliliğinin daha büyük bir tehdit oluşturduğu görülüyor. Toplumun geneli tarafından ulaşılabilir olmayan organik gıdaların (sertifikalı organik) görece daha az PFAS birikimi göstermesi, endüstriyel üretimin yapıldığı alanlarda ekonomik olarak geçimin daha kolay olması, ekonomik seviyenin düşmesiyle temiz suya ulaşımın zorlaşması, arıtma için ek maliyetlerin ortaya çıkması ve en önemlisi de PFAS için az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde henüz bir farkındalık oluşmamasını bu durumun sebepleri arasında gösterebiliriz.

Hayvansal gıdalar arasında en riskli gıdalar olan su ürünlerinin suda asılı kalan kimyasalları solungaçlarıyla filtre ederek veya besin yoluyla aldıklarını biliyoruz. Karides, yengeç, midye gibi kabuklu su

ürünlerinde PFAS birikiminin balıklara kıyasla 100 kata kadar daha yüksek seviyelere ulaştığı bulunmuştur. Balık türleri PFAS varlığı açısından değerlendirildiğinde ise planktonlarla beslenen, yağlı ve pelajik balıklarda PFAS konsantrasyonunun daha az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla denizlerimizde avlanan çok değerli omega-3 kaynağı hamsi, sardalya ve yüzey balıklarından lüfer, istavrit, palamut, çaça, uskumru, kolyoz, zargana gibi pelajik türlerin tüketimi kimyasal kirlilik etmenleri açısından daha güvenilir balık türleridir.

Deniz ürünlerinden sonra en riskli gıda grubu olan çiftlik hayvanlarında ise bulaşı en çok kontamine su ve kirli toprakta yetişen yemlerden kaynaklanır. Kümes hayvanları çiftlik hayvanlarına göre PFAS'ı daha hızlı elimine edebilmektedir. Kümes hayvanlarının etinde daha az PFAS seviyeleri ölçülmüş olup, PFAS kümes hayvanlarının yumurtasının özellikle sarısına transfer olup burada birikmektedir (2). Günümüzde özellikle endüstriyel kümes hayvanlarına karşı oluşan ön yargının yersiz olduğunu bilim insanları olarak yıllarca ifade ediyorduk ancak ayrıca kanatlı etlerinin çevresel kirlilik etmenleri açısından da oldukça güvenli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla önemli bir protein kaynağı olan kümes hayvanlarının diyetten çıkarılması sağlık açısından olumsuz etkiler doğurması yanında kimyasal birikim açısından da dengenin bozulacağı anlamına gelir.

Hayvanlardaki PFAS varlığı, yaşadığı bölgeye, otobur etobur oluşuna, dokulardaki yağ ve protein oranına göre türler arasında farklılık göstermektedir (2). Çin'de çiftlik hayvanların beslendiği yem silajındaki PFAS konsantrasyonunun hayvandan elde edilen sütteki miktardan 7,5 kat daha fazla olduğu bulunmuştur (4). Ancak yem üretiminin endüstriyel alanlardan uzak olmasıyla sütteki bulaşı azalacaktır. Genel olarak PFAS hayvanlarda kas ve diğer dokulara kıyasla ciğer ve kanda daha çok birikim gösterir. Dolayısıyla sakatat tüketimi PFAS açısından risk doğurmaktadır.

Tarımsal Bulaşma ve Bitkisel Gıdalar

Endüstriyel alanlara yakın kirli tarım alanları, sulama suları, gübre ve pestisitler bitkilerdeki bulaşının temel kaynağıdır. Bitkiler her ne kadar insanlarda PFAS birikiminin ana kaynağı olmasa da bu bitkilerle beslenen çiftlik hayvanları insan maruziyetinin ikincil kaynağı olabilir. Ne yazık ki uzun süre dayanıklı olması ve haşere ve böceklerde etkinliğini artırması sebebiyle pestisitlerde PFAS kullanımı söz konusudur. ABD'de yapılan bir çalışma göstermiştir ki son 10 yılda tarımda kullanılan pestisitlerin yüzde 30'unda PFAS benzeri kimyasallar tespit edilmiştir (5). Sebze ve meyvelerde üretim yöntemine ve bölgeye göre pestisitlerden ve sulama sularından kaynaklı olarak PFAS birikiminin değişiklik gösterebileceğini de göz ardı edemeyiz.

PFAS maruziyeti yalnızca gıdanın kendisinden değil; gıda ile temas eden ambalajlar ve mutfak ekipmanlarından da kaynaklanıyor. Yapışmaz tavalar, kâğıt bazlı ambalajlar ve fast-food paketleri, özellikle sıcak ve yağlı gıdalarda PFAS'ın gıdaya geçişini artırıyor. Bu görünmeyen temas, günlük maruziyetin en sessiz kaynaklarından biri.

Diğer Gıdalar

Suyun önemli bir PFAS kirlilik etmeni oluşturması sebebiyle çeşitli içecekleri de mercek altına almakta fayda vardır. Özellikle bebek mamaları gibi suyla hazırlanan gıdalar önemli bulaşı kaynağı olabilir. Vücut ağırlığı başına tüketilen gıdanın bebeklerde daha fazla oluşu onları PFAS birikimine daha duyarlı hâle getirmektedir. Bebek mamaları yanında yaşlı, çocuk ve hamile kadınlar için servis edilen gıdaların hazırlanmasında çeşme suyu kullanılmamalıdır.

Maden sularındaki PFAS varlığı da dikkati çekmektedir. Yapılan bir çalışmada Avrupa'nın çeşitli yerlerinden alınıp test edilen 119 maden suyu örneğinin yarısında PFAS tespit edilmiştir (6). Yer altı suyu veya yüzey suyu kaynaklı olmayan derin maden sularında dahi PFAS tespit edilmesi tehlikenin boyutunu göstermektedir.

Yapılan bir çalışmada şaraplardaki PFAS kirliliğinin yüksek boyutlarda olduğu özellikle yeni şaraplarda kirlenmenin oldukça fazla olduğu ortaya konulmuştur (7). Şaraptaki PFAS kirliliğinin yıllar bazında incelenmesiyle görülmüştür ki 1970'lere kadar şaraplarda PFAS tespit edilmezken 1980'ler itibarıyla PFAS kirliliği başlamış ve 2010'dan sonra kirlilik hızla artmıştır. Bu durumda şüphesiz endüstrileşmenin ve buna bağlı birikimin etkisi vardır.

Son yıllarda PFAS kirliliği için bal da araştırılmış ve ilginç bir şekilde özellikle kovan içi işçi arılarda ve bunların polenlerinde PFAS'a rastlanmıştır. Arı ve polenlere olan bulaşının atmosferik birikim veya yüzey teması ile olabileceği tahmin edilmektedir (8).

Organik/Doğal/Yöresel Gıda Paradoksu

Genellikle bahçede yetiştirilen, köyden gelen, yerel üreticiden bir şekilde temin edilen gıdaların daha sağlıklı olduğu yönünde toplumsal bir görüş vardır ancak bu gıdalar analiz edildiğinde durum algıların ötesinde bir hâl alabilir. PFAS kirliliğinden uzak alanlarda, temiz su ile sulama yapılan ve pestisit kullanımı konusunda bilinçli bir üreticinin ürettiği bitkisel ve hayvansal gıdaların elbette daha temiz olacağı aşikârdır. Tarımsal ve hayvansal üretim alanlarında kirlenmiş su ve toprak varlığı ürünün endüstriyel veya köyde üretilmesinden oldukça bağımsız bir konudur. Diğer yandan pestisitlerdeki PFAS varlığına düşünürsek yerel üreticilerin bilinçsizce yaptığı denetimden uzak ilaçlamalar hem kendi toprağını kirletip mahsulünü etkilemekte hem de o bölgede yetişen diğer ürünlere hava ve yer altı suları aracılığıyla bulaşmaktadır.

Avrupa'da yapılan bir çalışmada yerel üretilen sebze meyvelerin tüketimi kanda daha yüksek PFAS seviyeleriyle ilişkilendirilmiştir (9). Belçika'da PFAS kimyasallarının tespit edildiği bir alanda yapılan çalışmada ev üretimi serbest gezen tavuk yumurtasında yüksek PFAS varlığı tespit edilmiştir (10). Bahçede beslenen tavukların yumurtasındaki belirgin PFAS yüksekliğinin temel sebebi bu tavukların yemlerden çok doğada bulduğu böcek ve solucanlarla beslenmesidir. Başka bir çalışmada av balığı ile çiftlik balıkları PFAS varlığı açısından kıyaslanmış ve av balıklarında daha yüksek PFAS seviyeleri ölçülmüştür (11). Ayrıca av hayvanlarındaki PFAS seviyeleri çiftlik hayvanlarından daha yüksek bulunmuştur (12).

Yerel üretimle endüstriyel üretim arasında ortaya çıkan bu farklılığın temel sebebi kümes veya toplu yetiştiricilik yapılan çiftlik hayvanlarında belirli yemler izne tabi olarak verilmekte ve denetimli olarak ilaçlama yapılmaktadır. Ayrıca avcılık yapılan bölgelerde kontamine su ve topraktan kaynaklı birikim fazla olabilmektedir. Diğer yandan av hayvanlarının yaşam süresi daha uzun olmakla birlikte doğadaki diğer canlıları yiyerek biyobirikimi artırmaktadır. Bazı gelişmiş ülkelerde özellikle kirlilik etmenlerinin olduğu çevrelerde av hayvanlarının tüketilmemesi yönünde tavsiyeler verilmektedir.

Yukarıdaki çalışma sonuçlarından farklı olarak Danimarka'da yapılan bir çalışmada büyük endüstriyel çiftliklerdeki balık yemiyle beslenen tavukların organik yumurtalarında yüksek PFAS tespit edilmiştir (13). Yüksek PFAS seviyesinin yem olarak deniz ürünleri kullanımından kaynaklandığı tahmin edilebilir. Dolayısıyla organik, yerel veya avcılık olsun yetiştirilen bölgedeki kirlilik ve kullanılan yemlerin PFAS yoğunluğunun en etkili parametre olduğu görülür. Bu da gösteriyor ki tarladan sofraya her aşamada PFAS denetimi yapılarak kirlilik etmenlerinin bu zincirden çıkarılması gerekmektedir. En yüksek PFAS içeren gıdalardan biri olan yumurta için özellikle yemlemede acil önlemler gerekmektedir.

Mutfak Ekipmanları ve Gıda Ambalajlarından Kaynaklı Bulaşma

Gıda ile temas eden malzemelerde su ve yağ dayanımı sebebiyle PFAS kullanılmaktadır. İleri işlenmiş ve fast food gıdaların araştırıldığı çalışmalar gösteriyor ki bu gıdaların tüketimi ile kandaki PFAS seviyesi artmıştır. PFAS bulaşısının gıda işleme yöntemlerinden kaynaklı olmadığı ancak gıda ile temas eden malzemelerden gıdaya, gıdadan da insana geçtiği söylenebilir. Bu malzemeler arasında tepsiler, kaseler, pipetler, karton bardaklar, fast food kâğıtları, yağlı kâğıtlar, paket servis kutuları, muffin kâğıtları, mikrodalgada kullanıma uygun patlamış mısır ambalajları sayılabilir. Diğer yandan Teflon gibi yapışma önleyici malzemelerin kullanıldığı pişirme ekipmanlarında PFAS varlığı ciddi tehlike yaratmaktadır. Her ne kadar birçok Avrupa ülkesinde teflon yasaklansa da ülkemizde hâlâ yaygın olarak kullanılan bir mutfak ekipmanı olması halk sağlığı açısından endişe vericidir. Hatta ülkemizde birçok restoran teflon tavalarının aşınması sonucu bunları tekrar teflon kaplatmak üzere yenilemektedir. Bu durum gıdaya migrasyon düzeyi belirsiz bir takım florürlü bileşiklerin endüstriyel üretim dışında mutfak ekipmanlarında kullanıldığını göstermektedir.

Gıda ile temas eden ambalaj malzemelerinden en yüksek kontaminasyon suya karşı dayanımını sağlamak üzere PFAS ile iç kaplamaları yapılan kâğıt bazlı ambalajlardan kaynaklanmaktadır. Çin'de yapılan bir çalışmada ambalaj kaynaklı PFAS salınımının yüzde 87'sinin karton ambalajlardan yüzde 13'ünün de plastiklerden kaynaklandığı ortaya konulmuştur (14).

PFAS gibi "sonsuz kimyasallar" karşısında çözüm, gıdayı suçlamak ya da sofradan eksiltmek değildir. Gerçek çözüm, çevre kirliliklerini ortadan kaldırarak tarladan sofraya daha temiz, denetlenebilir ve sürdürülebilir üretim yolları geliştirmektir. Gıda güvenliği ancak bütüncül politikalarla, çevre–su–tarım zincirinin birlikte ele alınmasıyla sağlanabilir. Toplumun her kesiminin temiz gıdaya erişimi, bu mücadelenin en kritik ve vazgeçilmez adımıdır.

Ambalaj malzemesi veya mutfak ekipmanlarından gıdaya olan PFAS geçişini sıcaklık ve süre etkiler. Uzun süre yüksek sıcaklıklarda olan gıdanın bu malzemelerle teması migrasyonu artırmıştır. Bu sebeple özellikle yapışmaz veya kâğıt kek kalıpları, yağlı kâğıtlar, pişirme ekipmanları yüksek ısıl işlem görmesi sebebiyle oldukça riskli malzemelerdir. Ayrıca pişirme ekipmanlarının tekrar kullanımı PFAS geçişini önemli derecede artırmaktadır. Gıda paketleri her ne kadar "kullan at" olsa da yapışmaz özellikteki mutfak ekipmanları tekrar tekrar kullanılmaktadır. Gıda ambalajlarında öne çıkan ve üzerinde oldukça çalışma olan mikrodalgada pişirilebilir patlamış mısır ambalajlarında mikrodalgada ürünün oldukça yüksek sıcaklıklara ulaşması sebebiyle PFAS'ın mısıra geçişi yüksek boyuttadır.

Gıdaya geçişi (migrasyonu) etkileyen bir diğer faktör gıdanın yağ içeriğidir. Bir araştırmada yapıştırmaz tava, yağlı kâğıt, fast food ambalajı, elektrikli pirinç pişiricisi gibi 312 farklı gıda ile temas eden malzemede PFAS analizi yapılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki PFAS tüm gıdalara eşit miktarda geçmemiş, alkollü içecekler ve yağlı gıdalara olan migrasyon yüksek seviyelerde bulunmuştur (15). Ayrıca başka bir çalışmada asitli gıdalarda migrasyon seviyesinin daha fazla olduğu ortaya konulmuştur (16). Ancak şunu da belirtmek gerekir ki gıda ile temas eden bu malzemelerdeki PFAS varlığı ülkeye ve ülkenin koyduğu yasal düzenlemelere göre farklılık göstermektedir. Örneğin İspanya'da geri dönüştürülmüş karton, kâğıt, biyopolimer ve teflon kaplamalı ürünlerdeki PFAS geçişi Çin'e göre oldukça düşük seviyelerde bulunmuştur (17).

Plastiklerin olumsuz etkilerine alternatif ve doğa dostu olarak pazarlanan birçok tek kullanımlık kâğıt ürün PFAS içerebilir. Bu kimyasallar sıcak yemeklere veya çay-kahve gibi sıcak içeceklere temas ettiğinde de gıdaya yüksek oranda geçebilir. Dolayısıyla doğa dostu, yeşil, sürdürülebilir, biyobozunur olarak pazarlanan tek kullanımlık kâğıt ambalajlar her zaman PFAS için garanti vermez. 2025 yılında FDA (Amerika Gıda ve İlaç Dairesi) PFAS'ın kâğıt veya lif bazlı gıda paketlerine eklenmesini yasaklamıştır. Ancak bazı PFAS'lar pişirme kapları ve gıda ambalajları için hâlâ onaylıdır.

Alternatif Gıda ile Temas Eden Malzemeler

Sürdürülebilirlik açısından uzun yıllardır lignin, kitozan, protein, selüloz, polilaktik asit gibi biyobozunur paketleme materyalleri üzerinde çalışılmaktadır. Ancak son yıllarda ortaya çıkan PFAS tehlikesi bu çalışmaları hızlandırmıştır. Biyobozunur ambalaj malzemelerinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel dayanıklılık, bariyer özelliklerinin yetersizliği ve maliyettir.

PFAS Bertarafı ve Su Arıtma

PFAS havadan bitkilerin dış yüzeyine çökelmeden çok topraktan su alımı ile bitki iç kısımlarında birikmektedir. Dolayısıyla çeşitli solüsyonlarla veya suyla yıkama PFAS kirliliğini bertaraf etmekte etkili olmaz. Diğer yandan çeşitli pişirme yöntemlerinin PFAS'ı azaltması konusu da henüz tartışmalıdır. Dolayısıyla sofranıza gelen gıda için tüketici olarak alabileceğimiz pek bir önlem yok.

Elbette çevresel etkileri azaltmak için yasal düzenlemeler ile bu kimyasalların endüstriyel üretimden çıkarılması/kısıtlanması önemlidir. Ancak "sonsuz

kimyasallar" olarak adlandırılan bu maddelerin doğadaki mevcut durumunu yönetmek de insan sağlığı açısından son derece önemlidir. Endüstriyel katı atık yönetimi yanında yüzey sulardan kaynaklı çevresel PFAS döngüsünün kırılması için gelişmiş su arıtma sistemleri devreye sokulmalıdır. Adsorpsiyon, ters osmoz, iyon değişimi ve oksidasyon gibi su arıtma yöntemleri çeşitli PFAS bileşiklerini bertaraf etmede etkili olmuştur.

Ev tipi su arıtma cihazlarının etkinliği çeşitli araştırmalarda ortaya konulmuştur. Özellikle aktif karbon içeren filtreleme sistemlerinin yüzde 90'ın üzerinde PFAS kirliliğini azalttığı ve toz formundaki aktif karbonun granüler aktif karbon filtrelerden daha etkili olduğu ortaya koyulmuştur. ABD'de yapılan bir çalışmada çeşitli şişelenmiş sularda farklı PFAS bileşikleri araştırılmış ve kaynak sularında arıtma sulara göre daha fazla PFAS bileşikleri tespit edilmiştir (18). Türkiye'de gıdalardaki PFAS kontaminasyonu birkaç çalışmayla sınırlı kalsa da 2019 yılında yapılan bir çalışmada 33 farklı ilden alınan su örneklerinde çeşme sularında şişe sulardan daha fazla PFAS tespit edilmiş ancak her iki suyun kabul edilebilir limitlerin altında PFAS barındırdığı ifade edilmiştir (19).

Dünyada ve Türkiye'de Yasal Düzenlemeler

EFSA belirli gıdalardaki maksimum izin verilen miktarlar hakkında limitler getirmiş ve gıdalardaki PFAS kirliliği için yapılan çeşitli araştırmalarda sonuçlar sınır değerlerin altında çıkmıştır. Günlük alım limitleri belirlenirken maruz kalma yolları bütünüyle analiz edilmeli ve PFAS analiz metotlarının güvenilir bir şekilde standardize edilmiş olması gerekmektedir. Ancak gıda zinciri yoluyla maruziyet dışında çeşitli su kaynaklarından, suyla hazırlanan gıdalardan, havadan, ev tozundan veya temas yoluyla da maruz kalma durumu bu limitlerin belirlenmesi çalışmalarına henüz dâhil edilmemiştir. Diğer yandan analiz yöntemlerinin standardize edilmesi ve bütünüyle bulaşının tespit edilebilmesinin ardından yeterli hayvansal deneylerin de yapılması ve uzun vadeli etkilerin tespiti önemlidir. Dolayısıyla günlük alım limitleri şu an için yalnızca referans değer niteliği taşımaktadır. Ayrıca 5.000'den fazla PFAS benzeri bileşik olmasına rağmen, üzerinde çalışma yapılan ve etkisi ortaya konulup kısıtlamalar getirilen PFAS bileşiklerinden yalnızca yedi tanesi küresel düzenlemelerde listelenmektedir. Dolayısıyla bu bileşiklerden yüzde 99'unun toksikoloji testleri yoktur. Farklı maruziyet kaynakları olsa da riskin büyüklüğü net tanımlı değildir. Sonuç olarak potansiyel insan maruziyeti ve bu maruziyetin sağlık etkilerini daha iyi anlamak için tüm PFAS bileşiklerinin kümülatif etkilerini içeren kapsamlı bir risk değerlendirme çalışması gerekir.

Bahçeden gelen, yerel ya da avcılıkla elde edilen gıdalar her zaman daha temiz değildir. Yapılan çalışmalar, kirli toprak ve sulara maruz kalan yerel üretimlerin ve av hayvanlarının, denetimli endüstriyel üretime kıyasla daha yüksek PFAS birikimi gösterebildiğini ortaya koyuyor. "Doğal" algısı, kimyasal kirlilik karşısında güvenli bir kalkan oluşturmuyor.

Dünya genelinde mevcut PFAS verilerinin çoğu Avrupa Birliği (AB), ABD ve Çin gibi ülkelere aittir. Dolayısıyla dünya genelinde birçok bölge için çevresel ve gıda kirliliğinin tespitine yönelik bilgi eksikliği vardır. PFAS'ın gıdaya bulaşmasında en etkili yollardan biri olan gıda ambalajları, gıda işleme ve gıda ile temas eden malzemeler olduğundan bu malzemelerde PFAS kısıtlanmasına yönelik yasal düzenlemeler PFAS'la mücadele için oldukça önemlidir. Washington Eyalet Yönetimi 2022'de bilinçli olarak PFAS eklenen gıda ambalajlarının satışını yasaklamıştır (RCW 70A.222.070). Danimarka Çevre Bakanlığı ise 2020'den itibaren fast-food ve pişirme kâğıdı da dâhil olmak üzere gıda ambalajlarında PFAS kullanımına son vermiştir. Fransa'da mutfak ekipmanlarında teflon kullanımı uzun bir süredir yasak, ayrıca 2025 yılında musluk suyu kullanımı da yasaklanmış ve birçok endüstriyel üründe PFAS kullanımı sınırlandırılmıştır.

Türkiye'de PFAS üretimi, kullanımı ve bertarafına yönelik kapsamlı bir düzenleme henüz oluşmamış olsa da gıda mevzuatımız AB ile tam uyumludur. Bu sebeple 2023 yılında yayımlanan Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Yönetmeliğinde ilk defa bu bileşiklerden bahsedilmiştir. Buna göre birçok hayvansal gıdada PFOS, PFOA, PFNA, PFHXS bileşikleri için ayrı ayrı ve toplam, limitler belirlenmiştir. Bu yönetmelik 31.12.2025 tarihinden itibaren geçerli olmuştur. Türk Gıda Kodeksi belirli gıdalardaki perfloroalkil bileşenlerinin resmî kontrolü için numune alma ve analiz metodu kriterleri Tebliği'ni 21.10.2025 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlamıştır ve böylece denetim standartları netleşmiştir.

Gelecekte Nasıl Bir Yol İzlenmeli?

Çoğu gelişmiş ülkede PFAS bileşiklerinin kullanımı yasaklanmış veya kısıtlanmıştır. Ancak az gelişmiş ülkelerde henüz durum tespiti dahi yapılmamışken PFAS'a alternatif malzemelerin maliyetinin yüksek oluşu da PFAS maruziyetini artırmaktadır. Özellikle Uzak Doğu'dan ithal edilen pirinçlerin PFAS açısından değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

PFAS ile mücadelede deniz ürünleri gibi en riskli gıdaların izlenmesi, kayıt altına alınması ve denizlerdeki kirliliğin ortaya konulması oldukça önemlidir. Şu an için yalnızca ABD ve AB ülkelerinde içme suyu için yasal zorunluluklar mevcuttur. Küresel su standartlarının oluşturulması gerekir. Ters ozmoz gibi etkili su filtrasyon sistemlerinin özellikle tarımsal alanlarda sulama için ve gıda üretiminde kullanılması da maruziyeti azaltacak stratejilerdir.

Ülkemizde tarımsal ürünler, su ürünleri, hayvansal üretim tesisleri, yerel işletmeler, denizler, yer altı ve yüzey suları için kapsamlı bir PFAS kontaminasyon durum tespiti acilen yapılmalıdır. Türkiye'nin en yoğun nüfuslu ve sanayileşmenin en çok olduğu Marmara Bölgesi'nde 2024 yılında PFAS kirliliğini tespit etmek üzere bir çalışma yapılmıştır. Her ne kadar ülkemizde endüstrileşmenin en yoğun olduğu bölge olsa da gerek yüzey sularında gerekse balıklarda tespit edilen PFAS yoğunluğu Avrupa ülkeleri, Asya ve ABD'ye göre oldukça düşük çıkmıştır. Balık dokularındaki en yüksek PFAS yoğunluğu Küçükçekmece Gölü'nde avlanan turna balığında tespit edilirken, Eğirdir Gölü'nde analiz edilen balık dokularının yalnızca 1 tanesinde düşük miktarda PFAS tespit edilmiştir (20).

Ülkemizdeki durum Avrupa, Asya ve ABD'ye kıyasla daha iç açıcı gözükse de bu maddelerin kalıcı kirlilik yarattığı göz önünde bulundurularak izleme prosedürlerinin sürekliliği geniş bir sahaya yayılması önemlidir. Dolayısıyla Türkiye'de bu konuda yapılan bilimsel araştırmaların geniş bir yelpazede desteklenmesi gerekir. Ayrıca topraktan sofraya gıda güvenliğini sağlamaya yönelik kapsayıcı bir eylem planına ihtiyaç vardır.

Kaynaklar

1) Ohoro, C. R., & Ngole-Jeme, V. M. (2025). PFAS contamination and its rising toll on food security: A hidden global threat. Food Control, 111611.

2) Schoeters, G., Boodts, S., Colles, A., et al. (2025). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food and its contribution to human exposure. Current Opinion in Food Science, 101361.

3) Richterová, D., Govarts, E., Fábelová, L., et al. (2023). PFAS levels and determinants of variability in exposure in European teenagers–Results from the HBM4EU aligned studies (2014–2021). International Journal of Hygiene and Environmental Health, 247, 114057.

4) Schoeters, G., Boodts, S., Colles, A., et al. (2025). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food and its contribution to human exposure. Current Opinion in Food Science, 101361.

5) Hossini, H., Massahi, T., Parnoon, K., & Nouri, M. (2025). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in milk and dairy products: a literature review of the occurrence, contamination sources, and health risks. Food Additives & Contaminants: Part A, 42(9), 1284-1296.

6) Donley, N., Cox, C., Bennett, K., et al. (2024). Forever pesticides: a growing source of PFAS contamination in the environment. Environmental Health Perspectives, 132(7), 075003.

7) Gellrich, V., Brunn, H., & Stahl, T. (2013). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in mineral water and tap water. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 48(2), 129-135.

8) Affricano, A., Asteggiano, A., Di Bernardo, A., et al. (2025). Case study: Targeted HPLC-MS/MS analysis of TFA and other USC-PFAS in beverages and waters from Italy and Asia. Food Control, 111779.

9) Müller, V., Feldmann, J., Prieler, E., & Brodschneider, R. (2025). PFAS in the Buzz: Seasonal Biomonitoring with Honey bees (Apis mellifera) and Bee-collected Pollen. Environmental Pollution, 126750.

10) Richterová, D., Govarts, E., Fábelová, L., et al. (2023). PFAS levels and determinants of variability in exposure in European teenagers–Results from the HBM4EU aligned studies (2014–2021). International Journal of Hygiene and Environmental Health, 247, 114057.

11) Lasters, R., Groffen, T., Eens, M., et al. (2022). Home-produced eggs: An important human exposure pathway of perfluoroalkylated substances (PFAS). Chemosphere, 308, 136283.

12) Figueroa-Muñoz, G., Murphy, C. A., Whittum, K., & Zydlewski, J. (2025). Cleaner cuts: Farmed fish and skin-off fillets are lower in per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Science of The Total Environment, 959, 178266.

13) Schrenk D, Bignami M, Bodin L, et al. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA J 2020, 18:e06223.

14) DTU National Food Institute (2023). Indhold af PFAS i fiskemel og via indhold i økologisk foder i økologiske æg. DTU Fødevareinstituttet.

15) Wang, X., Huang, X., Zhi, Y., et al. (2024). Leaching of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from food contact materials with implications for waste disposal. Journal of Hazardous Materials, 479, 135658.

16) Choi, H., Bae, I. A., Choi, J. C., et al. (2018). Perfluorinated compounds in food simulants after migration from fluorocarbon resin-coated frying pans, baking utensils, and non-stick baking papers on the Korean market. Food Additives & Contaminants: Part B, 11(4), 264-272.

17) Mohamed, A. M., Mohamed, S. A., Mostafa, M. M., & Hamza, E. S. M. (2019). Impact of household cooking on release of fluorinated compounds PFOA and PFOS from Tefal coated cookware to foods. World J Adv Res Rev, 3(2), 24-35.

18) Vera, P., Canellas, E., Dreolin, N., et al. (2024). The analysis of the migration of per and poly fluoroalkyl substances (PFAS) from food contact materials using ultrahigh performance liquid chromatography coupled to ion-mobility quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-IMS-QTOF). Talanta, 266, 124999.

19) Chow, S. J., Ojeda, N., Jacangelo, J. G., & Schwab, K. J. (2021). Detection of ultrashort-chain and other per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in US bottled water. Water research, 201, 117292.

20) 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.

21) İkizoglu, B. (2024). PFOA and PFOS Pollution in Surface Waters and Surface Water Fish. Water, 16(16), 2342.

PFAS yüklü gıdaların İslami açıdan incelenmesi

Dr. Şeyma Ülger Nalbant

2012 yılında İstanbul Üniversitesi İlahiyat Fakültesi İngilizce Bölümüne başlamış; lisans eğitimi süresince Malezya'daki International Islamic University Malaysia (IIUM)'da iki dönem öğrenim görmüştür. 2017 yılında lisans eğitimini tamamlamasının ardından aynı yıl İstanbul Üniversitesi İlahiyat Fakültesinde yüksek lisans programına başlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2020 yılında tamamlamış; bu süreçte Almanya'daki Eberhard Karls Universität Tübingen'de de yüksek lisans düzeyinde dersler almıştır. Doktora eğitimi sürecinde helal farmakoloji alanına odaklanan bir BAP projesinde yürütücü olarak görev almış ve Malezya'da helal araştırmaları kapsamında akademik araştırmalar yapmıştır. Doktora tezini "İlaçlarda Haram Madde Kullanımının İslam Hukuku Açısından İncelenmesi" başlığıyla yürütmüş ve Ocak 2026'da başarıyla tamamlamıştır. Başlıca uzmanlık alanları İslam hukuku, helal farmakoloji, helal sağlık ve helal gıda çalışmalarını kapsamaktadır.

Per- ve polifloroalkil maddeler (Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) çevresel kalıcılıkları ve potansiyel toksisiteleri nedeniyle giderek daha fazla gündeme gelen bir mesele hâline gelmiştir. Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS'lar), en az bir tam flor atomu içeren (-CF2-) ve yüksek oranda flor içeren alifatik bileşikleri tanımlamak için kullanılan genel bir terim olup; bu maddeler, karbon zincirlerindeki hidrojen atomlarının tamamının veya bir kısmının flor ile değiştirilmesiyle oluşan kimyasal bileşiklerdir. PFAS'lar, bu güçlü karbon–flor bağları sayesinde son derece dayanıklı ve kalıcı yapılar hâline gelmektedir. Ancak belirtmek gerekir ki PFAS'lar su, hava ve toprakta olduğu gibi insan, hayvan ve bitki dokularında da tespit edilmiştir.

PFAS'lar, olarak 1940'lar ve 1950'lerde kullanılmaya başlanmış olup günümüzde günlük hayatımızın bir parçası olan çoğu ürün ve uygulamada yer almaktadır. Örneğin PFAS türlerinden Perflorooktanoik Asit (PFOA) genellikle teflon kaplı mutfak eşyalarında, tekstil ürünlerinde ve endüstriyel kaplamalarda kullanılmaktadır. Diğer bir uzun zincirli PFAS türü olan PFOS ise su ve leke itici kaplamalarda, yangın söndürücülerde ve bazı endüstriyel ürünlerde yaygın olarak bulunmaktadır. Ayrıca son derece dayanıklı bu kimyasal bileşikler, temizlik ürünleri, giyim, kozmetik, ev eşyaları (halılar ve döşemelik kumaşlar gibi), gıda ambalajları dâhil ambalaj malzemeleri, boya ve yangın söndürücü köpükler gibi çok çeşitli ürünlerde görülmektedir. Gıda kâğıt ve karton ambalajlarında ise suya, yağa ve yağın karton ambalaja geçişini önlemek ve ürünün sunumunu iyileştirmek amacıyla PFAS uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gıdalarda PFAS Birikimi ve Sağlık Üzerindeki Potansiyel Riskler

Çevrede birikme eğilimi gösteren ve son derece kalıcı özellikleri nedeniyle "kalıcı kimyasallar" sınıfında değerlendirilen PFAS bileşikleri, günümüzde 12.000'den fazla farklı türüyle dikkat çekmektedir. Araştırmalar, PFAS'ların dünya genelinde çok çeşitli tüketici ürünlerinde ve endüstriyel süreçlerde yaygın biçimde kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle PFAS meselesi artık yalnızca çevresel veya toksikolojik bir sorun olarak değil, aynı zamanda gıda güvenliği açısından da kritik bir risk alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Zira PFAS'lar; gıdanın üretimi, işlenmesi, taşınması ve depolanması süreçlerinde kullanılan gıda ambalajları ve diğer gıda temas materyallerinde bulunabilmektedir. Diğer pek çok gıda temas kimyasalında olduğu gibi, PFAS'ların kâğıt, karton ve plastik gibi çeşitli gıda ambalajlarından gıdaya geçebildiği ve bunun toplum genelinde maruziyeti artırdığı bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur. Bununla birlikte temas yolu yalnızca ambalaj materyallerinin gıdayı doğrudan kontamine etmesiyle sınırlı değildir. PFAS içeren gıda temas malzemelerinin geri dönüşüm veya yakma yoluyla bertarafı da önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu maddelerin bertaraf süreçleri sırasında çöp sahalarından sızan atık sular yer altı ve içme suyu kaynaklarını kirletebilmekte ve hem doğrudan hem de dolaylı yollarla insan sağlığına ciddi şekilde zarar verebilmektedirler.

İnsan ve hayvan kan ile dokularında biriken bu kimyasallar, üreme sistemi, tiroit bezi fonksiyonları, kemik metabolizması ile bağışıklık ve sinir sistemi üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarabilmektedir. PFAS'a maruziyet, farklı kanser türleri, gelişimsel toksisite, düşük doğum ağırlığı böbrek ve testis kanseri, kısırlık gibi çeşitli sağlık riskleriyle de ilişkilendirilmiştir. İnsan sağlığı açısından son derece zararlı olan bu kimyasalların küresel ölçekte üretilmesi ve çok çeşitli kullanım alanlarına sahip olması, maruziyet riskini önemli ölçüde artırmaktadır. İnsanlar, solunan hava, içme suyu, ev

DNA
DNA

içi tozlar, gıdalar ve doğrudan temas yoluyla PFAS'a maruz kalabilmektedir; bunlar arasında besin yoluyla alım, en yaygın ve belirleyici maruziyet şekli olarak öne çıkmaktadır. Gıda ürünlerinde en sık rastlanan Perflorooktansülfonat (PFOS) ve PFOA türleri, tarımsal uygulamalar, ambalajlama, taşıma ve depolama süreçleri sırasında kontamine olabilmekte ve gıda zinciri aracılığıyla insanlara geçmektedir. Kontamine gıda ve içeceklerin tüketimi, PFAS'a doğrudan maruziyetin temel kaynağını oluştururken bu kimyasallarla temas etmiş gıdalar yoluyla dolaylı maruziyet de söz konusu olabilmektedir.

İnsanlarda PFAS maruziyetinin başlıca yollarından biri olan beslenme açısından bakıldığında, bu maddelerin farklı gıda kategorilerinde bulunduğunu gösteren dikkat çekici bulgular bulunmaktadır. Özellikle su ürünleri, büyükbaş ve kümes hayvanları ile bunlardan elde edilen ürünlerin tüketimi önemli bir maruziyet kaynağıdır. Çeşitli çalışmalarda süt ve süt ürünleri, meyve ve sebzeler, sığır eti ve sakatat, yumurta, tatlı su ve deniz balıkları, kabuklu deniz ürünleri, hazır yemekler ve hatta anne sütü gibi birçok kategoride PFOA ve PFOS tespit edilmiştir. İnsan sağlığı açısından oluşturduğu risklere ilişkin Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (European Food Safety Authority/EFSA)'nin bilimsel değerlendirmesi, yumurta ve yumurta ürünlerinin; balık eti ile meyve ve meyve ürünleriyle birlikte maruziyete en fazla katkıda bulunan gruplar arasında yer aldığını göstermektedir. Bu doğrultuda yapılan bir çalışmada, günlük beslenmede tüketimi oldukça yaygın olarak yumurtanın, Avrupa'da PFAS maruziyetinin başlıca kaynaklarından biri olarak kabul edildiği belirtilmektedir.

Temel gıda maddelerinden biri olan yumurtalarda bu kimyasalların nasıl biriktiğini incelendiğinde bulaşmanın birden fazla yolunun bulunduğu görülmektedir. Hem açık alanda hem de kafes ortamında yetiştirilen tavukların yumurtalarında PFAS tespit edilmiştir. Ancak açık alanda yetiştirilen tavuklar, toprakla daha fazla temas ettikleri için PFAS kontaminasyonuna daha yüksek düzeyde maruz kalabilmektedir. PFAS'ların topraktan bitkilere geçebilmesi, bitkilerin de tavuklar için ek bir maruziyet kaynağı hâline gelmesine yol açmaktadır. Buna ek olarak, sudaki PFAS kirliliği de önemli bir risk faktörüdür. Örneğin İtalya'nın Veneto bölgesinde yapılan bir araştırmada incelenen 23 yumurtanın 11'inde PFAS tespit edilmiş; belirlenen bileşiklerin Perflorobütanoik Asit (PFBA) ile PFOS olduğu görülmüştür. Bu bulgu, bölgedeki su kaynaklarında bulunan PFAS'ların yumurtalara doğrudan bulaştığını göstermektedir. Benzer şekilde, İtalya'nın Emilia Romagna bölgesinde yapılan bir başka araştırmada da seçilen 16 yumurtanın 11'inde PFOS, PFOA, PFBA ve Perflorononanoik Asit (PFNA) gibi PFAS türleri tespit edilmiş ve bölgedeki su kirliliğinin yumurtalardaki PFAS düzeylerini belirgin biçimde etkilediği ortaya konmuştur. Bununla beraber kapalı ortamda yani kafes sisteminde yetiştirilen tavuklarda ise maruziyetin temel kaynaklarını içme suyu ve ticari yemler oluşturmaktadır. Özellikle balık bazlı yemlerde PFAS bulunma ihtimali daha yüksek olup, içme suyundaki PFAS konsantrasyonları ile yumurtalardaki PFAS düzeyleri arasında pozitif bir ilişki saptanmıştır.

EFSA, Avrupa genelinde günlük tüketim miktarının yüksek olması nedeniyle yumurtayı PFAS maruziyetinin başlıca kaynaklarından biri olarak belirtse de maruziyetin baskın besin kaynağı bölgesel olarak değişiklik gösterebilmektedir.

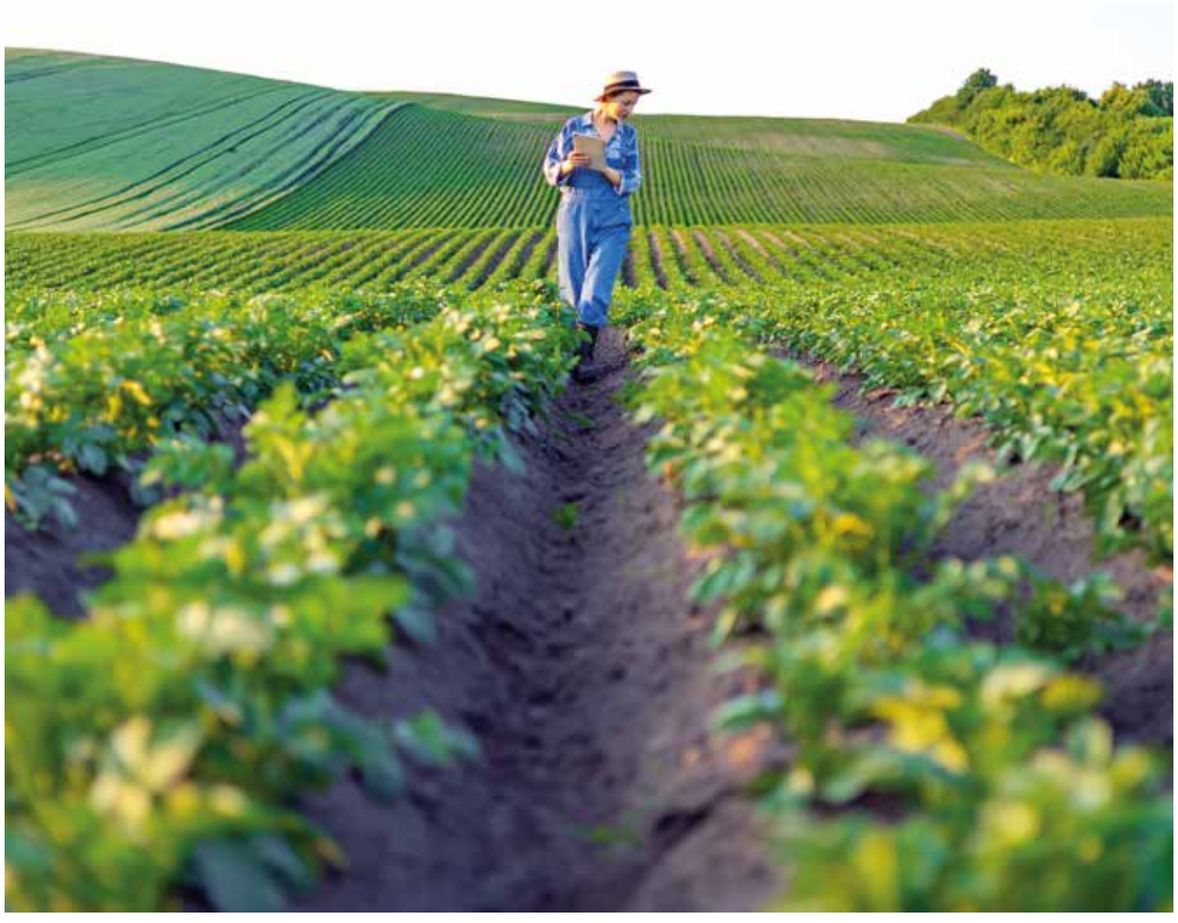
PFAS'lar hem çevre hem de insan sağlığı açısından ciddi endişelere yol açmakta ve canlılarda biyolojik olarak birikebilmektedirler. Hayvan ve insan kanı ile dokularında birikebilen bu kimyasallar insanlarda endokrin bozucu etkiler ortaya çıkarmaktadır. Özellikle üreme sistemi, tiroit bezi fonksiyonları ve kemik metabolizması üzerinde olumsuz etkileri olup bağışıklık ve sinir sistemi üzerinde de ciddi sağlık sonuçlarına neden olabilmektedirler.

Nitekim Uzak Doğu'daki bir ülke olan Tayvan'da yapılan bir çalışmada, PFAS maruziyetinin pirinç tüketimiyle güçlü bir şekilde ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Bu bölgede yaşayan insanların PFAS düzeylerinin yüksek olmasının temel nedenlerinden biri, beslenmede önemli yer tutan pirincin, PFAS ile kirlenmiş nehir suları kullanılarak sulanan tarlalarda yetiştirilmesidir. Diğer bir Uzak Doğu ülkesi olan Çin'de ise pirinç de dâhil olmak üzere tahıl ürünleri arasında yapılan bir araştırmada da en yüksek PFAS oranına sahip ürünün soya fasulyesi olduğu belirlenmiştir. Ülkemizde ise PFAS konusunda yürütülen çalışmalar yeni yeni ivme kazanmaya başlamış olup Türkiye'deki PFAS kirliliğine ilişkin araştırmalar artmaktadır. Bu kapsamda yapılan bilimsel çalışmalar, farklı şehirlerde hem musluk sularında hem de şişelenmiş sularda PFAS varlığını ortaya koymaktadır. Hatta bazı su örneklerinde, Avrupa Birliğinin önerdiği toplam PFAS sınır değerlerine yaklaşan konsantrasyonların gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Sonuç olarak, bu başlık altında giderek önem kazanan PFAS meselesi yalnızca ekolojik etkileriyle değil, aynı zamanda insan sağlığı üzerindeki olumsuz sonuçlarıyla da ele alınmıştır. Bu çerçevede konu, İslâmi perspektiften de ele alınmayı gerekli kılmaktadır. Nitekim şeriata göre insan canının korunması en temel amaçlardan biridir. Bu bağlamda, yüksek düzeyde PFAS içeren ve günlük hayatta yaygın olarak tüketilen yumurta, et ve tahıl ürünleri gibi gıdalar, fıkhî hükmü ve tüketim meşruiyeti açısından önemli bir tartışma alanı oluşturmaktadır.

PFAS Yüklü Gıdaların Helallik ve Tayyiblik Açısından Değerlendirilmesi

Bilimsel olarak yüksek düzeyde PFAS içeren gıdaların tüketimi bu kimyasalların vücutta birikmesine ve dolayısıyla insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği belirtilmektedir. Bu durum, İslam'ın temel maksatlarından biri olan "canın korunması" ilkesiyle yakından ilişkili olup fıkhî açıdan dikkatle ele alınması gereken önemli bir meseledir. Bu bağlamda, Kur'ân-ı Kerîm'de Hz. Peygamber (s.a.v.)'e hitaben "O, onlara tayyib olan şeyleri helal, habîs olan şeyleri de haram kılar." (el-A'raf, 7/157) buyrulmaktadır. Bu ayet, helal kılınan şeylerin zararsız ve temiz olması gerektiğine işaret etmekte; ayette geçen "tayyib" ifadesi de pratikte



bu nitelikleri karşılayan unsurlar olarak anlaşılmaktadır. Nitekim bu bütüncül yaklaşımın somut yansımaları, klasik dönem eserlerinde helallik ölçütlerinin belirlenmesinde açıkça görülmektedir. Bu bağlamda Hanbelî fakihlerden Buhûtî'nin (ö. 1051/1641) görüşleri dikkat çekicidir. Buhûtî'ye göre zararsız ve temiz nitelik taşıyan gıdalar helâl kabul edilir; tahıllar, meyveler ve diğer bitkisel ürünler bu kapsamda değerlendirilir. Buna karşılık, insan sağlığına zarar veren maddelerin helallik vasfı taşımadığı ifade edilmektedir.

Bu kapsamda, bir gıdanın zararlı olmasının hükme etkisine ilişkin meselelerin, İslâm hukuk literatüründe erken dönemlerden itibaren ele alındığı ve önemli tartışma alanlarından birini oluşturduğu söylenebilir. Hukukçuların gıdaları zararlı ve zararsız olarak kendi içinde tasnif ettiği ve buna göre hüküm verdikleri görülmektedir. Örneğin Şâfiî mezhebi hukukçularından Şîrâzî (ö. 476/1083) el-Mühezzeb ve Begavî (ö. 516/1122), et-Tehzîb adlı eserinde tahîr kavramını açıklayarak bu maddeleri temiz ve yenilmesi caiz olan unsurlar olarak değerlendirmişlerdir. Bu tasnife göre maddeler, "zararlı tahîr maddeler" ve "zararsız tahîr maddeler" olarak ikiye ayrılmaktadır. Zararlı tahîr maddeler; zehir, cam parçaları, taş veya toprak gibi doğrudan insan sağlığına zarar verebilecek unsurları kapsamaktadır. Bu tür maddelerin tüketilmesi caiz görülmemiştir; zira Allah Teâlâ, Kur'ân-ı Kerîm'de "Kendinizi öldürmeyin" (en-Nisâ, 4/29) ve "Kendi ellerinizle kendinizi tehlikeye atmayın" (el-Bakara, 2/195) buyrularak zararlı fiilleri yasaklamıştır. Hatta Şâfiî mezhebi fakihi en-Nevevî (ö. 676/1277), Mecmû adlı eserinde "her temiz ve zararsız şey helaldir" şeklindeki ifadesi ile bir maddenin helal sayılabilmesi için zararsız olması gerektiğini de ifade etmiştir. Nevevî, devamında ise temiz olmasına rağmen vücuda zarar veren maddelerin tüketilmesinin helal olmadığını bildirmiştir. Buna örnek olarak ise toprak, taş, cam parçaları ve benzeri bedene zarar verebilecek maddelerin tüketilmesinin caiz olmadığını ifade etmiştir.

Buna göre eski Arap toplumları da dâhil olmak üzere çeşitli kültür ve coğrafyalarda görülen toprak yeme alışkanlığı önemli bir örnektir. Buna göre İslam hukukçuları, eserlerinde oldukça ilginç bir tartışma konusu olan ve o dönemde insanların tükettikleri toprak yeme (eklü't-tîn) meselesinde tartışmayı bedene zararlı olup olmadığı merkezinde yapmışlardır. Şâfiî fakih Nevevî, Ebû İshak el-Mervezî (ö. 340/951)'nin görüşünü aktararak çamur yemenin bedene zararının ortaya çıkması hâlinde haram sayılması gerektiğini belirtmektedir. Hanbelî fakih İbn Kudâme (ö. 620/1223) de Hanbelî mezhebinin kurucusu Ahmed bin Hanbel (ö. 241/855)'in toprak yemenin mekruh olduğu yönündeki görüşünü naklet-mektedir. Ona göre hükmün sebebi ise toprağın bedene zarar verebilme ihtimalidir. Buna karşılık ne zararı ne de faydası olan toprağın yenilmesi ise anlamsız ve uygunsuz kabul edilmiştir. Bu, fıkhın eşyanın kullanımını maslahat ve amaç-araç dengesi üzerinden değerlendirdiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, özünde mubah olan bir maddenin niteliğinin bozulmasıyla hükmün değişmesini açıklayan diğer örneklerle de ifade edilebilir. Mesela et, mahiyeti itibarıyla mubahtır fakat bozulduğunda hükmü değişmektedir ve bozulduğunda yenmesi haram kabul edilmiştir. Yasak olmasının nedeni ise necislik değil, sağlık açısından oluşturduğu zarardır.

Mezkûr bu örnekler eşyanın fiilî nitelikleri, insan sağlığına etkisi ve zararın gerçekleşme ihtimali gibi rasyonel gerekçeler üzerinden işleyen bir mantıkla hüküm inşa ettiğini göstermektedir. Çağdaş araştırmacılardan Şinkîtî'nin misvak tartışmasında vurguladığı "zararsızlık" ölçütü, bu geleneğin güncel formülasyonlarından biridir. Ona göre Şeriat, bizzat insana zarar veren bir fiili veya aracı meşru kılmamaktadır; çünkü meşruiyetin amacı korunma, ıslah ve faydadır. Kullanılan araç maksadın hilafına bir zarara yol açtığında, hüküm otomatik olarak meşruiyet çerçevesinin dışına düşer ve caiz değildir. Bu örneklerin bütünlüğünde görülen ortak nokta, fıkhî sistemde "yarar-zarar dengesi"nin normatif bir eksen olarak işlediğidir. Şeriatın temel amacı insana fayda sağlamak, onun varlığını korumak ve sağlığını muhafaza etmektir. Dolayısıyla fayda sağlama amacıyla tüketilen bir gıdanın zarar üretmesi, onu tayyib vasfından uzaklaştırdığı için hükmünün yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Bu kapsamda PFAS içeren gıdalar belirli bir eşiğin üzerine çıktığında zararlı etkilerini göstermektedir. Yani eşik değerin altında kaldığında bu gıdaların hâlâ besleyici ve faydalı yönleri barındırdıkları yorumu yapılabilir. Bir maddenin "tam mefsedet" kategorisine alınması, zararının hiçbir fayda unsuruyla dengelenmeyecek kadar açık olması şartına bağlı olmaktadır. Bu çerçevede İslam âlimlerinin sıkça tartıştığı bir konu olan sigaranın hükmü tipik bir örnek olarak zikredilebilir. Sigaranın insana herhangi bir faydası yoktur ve aksine sağlığa verdiği zarar kesin, yoğun ve süreklidir. Bu yüzden sigara, maslahat-mefsedet açısından değerlendirildiğinde bütünüyle "mefsedet" kategorisine girmekte ve şer'î hükmünün menfi yönde şekillenmesi daha belirgin hâle gelmektedir.

PFAS içeren gıdaların değerlendirilmesinde, mevcut bilimsel veriler belirli eşik değerlerin önemine işaret etmektedir. Buna göre, PFAS yükü yüksek bir yumurta belirli bir eşiği aştığında ve sürekli tüketildiğinde, söz konusu maddelerin vücutta birikme ihtimali artmakta; bu durum da zarar yönünün ağır basmasına yol açmaktadır. Yani eşik değerinin dikkate alınması, yumurtanın besleyici özelliklerinin tamamen ortadan kalkmadığını göstermektedir. Dolayısıyla PFAS miktarı arttıkça kimyasal maruziyet riski belirgin biçimde öne çıkmakta; ancak sınırlı da olsa besinsel faydanın tamamen yok olmadığı ifade edilebilir. Aynı değerlendirme su için de yapılabilir. Su, insan yaşamı için yaşamsal öneme sahiptir ve PFAS bulunsa dahi susuz kalmanın kısa vadeli zararları, PFAS'ın uzun vadeli etkilerinden çok daha büyük olabilmektedir. Bu sebeple PFAS yüklü suda dahi hidrasyon gibi belirli faydalar hala devam ettiği sonucu çıkarılabilir. Bu durum, meselenin yarar-zarar dengesi bağlamında ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu nedenle, PFAS içeren gıdalar "alkol" ve "GDO'lu yiyecekler" bağlamındaki benzer bir değerlendirmeye tabi tutulabilir. Buna göre bazı maddeler, faydalı olmalarına rağmen olası zararları faydalarından daha ağır bastığında, İslam'da bunların tüketimi yasaklanmıştır. Bu yaklaşımın en açık delillerinden biri, "Sana içkiyi ve kumarı soruyorlar. De ki: 'Onlarda büyük bir günah ve insanlar için bazı faydalar vardır; fakat zararları faydalarından daha büyüktür.'" (el-Bakara, 2/219) ayetidir. Burada vurgulanan "zararları faydalarından daha büyük" ifadesi, yarar-zarar dengesinin temel bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Buna göre, bir maddenin tüketiminde hem fayda hem zarar ihtimali mevcutsa hüküm belirlenirken hangi unsurun daha ağır bastığı göz önünde bulundurulur. Yani zarar faydadan daha büyük ise tüketim ilahi buyrukla yasaklanmıştır. Genetiği Değiştirilmiş (GD) gıdalar meselesinde de benzer bir değerlendirme yapmak mümkündür. GDO'lar, yapıları gereği hem belirli faydalar sağlayabilen hem de çeşitli riskler barındıran bir potansiyele sahiptir. Yani GD bir gıdada zararla

beraber hâlâ besin değeri açısından bazı faydalar bulunabilmektedir. Yani GD bir gıdada, bazı zarar ihtimallerine rağmen besin değeri açısından belirli faydalar da bulunabilir. Bu sebeple maslahat ve mefsedet birlikte değerlendirilir ve fıkhî hüküm, hangi unsurun daha ağır bastığının tespitiyle şekillenir. Bu çerçevede GDO'ların yol açabileceği muhtemel zararların, sağlayabileceği faydalardan önce dikkate alınması "def'-i mefâsid celb-i menâfi'den evlâdır" (Mecelle, md. 30) kaidesi gereğince gerekmektedir. Yarar-zarar dengesi incelendiğinde potansiyel zararların daha ağır bastığı ve özellikle ekolojik ve genetik düzeyde geri dönüşü güç hatta imkânsız sonuçlar ortaya çıkarabileceği anlaşılırsa, "kendi ellerinizle kendinizi tehlikeye atmayın" (el-Bakara, 2/195) buyruğu gereği olarak bu ürünler hakkında kesinlik sağlanıncaya kadar üretim süreçlerine ihtiyatla yaklaşmak daha uygun görülmektedir.

PFAS içeren ürünler söz konusu olduğunda, fayda ile muhtemel zarar birlikte söz konusudur. Bu nedenle, şer'î hükmün belirlenmesinde maslahat ile mefsedet arasındaki denge gözetilerek bir değerlendirme yapılması gerektiği ifade edilebilir. Mecelle'de yer alan (md. 30) kaide bu dengeyi somutlaştırmaktadır. Eğer bir zarar söz konusu ise elde edilecek faydanın mahiyeti ne olursa olsun önceliğin zararın bertaraf edilmesine verilmesi gerekmektedir. Nitekim bu yaklaşımı destekleyen diğer fıkhî kaideler de zararın giderilmesi ve ortadan kaldırılmasının esas olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. "Zarar izâle olunur." (Mecelle, md. 20), "Zarara zararla karşılık verilmez." (Mecelle, md. 25) ve "Zarar bi-kaderi'l-imkân izale olunur." (Mecelle, md. 31) kaideleri de zararın ortadan kaldırılmasını gerektiren yaklaşımı teyit etmektedir. Bu itibarla, yüksek düzeyde PFAS içeren ürünlerin kullanımı, söz konusu gıdaların uzun vadeli zararlı etkileri göz önünde bulundurularak ihtiyat ilkesi çerçevesinde kaçınılması gereken bir durum olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, İslâm âlimlerinin erken dönemlerden itibaren bir maddenin şer'î hükmünü belirlerken zarar ve yarar dengesini (maslahat–mefsedet) birlikte değerlendirdikleri görülmektedir. Bu çerçevede, sağlığa zarar verme potansiyeli taşıyan gıdalara yönelik ihtiyat esaslı sınırlamalar, şeriatın temel gayelerinden biri olan "canın korunması" ilkesinin somut bir yansıması olarak değerlendirilebilir. PFAS ile yüksek düzeyde kontamine olmuş gıdaların ciddi sağlık riskleri taşıdığı, bilimsel araştırmalarla ortaya konmuş olup bu risklerin uzun vadede söz konusu gıdalardan elde edilebilecek muhtemel besinsel faydaların önüne geçtiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, PFAS içeren gıdaların tüketimi konusunda ihtiyatlı bir tutum benimsenmesi, şer'î koruma perspektifi açısından isabetli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Literatürdeki Boşluklar ve Gelecek Çalışmalar

Günümüz gıda endüstrisinde gıdaların içerdiği kimyasal maddeler önemli bir mesele hâline gelmiştir. Modern üretim süreçleriyle birlikte gıda zincirine giren cıva, kurşun ve arsenik gibi ağır metaller ile mikro ve nanoplastikler, pestisitler ve diğer tarımsal kimyasalların insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri, fıkhî değerlendirmelerde dikkate alınması gereken önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, söz konusu meselelerin hem bilimsel hem de İslâmî boyutlarıyla birlikte incelenmesi toplum sağlığının korunması ve dinî hükümlerin güncel veriler ışığında doğru uygulanması açısından önem taşımaktadır. Disiplinler arası çalışmalara ihtiyaç giderek artmakta olup bu alanda yapılacak araştırmalar araştırmacılar için önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

Teşekkür: Çalışmanın İslami yönlerden ele alınan kısımlarında yaptığı değerli yorumlarından dolayı Doç. Dr. Merve Özaykal'a teşekkür ederim.

Kaynaklar

Begavî, E. M. M. (1997). et-Tehzîb fî fıkhî'l-İmâm eş-Şâfi'î (A. A. Abdülmevcûd & A. M. Muavved, Thk.). Beyrut: Dârü'l-Kütübü'l-İlmiyye.

Buhûtî, Mansûr b. Yûnus b. İdrîs. (1968). Keşşâfü'l-Kınâ' 'an Metni'l-İknâ' (H. Musaylihî Mustafa, Thk.). Mektebetü'n-Nasri'l-Hadîsa bi'r-Riyâd.

Çevre Gıda ve Endüstriyel Analiz Laboratuvarı. (2025). Sürekli kalıcı kimyasallar (PFAS) ve suyumuz: Tehlike, düzenleme ve laboratuvar mücadeleleri. https://www.cevreanaliz.com/endustriyel/surekli-kalici-kimyasallar-pfas-ve-suyumuz-tehlike-duzenleme-ve-laboratuvar-mucadeleleri_361 (Erişim Tarihi: 23.04.2026).

Günay, H. M., & Özdemir, M. (2016). İslâmî açıdan genetiği değiştirilmiş ürünler. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 9(45), 1004-1022.

İbn Kudame, M. A. A. (1997). el-Muğni (3. Baskı, 15 Cilt). Riyad: Dâr-u Âlemi'l-kütüb.

İbn Manzûr, M. M. (1414/1993). Lisânu'l-'Arab (15 Cilt). Beyrut: Dâru Sâdır.

Li, X., vd., (2024). Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances in wheat, maize, rice, and soybean from Chinese major grain producing regions. Journal of Hazardous Materials, 480, 136509.

Melnyk, L. J., et al. (2025). Evidence mapping and scoping review of pathways for potential dietary exposure to per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS). Environmental Science: Processes & Impacts, 27(8), 2452-2463.

Mikołajczyk, S., vd., (2024). Chickens' eggs and the livers of farm animals as sources of perfluoroalkyl substances. Journal of Veterinary Research, 20;68(2):241-248. doi: 10.2478/jvetres-2024-0034. PMID: 38947157; PMCID: PMC11210361.

Nevevî, E. Z. Y. (1926). el-Mecmû ' şerhu'l-muhezzeb (20 Cilt). Beyrut: Dâru'l-Fikr.

Nobile, M., vd., (2023). Incidence of perfluoroalkyl substances in commercial eggs and their impact on consumer's safety. Foods, 12(20):3846.

Okur, K. H. (2009). İslam hukuku açısından helal ve haram olan gıdalar ve bazı güncel meseleler. Usûl İslam Araştırmaları, 11(11), 7-40.

Phelps, D. W., vd., (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances in food packaging: Migration, toxicity, and management strategies. Environmental Science & Technology, 58(13), 5670-5684. Epub 2024 Mar 19. PMID: 38501683; PMCID: PMC10993423.

Ramírez Carnero, A., vd., (2021). Presence of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food contact materials (FCM) and its migration to food. Foods, 10(7), 1443. PMID: 34206351; PMCID: PMC8306913.

Refis, A. A. (2009). el-Et'imetü'l-musanna'ati'l-hadîseti beyne't-te'sîli'ş-şer'iyyî ve't-tahlîli'l-'ilmiyyî (Doktora tezi). Câmi'atü'l-Emîr Abdü'l-kâdir.

Şâfiî, M. İ. (1983). el-Ümm (2.Bsk. 8 Cilt). Beyrut: Darü'l-Fikr.

Şinkîtî, M. M. (1994.). Şerhu zâdü'l-müstakni (2. Bsk.), y.y.

Tahtâvî, A. M. İ. (1997). Hâşiye et-Tahtâvî 'alâ merâkî'l-felâh şerh nûr el-iydâh (M. A. el-Hâlîdî, Thk.). Beyrut: Dârü'l-Kütübü'l-İlmiyye.

Van Asselt, E. D., et al. (2013). Transfer of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) from contaminated feed to dairy milk. Food Chemistry, 141(2), 1489-1495.

Xing, Y., vd., (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. Epub 2023 Sep 22. PMID: 37742961.

Yalçın, İ. (2014). Fıkıhta haram hayvanları belirleme sorunu. İslam Hukuku Araştırmaları Dergisi, 24, 329-345. https://izlik.org/JA52TU76BS.

Yerinde, A. (2025). Tayyib. TDV İslâm Ansiklopedisi. https://islamansiklopedisi.org.tr/tayyib (Erişim Tarihi: 23.04.2026).

Yetim, Ö. F. (2019). Katkı maddesi ihtiva eden gıdalarda helalliğin ve haramlığın belirlenmesinde bir yöntem olarak istihâle ve istihlâk (Yüksek lisans tezi). Harran Üniversitesi.

Yurtsever, M. (2025). Per- ve polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasalların) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 412-423.

Zebîdî, M. M. (1965-2001). Tâcu'l-arûs min cevâhiri'l-kâmûs (40 Cilt). Kuveyt: Vizâratü'l-İrşâd ve'l-Enbâ.

İslam nazarında bir çevre problemi olarak israf ve kirletme olgusu: PFAS'lar bağlamında bir değerlendirme

Prof. Dr. Recep Ardoğan

Çorum İskilip'te doğdu. İlk ve ortaöğrenimini İskilip'te tamamladıktan sonra Konya Selçuk Üniversitesi İlahiyat Fakültesini bitirdi ve öğretmenliğe başladı. Ankara Üniversitesi İlahiyat Fakültesinde 1997 yılında yüksek lisansını, 2003 yılında da doktorasını tamamladı. "İslam'da Çevre Teolojisi [şuanki baskısının ismi "Varlık Anlayışında Ahlaki Temellere İslam'da Ekoloji"dir]" kitabını yayımladı ve 2011'de doçent oldu. Aynı yıl Aralık ayında KSÜ İlahiyat Fakültesinde öğretim üyesi olarak göreve başladı. 2018'de profesör kadrosuna atandı. Her yıl düzenli olarak araştırma ve yayım faaliyetlerini sürdürmekte; KLM yayınları için gönüllü akademik danışmanlık yapmaktadır. Çalışmaları siyaset felsefesi/politik teoloji, sosyal kelam, metodoloji konularında yoğunlaşmaktadır.

Günümüzde sentetik kimyasalların kullanımının yaygınlaşması, çevre kirliliği ve çeşitli sağlık sorunlarına yol açtığı tespit edilmekte olup sentetik kimyasaların bir türü de PFAS'lar yani "Per- ve polifloroalkil maddeler"dir. Bunlar, her alanda yaygın kullanılmakta ve yüksek kararlılıkları nedeniyle de çevrede kalıcı hâlde birikmektedir. İçeriğindeki yüksek kararlılık ve direnç gösteren florokarbon zincirler nedeniyle kimyasal ve termal bozunmaya karşı son derece dayanıklıdır. Yangın söndürme köpükleri; yapışmaz pişirme kapları; gıda ambalaj malzemeleri; kozmetik ürünleri; su itici, yağ itici ve leke tutmayan kumaşlar, kaplamalar; balmumu, boya, vernik, mürekkepler; pestisitler ve gübreler gibi birçok endüstriyel ve tüketici ürününde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak, PFAS bileşikleri, bazı araştırmalara göre, sağlık üzerinde olumsuz etkiler yapmaktadır. Karaciğer hasarı, tiroit hastalığı, obezite, doğurganlık sorunları, hormon baskılanması ve kanser gibi sağlık sorunları; anne karnındaki cenindeki bazı olumsuz gelişimler, bunlardandır. Ayrıca, aşağıdaki özellikleri nedeniyle de bu maddelerin, olumsuz etkileri artmaktadır: i) Yaygınlık, ii) Kalıcılık (uzun yarılanma ömürleri), iii) Biyoakümülatiflik (canlılarda biyolojik olarak birikebilirlik) iv) Toksisite (kanserojenik, kısırlık, endokrin bozucu etkileri gibi çoklu sağlık tehlikeleri).

Tüm bu özellikleri nedeniyle, Avrupa Komisyonu, 19 Eylül 2024 tarihinde, REACH Tüzüğü (AB kimyasal mevzuatı) kapsamında, undekafloroheksanoik asit ('PFHxA') ve PFHxA ile ilgili maddelerin kullanımını kısıtlayarak insan sağlığını ve çevreyi koruyacak yeni önlemler kabul etmiştir.

Bu makalede, PFAS'ların özellikleri, kullanım alanları ve çevre üzerindeki etkilerini, kimya, biyoloji ve tıp gibi alanların uzmanlarına bırakarak, doğrudan çevreyi kirleten ve ekolojik düzene zarar veren maddeleri üretmenin, en azından zorunlu ve ihtiyaç olandan fazla üretmenin İslam nazarında nasıl değerlendirilebileceği üzerinde duracağız. Konuyu kaynak taraması, analiz ve yorumlama yöntemiyle ortaya koyacağız.

Çevre Sorunlarının Nedenlerine İlişkin Genel Bakış

Çevre sorunları, insanların doğadaki kaynakları israf etmeleri ve fiziki çevreyi kirletmeleri yanında yapay çevre ile doğal çevre arasındaki uyumsuzluğa işaret eder. Sanayi devrimi sonrasında çevre sorunları gözle görülür biçimde artmış ve günümüzde akut hâle gelmiştir. Bu nedenle bilim adamları ve düşünürler, çevre sorunlarının zihniyet, sistem ve pratik kökenleri ile çözüm yolları üzerinde etraflıca durmuşlar; farklı fikir ve önerilerle çeşitli tartışmalar başlatmışlardır. Batı düşüncesinde çevre sorunlarının zihniyet temelleri olarak; I) Ruh-madde ayrımı ve ruhun maddeden, düşüncenin uzamdan, insanın da evrenden üstün ve ona egemen olduğu düşüncesi (Kartezyen düalizmi); II) Buna bağlı olarak oluşan ve yakın zamanlarda insan-merkezcilik olarak adlandırılmaya başlanan kadim paradigma, III) Francis Bacon'dan itibaren bilgiyi doğa ve hatta başka insan ve toplumlar üzerinde kontrol ve egemenlik kurma aracı olarak gören hâkimiyet epistemolojisi, IV) Evreni organik bir bütün olarak görmek yerine onu mekanik bir varlık, kozmik bir cihaz olarak algılayan "mekanizm" gösterilir.

Kanaatimizce, bu nedenlendirmelerin haklı yönleri olduğu gibi aşırılıkları da vardır. Dolayısıyla, çevre sorunlarının nedenleri konusunda kafa karışıklığı ve ihtilaflar hâlâ sürmektedir. Ancak temel

sorun, doğadaki varlıklar içinde, akıl ve vicdan melekeleri ve başkalarının acısını hissedebilme yeteneği bulunan, bundan dolayı da ahlaki özne niteliğini hak eden tek varlık olan insanın; içinde bulunduğu habitata karşı sorumluluğunun ne olduğu sorusunu doğru yanıtlayamamış olmasıdır. Bu sorun, giderek büyümektedir. Çünkü Batı ülkeleri ve onların birer fabrika ve atık deposuna dönüştürdüğü ülkelerde bilim ve teknoloji, âdeta bindiği dalı keser gibi, çevreye zarar verecek ve gezegenin dengesini bozacak şekilde kullanılmaktadır. İnsan hayatına büyük bir çeşitlilik katmakla birlikte doğadaki biyolojik çeşitliliğe büyük zarar vermekte ve insan-dışı canlıların yaşam alışkanlıkları doğal olmayan biçimde değiştirilmektedir.

Çözüm Yolu Olarak Varlık ve İnsana Bakışta Temel İlkeler

İnsanın varlık seferindeki yerini doğru tespit: Çevre sorunlarının zihniyet temellerinden biri, iddia edildiği gibi insan-merkezcilik değildir; "ben-merkezcilik"tir. "Ben-merkezcilik" insana insan olduğu için değer veren yaklaşıma düşmandır. Oysa insana değer veren yaklaşım onun habitatını korur. Bu sebeple, çevre ahlakının dayandığı temellerden biri "insanın değeri" olmalıdır. Yanlış olan, bireyin değerini tanımak değil; bireyciliğin özerklik, sekülerlik ve görecilik gibi kavramlarla oluşan yorumu, özellikle de yoksulların sömürüsüne yol açacak şekilde özel mülkiyet ve girişim özgürlüğünü mutlaklaştıran, birey için toplumu nesneleştiren perspektifidir. Bireyciliğin sınırları 'doğa durumu' denen herkesin herkesle savaşı, korku ve kaygı ortamına uzanmaktadır. Aşırı liberal görüşler de bazı bireylerin temel haklarını kullanma imkânından mahrum olması pahasına, hukuku, üretim ve ekonomiden yana kullanmak istemektedir. Katı Liberalizmin toplumdan soyutlanmış ve insanların münferit yaşam sürdüğü tabii hâl kurgusuna dayanan birey anlayışının, bireyin doğa ile uyumlu ilişkileri için ne derece el verdiği düşünülmelidir. İnsanların sömürüldüğü bir vasatta, doğa da mutlaka sömürülür. Çünkü doğanın sömürülmesi, insanların sömürülmesine payanda oluşturur.

Doğa ile fıtrat farkının farkında olma: Çevre ahlakının dayanması gereken temellerden bir diğeri de doğa ile fıtrat; doğal/tabi'i olan ile fıtri olan; yaban hayatı ile sivil/medeni toplum yaşamı, yabani ile insani arasındaki ayrım olmalıdır. Aydınlanma döneminde, ilahî iradeye atıfta bulunmaksızın insanın varlığına bağlı soyut haklardan söz eden düşünürler, insanların hiçbir yasaya bağlı bulunmadığı doğa durumu ve sosyal sözleşme kavramlarına başvurmuşlardır. Bu seküler yaklaşım, hak kavramını 'olan'a indirgemiştir. Nitekim Thomas Hobbes'un (öl. 1679), temel doğa yasalarını, "herkesin her şeye, bir başkasının bedenine bile hakkı olması" ve "herkesin herkese karşı savaşı" olarak tanımlanması, doğa üzerinde bir ahlaki kaygı olmaksızın her türlü faaliyette bulunmayı, insan-dışı canlılara keyfi biçimde ilişmeyi ve zarar vermeyi haklı hâle getirmektedir.

Oysaki insan, fıtratına dönerek bilinçli ve gönüllü olarak ilahi buyruklara uygun yaşadığında, insani doğasıyla, toplumuyla ve doğayla barış içinde olacaktır. Bu nedenle ilahi mesaja uygun yaşam, aynı zamanda ekolojik bir hayat tarzıdır. Ayrıca, evrende insan dışındaki tüm varlıklar, doğal olarak ilahi iradeye teslimiyet içindedir. İnsanoğlu da bilinçli olarak aynı iradeye teslim olmalıdır. Aksi hâlde insan, kendine ve doğaya yabancılaşacaktır. Bunun sonucunda; i) İnsanın hayat tarzı, üretimine katıldığı teknolojilerle belirlenecektir. ii) Toplum, bireye nelere ihtiyaç duyması gerektiğini çeşitli yollarla telkin edecek; bireyin saygınlığını tüketim düzeyiyle ilişkilen-

direcektir. iii) Birey, modern toplumda bir değer hâlini alan tüketim döngüsünün dışına çıkamayacaktır. iv) Birey, tüketim yoluyla kimliğini ikmal etmeye çalışacak, öznelliğini yitirip nesneleşecektir. v) Egemen güçlerin doğayı sömürüsünü kanıksayacaktır.

Canlı bütün olarak [organik] evren anlayışı: Evrenin mekanik ya da organik bir bütün olarak anlaşılması, ekolojik yaklaşım açısından bir yol ayrımı gibidir. Çünkü, mekanik evren anlayışı, insanın doğayla, flora ve faunayla duygusal ilişkiler kurmasını güçleştirir. Bu durumda insanın doğadaki canlılığa karşı sevgi, şefkat, merhamet gibi duyguların temel oluşturduğu bir duyarlılık, ilgi ve itina ile yaklaşması güçleşir. Yine doğayı eskiyen veya arızalanan bir parçası sökülüp yenilenebilen bir saat gibi düşünmek ile onu bir organizma gibi düşünmek, doğaya karşı çok farklı yaklaşımları besler. Konumuz açısından bakınca, PFAS'lar gibi olumsuz etkileri olan maddelerin endüstriyel alanda yaygın kullanımı ve sentetik kimyasalların çöp olarak doğaya geri bırakılması, evrenin organik bir bütün olduğunun yeterince anlaşılmadığını göstermektedir.

Batı'da gelişen mekanik evren anlayışının aksine İslam tasavvuf felsefesinde, evren, bir organizma olarak görülmüş; tabiat insanlaştırılmıştır. Evren, "büyük insan", insan da "küçük evren" olarak nitelendirilmiştir. İnsan ve doğa, aynı hakikatin tecellileri olarak düşünülmüştür. İnsan ve doğa, aynı hakikatin farklı tecellileri olarak düşünülmüş, organik bir evren anlayışı içine yerleştirilmiştir. Örneğin Avrupa'da yaşamış Müslüman bir filozof olan İbn Tufeyl, "Hayy b. Yakzan"ın düşünme süreci üzerinden, evrendeki tüm varlıkların tek bir organizma gibi birbirine bağlı olduğu "holistik" ve tüm tabiatın ortak bir ruhunun olduğu "organik" bir evren resmeder. Kur'an-ı Kerim de insanın topraktan yaratıldığı ve ona döneceğinin vurgulanması (Tâhâ 20/55.), içinde yaşadığı evren ile insan arasında "organik bağ" olduğunu ima eder. Bu anlayış, her varlık ve oluşun doğada düzen, bio-çeşitlilik ve süreğenlik için gerekli bir işlevi yerine getirdiği bilincini yükseltir. Buna göre insanoğlu da bilinçli olarak aynı iradeye ve düzene teslim olmalıdır.

Doğaya adalet ve insafla yaklaşma: İslam'da holistik bir yaklaşımla zulm, "bir şeyi tabii konumunun dışına koymak"; varlığa varoluş amacına veya tabiatına aykırı davranmak olarak tanımlanır. Bu durumda, zulmün insan-çevre ilişkileriyle ilgili temel anlamı, varlıkların yerini, değerini bilmemek, hak ettiği gibi davranmamaktır. Bu anlamıyla zulmün yasaklanması, özelde doğadaki varlıklara kötü muameleden kaçınmayı, genel olarak da tabii düzeni korumayı gerektirir. "Zulm"ün karşıtı olarak "adil olan" da varlıklara varoluş amacına ve tabiatına uygun davranmaktır. Allah, "el-Adl" yani "mutlak adaletin kendisi"dir; kusursuz adalet sahibidir; adil olanı yapar, adil olanı meşru kılar ve emreder.

İnsanın varlığının ölümle sona erdiğini, sorumluluk duymadan ötekileri ve gelecek nesilleri düşünmeden tabiat üzerinde tasarrufta bulunabileceğini düşünmek, eşyaya tabiatına aykırı olarak kullanmaktır ki, buna tekabül eden kavram zulümdür. İslam'da bir ahlak ilkesi olarak doğadaki hiçbir varlığı tabiatına; gayesine, özelliğine, ekolojik düzendeki işlevine aykırı bir şekilde değerlendirmemek gerekir.

Doğa, geçmişten geleceğe tüm insanlığa ve canlılara bırakılmış şefkatli bir emanettir. Modern dünyada PFAS gibi kalıcı kimyasallarla çevreyi kuşatmak, aslında insanın kendi fıtratına ve evrendeki o muazzam organik bağa yabancılaşmasıdır. İslam'ın evrensel "zarar vermeme" ilkesi, bize sadece insanı değil; toprağı, suyu ve karıncayı bile gözeten bir sorumluluk yükler.

Emanet Anlayışı ve Zarar Vermeme İlkesi

İslam'da her şeyin gerçek var edicisi, mutlak sahibi (el-Melik, Mâlikü'l-mülk) ve hâkimi Allah'tır. Dolayısıyla, insan için mutlak yani kayıtsız, amaçsız ve ilkesiz bir mülkiyet hakkı söz konusu olamaz. İnsan, sahip olduğu tüm imkânların bir yed-i emîni, çeşitli haklar ve sorumlulukların emanetçisidir. Bu anlayışın sosyal hayata yansıması, özel mülkiyeti kaldırmaz ama kayıtsız bir mülkiyet anlayışıyla da bağdaşmaz. Özel mülkiyet, insanın yeryüzünde halife oluşunun bir sonucu olup mülkün asıl ve mutlak sahibi olan Allah'ın iradesine uygun olarak temellük ve tasarruf hakkından ibarettir. Bu inanç, bazı ilkeler vaz' eder:

İlk olarak, özel veya tüzel kişi, mülkiyet hakkını başkalarına ve gelecek nesillere zarar verecek şekilde kullanamaz.

Doğa, Allah'ın geçmiş, şimdiki ve gelecek bütün çağlara lütfu olup Allah'tan başka kimsenin mutlak mülkü değildir. O, yalnızca bugünkü kuşağa veya güç ve teknolojiyi elinde tutan belli bir kesime değil gelecek nesilleri de kapsayan bütün bir insanlığa sunulmuştur. Siyonizmin aksine, seçilmiş ırk fikrine yer vermeyen İslam açısından çevre, insanlığın ortak mirasıdır; şimdiki ve gelecek kuşakların hakkıdır. Dolayısıyla, PFAS'lar özelinde ifade edilirse, bunların yaygın kullanımı, bir yandan kaynakların tüketimi, diğer yandan da atıklar yoluyla doğanın kirletilmesi demektir ve gelecek nesillerin hakkına girmektir.

İkinci olarak, ihtiyacını meşru olarak karşılamanın ötesinde sömürüye başvurulamaz.

Batı kolonyalizminin doğuşundan itibaren, sömürgeciliği temellendirmek için de gelişmiş-geri kalmış, ilkel-medeni, hakikat(!)-dalalet gibi ayrımlara başvurulmuştur. Günümüzde de çevre sorunlarını Üçüncü Dünya Ülkeleri'ne ihraç etmeye çalışan Modern Batı, kendi kültürünü insanlara aşılanması gereken medeniyetin gerekleri olarak sunmaktadır. Oysa kolonyalizm ve buna temel oluşturan ayrımcılık ve ırkçılık, hem Gezegen'in ekolojik düzenine zarar vermekte hem de bizzat "insan" kavramını/idealini öldürmektedir.

Üçüncü olarak, özel veya tüzel kişi, mülkiyet hakkını ve ekonomik gücünü, ekolojik denge ve döngüye, doğadaki yaşam zenginliğine zarar verecek biçimde de kullanamaz.

İslami yaklaşımın temel özelliklerinden biri de yeryüzünü sadece insanlar için değil tüm canlılar için yaratılmış olduğunun bilincinde olmaktır: "(Allah) yeri, canlılar için koydu (yarattı)."(Rahmân 55/10.) Buna göre insan, sadece insanlık adına değil doğadaki yaşam çeşitliliğini korumak için de ekolojik düzeni gözetmelidir. Bu ilke de başka ilkeler vaz' eder.

Mu'tezilî kelamcıların Mutezile'nin "ta'vîd (acıların ahirette telafi edilmesi)" görüşüne göre de insan, diğer insanlar gibi doğadaki insan-dışı canlılara da zarar verirse bundan dolayı ahirette ceza görür. Eğer bir kimse bir diğerine acı çektirirse Allah, acı çekenin hak ettiği 'ivaz (uhrevi telafi)'ı ister mükellef olsun ister olmasın acı çektirenden alıp ona verir. Aslında, Kâdî Abdülcebbâr kültürümüzdeki "kul hakkı" kavramını, insanın yeryüzündeki diğer canlılarla ilişkisine teşmil etmekte, insan-doğa ilişkilerinde insan-dışı varlıkların haklarını da gözetmek gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca Kur'an, tekil bir olayı "ekin ve nesli mahvetmek" ifadesiyle evrensel açılımları olacak şekilde tenkit etmekte doğadaki canlılara zarar vermeyi de inanç alanındaki sapmalardan ayrı görmemektedir.

İslam'ın ortaya koydu evrensel ilkelerden biri de "zarar vermemek"tir. İslam Peygamberi'nin (s.a.v.) bu konuyla ilgili bir hadisi şöyledir:

"Kim başkasına zarar verirse Allah da ona zarar verir."
(Ebû Dâvûd, "Kadâ (Akdiye)", 31.)

Kur'an-ı Kerim de Hz. Süleyman'ın büyük bir orduyla bir vadiden geçişini anlatırken zarar vermeme ilkesinin tüm canlıları da kapsadığı, tüm canlılara merhametle yaklaşmak gerektiği konusunda dolaylı bir mesaj vermektedir:

"Nihayet karınca vadisine geldikleri zaman, bir karınca: 'Ey karıncalar! Yuvalarınıza girin; Süleyman ve ordusu farkına varmadan sizi ezmesin!' dedi."
(Neml 27/18.)

Ayette geçen "farkına varmadan" ifadesi, büyük bir ordu hâlinde de olsa müminlerin, masum insanlara zarar vermek bir yana, bilerek karıncalara dahi zarar vermeyeceklerini belirtmektedir. Kültürümüzdeki 'karıncayı bile incitmemek' deyimi, işte bu anlayışın sonucu olmalıdır. Kültürümüzde bu anlayışı yansıtan dikkat çekici örnekler de vardır. Osmanlı padişahı Kanuni Sultan Süleyman, Şeyhu'l-İslam Zembilli Ali Cemali Efendi'ye şiirsel bir dille şu soruyu yöneltmiştir:

"Dırahtı [ağacı] sarınca karınca
Vebal var mıdır karıncayı kırınca?"
Zenbilli Ali Cemali Efendi de Kanuni'nin sorusunu şiirsel bir anlatımla
"Yarın Hakk'ın huzuruna varınca

Süleyman'dan hakkın alır karınca." şeklinde yanıtlamıştır. Zembilli'nin bu cevabı, fauna veya florada bir zarara yol açmadan önce alternatif çözüm yolları aramak gerektiğine işaret etmekte; bir zorunluluk olmadıkça doğal yaşamın bir parçası olan canlılara zarar vermenin, ahirette sorumluluğu olduğunu vurgulamaktadır. Aslında doğal çevreye verilen zararın bu dünyada da cezası vardır. İnsanın kastı dışında ama tasarrufları dâhilinde çevre zarar gördüğünde bile o kimsenin bu zararı tazmin etmesi gerekir.

Yaşamı Destekleme

Yaşamı destekleme ile kastettiğimiz, servetin belli ellerde toplanması yerine sosyal adalet ilkeleriyle dağıtımı; zenginlerden insani yaşam standartlarının altında olan ailelere "sosyal hak" olarak belli bir miktarın devlet eliyle transfer edilmesidir. İslam'ın başlangıcında belli bir zenginliğe ulaşan Müslümanların vermesi gereken (vacip/farz olan) "zekât"ın devlet eliyle ve "âmil/çalışan" denen kamu görevlileri tarafından toplandığı ve yine devlet eliyle doğrudan yoksullara dağıtıldığı malumdur.

Zekâtın bu şekilde devlet eliyle toplanması ve devlet eliyle dağıtılması; dağıtılırken kamunun genel yararına harcamalar için kullanılamaması, yalnızca özel kişiler olarak yoksullara ödenmesi, onu sosyal bir hak konumuna çıkartmaktadır. Diğer yandan özel mülkiyet hakkı, iyi yaşamı yani hem konforlu hem de ahlaki yaşam tarzını destekleyen bir araçtır. Kullanımı da ancak toplumda hem konforu hem de ahlaki yaşam tarzını, aynı anda destekleyecek şekilde olabilir. Ekolojik döngü ve denge ise bugünden gelecek kuşaklara doğru hayatın temelidir; bir yarar ve özgürlük konusu olmaktan öte bir haktır. Dolayısıyla özel mülkiyet, girişim, üretim, pazarlama gibi ekonomik haklar ekolojik döngüyü ve dengeyi bozacak şekilde kullanılamaz; aksine ekolojik dengeyi destekleyecek şekilde kullanılması, "Allah'ın yaratmadaki planına saygı ve sadık kalmak" yönüyle hem Allah'ın hakkıdır hem de bu hakla temellenen "doğadaki yaşamın ve canlı bireylerin" ve "gelecek kuşakların" hakkıdır. Burada, İslam'ın haklar sistemini bir şema ile göstermek, konunun zihinde tasavvurunu daha kolay hâle getirecektir.

Hak kavramının taraflarından biri hak sahibi iken diğeri de hakka saygı göstermek veya hakkı sağlamakla yükümlü taraftır. Bu durumda tabloda yer alanları görevler yerine haklar kavramıyla da ifade etmek mümkündür.

Bütün hakların, aynı anda Allah'ın hakları sayılması ve insanın bunlara saygı göstermekle Allah'ın huzurunda da sorumlu oluşu, bunlara riayet konusunda vicdani bir güvence, bir otokontrol mekanizması oluşturur.

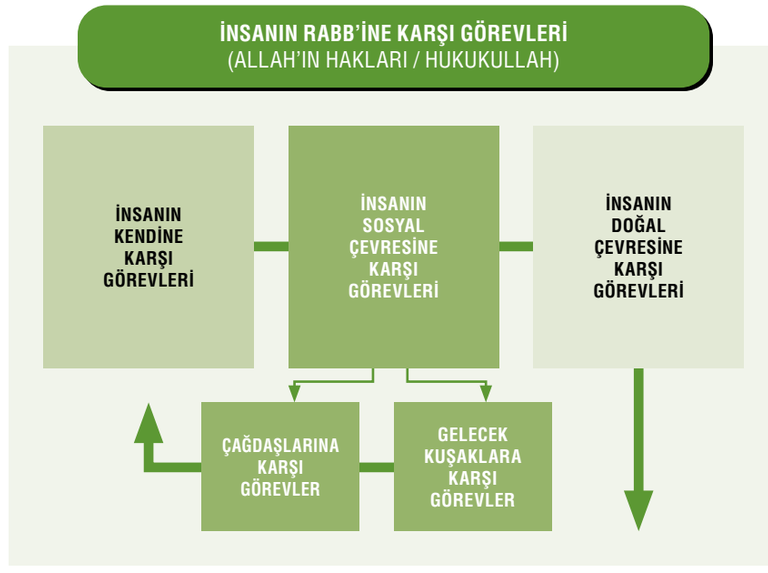
İslam, külli-kuşatıcı bir ahlak düzeni sunmaktadır. Hadis kitaplarına bakıldığında, İslam'da ahkâmın ve ahlakın insan-doğa ilişkilerini dışarıda tutmadığı görülür. Hz. Peygamberin, hayvanların dilinden anladığı, onların acı ve sorunları için insanları uyardığı rivayet edilir. Dolayısıyla İslam ahlakını, her yönüyle ortaya koyabilmek için dört ayrı kategoride incelemek gerekir: 1) İnsanın Allah ile ilişkisi, 2) İnsanın kendi benliğiyle ilişkisi, 3) İnsanın diğer insanlar ile ilişkisi ve 4) İnsanın çevreyle ilişkisi.

Çevre konusundaki sekülerist etikler, insan ürünü olunca, insanların içinden geçtiği koşullara ve sorunlara göre belirledikleri amaç yönünde bu etik kurallarını değiştirebilecekleri de açıktır. Bu etik sistemlerde ortaya konan koşulsuz buyruklar ve maksimler, belli sonuçları ortaya çıkarmaya veya belli sonuçlardan kaçınmak maksadıyla etikçi tarafından konulmuştur. Dolayısıyla göreli ve araçsal özelliktedir. Bu yüzden, sekülerist çevre etikçilerinin ortaya koyduğu kurallar, beklenen sonuçları gerçekleştirmeyeceği açıklık kazandığında önemini büsbütün yitirecektir. Onlar, tüm temellendirme gayretlerine karşın pratik aklın sağgörüsel icatlarıdır. Doğal olarak insan (zihni) merkezdedir. Oysa, teistik inanç gerek ilahi iradeye bağlı gerekse ilahî irade tarafından gözetilen evrensel ahlaki ilkelerin varlığını gerektirir. Yani mutlak varlık varsa, evrensel ahlaki değerler ve ilkeler de vardır. Bu nedenle teistik ahlak, insan davranışlarını yönlendirmede daha belirleyicidir. Çünkü Allah'a inanan kimse onun buyruklarının tartışmasız iyi ve doğru olduğunu kabul eder. Teist ahlak, doğadaki diğer varlıklara ait haklara da yer verdiğinde, inananlar açısından onların ahlakın nesnesi olduğu ve insanların onlara karşı tek taraflı sorumluluğu bulunduğu, tartışma götürmez ve bağlayıcı bir hakikat olmaktadır.

Nitekim Kur'an'da Allah'ın mülkü dilediğine verdiği ve dilediğinden aldığı vurgulanır. Sûra üflendiği an, insan için mülkiyet kavramının kalkacağına ve insanın emanetçiliğinin sona ereceğine ve mülkün gerçek sahibinin insanı sorgulayacağına işaret edilir.

İsraf Etmeme

İsraf, ihtiyacın gerektirdiğinden fazla tüketme olarak tanımlanabilir. Ancak ihtiyaç olmadan üretmek de aynı anlam çerçevesine oturmaktadır. Kaynaklar ve ihtiyaçların sınırlı ama insan hırsının sınırsız olduğu bir dünyada temel sorunlardan biri "israf", bir diğeri de her şeyi sömürmeye ve israf etmeye hazır olan "biriktirme hırsı"dır. Günümüzde gerek uluslararası düzeyde gerekse ulusal ve yerel ölçekte insanlığın pek



Şekil 1. İnsanın görevlerine ilişkin şematik gösterim

çok sorununun temelinde bu iki olgu yatmaktadır.

İnsanın, ilahi mesajdan uzaklaşması, onun gerek kendine gerekse dünyasına karşı yabancılaşmasına yol açmıştır. Bu süreçte hayatın anlamını ve varoluş gayesini yitiren, kişiliği parçalı bir hâl alan çağdaş insanın hayat felsefesi, "çok üret, çok tüket" sloganı olmuştur. 'İnsanlar akıllarını ve sevme yetilerini geliştirmeyi ana hedef olmaktan çıkarmış, kendilerini kendi yaptıkları ekonomi makinesinin çarkları arasına bir araç olarak atmışlardır. Artık insan kendi mutluluğu ya da ruhunun serpilip büyümesi için değil yalnızca verim ve başarı için çabalar olmuştur. 'Artık, hayatın, insanın ve kendini gerçekleştirmenin anlamı değişmiştir. İyi yaşam; kişinin I) farklılıklarıyla en çok ilgi topladığı, II) daha fazlasına sahip olduğu, en çok kârı elde ettiği, III) dolayısıyla tüketimden azami payı aldığı yaşam olarak tanımlanmaya başlamıştır.

Çağdaş ekonomik düzende üretim, artık bireylerin insana yaraşır bir hayat sürmeleri için gerekli ihtiyaçlarını karşılamak yerine, gösteriş (lüks) temelli harcama isteğini, kaynak israfı, ekosistemdeki dengenin bozulması ve çevre kirlenmesi gibi sonuçlar doğuracak şekilde tatmin gayesine yönelmiştir. "En az maliyetle en çok kâr"ı ilke edinen kapitalizm ve sanayi toplumunun insanı doğasından koparak yabancılaştırması doğanın acımasızca tahribini beraberinde getirmiştir.

Yukarıda vurgulandığı üzere, modern dünyada insanların tüketim alışkanlığı da bu durumun artarak sürmesini sağlamaktadır. Bu nedenlerle günümüzde hem genişleyen hem de hızlanan üretim ve tüketim döngüsü, doğadaki "geri dönüştürme (yenileme) kapasitesi"ni aşan bir boyuta varmıştır. Yerküredeki doğal kaynakların tüketilmesinin "göz ardı edilen bir sonucu" olarak, hayatı bu kaynaklara bağlı olan canlı türleri de yok olmaktadır.

Kaynaklar zararı hesaplanmadan israf edilmekte, bunun sonucunda fosil yakıtları azalmakta; atığa dönüşen maddeler çevreyi kirletmekte ve çevre kirliliği, insan sağlığı için yakın bir tehdit hâline gelmektedir. Diğer taraftan çöplerin toplanması, imha edilmesi veya geri dönüştürülmesi büyük mali harcamalar gerektirmektedir. Eğer dünyanın her yerinde gelişmiş Batı toplumlarındaki gibi bir tüketim alışkanlığı ve buna bağlı olarak atık ve çöp üretimi olsaydı, dünya çoktan yaşanmaz hâle

Dünyayı kapitalist bir hırsla "çok üret, çok tüket" sarmalına sokmak, doğanın yenilenme kapasitesini aşan küresel bir israftır. Oysa çevre, geçmişten geleceğe tüm insanlığın ortak mirasıdır. Kul hakkından hayvan haklarına uzanan bu kuşatıcı ahlak düzeninde, ekolojik dengeyi korumak hem Allah'ın hakkı hem de gelecek nesillerin hukukudur.

gelirdi. Bu nedenle çevre temizliğine, kamu sağlığına ve ekonomik sürdürülebilirliğe tehdit oluşturan savurganlığın yasaklanması da çevre temizliği, açısından önemli bir tedbirdir. Nitekim, İslam açısından, Allah'ın belirlediği işlevleri doğal olarak yerine getiren ve Allah'ı tesbih eden varlıkları insanların bir ihtiyaç olmaksızın veya amacı dışında kullanması ve israf etmesi yaratılış gayesine aykırıdır. Nitekim Kur'an, gösteriş için harcama yapan ve tüketimle övünen kimseleri kötülemekte; gereksiz yere saçıp savurmaktan nehyetmektedir (Beled 90/20; A'râf 7/31.).

İslam Peygamberi'nin yeşil alanların ve ormanların çok az bulunduğu bir bölgede gönderilmiş olmasının bir hikmeti de onun (s.a.v.) yeşilliğe ve bitki örtüsüne daha fazla değer vermesi olmalıdır. İslam Peygamberi, çevrede yolcuların ve hayvanların gölgesinden istifade ettikleri bir sidre ağacını, o ağaçta herhangi bir hak sahibi olmayan bir kimsenin kesmesinin günah olduğunu belirtmiştir. Bu da demektir ki, günümüzde çevre ve ekolojik sistemi tahrip etmek, insan sağlığına hatta yaşamına yönelik ciddi boyutta tehlikelere ve zararlara yol açtığı için (zararın büyüklüğü oranında) günahtır.

Dünyadaki nüfus artışı, çevrecilerin ve çevre bilimcilerin bir sorun olarak önem verdikleri bir konudur. "Nüfus fazlalılığı"nın sefalet ve doğa yıkımının nedeni olduğu iddiası, gelişmiş ülkeler tarafından yedekte tutulan sinsi bir mazerettir. Bununla birlikte mistik bir New Age Malthusçuluğu kılığında derin ekolojide geniş bir inananlar kitlesine sahip olmuştur. Onlar, fazla nüfusu Üçüncü Dünya'nın tüm dünya kaynaklarını tehdit eden bir hatası olarak açıklama eğilimindedirler. Çevre sorunlarına ilişkin yakın zamanlarda oluşan alanyazında, bu sorunların önemli bir nedeni/kaynağı olarak nüfuz fazlalığı ve hızlı nüfus artışı gösterilir. Çevre sorunlarının nedenlerine ilişkin incelemelerde, çok kez doğadaki kaynakların sınırlı olması, insan nüfusunun fazlalığı önemli bir problem olarak dile getirilmektedir. İnsan nüfusundaki hızlı artışın da yakın gelecekte, başta kıtlık olmak üzere bir dizi çevre sorununu içinden çıkılamaz hâle getireceği vurgulanmaktadır. Bu yaklaşımla da tüketim ile nüfus arasında doğrudan ve katı bir sebeplilik ilişkisi ortaya konmakta; gerek nüfuz fazlalığında ve gerekse nüfusun geometrik/katlanarak artışından da elbette Batı ülkeleri dışındakiler sorumlu tutulur. Ancak, doğruluğu aşikâr görünen her iddianın farklı perspektiflerden incelenmesi ve sorgulanması gerekir. Nitekim, tüketimin en çok olduğu yerler nüfusun fazla olduğu 3. Dünya ülkeleri değildir. Aksine, geçmişte kolonyalizme imza atan, hâlen de sömürüyü, farklı biçimlerde sürdüren ABD ve AB ülkeleridir. Çünkü, bu ülkelerdeki zenginlik ve aşırı tüketimin temel kaynağı, kolonyalizmdir. Günümüzün aktüel kolonyalizmine pek çok örnek verilebilir. ABD'nin, ülke sınırları dışında, Temmuz 2024 itibarıyla en az 128 askeri üssünün bulunması da sömürgeciliğin askeri güçle ne denli tahkim edildiğinin indekssel göstergesidir.

Aşırı tüketimin sorumlularını gösteren diğer bir kanıt da "çöp ihracı" olgusudur. Yerkürede başka ülkeleri sömüren, tüketimi ihtiyaç değil gösteriş/lüks olgusu hâline getiren, bilinçsiz/aşırı tüketiminin atıklarını da başka ülke topraklarına, -az bir para ödeyerek- ihraç etmeleri, o başka ülke yöneticilerinin de –bireysel çıkarı uğruna- bu çöpleri kabul etmeleri, uluslararası hukuka aykırı bir cürümdür.

Anlaşılmaktadır ki, çevre kirliliğinin gerçek suçluları, çevre sorunlarından en çok zarar gören, yaşadıkları toprakları sömürülen ve başka ülkelerin zehirli atıkları ile doldurulan yoksul ülkelerin insanları değildir. Çünkü, İngiltere ve ABD gibi ülkelerde yaşayan biri, Üçüncü Dünya'da yaşayan bir kişinin kırk katına kadar, enerji, katı yakıt, FPAS'ların kullanıldığı endüstriyel ürünler tüketmektedir. Burada, kanaatimizce, "rakamsal nüfus" ile "etkisel nüfus" ayrımını yapmak gerekir. "Rakamsal nüfus" Üçüncü Dünya'da yüksek olabilir ancak gelişmiş ülkelerin "etkisel nüfusu" Üçüncü Dünya Ülkeleri'nin nüfusundan aşırı derecede yüksektir. Yani doğadaki kaynakların tüketiminden ve çevreyi kirletmekten birinci derecede sorumlu olan taraf, nüfusun ve nüfus artışının az olduğu ülkelerdir. O hâlde denebilir ki gelişmiş ülkelerin doğadaki düzen ve kaynaklar üzerindeki nüfus etkisi, ters orantılı biçimde diğer ülkelerin nüfus sayısını katlamaktadır. Bunun en somut örneği, nüfusları aynı kalan ya da düşmekte olan ülkelerde tüketiminin gitgide artmasıdır. Bu bağlamda sorun sadece endüstriyel alanda PFAS'ların kullanımı da değil tüketiminin de katlanmasıdır.

> Küresel çevre kirliliğinin temel kaynağı gelişmekte olan ülkelerin "rakamsal nüfusu" değil, gelişmiş merkezlerin sömürgeci karakterli "etkisel nüfusu" ve lüks odaklı tüketim modelidir. Endüstriyel tüketim atıklarının ve kalıcı PFAS bileşenlerinin yoksul coğrafyalara ihraç edilmesi, uluslararası etik ve hukuki normları ihlal eden sistematik bir cürümdür.

Kirletmeme

Günümüzde öne çıkan holistik yaklaşım, ekosistemlerin canlı ve cansız varlıklar yanında bunların karşılıklı etkileşimler ağıyla oluştuğunu ve evrildiğini göstermektedir. Bu sebeple, üretim ve tüketim süreçlerinde ihtiyaç tanımlamasının çok iyi yapılması, atık ve çevre kirlenmesi sorununun çözümü için başta doğru planlamalar yapılması son derece önemlidir. Örneğin yaygın biçimde kullanılan Per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS'lar) ihtiyaç ve zorunluluk mefhumuna göre kullanılması/sınırlanması gerekmektedir. Çünkü üretim ile tüketim bir madalyonun iki yüzü gibidir. Üretim aynı zamanda doğadaki kaynakları tüketmek demektir; doğal maddeleri endüstriyel atıklara dönüştürmek demektir. Bunların doğaya geri dönüşü, toprağın, havanın ve suyun kirlenmesine yol açmaktadır. Holistik açıdan bakıldığında, bu durumun geri dönülmez bir süreç olarak hem insan-dışı canlılar hem de gelecek kuşaklar için büyük zararları olacağı öngörülebilir.

Oysa, yukarıda açıklandığı üzere, kapitalist üretim tarzı, bir yandan kitleleri çok tüketime ve israfa teşvik ederken diğer yandan atık madde sorununu doğurmaktadır. Birleşmiş Milletler raporuna göre, 2022 yılında dünya genelinde üretilen gıdanın yüzde 19'u çöpe gitmiştir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), yaklaşık 783 milyon insan açlıkla mücadele ederken, 2022'de dünya genelinde bir günde 1 milyardan fazla öğünün israf edildiğini

bildirmektedir. Gıda israfı, küresel gıda sistemini etkileyen kritik bir konu olmaktadır. Her yıl üretilen gıdanın yaklaşık üçte biri (yaklaşık 1,3 milyar metrik ton) kaybolmakta veya israf edilmektedir. Atık madde sorununun büyümesi, atık maddeleri cüz'i bir ödeme karşılığı başka ülkelere depolama olgusunu karşımıza çıkarmaktadır. Esefle söyleyelim ki, ülkemizde de paraya aşırı tamah eden ve doğayı kirleten, toprağı ve su kaynaklarını zehirleyen çöpleri para karşılığında ülkemize gizlice getirerek bir yerlere boşaltan, irfan yoksulu ucuz kimseler vardır. Bunlar, sadece başkalarının haklarını değil gelecek kuşakların haklarını da ihlal etmektedirler.

Çevre temizliğinin İslam'ın temizlik anlayışında önemli yeri vardır. İslam'da hem manevi temizlik hem de maddi temizlik -kendi başına bir gereklilik olarak ve manevi temizlik için bir basamak olarak- emredilmiştir. Ayrıca, namaz kılınacak yerin temiz olması gerekir. Nitekim yeryüzü bir "mescit"; su bulunmadığı zaman toprak, "tahûr (temiz ve temizleyici)" kılınmıştır (Müslim, "Mesâcid", 4, 5.). Buradan yeryüzünü temiz tutmak ve çevre temizliğine özen göstermek gerektiği sonucuna ulaşılır. Nitekim Hz. Muhammed, insanların ihtiyaçları için kullanacağı durgun suları, işlek yolları, halkın dinlenmek ve temiz hava için oturduğu gölgelikleri kirletmekten sakındırmıştır.

Çevre temizliğinin diğer bir gereği de atık maddeleri çevreye zarar vermeyecek şekilde özel yerlerde toplamak; çevreye zararı olan şeyleri kaldırmaktır. İslam Peygamberi de bu gibi davranışları imanın tezahürlerinden biri ve bir sadaka türü olarak niteler. Onun bu konudaki uyarıları Müslümanları duyarlı davranmaya teşvik eder: "İman, yetmiş küsur -bir rivayette de altmış küsur- şubedir. [….] En basit düzeyi, yoldaki rahatsız edici şeyleri temizlemektir." (Buhârî, Îmân 3; Müslim, Îmân 58. Bk. Ebû Dâvûd, "Tahâret", 14.) Burada çevreden zararlı unsurları kaldırmanın imanın tezahürlerinden biri olarak sunulması dikkat çekicidir. Bu davranış, Hz. Peygamberin ifadesiyle, bir "sadaka"dır (Buhârî, "Cihâd", 128.). Bu inanç, sahillerde olsun mesire alanlarında olsun, halkımızın, PFAS'ların kullanıldığı ürün ve ambalajları atarak kamu sağlığına zarar vermek bir yana, çevreyi korumasını ve başkalarının olumsuz tutumlarına kayıtsız kalmamasını gerektirmektedir.

Sonuç

Çevre sorunlarının teknik açıdan çok farklı nedenlerinden söz edilmekle birlikte, temelde bir zihniyet problemi olarak fazla kâr amacı, çok üretme, çok tüketme ve israf olgularına bağlanabilir. Modern çağda kapitalist üretim ve pazarlama anlayışı, bu açıdan belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu üretim tarzının temel ilkeleri, ekonomik olarak hızlı büyümek, bunun için az maliyetle çok üretmek, üretilen maddelere karşı kitlelerde ihtiyaç algısı oluşturmak, kârı daha fazla üretmek için kullanarak mali büyümeye devam ve ivme kazandırmaktır. Günümüzde zorunlu bir ihtiyaç maddesi olmayan, sağlığa etkisi tartışmalı ve doğaya verdiği zarar aşikâr ürünlerin ihtiyaca göre değil talep oluşturabilme becerisine göre üretildiği görülmektedir. Çok üretme, çok tüketme ve israf olgusunun önemli bir göstergesi de "Per- ve polifloroalkil maddeler"in (PFAS'lar) yaygın kullanımıdır. Bu durum karşısında, gerek bireylerin bilinçlenmeleri ve tüketimi zorunlu olanla sınırlandırmaları gerekse hükümetlerin bunların üretilmesi ve ithaline karşı cebrî önlemler alması gerekmektedir.

Per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS'lar) yaygın kullanımı, uzun süre korunumu, canlı bünyelerde biyolojik olarak birikilebilirliği, toksit etkileri nedeniyle, ekolojik denge açısından önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bazı çalışmalarda da bunlar yerine alternatif maddelerin kullanımı önerilmektedir. Ancak, en önemli çözüm, insanların "ihtiyaç" kavramı konusunda bilinçlendirilmeleri, tüketimi teşvik eden pazarlama stratejilerine karşı korunmaları ve üretimin sınırlanmasıdır. Başta ABD ve Trump yönetimi olmak üzere Batı ülkelerinin, kendi vatandaşlarının tüketim alışkanlığını sürdürebilmesi için başka ülkeleri kolonileri hâline getirme çabası, aşırı tüketimin/israfın sürdürülebilir olmadığını göstermektedir.

İslam, insanoğlunu sahip olduğu tüm imkân ve nimetlerin, varlık ve değerlerin mutlak sahibi değil emanetçisi olarak görür. Bu anlayış, insanın çevreyle ilişkinlerini bilinç düzeyine çıkarmasını; sahip olduğu akıl, vicdan ile diğer yeteneklerin ve çeşitli imkânların hakkı verilmesi gereken emanet olarak görmesini; doğadaki etkinliklerinin sorumluluk üzerine kurulu olmasını gerektirir. Üretim alanında pek çok değişkeni hesaba katmasını, ekolojik düzeni; gelecek kuşakların ve insandışı canlıların haklarını gözetmesini; ihtiyacını da doğaya zarar vermeden karşılamasını, ihtiyaç olmadan tüketmemesini, atıkları mümkün olduğunca değerlendirmesini gerektirir. Çünkü doğadan alınan her şeyin bir bedeli vardır. Kısaca birey, yeryüzünü istediği gibi tasarrufta bulunabileceği bir mülk olarak görmemelidir. Kâinattaki toprak, su, hava gibi tüm canlıların hakkı bulunan varlıklardan diğer insanları ya da insandışı canlıları mahrum etmemelidir. "Kul hakkı" kavramını çevreye karşı duyarlı olmayı sağlayan bir anlayış düzeyine oturtmalıdır. Ayrıca, doğa, fıtrat, bilgelik, maneviyat ve ahlakı anahtar kavramlar olarak alıp modern yaşam tarzı üzerinde yeniden düşünmelidir.

Kaynaklar

Akbaba, Gülgün, ve Çağlar Sunay. "Nüfus Artışı ve Açlık." Bilim ve Teknik, Mart 1999, 98-101. https://e-dergi.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf?dergiKodu=4&cilt=32&sayi=376&sayfa=98&yaziid=11374.

al-Sayyid, Rıdwân. "Contemporary Muslim Thought and Human Rights." Islamochristiana 21 (1995).

Ardoğan, Recep. "Tüketim, Nüfus ve Çevre Sorunları: Orantısız Denklem." Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi 1, no. 4 (2012): 81-106.

Ardoğan, Recep. Varlık Anlayışından Ahlâkî Temellere: İslam'da Ekoloji. İstanbul: KLM Yayınları, 2022.

Ata, Sezgin. "Sürdürülebilir Bir Barbarlığa Doğru mu Özgürlükçü Bir Topluma Doğru mu?" Özgür Üniversite Forumu, sayı 19 (Sürdürülebilemez Kalkınma), XIX (2002): 37.

el-İsfahânî, Râgıb. el-Mufradât fî Garîbi'l-Kur'ân. İstanbul: Kahraman Yayınları, 1986.

el-Kelâbâzî, Ebû Bekr Muhammed. et-Ta 'arruf li-Mezhebi Ehli't-Tasavvuf. Dımeşk: Dâru'l-İmân, 1986.

Görmez, Kemal. Türkiye'de Çevre Politikaları. Gazi Büro Yayınları, Ankara, 1991.

Güleç, Cengiz. "Çevre ve Ruh Sağlığı." Çevre Üzerine. Ankara: Türkiye Çevre Sorunları Vakfı Yayını, 1991.

Hobbes, Thomas. Leviathan. Çeviren Semih Lim, İstanbul: Yapı Kredi Yayınları, 1993.

İbn Tufeyl. Ruhun Uyanışı ya da Hayy b. Yakzan'ın Olağanüstü Serüveni. Çeviren N. Ahmet Özalp. İstanbul: İnsan Yayınları, 1985.

Paine, Thomas. İnsan Hakları. Çeviren M. Osman Dostel. İstanbul, 1988.

Soljenitsin, Aleksandr. "Tanrı'yı Politikaya Geri Getirin." Çeviren Özden Arıkan. NPQ, Eylül 1996. İstanbul, 1996.

Şeriati, Ali. Medeniyet ve Modernizm. Çeviren Ahmet Yüksekoğlu. 5. bs. İstanbul: Bir Yayıncılık, 1985.

Yurtsever, Meral. "Çevredeki Per ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: Tarihçesi, Kaynakları, Analizi, Riskleri ve İlgili Düzenlemeler." Recep Tayyip Erdoğan University Journal of Science and Engineering 6, no. 1 (2025): 403-427.

Yurtsever, Meral. "Per- ve Polifloroalkil Maddelerin (Sonsuz Kimyasalların) Çevredeki Kalıcılığı, Yayılımı, Birikimi ve Sağlığa Etkileri." Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 14, no. 1 (Ocak 2025): 412-423.

PFAS ve immün sistem: immünotoksisite mekanizmaları, aşıya cevapsızlık ve enfeksiyonlara yatkınlık

Prof. Dr. Recep Öztürk

1962 yılında Rize İkizdere'de doğdu. Tulumpınar Köyü Mehmet Akif İlkokulu, İkizdere Ortaokulu, Rize Lisesini bitirdi. İstanbul Üniversitesi (İ.Ü.) Cerrahpaşa Tıp Fakültesinden 1984 yılında mezun oldu. Enfeksiyon hastalıkları ve klinik mikrobiyoloji uzmanlığını İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde yaptı. 1994'te doçent, 2000'de profesör oldu. İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Öğretim Üyeliğinden 2016'da emekli oldu. 2009-2013'te Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Üyeliği, 2011-2015'te Tıpta Uzmanlık Kurulu (TUK) üyeliği ve başkan vekilliği yaptı. Sağlık Bakanlığı Ulusal Enfeksiyon Önleme ve Kontrol Kurulu ile Bağışıklama Danışma Kurulu, Grip Bilim Kurulu ve Koronavirüs Bilim Kurulu üyesidir. Öncelikli uğraş alanları hastane enfeksiyonları, enfeksiyöz ishaller, enfeksiyon hastalıkları laboratuvar tanısı ile yükseköğretimde kalite ve akreditasyondur. Dr. Öztürk, hâlen İstanbul Medipol Üniversitesi Rektör Yardımcısı, Üniversite Kalite Koordinatörü, Tıp Fakültesi Enfeksiyon Hastalıkları ve Klinik Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalı Başkanıdır.

Modern endüstrinin yarım yüzyılı aşkın süredir çevreye bıraktığı per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), bugün yalnızca bir çevre kirliliği sorunu olmanın çok ötesine geçerek insan bağışıklık sisteminin temel işlevlerini tehdit eden bir halk sağlığı meselesine dönüşmüştür. Son 10 yılda biriken epidemiyolojik ve mekanistik veriler, bu "sonsuz kimyasallar"ın özellikle gelişmekte olan çocuk immün sisteminde aşı cevabını baskılayabildiğini, enfeksiyöz hastalıklara yatkınlığı artırabildiğini ve doğal bağışıklık mekanizmalarını bozabildiğini tutarlı biçimde ortaya koymaktadır. Bu yazıda, "sonsuz kimyasallar"ın (PFAS) bağışıklık sistemimizde açtığı gedikleri ve bunun halk sağlığına yansımalarını güncel bilimsel veriler ışığında ele alacağız. Bu kapsamda, PFAS'ların immünotoksik etkileri, aşıya antikor cevabının baskılanması, bu baskılanmanın altında yatan immünolojik mekanizmalar, enfeksiyöz hastalıklara klinik yatkınlık ve SARS-CoV-2 bağlamındaki güncel bulgular olmak üzere değerlendirme yapılacak; mevcut kanıt tabanının gücü, sınırlılıkları ve klinik yansımaları eleştirel bir perspektifle tartışılacaktır.

PFAS Nedir? Kimyasal Yapı ve Çevresel Kalıcılık

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), flor-karbon (C-F) bağı içeren 4.700 ila 14.000'den fazla sentetik kimyasalı kapsayan geniş bir ailedir. Bu bağ, doğanın oluşturduğu en güçlü kimyasal bağlardan biri olup PFAS'ların ısı, asit, baz ve biyolojik parçalanmaya karşı yüksek düzeyde direnç göstermesine yol açar. Bu nedenle bilim insanları bu maddelere "forever chemicals" (sonsuz kimyasallar) ya da "kalıcı-mobil organik bileşikler" adını vermektedir. Yapısal olarak iki ana alt gruba ayrılırlar: uzun zincirli (≥7 C, örn. PFOA, PFOS) ve kısa zincirli (<6 C, örn. PFBS, GenX) bileşikler. Uzun zincirli PFAS'lar biyobirikimde daha belirginken, kısa zincirli olanların toksik profili henüz tam aydınlatılmamıştır (1, 2).

1940'lardan bu yana büyük ölçekli endüstriyel üretim sürecindeki PFAS'lar; yapışmaz kaplama (Teflon), leke tutmaz tekstil ve halı, gıda ambalajı, yangın söndürme köpükleri (AFFF), kozmetik, boya, medikal cihazlar ve yarı iletken üretiminde kullanılmaktadır. Üretim ve kullanım sonucu çevreye yayılan bu maddeler; toprak, su ve havada birikerek besin zincirine girmekte, bitkilerden balıklara, oradan insana uzanan bir biyolojik büyültme (biyomagnifikasyon) zinciri oluşturmaktadır. Balıklarda çevre suyuna kıyasla 100-1.000 kat daha yüksek PFAS konsantrasyonları saptanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 200 milyondan fazla kişinin içme suyunun PFAS ile kontamine olduğu hesaplanmakta; CDC'nin ulusal biyoizleme çalışmalarında nüfusun yüzde 97'si üzerinde PFAS varlığı bildirilmektedir (1, 2).

İnsan ve Hayvan Sağlığı Üzerindeki Genel Toksik Etkiler

Epidemiyolojik ve deneysel çalışmalar PFAS'ların karaciğer hasarı, tiroid fonksiyon bozukluğu, lipid ve insülin disregülasyonu, böbrek hastalığı, üreme ve gelişimsel toksisite ile kanser ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Uzun zincirli PFAS'ların insanda serumda kısmen yıllarca kalabildiği bilinmektedir; örneğin PFOS'un insan serumundaki yarı ömrü 3,4-5 yıl, PFHxS için ise 5,3-8,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu uzun biyolojik yarı ömür, kronik düşük doz maruziyetin bile birikmeli bir toksisite oluşturabileceğini göstermektedir. Kolesterol yükselmesi PFAS maruziyetinin en tutarlı metabolik

bulgusu olup LDL kolesterol artışı, serum PFAS düzeyleriyle güçlü dozla bağımlı ilişki göstermektedir (2, 3).

Çevre ve Yaban Hayatı Üzerindeki Etkiler

PFAS kirliliği dünya genelinde 600'den fazla yabani hayvan türünde belgelenmiştir; kutup ayılarından şahin gagalı deniz (hawskbill) kaplumbağalarına, balina ve kutup deniz kuşlarına kadar coğrafi olarak uzak bölgeler de dâhil olmak üzere neredeyse her ekosisteme yayılmıştır. Yaban hayatında gözlemlenen etkiler; bağışıklık baskılanması, karaciğer hasarı, üreme başarısızlığı, endokrin sistem bozuklukları, bağırsak mikrobiyom değişiklikleri ve nörotoksisite olarak özetlenebilir. Alligatorlarda yüksek serum PFAS düzeyleri yara iyileşmesinin bozulmasıyla ve artan enfeksiyon sıklığıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bulgu, PFAS immünotoksisitesinin tür sınırını aştığını ve ekolojik düzeyde biyoizleme çalışmaları gerektirdiğini vurgulamaktadır (1, 3).

Tek Sağlık Perspektifi

PFAS maruziyetine bağlı immünotoksik etkilerin yalnızca insanlarda değil; kutup ayıları, şahin gagalı deniz kaplumbağaları ve farklı trofik düzeylerdeki pek çok yabanıl türde benzer bağışıklık bozuklukları ile seyretmesi, bu kimyasalların tipik bir "Tek Sağlık (One Health)" sorunu olduğunu açıkça göstermektedir. Aynı moleküler hedeflerin (innate immün hücreler, sitokin ağları, endokrin–immün eksen) insan, hayvan ve ekosistem sağlığında paralel olarak etkilenmesi, PFAS düzenlemelerinin yalnızca klinik tıbbın değil veteriner hekimlik, çevre sağlığı ve ekoloji disiplinlerinin ortak gündemi olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bakış açısı, PFAS kirliliğinin kontrolü için alınacak önlemlerin hem enfeksiyon hastalıkları yükünü azaltma hem de biyolojik çeşitliliği koruma potansiyeli taşıdığını vurgular (2, 3).

PFAS İmmünotoksisitesi ve Klinik Önemi

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), bugüne kadar tanımlanan çevresel kimyasallar arasında insan immün sistemi üzerindeki etkileri en tutarlı biçimde belgelenenler arasında yer almaktadır. Birden fazla büyük düzenleyici kurum — Ulusal Bilimler, Mühendislik ve Tıp Akademileri (NASEM 2022), Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), Ulusal Toksikoloji Programı (NTP) — aşıya azalmış antikor cevabını PFAS maruziyetinin en güçlü ve en tutarlı insan sağlığı etkisi olarak nitelendirmiştir. Bu etki, bilhassa bebek ve çocukluk dönemlerinde saptanmış; koruyucu antikor eşiklerinin altına düşme biçiminde klinik anlam kazanmıştır. Ancak mevcut kanıtlar yalnızca antikor baskılanması ile sınırlı değildir; enfeksiyon sıklığı, solunum yolu hastalıkları ve SARS-CoV-2'ye hücresel immün cevap üzerine de giderek büyüyen bir epidemiyolojik ve mekanistik literatür birikimi söz konusudur (4, 5).

Bu veriler, PFAS'ın aşı cevabını baskılamasını tek bir mekanizma yerine çoklu düzeylerde eş zamanlı hasar üzerinden açıklayan bir test etki yolağı (Adverse Outcome Pathway-AOP) çerçevesinde bütünleştirilebilir: (1) aşıya antikor cevabının baskılanması, (2) bu baskılanmanın altında yatan immünolojik mekanizmalar, (3) enfeksiyöz hastalıklara klinik yatkınlık ve epidemiyoloji, (4) SARS-CoV-2 ve güncel virüsler bağlamında PFAS immünotoksisitesi.

Aşıya Antikor Cevabının Baskılanması

Faroe Adaları Kohort Çalışmaları: Temel Epidemiyolojik Kanıtlar

PFAS-aşı cevabı ilişkisine ilişkin kanıt tabanının büyük bölümü, Grandjean ve ark. tarafından Faroe Adaları doğum kohort çalışmalarından kaynaklanmaktadır (6). Bu çalışma serisinde anne kanı ve erken çocukluk serumundaki PFAS düzeyleri belirlenerek çocuklara uygulanan standart aşılara (difteri, tetanoz, kızamık, hepatit) verilen antikorları takip edilmiştir. Temel bulgular şöyledir (6, 7):

- Gebelikte PFOS maruziyetinin iki katına çıkması, 5 yaşındaki çocuklarda difteri antikor konsantrasyonunda yüzde 24 azalma ile ilişkilendirilmiştir.
- 5 yaşındaki PFOA, PFOS, PFHxS, PFNA ve PFDA maruziyetleri, 7 yaşında hem tetanoz hem de difteri antikor konsantrasyonlarıyla ters yönde ilişki göstermiştir.
- Bu ilişki 13 yaşında da devam etmiştir; PFOA, 7 yaşından 13 yaşına kadar difteri antikor konsantrasyonunda her PFAS ikiye katlandığında yaklaşık yüzde 25 azalma ile ilişkilendirilmiştir.
- Daha da endişe verici olanı, etkilenen çocukların bir bölümünde antikor titreleri standart aşılama şemasına rağmen koruyucu eşiğin altına gerilemiştir. Bu durum, bağışıklamanın klinik düzeyde başarısızlığa uğradığı anlamına gelmektedir.
- Daha sonra gerçekleştirilen üçüncü kuşak Faroe Adaları Çalışmasında, 28 yaşında yapılan difteri ve tetanoz aşılamasından 6 ay sonra ölçülen antikor cevapları ile gebelik, 7, 14, 22 ve 28 yaşlarındaki PFAS maruziyetleri değerlendirilmiş; özellikle Hepatit A ve B antikorlarında PFOA ile ters yönlü eğilimler gözlemlenmiş, erken yaşam PFAS maruziyetinin etkilerinin yetişkinliğe uzanabileceği sonucuna varılmıştır.

Meta-Analiz Kanıtları: Sistematik Sentez

Systematic Reviews (2024) dergisinde yayımlanan bir sistematik derleme ve meta-analizde, 17 çalışma (çoğunlukla doğum kohort çalışmaları) incelenmiştir (4). Meta-analiz sonuçlarına göre:

- Gebelik döneminde PFOS maruziyeti difteri antikor titrelerinde her iki katına çıkmada yüzde 24,3 azalma (%95 CI: −39,2 ile −9,4) ile ilişkilendirilmiştir.
- Çocukluk çağında PFOA maruziyeti tetanoz antikor titrelerinde yüzde 15 azalma (%95 CI: −26,2 ile −4,5) ile ilişkilendirilmiştir.
- Gebelik döneminde PFOS'un EV71 antikorlarında yüzde 23,6, CA16 antikorlarında yüzde 20,6 azalmayla ilişkili olduğu da gösterilmiştir.
- Çocuklarda başta PFOS ile solunum yolu enfeksiyonu (OR 1,17; %95 CI: 1,07–1,28), herhangi bir enfeksiyon (OR 1,61; %95 CI: 1,18–2,20) ve ateş (OR 1,57; %95 CI: 1,21–2,03) arasında pozitif ilişki saptanmıştır.
- PFOA ile solunum yolu enfeksiyonu (OR 1,21) ve psödokrup (OR 1,22), PFHxS ile otitis media (OR 1,08) ve psödokrup (OR 1,20) ilişkileri de raporlanmıştır.

Çalışmanın, PFOS ve PFOA üreticisi olan 3M şirketi tarafından finanse edildiği ve yazarların 3M'den ücret aldığı beyan edilmiştir; bu durum bulguların yorumlanmasında göz önünde bulundurulmalı; yazarların kendi değerlendirmesi daha temkinli olduğuna dikkat edilmelidir: enfeksiyonlara yatkınlık açısından PFAS maruziyetiyle "destekleyici düzeyde kanıt", antikor titresi azalması açısından ise "ılımlıdan düşüğe uzanan kanıt" ifadeleri kullanılmıştır (4). Bu nüans farkı yukarıdaki sayısal bulguların klinik anlamlandırılmasında dikkate alınmalıdır.

Çocuklarda Antijene Özgü Antikor Baskılanmasının Klinik Önemi

Klinik bağlamda bu bulgular son derece önemlidir; zira difteri ve tetanoza karşı koruyucu antikor seviyeleri eşik değerlerin altına düştüğünde, tam aşılı çocuklar bile temel bulaşıcı hastalıklara karşı savunmasız kalabilmektedir. Bu durum bir nüfus genelinde değerlendirildiğinde, sürü bağışıklığı eşiklerini etkileyerek salgın kontrolü açısından ciddi halk sağlığı sonuçları doğurabilir. EFSA, PFAS için tolere edilebilir haftalık alım değerini türetirken çocuklarda aşı antikor cevabı üzerindeki bu etkiyi kritik uç nokta (critical endpoint) olarak kullanmış; EPA ise 2022 yılında içme suyuna ilişkin sağlık tavsiye limitlerini benzer biçimde bu immünotoksisite verilerinden yola çıkarak oluşturmuştur (4, 8-10).

Padova Üniversitesinden Carraro ve ark. tarafından 2025'te ön baskı olarak sunulan [henüz hakem değerlendirmesinden geçmemiş] bulgular: PFOA'ya maruz bırakılan sağlıklı donörlerden elde edilen B lenfositlerinin daha az aktive olduğu, daha yavaş olgunlaştığı ve IgG üretiminde yüzde 30–45 azalma gösterdiği saptanmış; bu değer, yüksek PFAS kontaminasyonu olan bölgelerdeki çocuklarda yürütülen epidemiyolojik çalışmaların bulgularıyla örtüşmektedir (11).

Yetişkinlerde Aşı Cevabı: Farklılaşan Bulgular

Yetişkinlerdeki kanıtlar daha heterojen bir tablo çizmektedir. Ronneby, İsveç'te on yıllarca içme suyundan yüksek düzey PFAS (PFHxS, PFOS) maruziyetine uğrayan ve maruz kalmayan bir kontrol grubuyla karşılaştırılan bir kohortta, iki doz Spikevax (Moderna) mRNA COVID-19 aşısından 5 hafta ve 6 ay sonra yapılan anti-spike IgG ölçümlerinde PFAS ile antikor düzeyleri arasında anlamlı negatif bir ilişki saptanmamıştır. Buna karşın, yetişkin Danimarkalıları inceleyen ayrı bir çalışmada, booster doz sonrasındaki spike IgG artışının serum PFAS konsantrasyonuyla ters yönlü ilişkili olduğu bildirilmiştir: 7 PFAS için her iki katına çıkma başına booster cevabında medyan 802 BAU/mL daha düşük artış (%95 CI: –1812; 208). Bu bulgular, eğer bir etki varsa bunun bağışıklanmamış bireylerde primer aşıdan ziyade tekrarlayan maruziyet döngülerinde (booster) daha belirgin olabileceğini düşündürmektedir. Ronneby T hücre alt çalışması ise en fazla PFAS maruziyetine sahip sağlıklı yetişkinlerin mRNA COVID-19 aşısına yeterli immün cevap verebildiğini göstererek yetişkin cevabının çocukluktan farklılaştığına işaret etmektedir (12, 13).

ABD'li esansiyel çalışanları içeren daha büyük ölçekli bir kohort çalışması, daha yüksek serum PFAS konsantrasyonlarının SARS-CoV-2 enfeksiyonu sonrasında (aşılama öncesinde) elde edilen antikor düzeylerini azalttığını ve antikor düşüş hızını yavaşlattığını (düşük başlangıç titresine uyumlu olarak) ortaya koymuştur; bu etki aşı sonrası grupta gözlemlenmemiştir (14).

Humoral İmmünitenin Zayıflamasının Mekanizmaları: B Hücre Gelişiminin Bozulması

Germinal Merkez Reaksiyonları: Temel Hedef

Antikor cevabının baskılanmasına yönelik en aydınlatıcı mekanistik çalışma, Masaryk Üniversitesinin Çek yetişkinlerden oluşan CELSPAC kohortunda yürüttüğü kapsamlı transkriptomik analizdir. Bu çalışmada, birden fazla PFAS (PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFHxS, PFOS) ile ilişkili ve anlamlı biçimde downregüle olan 166 gen saptanmıştır. Subnetwork Enrichment Analysis (SNEA), bu genlerin dört temel B hücre biyolojisi süreciyle zenginleştiğini ortaya koymuştur: germinal merkez B hücre diferansiasyonu, germinal merkez oluşumu, B hücre reseptör sinyal yolu ve plazma hücre diferansiasyonu (15).

Etkilenen başlıca transkripsiyon faktörleri şunlardır:

- E2A (TCF3) ve E2-2 (TCF4): Germinal merkez B hücre diferansiasyonu ve plazma hücre gelişimi için zorunlu E-proteinler.
- EBF1: Erken B hücre faktörü; pro-B hücre aşamasında kritik öneme sahip olup PAX5 ile işbirliği yaparak CD19 ve CD79b ekspresyonunu düzenler.
- CD19: B hücre yüzeyinin tanımlayıcı belirteci ve BCR eş-reseptörü; Lyn, Fyn, Btk, PI3K ve Ras kinazlara sinyal iletir; PFAS tarafından anlamlı biçimde downregüle edilir.
- OCT-2 (POU2F2): Germinal merkez oluşumu için kritik transkripsiyon faktörü.
- SPI-B: BCR, CD40L, BAFF ve TLR reseptörleri aracılığıyla sinyal iletimi için gereklidir.
- LSD1 (KDM1A): Histon demetilaz; Blimp-1 ile etkileşerek plazma hücre gelişimindeki kritik epigenetik düzenleyici rolünü üstlenir.

Söz konusu transkriptomik bulgular, Faroe Adalarından itibaren epidemiyolojik literatürde tekrarlanan aşı antikor baskılanmasına moleküler bir açıklama getirmektedir. PFAS'ın B hücre aktivasyonundaki rolü, germinal merkez reaksiyonlarını tetikleyen transkripsiyonel ağın çökmesiyle sonuçlanmakta ve nihayetinde antikor salgılayan plazma hücre sayısını azaltmaktadır (15).

RAG1/RAG2 Baskılanması: V(D)J Rekombinasyonunun Çöküşü

Wageningen Gıda Güvenliği Araştırma Enstitüsünden Janssen ve ark., Namalwa insan B lenfoma hücre hattında PFOA, PFNA, PFOS ve PFHxS'nin RAG1 ve RAG2 gen ekspresyonunu baskıladığını göstermiştir. RAG1 ve RAG2 enzimleri, antijen reseptörü çeşitliliğini yaratan V(D)J rekombinasyonu için temel öneme sahip enzimlerdir; bu genlerin baskılanması immünoglobulin çeşitlilik repertuarını köklü biçimde kısıtlar. Potens sıralaması PFNA > PFOA > PFOS > PFHxS olarak belirlenmiştir. Buna paralel olarak PFAS, IL-2 promotör aktivitesini de inhibe etmektedir; 15 farklı PFAS, Jurkat T hücre hattında konsantrasyona bağımlı biçimde IL-2 promotör aktivitesini baskılamıştır. IL-2'nin T hücre-B hücre iş birliği açısından vazgeçilmez bir büyüme faktörü olduğu göz önüne alındığında, bu etki T hücresine bağımlı antikor cevabını ikinci bir mekanizma üzerinden daha sekteye uğratmaktadır (16).

Timus Atrofisi ve T Lenfosit Gelişimine Etkiler

Hayvan çalışmaları, hem timus morfolojisi hem de timosit popülasyonları üzerindeki güçlü etkiler göstermiştir. PFOA ile tedavi edilen C57Bl/6 farelerde timus ve dalak belirgin atrofi geliştirmiş; tüm timosit popülasyonları azalırken en dramatik düşüş immatür $CD4^+CD8^+$ çift pozitif timositlerde gerçekleşmiş (%90'ın üzerinde azalma) ve splenositlerde hem T hem de B hücresi sayısı düşmüştür. Benzer şekilde, tek doz PFNA uygulanan farelerde iki hafta sonra $CD4^+CD8^+$ çift pozitif timosit popülasyonu neredeyse tamamen ortadan kalkmış (%99 azalma); bu etki 4 hafta sonra kısmen toparlanmış olmakla birlikte ciddi şekilde azalmış olarak (%33–57) devam etmiştir ve bu azalma dişilerde erkeklerden daha belirgin olmuştur. Bu bulgular, PFAS maruziyetinin T hücre gelişiminin tam olgunlaşma öncesindeki kritik pozitif seçim sürecini bozabileceğini göstermektedir. Hayvan modellerinde PFOA ve PFNA ile yapılan çalışmalar,

timusta özellikle $CD4^+CD8^+$ çift pozitif timosit popülasyonunda belirgin azalma ve buna eşlik eden dalak T/B hücre kaybı olduğunu ortaya koymuş; bu etkilerin bazı deneylerde cinse özgü farklılıklar gösterebildiği bildirilmiştir (17, 18).

T Hücre Bağımlı Antikor Cevabının Bütünleşik Modeli

Tüm bu bulgular birleştirildiğinde, PFAS'ın aşı cevabını baskılamasının birden fazla düzeyde katkıda bulunan bir ters etki yolağı çerçevesinde anlaşılması gerektiği görülmektedir (17, 18):

- Timus düzeyi: PFAS → timosit $CD4^+CD8^+$ popülasyonunun azalması → periferik $CD4^+$ T hücre sayısının düşmesi → T-foliküler yardımcı (Tfh) hücre sayısının azalması (18).
- Germinal merkez düzeyi: PFAS → TCF3, EBF1, CD19, LSD1 downregülasyonu → azalmış Tfh-B hücre iş birliği → bozulmuş germinal merkez oluşumu (15).
- Plazma hücre düzeyi: PFAS → plasma hücre diferansiasyon transkriptom ağının çöküşü → azalmış antikor salgılayan plazma hücresi sayısı → düşük IgG titresi (15).
- B hücre olgunlaşma düzeyi: PFAS → RAG1/RAG2 baskılanması → daralmış VDJ repertuarı → antijen çeşitliğine karşı sınırlı antikor cevap kapasitesi.

Enfeksiyöz Hastalıklara Klinik Yatkınlık: Epidemiyolojik Kanıtlar

Solunum Yolu Enfeksiyonları

Solunum yolu enfeksiyonu yatkınlığı, PFAS immünotoksisitesinin enfeksiyon sonuçları açısından en güçlü epidemiyolojik desteğe sahip alanlarından biridir. İskandinav doğum kohort çalışmaları bu alanda belirleyici olmuştur.

Prenatal Maruziyet ve Erken Çocukluk Solunum Yolu Enfeksiyonları

- Japon Hokkaido kohortunda (Hokkaido Study on Environment and Children's Health; 1.558 anne-çocuk çifti) doğum öncesi PFOS ve PFHxS maruziyetinin dört yaşına kadar solunum yolu enfeksiyonları, otitis media, RSV ve su çiçeği dahil enfeksiyon sıklığıyla ilişkili olduğu gösterilmiştir (19).
- Norveçli MOBA kohortunda (478–1.207 katılımcı) prenatal PFAS maruziyetinin çocuklarda pnömoni/bronşit ve psödokrup ile ilişkisi gözlemlenmiştir (4).
- 2025 yılında yayımlanan sistematik derleme, prenatal PFAS maruziyetinin (özellikle PFHxS ve PFOS) çocuklarda solunum yolu enfeksiyonu riskini artırdığını doğrulamıştır; PFHxS için tüm yaş gruplarında alt solunum yolu enfeksiyonu ile RR: 1,14 (%95 CI: 1,00–1,29) bildirmiştir (20).

PFAS kirliliği dünya genelinde 600'den fazla yabani hayvan türünde belgelenmiştir; kutup ayılarından şahin gagalı deniz (hawskbill) kaplumbağalarına, balina ve kutup deniz kuşlarına kadar coğrafi olarak uzak bölgeler de dâhil olmak üzere neredeyse her ekosisteme yayılmıştır. Yaban hayatında gözlemlenen etkiler; bağışıklık baskılanması, karaciğer hasarı, üreme başarısızlığı, endokrin sistem bozuklukları, bağırsak mikrobiyom değişiklikleri ve nörotoksisite olarak özetlenebilir.

Meta-Analiz Bulguları

- PFOS ile solunum yolu enfeksiyonu arasındaki pooled OR: 1,17 (%95 CI: 1,07–1,28); PFOS ile herhangi bir enfeksiyon arasında OR: 1,61 (%95 CI: 1,18–2,20) (4,8).
- PFOA ile solunum yolu enfeksiyonu arasında OR: 1,21 (%95 CI: 1,10–1,31) (4,8).
- PFHxS ile otitis media (OR: 1,08) ve psödokrup (OR: 1,20) ilişkisi de anlamlı bulunmuştur (4).

Solunum Yolu İmmünitesine Mekanistik Etki

PFAS'ların akciğer solunum yolu zarında alveoler makrofaj fonksiyonunu zayıflattığı, özellikle sürfaktan üretimini sekteye uğratarak alveolar klirens kapasitesini azalttığı bildirilmektedir. Bu mekanizma; Streptococcus pneumoniae ve Haemophilus influenzae gibi bakteriyel patojenlerin akciğer yolunda daha uzun süre kalmasına ve daha ciddi enfeksiyon tablolarına zemin hazırlamasına katkıda bulunabilmektedir (21).

Otitis Media, Gastrointestinal Enfeksiyonlar ve Diğer Enfeksiyonlar

Danimarkalı doğum kohortunu (n=1.472) inceleyen Dalsager ve ark., gestasyonel PFAS maruziyetinin dört yaşındaki çocuklarda herhangi bir enfeksiyon nedeniyle hastaneye yatışı artırdığını göstermiştir. Japon doğum kohortunda (n=2.689), gestasyonel PFAS maruziyetinin rinit, su çiçeği, otitis media ve pnömoni ile ilişkisi değerlendirilmiştir. Norveçli erken çocukluk çalışması, PFAS'ın hem soğuk algınlığı hem de gastrointestinal enfeksiyon olaylarını etkileyebileceğine işaret etmiştir (4).

Meta-analiz sonuçlarının iki yönde olduğu - yani bazı PFAS'ların belirli enfeksiyonlarda artışa işaret ederken bazı çalışmaların beklenmedik şekilde "azalmış enfeksiyon" bildirdiği - dikkat çekmektedir. Bu çelişkili görünen tablo, PFAS'ın yalnızca immünosüpresyon değil, inflamasyon disregülasyonu yarattığı gerçeğinin bir yansıması olabilir; kronik düşük dereceli inflamasyon bağlamında bazı akut enfeksiyon semptomu eşiklerinin değişmesi ya da saptama yanlılıkları bu sonuçları karmaşık hâle getirebilmektedir (4, 8).

Başlangıç Yaşı ve Yaşam Dönemine Bağlı Duyarlılık

Enfeksiyona yatkınlık açısından kritik duyarlılık pencerelerinin belirlenmesi, PFAS klinik immünotoksisitesinin anlam kazandığı temel bir boyuttur. Prenatal dönemde PFAS'a maruz kalan fetüste immün sistem organogenezini sekteye uğratmakta; bebek serumundaki PFAS konsantrasyonlarının maternal düzeyleri aşabildiği bilinmektedir (3). Erken yaşta PFAS maruziyeti;

- timus ağırlığını ve boyutunu azaltabilmekte,
- lenfosit popülasyonlarını kalıcı olarak etkileyebilmekte,
- doğal öldürücü (NK) hücre fonksiyonunu bozabilmekte ve
- T-B hücre germinal merkez iş birliğini uzun vadeli olarak kısıtlayabilmektedir (8).

Bu dönemde oluşan immünolojik "yanlış programlama", çocuğun ileriki dönemlerine kadar sürebilecek savunma açıkları doğurabilmektedir. Ancak bu uzun vadeli programlama etkilerini yetişkinlik dönemindeki daha kompetent immün sistemin kısmen tolere edebildiği de göz ardı edilmemelidir; bu durum çocuk ile yetişkin PFAS cevapları arasındaki farklılıkları açıklayabilmektedir (4, 8).

SARS-CoV-2 ve COVID-19 Bağlamında PFAS İmmünotoksisitesi

COVID-19 Enfeksiyonu Sonrası Antikor Cevabı

COVID-19 pandemisi, PFAS'ın antikor cevabı üzerindeki etkilerini araştırmak için geniş ölçekli bir gözlemsel çerçeve oluşturmuştur. ABD'li esansiyel çalışanlardan oluşan kohort çalışmasında (n=1.200'ün üzerinde), daha yüksek serum PFAS konsantrasyonlarının SARS-CoV-2 enfeksiyonu sonrasında elde edilen antikor düzeylerini baskıladığı - hem pik antikor konsantrasyonunun düşük olduğu hem de antikor düşüş hızının değiştiği - bulunmuştur. Bu bulgular, PFAS maruziyetinin yüksek olduğu bireylerde tekrarlayan SARS-CoV-2 enfeksiyonuna karşı azalmış doğal koruma anlamına gelmektedir (14).

mRNA Aşısına Humoral Cevap: Ronneby ve Diğer Kohortlar

Ronneby (İsveç) çalışmasının yukarıda özetlenen bulguları, PFAS'ın yetişkinlerde iki doz mRNA aşılamasına verilen antikor cevabını anlamlı biçimde etkilemediğini göstermiştir. Bu bulgu, çocuklardaki güçlü etki ile yetişkinlerdeki zayıf etki arasındaki kontrasta dikkat çekmekte ve yaşa bağlı bağışıklık olgunluğunun PFAS'ın etkisini modüle ettiğini düşündürmektedir. Danimarkalı booster aşı çalışmasındaki azalmış booster cevabı ise farklı maruziyete sahip yetişkinlerde tekrarlayan antijene maruziyetin kümülatif etkilerini değerlendiren daha ileri araştırmalara ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir (13).

SARS-CoV-2'ye Hücresel İmmün Cevap: UFZ Çalışması

Humoral cevabın ötesinde, 2025 yılında Environment International'da yayımlanan Helmholtz Çevre Araştırma Merkezi (UFZ) çalışması, COVID-19 aşısına hücresel (T hücre aracılı) immün cevap üzerindeki PFAS etkilerini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, COVID-19 aşılı bireylerin periferik kan örnekleri SARS-CoV-2 spike peptidi ile uyarılmıştır (22). Temel bulgular şöyledir:

- Yüksek PFAS maruziyeti, T ve NK hücrelerinde IFNγ ekspresyonunu artırmış; bu etki özellikle erkek donörlerde belirgin olmuştur.
- Yüksek PFAS karışım konsantrasyonlarında B hücre popülasyonunda toplam azalma gözlemlenmiş; bu etki özellikle kadın donörlerde belirgin olmuştur.
- Yüksek PFAS konsantrasyonlarında MIP-1α (CCL3) ve MIP-3α (CCL20) gibi pro-inflamatuvar kemokinlerin sekresyonunda anlamlı azalma saptanmıştır.
- Bulgular cinsiyete özgü (eşeye bağlı) farklılıklar göstermiş; bu durum cinsiyet hormon profillerine (endokrin farklılıklara) bağımlı olduğuna işaret etmektedir.

Bu çalışma; PFAS'ın COVID-19'a karşı koruyuculuk için kritik öneme sahip olan viral replikasyona karşı sitotoksik T hücre cevabını zayıflatabileceğini düşündürmekte olup önemi büyük bir araştırma boşluğunu kapatmaktadır. SARS-CoV-2 bağışıklığında güçlü bir antikor titresi, ağır hastalıktan koruma garantisi vermediğinden, hücresel cevabın optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

PBMC Çalışması: COVID-19 Aşılılarında Modülasyon

Yeni yayımlanan PBMC çalışmasında (2025), altı PFAS'tan oluşan ve insan kan konsantrasyonlarına uyan bir karışıma maruz bırakılan sağlıklı COVID-19 aşılı donörlerin immün hücre cevapları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bazı yüksek konsantrasyonlarda T ve NK hücrelerinde IFNγ ekspresyonunun arttığını ancak B hücre popülasyonunun azaldığını göstermiştir; üstelik bu etkiler cinsiyete göre farklılık göstermiştir. Bu karmaşık "immün disregülasyon" tablosu, PFAS'ın immün cevap üzerindeki etkisinin tek boyutlu bir baskılanmadan ibaret olmadığını, bazı akslarda uygunsuz aktivasyona diğerlerinde ise baskılanmaya yol açabileceğini ortaya koymaktadır (22).

Doğal İmmünite Üzerindeki Etkiler ve Enfeksiyon Direncine Katkısı

Nötrofil Fonksiyon Bozukluğu ve İlk Savunma Hattının Zayıflaması

Nötrofiller, akut bakteriyel ve fungal enfeksiyonlara karşı birinci savunma hattıdır. PFAS, nötrofil işlevini şu düzeylerde bozmaktadır:

- Sayısal azalma: PFOA ve PFOS maruziyeti periferik kan nötrofil sayısını azaltmaktadır (1).
- Kemotaksis inhibisyonu: Enfeksiyon bölgesine migrasyon inhibe olmaktadır (1).
- Fagositik kapasite azalması: Patojen yutma ve intraselüler yok etme kapasitesi düşmektedir (1).
- ROS üretimi değişimi: PFHxA ve GenX, nötrofil reaktif oksijen türleri üretimini baskılamış; oysa bazı uzun zincirli PFAS'lar paradoks olarak oksidatif stres artışına neden olmuştur (1).

Bu işlevsel bozukluklar, özellikle birlikte ele alındığında, PFAS maruziyetinin patojen klirensini geciktirip enfeksiyonun yerleşmesini kolaylaştırabileceğini ortaya koymaktadır (1).

Alveoler Makrofaj Fonksiyonu ve Pulmoner İnnate İmmünite

Akciğer solunum yolu mikroplarına karşı özelleşmiş birinci savunma hücreleri olan alveoler makrofajlar, PFAS'ın solunum yolu enfeksiyonu riskini artırmasındaki mekanizmalar açısından kritik öneme sahiptir. PFAS maruziyetinin alveoler makrofajlarda sürfaktan lipid metabolizmasını bozduğu, fagositik kapasiteyi azalttığı ve NF-κB sinyal yolu üzerinden sitokin üretim profilini değiştirdiği çok sayıda çalışmayla gösterilmiştir. Akciğerlerde, solunum yolu mikroplarına karşı özelleşmiş birinci savunma hücreleri olan alveoler makrofajlar, PFAS ve diğer kalıcı organik kirleticilerin solunum yolu enfeksiyonu riskini artırmasında rol oynayabilecek temel hedef hücrelerdir. Kalıcı organik kirleticiler üzerine yapılan çalışmalar, bu bileşiklerin alveoler makrofajların lipid metabolizmasını ve sitokin üretim profilini değiştirerek fagositik kapasiteyi zayıflatabildiğini ve böylece solunum yolu patojenlerine karşı konak savunmasını bozabileceğini düşündürmektedir (21).

NK Hücre Fonksiyonu ve Viral Enfeksiyon Kontrolü

NK hücreleri, özellikle virüsle enfekte hücreleri tanıyıp ortadan kaldırmada temel doğuştan (innate) immün efektör hücrelerdir. PFNAS, PFDA ve PFMOBA dâhil çeşitli PFAS'ların NK hücre sayısını azalttığı ve sitoliz kapasitesini değiştirdiği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. UFZ'nin 2025 COVID-19 çalışmasında yüksek PFAS konsantrasyonlarına maruz kalan NK hücrelerinde IFNγ ekspresyonunun artması, viral uyarı altında bu hücrelerin uygunsuz aktivasyon ve tükenme döngüsüne girebileceğine işaret etmektedir. NK hücre sinyalinin kronik disregülasyonu, özellikle viral enfeksiyonlara ilk immün cevap açısından uzun vadeli kırılganlık yaratabilmektedir (1, 22).

Çocukta Gelişen İmmün Sistemin Özel Durumu: Pencere Dönemi Maruziyeti

Prenatal Maruziyet ve Ömür Boyu (Lifelong) İmmün Programlama

PFAS, plasentayı serbestçe geçmekte ve fetal serumda maternal düzeylere benzer ya da zaman zaman daha yüksek konsantrasyonlarda birikebilmektedir. Bu prenatal maruziyetin immünolojik önemi kritiktir; zira immün sistemin temel organogenezi - timus gelişimi, lenfoid doku oluşumu, NK hücre programlaması - fetal dönemde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla PFAS tarafından bozulan immün programlama, bebeğin bağışıklık sistemi gelişimini fetal immün programlamanın fizyolojik gelişim çizgisinden sapmasına yol açabilmektedir (3, 8).

Von Holst ve ark. 2021 tarihli derlemesi, erken yaşam PFAS maruziyetinin immünosüpresyon üzerinden bebek ve çocukluk sağlığını etkilediğini, çocuklarda aşı cevabının azaldığını ve atopik dermatit ile alt solunum yolu enfeksiyonlarına yatkınlığı artırdığını, bazı etkilerin cinsiyete özgü olduğunu kapsamlı biçimde özetlemiştir (8).

Anne Sütü ile Geçiş ve Erken Yaşam Maruziyeti

PFAS, anne sütüne geçmekte ve emzirme döneminde bebeklerde birikmekte olan PFAS yüküne önemli bir katkı sunmaktadır. Emzirmenin bilinen immünolojik yararlarını (sIgA, laktoferrin, sitokinler içermesi) dengeleyip dengelemediği ya da farklı etkiler gösterip göstermediği hâlâ araştırılmaktadır. Mevcut epidemiyolojik çalışmalar bu karmaşık tabloyu netleştirmek için yeterli güçten yoksun olsa da uzun süreli emzirme ile yüksek PFAS maruziyetinin bir arada bulunduğu koşullarda immün etkilerin daha karmaşık bir seyir izleyebileceği not edilmelidir (8).

Kanıt Düzeyi, Çelişkili Bulgular ve Araştırma Boşlukları

Kanıt Düzeyi Sınıflaması

Tablo 1'de PFAS maruziyetinin immün sistem üzerindeki başlıca klinik sonuçları için kanıt gücü ve bu sınıflamayı destekleyen temel çalışmalar özetlenmiştir. Çocuklarda aşıya azalmış antikor cevabı için Grandjean ve ark. (6) ile Antoniou ve Dekant'ın (4) sistematik derleme ve meta-analizi, erken yaşam enfeksiyon yatkınlığı için Goudarzi ve ark. (19) ile Lyrou ve ark. (20) tarafından yapılan kohort ve sistematik incelemeler, timus ve T hücre gelişimi açısından Yang ve ark.'nın (17) hayvan modelleri, yetişkinlerde COVID19 mRNA aşı cevabı için ENFORCE (Timmermann ve ark. (12)), Ronneby (Andersson ve ark. (13)) ve Hollister'in (14) kohort çalışmaları ve hücresel COVID19 cevabındaki disregülasyon için Ayuk ve ark.'nın (22) PBMC çalışması temel alınmıştır. Bu seçili çalışmalar, hem insan epidemiyolojisi hem de mekanistik deneysel veriyi birlikte kullanarak PFAS ilişkili immünotoksisitenin klinik önemini derecelendirmeye olanak sağlamaktadır.

Önemli Metodolojik Sınırlılıklar ve Çelişkili Bulgular

Meta-analiz sonuçlarında tutarsızlıkların birkaç açıklaması bulunmaktadır: (1) Çalışmalar farklı PFAS konsantrasyonlarına, farklı PFAS karışımlarına ve farklı maruziyet dönemlerine odaklanmaktadır. (2) Bazı eski kohortlardaki PFAS konsantrasyonları (örn. Faroe Adalarındaki balina tüketiminden kaynaklanan) günümüz genel nüfus maruziyetlerinin çok üzerindedir. (3) Özellikle kısa zincirli PFAS alternatifleri ve karışım etkileri henüz yeterince araştırılmamıştır. (4) Enfeksiyon verileri çoğunlukla anne bildirimine dayalı olup; PFAS'ın gerçekten daha az enfeksiyöz semptom mu yol açtığı yoksa algı/bildirim yanlılığı mı olduğu net değildir (1, 4, 23).

Öncelikli Araştırma Boşlukları

- Kısa zincirli PFAS (PFBS, PFBA, GenX) ve alternatif PFAS'ların immünotoksisite profili (23)
- PFAS karışımlarının additif/sinerjik/antagonist immün etkileri
- Maruziyet sona erdiğinde (başlangıç immünotoksisitesinin ne kadarının geri döndüğü)
- Yetişkinlerde PFAS'ın rutin aşıları (grip, pnömokok) etkileyip etkilemediği
- PFAS-immün aks üzerinde bireysel genetik varyasyonun belirleyiciliği (örn. detoksifikasyon enzimleri)
- "Tolerable" PFAS konsantrasyonunun gerçekten mevcut tahminleri için koruyucu olup olmadığı

Tablo 1. PFAS immünotoksisitesi için kanıt düzeyi ve temel çalışmalar

İmmün Sonuç	Kanıt Gücü	Temel Kaynaklar
Çocuklarda aşıya azalmış antikor cevabı	Yüksek/Yeterli	Grandjean ve ark., meta-analiz
Antikor baskılanmasının mekanizması (GC/plazma hücre)	Orta-Yüksek	Rudzanová ve ark., Padova 2025
Çocuklarda solunum yolu enfeksiyonu yatkınlığı	Orta	Japon kohortu, meta-analiz, sistematik derleme
Timus atrofisi ve T hücre gelişim bozukluğu	Orta (ağırlıklı hayvan verisi)	Yang ve ark.
Yetişkinlerde aşıya azalmış antikor cevabı	Düşük-Orta (çelişkili bulgular)	Ronneby, Danimarkalı kohort
COVID-19 sonrası azalmış antikor cevabı	Orta	ABD esansiyel çalışanlar kohoru
Hücresel COVID-19 cevabında disregülasyon	Ön-Kanıt	UFZ 2025, PBMC çalışması
Otitis media ve GI enfeksiyonlar	Düşük-Orta	Japon ve Norveç kohortları

Klinik ve Halk Sağlığı Yansımaları

Yüksek PFAS Maruziyetli Bireylere Klinik Yaklaşım

Mevcut klinik rehberler, yüksek mesleki ya da çevresel PFAS maruziyeti olan bireyler için immün sistem izlemini yetersiz biçimde ele almaktadır. Bağışıklık-odaklı izlem için şu öneriler gündeme gelmektedir (24):

- Mümkünse serum PFAS düzey tayini (PFAS maruziyetini nicelendirmek için),
- pediatrik hastalarda, özellikle erken hayat PFAS maruziyeti söz konusuysa, aşı antikor titrelerinin doğrulanması,
- yüksek riskli maruziyeti olan bireylerde rutin immünogram (lenfosit alt grupları, serum Ig düzeyleri),
- PFAS maruziyetinin yüksek olduğu itfaiyeci, AFFF kullanan askeri personel ve endüstri işçileri için periyodik aşı cevabı takibi.

Halk Sağlığı Düzleminde Süregelen Gerilim

En önemli halk sağlığı sonucu, standart aşılama şemasına uyulduğu hâlde bir bölümü yüksek PFAS kontaminasyonlu alanlarda yaşayan çocuklarda antikor düzeylerinin koruyucu eşiğin altına gerileyebildiğidir. Bu bulgu, PFAS'ın toplum bağışıklığına potansiyel olarak ciddi bir zarar verdiğini düşündürmektedir; difteri, tetanoz ve kızamık gibi salgın potansiyeli taşıyan hastalıklara karşı nüfus düzeyindeki koruma eşiklerinin - özellikle yüksek PFAS kirliliği olan bölgelerde - zedelenmiş olabileceğini göstermektedir (6, 24).

Türkiye Bağlamı ve Yerel Riskler

Mevcut kanıt tabanı ağırlıklı olarak ABD, İskandinav ülkeleri ve Japonya'dan elde edilmiş olsa da PFAS maruziyeti açısından Türkiye'nin özgün bir risk profili bulunmaktadır. Tekstil, deri, halı, metal kaplama ve petrokimya endüstrisinin yoğunlaştığı Marmara Bölgesi, Ergene Havzası ve Ege kıyıları başta olmak üzere birçok sanayi bölgesinde PFAS içeren proses kimyasallarının kullanıldığı ve yer altı–yüzey suyu kirliliği potansiyelinin yüksek olduğu bildirilmektedir. Türkiye'de PFAS için ulusal ölçekte yürütülen biyolojik izlem (kan, idrar, anne sütü) çalışmaları son derece sınırlıdır; bu nedenle hem genel toplum hem de mesleki maruziyet gruplarında gerçek iç vücut yükü büyük ölçüde bilinmemektedir. Çocukluk çağı bağışıklama programının yüksek kapsama oranları ve yoğun sanayileşme birlikte

düşünüldüğünde, PFAS ilişkili immünotoksisitenin ülkemiz için de öncelikli bir halk sağlığı riski olarak ele alınması, ulusal biyoizleme programlarının başlatılması ve içme suyu ile endüstriyel deşarjlarda bağlayıcı PFAS limitlerinin hızla regüle edilmesi gerekmektedir (2).

Risk İletişimi Açısından Not

Dünya Sağlık Örgütü ve uluslararası pediatri otoriteleri, mevcut kanıtlar ışığında standart çocukluk çağı aşılamasının ve anne sütünün sağladığı immünolojik yararların, çevresel PFAS maruziyetine bağlı olası risklerden açık ara üstün olduğunu vurgulamaktadır. PFAS'a bağlı immünotoksisite bulguları, aşıların "gereksiz" olduğu ya da emzirmenin "zararlı" hâle geldiği şeklinde yorumlanmamalıdır; aksine, bağışıklık sistemi üzerindeki çevresel baskının arttığı bir dönemde, enfeksiyonlardan korunmada etkili ve güvenli araçlara (aşılar, anne sütü) daha da fazla ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çözüm, aşılamadan veya emzirmekten vazgeçmek değil, bu kalıcı kimyasalların üretim ve kullanımının sınırlandırılması, içme suyu ve gıdadan uzaklaştırılması ve maruziyetin düzenleyici önlemlerle en aza indirilmesidir.

Sonuç

PFAS, immün sistemin birden fazla düzeyini – doğal immünite (nötrofil, NK ve alveoler makrofaj fonksiyonları), adaptif immünite (B hücre germinal merkez reaksiyonları, plazma hücre gelişimi, T hücre–B hücre etkileşimi) ve immünolojik bellek oluşumu – hem sistemik hem de moleküler düzeyde bozabilen, özgün bir çevresel immünotoksikan grubudur. Bu çok katmanlı bozulmanın klinik yansımaları; koruyucu eşiklerin altına düşen aşıya antikor cevapları, çocukluk çağında solunum yolu enfeksiyonları, otitis media ve diğer enfeksiyöz hastalıklara artmış yatkınlık ile SARS-CoV-2 enfeksiyonu sonrasında zayıflamış humoral cevap biçiminde ortaya çıkmaktadır. Kanıtların ağırlık merkezi erken yaşam maruziyetindedir; gebelik ve çocukluk dönemindeki PFAS düzeyleri hem aşı cevabı hem de enfeksiyon insidansı açısından en tutarlı risk artışı ile ilişkili görünmektedir. Bununla birlikte yetişkin kohortlarında, özellikle yüksek çevresel yük taşıyan ve tekrarlayan antijen maruziyetine (booster aşılar, doğal enfeksiyonlar) giren gruplarda da humoral ve hücresel cevapların modüle olabildiğine dair bulgular giderek güçlenmektedir. Germinal merkez organizasyonunu, plazma hücre diferansiasyonunu ve B hücre repertuarını hedef alan transkriptomik değişiklikler, artık insan PBMC'lerinden elde edilen verilerle gösterilmiş; timus, dalak ve periferik lenfosit popülasyonlarındaki değişiklikleri ortaya koyan hayvan modelleriyle birlikte değerlendirildiğinde, PFAS immünotoksisitesi için tutarlı bir ters etki yolağı şeması ortaya çıkmıştır. Bu mekanistik çerçeve, yalnızca çocukluk çağı aşı programlarının ve COVID-19 gibi yeni ortaya çıkan enfeksiyonlara karşı bağışıklama stratejilerinin yeniden değerlendirilmesi açısından değil, aynı zamanda yüksek riskli popülasyonlarda immün izlem algoritmalarının ve maruziyet limitlerinin belirlenmesi açısından da güçlü bir bilimsel zemin sağlamaktadır. Bununla uyumlu olarak, PFAS maruziyetinin azaltılması ve mümkünse ortadan kaldırılması; aşılamanın ve emzirmenin sürdürülmesi, hatta PFAS ile kontamine çevrelerde daha da güçlendirilmesi gereken temel halk sağlığı müdahaleleri olarak değerlendirilmelidir.

Kaynaklar

1) Phelps DW, Connors AM, Ferrero G, DeWitt JC, Yoder JA. Per- and polyfluoroalkyl substances alter innate immune function: evidence and data gaps. J Immunotoxicol. 2024 ;21(1):2343362.

2) Yurtsever M. Per- ve Polifloroalkil maddelerin (sonsuz kimyasalların) çevredeki kalıcılığı, yayılımı, birikimi ve sağlığa etkileri. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg., 2025; 14(1), 412-423.

3) Fenton SE, Ducatman A, Boobis A, 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):606-630.

4) Antoniou EE, Dekant W. Childhood PFAS exposure and immunotoxicity: a systematic review and meta-analysis of human studies. Syst Rev. 2024 ;13(1):176.

5) Bline AP, DeWitt JC, Kwiatkowski CF, et al. Public Health Risks of PFAS-Related Immunotoxicity Are Real. Curr Environ Health Rep. 2024 ;11(2):118-127.

6) Grandjean P, Heilmann C, Weihe P, Nielsen F, Mogensen UB, Budtz-Jørgensen E. Serum Vaccine Antibody Concentrations in Adolescents Exposed to Perfluorinated Compounds. Environ Health Perspect. 2017;125(7):077018.

7) Sigvaldsen A, Højsager FD, Paarup HM, et al. Early-life exposure to perfluoroalkyl substances and serum antibody concentrations towards common childhood vaccines in 18-month-old children in the Odense Child Cohort. Environ Res. 2024;242:117814.

8) von Holst H, Nayak P, Dembek Z, et al. Perfluoroalkyl substances exposure and immunity, allergic response, infection, and asthma in children: review of epidemiologic studies. Heliyon. 2021;7(10):e08160.

9) Qiu J, Huo X, Dai Y, Huang Y, Xu X. Potential effects of PFAS exposure on trained immunity: From mechanisms to health risks. Ecotoxicol Environ Saf. 2025;302:118757.

10) Grandjean P, Andersen EW, Budtz-Jørgensen E, Nielsen F, Mølbak K, Weihe P, Heilmann C. Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds. JAMA. 2012 ;307(4):391-7.

11) Carraro S, Di Nisio A, Piazza M, Gualtiero G, Cennamo M, Altinier S, Cinetto F, Rattazzi M, Ceccato J, Vianello F, Ferlin A, Foresta C, De Toni L. "Differential effects of legacy and new-generation perfluoro-alkyl substances on in vitro differentiation and immunoglobulins production by B cells." SSRN Preprint, 8 Ekim 2025.

12) Timmermann A, Johansen IS, Tolstrup M, et al. Antibody response to SARS-CoV-2 mRNA vaccination in Danish adults exposed to perfluoroalkyl substances (PFASs): The ENFORCE study. Environ Res. 2024;263(Pt 1):120039.

13) Andersson AG, Lundgren A, Xu Y, et al. High Exposure to Perfluoroalkyl Substances and Antibody Responses to SARS-CoV-2 mRNA Vaccine-an Observational Study in Adults from Ronneby, Sweden. Environ Health Perspect. 2023 ;131(8):87007.

14) Hollister J, Caban-Martinez AJ, Ellingson KD, et al. Serum per- and polyfluoroalkyl substance concentrations and longitudinal change in post-infection and post-vaccination SARS-CoV-2 antibodies. Environ Res. 2023;239(Pt 1):117297.

15) Rudzanová B, Thon V, Vespalcová H, et al. Altered Transcriptome Response in PBMCs of Czech Adults Linked to Multiple PFAS Exposure: B Cell Development as a Target of PFAS Immunotoxicity. Environ Sci Technol. 2024 ;58(1):90-98.

16) Janssen AWF, Jansen Holleboom W, et al. Determination of in vitro immunotoxic potencies of a series of perfluoralkylsubstances (PFASs) in human Namalwa B lymphocyte and human Jurkat T lymphocyte cells. Front Toxicol. 2024;6:1347965.

17) Yang Q, Xie Y, Depierre JW. Effects of peroxisome proliferators on the thymus and spleen of mice. Clin Exp Immunol. 2000 ;122(2):219-26.

18) Rockwell CE, Turley AE, Cheng X, Fields PE, Klaassen CD. Persistent alterations in immune cell populations and function from a single dose of perfluorononanoic acid (PFNA) in C57Bl/6 mice. Food Chem Toxicol. 2017;100:24-33.

19) Goudarzi H, Miyashita C, Okada E, et al. Prenatal exposure to perfluoroalkyl acids and prevalence of infectious diseases up to 4years of age. Environ Int. 2017;104:132-138.

20) Lyrou M, Karampas G, Metallinou D, et al. Association between prenatal exposure to perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and the incidence of infant and childhood respiratory infections: A systematic review. Med Int (Lond). 2025;5(5):51.

21) Guillotin S, Delcourt N. Studying the Impact of Persistent Organic Pollutants Exposure on Human Health by Proteomic Analysis: A Systematic Review. Int J Mol Sci. 2022;23(22):14271.

22) Ayuk HS, Pierzchalski A, Tal T, et al. Evaluating PFAS-Induced modulation of peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) immune response to SARS-CoV-2 spike in COVID-19 Vaccinees. Environ Int. 2025;98:109409.

23) Iulini M, Galbiati V, Marinovich M, Corsini E. Decoding PFAS immunotoxicity: a NAMs-based comparison of short vs. long chains. Front Toxicol. 2025;7:1665163.

24) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Health and Medicine Division; Division on Earth and Life Studies; Board on Population Health and Public Health Practice; Board on Environmental Studies and Toxicology; Committee on the Guidance on PFAS Testing and Health Outcomes. Guidance on PFAS Exposure, Testing, and Clinical Follow-Up. Washington (DC): National Academies Press (US); 2022.

PFAS'ın endokrin ve metabolik izleri: kan şekeri, tiroid, lipidler ve obezite

Doç. Dr. Muhammed Masum Canat

1980 yılında Konya'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Konya'da tamamladıktan sonra İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesinden 2003 yılında mezun oldu. İç Hastalıkları uzmanlık eğitimini Sağlık Bilimleri Üniversitesi (SBÜ) Taksim Eğitim ve Araştırma Hastanesinde 2009 yılında tamamladı. Uzmanlık devlet hizmet yükümlülüğü görevini Bağcılar Eğitim ve Araştırma Hastanesinde yaptı. Askerlik görevini yedek subay olarak Gölcük Asker Hastanesinde 2010 yılında gerçekleştirdi. Endokrinoloji ve Metabolizma Hastalıkları yan dal uzmanlık eğitimini 2014 yılında SBÜ Şişli Hamidiye Etfal Eğitim ve Araştırma Hastanesinde tamamladı. Yan dal uzmanlığı devlet hizmet yükümlülüğü görevi için 2015-2017 yılları arasında Bayburt Devlet Hastanesinde bulundu. 2017 yılında yan dal uzmanı olarak SBÜ Şişli Hamidiye Etfal Eğitim ve Araştırma Hastanesi Endokrinoloji ve Metabolizma Hastalıkları Kliniğine atandı. 2021 yılında Başasistan, 2024 yılında Doçentlik ünvanı aldı. Evli ve üç çocuk babasıdır.

Prof. Dr. Yüksel Altuntaş

1961 yılında İstanbul'da doğdu. Pertevniyal Lisesinin ardından 1985'te İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesinden mezun oldu. 1999'da Şişli Etfal Eğitim ve Araştırma Hastanesi iç Hastalıkları Klinik Şefliğine atandı. 2003-2005 arasında aynı hastanede başhekimlik görevini yürüttü. Hâlen Endokrinoloji ve Metabolizma Klinik eğitim sorumlusu olan Dr. Altuntaş, Metabolik Sendrom Derneğinin kurucuları arasında yer almaktadır. Türkiye Endokrinoloji ve Metabolizma Derneği, Tıbbi Beslenme ve Egzersiz Metabolizması Çalışma Grubu Kurucu Başkanıdır.

Perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS: Per- and polyfluoroalkyl substances), endokrin bozucu kimyasallar (endocrine-disrupting chemicals, EDC) sınıfında değerlendirilen sentetik bileşiklerdir. Endokrin bozucu kimyasallar; hormonların sentezi, taşınması, reseptörlere bağlanması ve geri bildirim (feed-back) mekanizmaları gibi birçok fizyolojik süreci farklı düzeylerde etkileyebilir (1). Glukoz homeostazı, lipid metabolizması ve tiroid hormon aksı gibi metabolik sistemlerin hormonal düzenlemeyle yakından ilişkili olması, PFAS maruziyetinin bu sistemler üzerindeki olası etkilerini özellikle önemli hâle getirmektedir (2, 3).

PFAS, güçlü karbon–flor bağları nedeniyle kimyasal ve biyolojik olarak oldukça kararlı bileşiklerdir. Endüstriyel üretim, gıda ambalajları, su itici kaplamalar ve yangın söndürme köpükleri gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaları, çevrede yaygın olarak bulunmalarına yol açmıştır. İnsan serumunda uzun yarı ömürlere sahip olmaları ve biyolojik olarak birikebilmeleri, bu maddelere maruziyetin zaman içinde devam ederek vücutta klinik açıdan anlamlı düzeylere ulaşabilmesine neden olabilir (1, 4).

Son yıllarda yapılan epidemiyolojik çalışmalar, PFAS maruziyeti ile gestasyonel diyabet, tip 2 diyabet, dislipidemi ve tiroid fonksiyon parametreleri arasındaki olası ilişkileri incelemiştir. Meta-analizler, bu ilişkilerin bazı metabolik eksenlerde belirli ölçüde tutarlı olabileceğini göstermektedir (2, 3, 5, 6). Bununla birlikte bildirilen etki büyüklükleri genellikle sınırlıdır. Ayrıca doz–yanıt ilişkilerinin çoğu zaman doğrusal olmaması ve maruziyetin genellikle birden fazla kimyasalın birlikte bulunduğu karışımlar şeklinde gerçekleşmesi, PFAS etkilerinin klasik toksikoloji yaklaşımının ötesinde daha kapsamlı bir değerlendirme gerektirdiğini düşündürmektedir (5, 7).

Disglisemi

PFAS, glukoz homeostazını çeşitli mekanizmalar aracılığıyla etkileyebilen çevresel kimyasallardır. Hem epidemiyolojik hem de deneysel çalışmalar, PFAS maruziyetinin insülin direnci, bozulmuş açlık glukozu ve tip 2 diyabet (T2D) gelişimi ile ilişkili olabileceğini göstermektedir (2, 8-10). Bununla birlikte, bu ilişkinin yönü ve büyüklüğü PFAS türüne, maruziyet düzeyine ve maruziyetin yaşamın hangi döneminde gerçekleştiğine bağlı olarak değişebilmektedir.

Gestasyonel disglisemi

Gebelik, fizyolojik insülin direncinin arttığı özel bir metabolik dönemdir ve bu nedenle çevresel endokrin bozucuların etkileri bu dönemde daha belirgin hâle gelebilir. PFAS maruziyetinin gestasyonel diyabet (GDM) riski ile ilişkisini değerlendiren bir meta-analizde, PFAS grubundaki kimyasallardan biri olan perflorooktanoik asit (PFOA) maruziyetinin GDM riskini artırdığı bildirilmiştir (OR = 1.27, 95% CI:

1.02–1.59) (2). Daha güncel sistematik derlemelerde de PFAS maruziyetinin genel olarak GDM riskinde artış ile ilişkili olduğu; özellikle PFOA ve perflorooktansülfonat (PFBS) için doz–yanıt ilişkisinin tanımlandığı gösterilmiştir (9, 10).

Prenatal PFAS maruziyeti ile OGTT parametreleri arasındaki ilişkiyi inceleyen analizlerde PFOA, PFOS ve perflorononanoik asit (PFNA) düzeylerinin OGTT'nin 1. ve 2. saat glukoz değerleri ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (9). Bu bulgular, PFAS etkisinin yalnızca tanısal GDM eşiği ile sınırlı olmayabileceğini ve gebelikte glukoz toleransının daha geniş bir spektrumunu etkileyebileceğini düşündürmektedir. Çevresel kirleticileri genel olarak değerlendiren çalışmalar da PFAS'ların GDM için bağımsız bir risk faktörü olabileceğini desteklemektedir (10, 11).

Erişkin popülasyonda tip 2 diyabet

Genel popülasyonda PFAS ve T2D ilişkisine dair bulgular daha heterojendir. Sistematik derlemeler ve meta-analizler, PFAS maruziyeti ile T2D arasında pozitif bir ilişki olabileceğini ancak çalışmalar arasındaki metodolojik farklılıkların sonuçları etkileyebileceğini vurgulamaktadır (6). Bazı çalışmalarda PFOA için doğrusal olmayan (ters U şeklinde) doz–yanıt ilişkisi bildirilmiştir (12). Bu durum, düşük ve orta düzey maruziyetlerde risk artışı görülürken daha yüksek düzeylerde ilişkinin zayıflayabileceğini veya tersine dönebileceğini düşündürmektedir. Aynı meta-analizde, yaşlı popülasyonda bazı uzun zincirli PFAS türleri (PFDA, PFUdA) ile T2D riski arasında ters yönlü ilişki de bildirilmiştir (12). Bu bulgu, farklı PFAS türlerinin biyolojik etkilerinin birbirinden farklı olabileceğini göstermektedir.

Çocuk ve adölesanlarda glukoz metabolizması

Çocukluk ve adölesan dönem metabolik programlamanın devam ettiği kritik gelişim evreleridir. Zheng ve arkadaşlarının meta-analizinde PFAS maruziyeti ile total kolesterol ve LDL düzeyleri arasında pozitif, HOMA-IR ile ise negatif ilişki bildirilmiştir (13). İnsülin direnci ile ilgili bu çelişkili bulgular, sonuçların gelişimsel bağlam içinde dikkatli şekilde yorumlanması gerektiğini düşündürmektedir.

Metabolomik analiz, bir hücre, doku veya organizmada bulunan küçük moleküllerin (metabolitlerin) kapsamlı biçimde ölçülmesi ve analiz edilmesini ifade eder. Bu tür analizlerde PFAS karışımlarının tirozin metabolizması, yağ asidi biyosentezi ve amino asit metabolizması gibi metabolik yolaklarda değişikliklere yol açabileceği gösterilmiştir (14). Bu bulgular PFAS etkilerinin yalnızca klasik glisemik parametrelerle sınırlı olmayabileceğini düşündürmektedir.

Deneysel ve insan çalışmalarından elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde PFAS kaynaklı disgliseminin aşağıdaki biyolojik mekanizmalar üzerinden gelişebileceği öne sürülmektedir:

- β-hücre disfonksiyonu
- Hepatik insülin sinyal yolaklarında bozulma
- PPAR aracılı lipid–glukoz etkileşimi
- Oksidatif stres ve inflamasyon
- Epigenetik modifikasyonlar

Glukolipid metabolizması üzerine yapılan derlemeler, PFAS maruziyetinin metabolik sendrom bileşenleri ile olan ilişkisinin tek yönlü olmadığını; PFAS türüne ve bireyin metabolik durumuna bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya çıkabileceğini vurgulamaktadır (15).

Tiroid

PFAS'ın tiroid aksı üzerindeki etkileri, hem epidemiyolojik bulgular hem de hücresel ve moleküler çalışmalarla desteklenen çok katmanlı bir biyolojik etkileşime işaret etmektedir. Tiroid hormon dengesi, iyot alımı, tiroglobulin iyodinasyonu, deiyodinaz enzimlerinin aktivitesi, hormonların taşıyıcı proteinlere bağlanması ve hipotalamo-hipofizer geri bildirim mekanizmalarının hassas dengesi ile düzenlenir. Yapılan çalışmalar PFAS'ların bu basamakların birden fazlasını etkileyebildiğini göstermektedir (16, 17).

Epidemiyolojik Bulgular

Adölesan popülasyonda yapılan ve çok sayıda PFAS türünün birlikte değerlendirildiği NHANES temelli karışım analizlerinde, PFAS maruziyeti ile total T3 ve FT4 düzeyleri arasında ilişki olduğu; özellikle total T3 düzeylerinde azalma eğilimi bulunduğu bildirilmiştir (16). Benzer şekilde Avrupa merkezli çalışmalarda da PFAS maruziyeti ile total T3 düzeylerinde azalma arasında ilişki saptanmıştır (18).

Gebelik kohort çalışmalarında maternal PFAS düzeyleri ile FT4 ve TSH arasında ters yönlü ilişkiler bildirilmiş; bazı PFAS türlerinin hem serbest T4 hem de TSH düzeylerinde azalma ile ilişkili olabileceği gösterilmiştir (17, 19). Umbilikal kord kanında total T3 düzeylerinin daha düşük bulunması, fetal tiroid aksının prenatal maruziyete duyarlı olabileceğini düşündürmektedir (20).

Çocuk popülasyonunda yapılan kesitsel çalışmalarda PFAS maruziyeti ile subklinik hipotiroidi arasında ilişki bildirilmiştir (21). Prospektif kohort çalışmalarında ise PFAS maruziyetinin zaman içinde TSH ve FT4 düzeylerindeki değişimlerle ilişkili olabileceği gösterilmiştir (22, 23).

Erişkin erkeklerde ve gebe olmayan kadınlarda yapılan analizlerde ise PFAS maruziyeti ile tiroid hormon düzeyleri arasında doğrusal olmayan ilişki paternleri bildirilmiştir. Bazı PFAS türleri için ters U şeklinde doz–yanıt eğrileri gözlenmiştir (24, 25).

Patofizyolojik Mekanizmalar

PFAS'ların tiroid üzerindeki etkileri birkaç temel biyolojik mekanizma üzerinden açıklanmaktadır:

1) **Taşıyıcı protein ve reseptör etkileşimi:** Prospektif gebelik kohortlarında yapılan moleküler analizler, bazı PFAS türlerinin tiroksin bağlayıcı proteinlere (örneğin transtiretin) tiroksine göre daha yüksek bağlanma afinitesi gösterebildiğini ortaya koymuştur (17). Bu durum dolaşımdaki serbest hormon fraksiyonunu etkileyebilir.

2) **Gen ekspresyonu ve hücresel sinyalizasyon:** Primer tiroid hücre kültürlerinde PFCA'ların PAX8 ve tiroid hormon sentezi ile ilişkili bazı genlerin ekspresyonunu değiştirdiği ve oksidatif stres belirteçlerini artırdığı gösterilmiştir (26). Ayrıca histolojik ve hücresel sinyal analizleri PFAS'ların MAPK ve benzeri proliferatif yolakları etkileyebileceğini düşündürmektedir (27).

3) **cAMP ve TSH sinyal yolu:** Erken yaşam döneminde F-53B maruziyetinin juvenil ratlarda tiroid fonksiyonunu bozduğu ve bu etkinin cAMP sinyal yolu ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (28). Bu bulgu, PFAS'ların tiroid hücresi düzeyinde TSH yanıtını doğrudan etkileyebileceğini düşündürmektedir.

4) **Epigenetik düzenleme:** Maternal PFAS düzeyleri ile plasentada DNA metilasyon değişiklikleri arasında ilişki bildirilmiş; özellikle tiroid hormonları ile ilişkili gen bölgelerinde epigenetik modifikasyonlar saptanmıştır (29).

5) **Hipotalamo-hipofizer-tiroid (HPT) aksı düzeyinde etki:** Editorial ve derleme çalışmalar, PFAS'ların HPT aksı boyunca birden fazla noktada etkileşim gösterebileceğini; hem çevresel hormon dönüşümünü hem de santral geri bildirim mekanizmalarını etkileyebileceğini vurgulamaktadır (1, 4).

Epidemiyolojik ve moleküler bulgular, modern endüstrinin kalıcı mirası olan PFAS bileşiklerinin, insan metabolizmasını hücresel düzeyde yeniden programladığını gösteriyor. Tiroid aksından lipid mekanizmasına, obezite riskinden glukoz intoleransına kadar pek çok hassas dengede popülasyon düzeyinde sapmalara yol açan bu kimyasal karışım krizi; klasik toksikoloji ezberlerini bozarak küresel halk sağlığı politikalarını ve klinik izlem standartlarını kökten bir değişime zorluyor.

Tiroid Nodülleri ve Kanser

Tiroid nodülleri ve papiller tiroid karsinomu (PTC) ile PFAS maruziyeti arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar heterojen sonuçlar bildirmektedir. Bazı karışım analizlerinde nodüler guatr ve PTC riskinde artış gösteren veriler bulunmaktadır (30). Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yürütülen büyük ölçekli prospektif bir kanser tarama kohortunda da bazı PFAS türleri ile tiroid kanseri riski arasında ilişki bildirilmiştir (31). Bununla birlikte, daha geniş sistematik derlemelerde sonuçların tutarsız olduğu ve nedensellik açısından kanıtların sınırlı kaldığı belirtilmektedir (32). Sosyoekonomik düzey ve çevresel maruziyet birlikte değerlendirildiğinde PFAS yükü ile tiroid kanseri arasında ilişki olabileceğini bildiren çalışmalar da mevcuttur (33). Ancak mevcut veriler PFAS'ların doğrudan karsinojenik etki gösterdiğini kesin olarak ortaya koymamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde PFAS maruziyeti, tiroid aksında hem periferal hormon düzeylerinde değişikliklere hem de hücresel düzeyde gen ekspresyonunda ve sinyal yolaklarında modifikasyonlara yol açabilmektedir. Doğum öncesi dönemden erişkinliğe uzanan çalışmalar, bu etkilerin yaşam evresine ve PFAS türüne bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Mekanistik bulgular biyolojik olasılığı desteklemekle birlikte, klinik sonuçların yorumlanmasında doz–yanıt paternleri ve kimyasal karışım etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Dislipidemi

PFAS'ın lipid metabolizması üzerindeki etkileri, metabolik sonuçlar arasında epidemiyolojik açıdan en tutarlı bulguların elde edildiği alanlardan biridir. Farklı coğrafi bölgelerde yürütülen sistematik derlemeler ve meta-analizler, serum PFAS konsantrasyonları ile total kolesterol (TC) ve LDL-kolesterol (LDL-C) düzeyleri arasında pozitif ilişki olduğunu göstermektedir (3, 5, 34, 35). Bu ilişki özellikle uzun zincirli PFAS türleri (örneğin PFOA ve PFOS) için daha belirgin görünmektedir.

Küresel ölçekte yapılan kapsamlı bir meta-analizde, serum PFAS düzeylerindeki artışın TC ve LDL-C düzeylerinde küçük ancak istatistiksel olarak anlamlı artışlarla ilişkili olduğu bildirilmiştir (3). Diğer ana-

lizlerde ise serum PFAS düzeylerindeki dağılımın orta yüzde 50'lik kısmını temsil eden artışa (kuartiller arası aralık) karşılık LDL-C düzeyinde birkaç mg/dL'lik yükselme saptanmıştır (34, 35). Güncel ve metodolojik olarak genişletilmiş bir değerlendirmede, çalışmalar arasında heterojenlik bulunmasına rağmen ilişkinin yönünün büyük ölçüde tutarlı olduğu; ancak etki büyüklüğünün popülasyon özellikleri ve çalışma tasarımına göre değişebileceği vurgulanmıştır (5).

PFAS'ların lipid metabolizması üzerindeki etkileri çoğunlukla karaciğer düzeyinde açıklanmaktadır. Bu bileşiklerin peroksizom proliferatör-aktive edici reseptör alfa (PPAR-α) üzerinden yağ asidi oksidasyonu, lipoprotein sentezi ve kolesterol metabolizmasını etkileyebileceği öne sürülmektedir (3, 35). PPAR-α aktivasyonu hem lipoprotein üretimini hem de kolesterol dönüşümü ile safra asidi sentez yolaklarını etkileyerek dolaşımdaki LDL-C düzeylerinde değişikliklere yol açabilir. Bununla birlikte, insan çalışmalarında bildirilen etki büyüklükleri genellikle sınırlıdır. Bu durum PFAS maruziyetinin klasik bir hiperlipidemi tablosundan ziyade, lipid dağılımında küçük fakat popülasyon düzeyinde anlamlı kaymalara neden olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca farklı PFAS türlerinin biyolojik davranışlarının da farklı olabileceği; özellikle kısa zincirli alternatifler için mevcut verilerin daha sınırlı olduğu bildirilmektedir (3, 34, 35).

Sonuç olarak, mevcut literatür PFAS maruziyeti ile total ve LDL kolesterol düzeyleri arasında yönü genel olarak tutarlı ancak büyüklüğü sınırlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Bu ilişki için biyolojik bir temel olduğu gösterilmekle birlikte, nedenselliğin daha net ortaya konabilmesi için özellikle prospektif ve kimyasal karışımları dikkate alan araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Obezite

PFAS'ın obesojen potansiyeli son yıllarda giderek daha fazla araştırılmaktadır. Çocukluk çağı adiposite paternleri, erişkin dönemde obezite ve kardiyometabolik hastalık riskinin önemli belirleyicilerindendir. Bu nedenle erken yaşam dönemindeki çevresel maruziyetler özel önem taşımaktadır (7, 36–38). PFAS'lar kalıcı organik kirleticiler olup uzun yarı ömürleri ve yaygın çevresel dağılımları nedeniyle hem doğum öncesi hem de doğum sonrası dönemde biyolojik olarak anlamlı iç dozlara ulaşabilmektedir (7, 36).

Epidemiyolojik Bulgular

Avrupa'da yürütülen çok merkezli kesitsel bir çalışmada, ergenlerde PFAS düzeyleri ile vücut kitle indeksi (BMI) arasında genel olarak zayıf ve ters yönlü bir ilişki bildirilmiştir. Özellikle PFOA için negatif ilişkinin istatistiksel olarak sınırda anlamlı olduğu gösterilmiştir (36). Bu bulgular, ergenlik döneminde PFAS maruziyetinin daha düşük BMI ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Buna karşılık, doğum öncesindeki maruziyeti inceleyen sistematik derleme ve meta-analizler daha heterojen sonuçlar sunmaktadır. Stratakis ve arkadaşlarının meta-analizinde prenatal PFAS maruziyeti ile çocukluk BMI arasında genel olarak anlamlı bir ilişki gösterilememiştir (37). Frigerio ve arkadaşlarının daha güncel meta-analizinde ise bazı PFAS türleri (özellikle PFNA) için doğum öncesi maruziyet ile çocukluk BMI ve bel çevresi arasında pozitif ilişki bildirilmiştir; ancak sonuçlar yüksek heterojenite göstermiştir (38). Frangione ve arkadaşlarının çocuk popülasyona odaklanan meta-analizinde doğum öncesi maruziyet için belirgin bir pozitif ilişki saptanmazken, doğum sonrası maruziyet için bazı PFAS türlerinde BMI ile ters yönlü ilişki bildirilmiştir (39).

Bu farklı sonuçlar, maruziyet zamanlaması, PFAS türleri, ölçüm yöntemleri ve yaşa özgü metabolik paternler gibi faktörlerin sonuçları etkileyebileceğini düşündürmektedir.

"Obesojen Hipotezi"

PFAS'lar potansiyel "çevresel obesojenler" arasında değerlendirilmektedir. Mekanistik olarak PPAR-α ve PPAR-γ başta olmak üzere nükleer reseptörler üzerinden adipogenez, yağ asidi oksidasyonu ve lipogenez yolaklarını etkileyebildikleri gösterilmiştir (7). Deneysel modellerde PPAR aktivasyonunun adiposit farklılaşmasını artırabildiği bildirilmiştir; ancak insan çalışmalarında etki yönü tutarlı değildir. Ayrıca PFAS'ların endokrin bozucu özellikleri aracılığıyla tiroid hormonları, seks steroidleri ve glukokortikoid sinyallemesi üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bu durum bazal metabolizma hızı, enerji dengesi ve yağ dağılımı üzerinde dolaylı etkiler oluşturabilir (7, 38). Bazı çalışmalar PFAS maruziyeti ile istirahat metabolik hızında azalma arasında ilişki bildirmiştir; bu durum enerji dengesinin yağ depolanması yönünde kaymasına katkıda bulunabilir. Doğum öncesi maruziyet açısından Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) paradigması önemlidir. Anne karnındayken adiposit öncül hücrelerinin programlanması, epigenetik değişiklikler ve metabolik set-point değişimleri uzun vadeli adiposite riskini etkileyebilir (37, 38). Bununla birlikte, insan çalışmalarında prenatal PFAS maruziyeti ile çocukluk obezitesi arasındaki ilişki henüz tutarlı değildir.

Klinik ve Halk Sağlığı Perspektifi

Mevcut literatür PFAS maruziyeti ile obezite arasında güçlü ve tek yönlü bir ilişki ortaya koymamaktadır. Doğum öncesi maruziyet için bazı çalışmalar pozitif ilişki bildirirken, çocukluk ve ergenlik döneminde ölçülen postnatal maruziyet sıklıkla ters yönlü ilişkilerle rapor edilmiştir. Bu durum, maruziyetin yaşamın farklı dönemlerinde farklı biyolojik etkiler gösterebileceğini düşündürmektedir.

Bildirilen etki büyüklükleri genellikle mütevazıdır. Ancak PFAS maruziyetinin küresel ölçekte yaygın olduğu göz önüne alındığında, popülasyon düzeyinde küçük kaymalar bile anlamlı halk sağlığı sonuçları doğurabilir. Bu nedenle özellikle kimyasal karışımların, non-monotonik doz–yanıt eğrilerinin ve gelişimsel zamanlamanın birlikte değerlendirildiği ileri tasarımlı kohort çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Sonuç olarak PFAS'ların obeziteye neden olma potansiyeli biyolojik olarak olası görünmektedir; ancak insan epidemiyolojisinde elde edilen kanıtlar heterojen olup PFAS türüne ve maruziyet zamanlamasına bağlı olarak değişmektedir. Bu alan, yaşam döngüsü yaklaşımını ve farklı disiplinlerin katkısını gerektiren dinamik bir araştırma alanı olarak önemini korumaktadır.

Sonuç

PFAS'ın endokrin ve metabolik sistemler üzerindeki etkileri, klasik toksikoloji yaklaşımının ötesinde değerlendirilmesi gereken çok katmanlı bir biyolojik etkileşime işaret etmektedir. Bu derlemede ele alınan disglisemi, tiroid fonksiyonları, dislipidemi ve obezite başlıkları birlikte değerlendirildiğinde, PFAS maruziyetinin

Bilimsel veriler, modern endüstrinin kalıcı mirası olan PFAS bileşiklerinin tek bir hastalık kategorisiyle sınırlı kalmayıp insan metabolizmasını hücresel düzeyde sabote ettiğini kanıtlıyor. Tiroid aksındaki hormonal sapmalardan popülasyon düzeyindeki kardiyovasküler risk artışlarına, gebelik dönemindeki glikoz intoleransından erken yaşam evrelerindeki kronik obezite programlamasına kadar uzanan bu sessiz kriz, geleneksel risk değerlendirme modellerini geçersiz kılıyor.

farklı fakat birbiriyle bağlantılı metabolik eksenler üzerinde etkili olabileceği görülmektedir.

Disglisemi açısından özellikle gebelik dönemine ait veriler, prenatal PFAS maruziyetinin glukoz toleransı üzerinde ölçülebilir etkiler oluşturabileceğini düşündürmektedir. Tip 2 diyabet için mevcut bulgular daha heterojendir. Bunun önemli nedenlerinden biri, doz–yanıt ilişkilerinin her zaman doğrusal olmaması ve bireylerin genellikle tek bir kimyasala değil, PFAS karışımlarına maruz kalmasıdır. Dislipidemi alanında ise serum PFAS düzeyleri ile total kolesterol ve LDL-kolesterol arasında yönü büyük ölçüde tutarlı, ancak büyüklüğü sınırlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu etki tek tek bireyler için klinik açıdan dramatik sonuçlar doğurmayabilir; ancak geniş popülasyonlarda kardiyovasküler risk dağılımında küçük fakat anlamlı kaymalara yol açma potansiyeli taşımaktadır.

Tiroid ekseni, PFAS maruziyetine karşı biyolojik olarak en duyarlı sistemlerden biri gibi görünmektedir. Moleküler bağlanma çalışmalarından epigenetik değişikliklere, hücresel sinyal yolaklarından uzun süreli kohort verilerine kadar uzanan bulgular, PFAS'ların hipotalamo-hipofizer-tiroid aksının farklı basamaklarında etkileşim gösterebileceğini düşündürmektedir. Buna karşın, tiroid kanseri ile PFAS maruziyeti arasındaki ilişki için mevcut veriler heterojen olup güçlü bir nedensellik çıkarımı yapmak için henüz yeterli değildir. Obezite açısından ise prenatal ve postnatal maruziyetin farklı yönlerde sonuçlar verebilmesi, yaşam evresinin ve maruziyet zamanlamasının önemli belirleyiciler olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular birkaç önemli noktaya işaret etmektedir. İlk olarak, PFAS etkileri çoğu zaman küçük etki büyüklükleri ile karakterizedir; ancak maruziyetin küresel ölçekte yaygın olması nedeniyle halk sağlığı açısından anlamlı sonuçlar doğurabilir. İkinci olarak, doğrusal olmayan doz–yanıt ilişkileri ve kimyasal karışım etkileri, geleneksel risk değerlendirme yaklaşımlarının her zaman yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Üçüncü olarak, prenatal dönem ve çocukluk gibi erken yaşam evreleri metabolik programlama açısından kritik pencereler olup maruziyet değerlendirmelerinde bu zaman boyutunun dikkate alınması gerekmektedir.

Politika ve düzenleyici perspektiften bakıldığında, PFAS'ların yalnızca tek tek kimyasallar olarak değil, bir kimyasal

sınıf ve karışım etkileri çerçevesinde değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Çevresel izleme programları, içme suyu standartları ve gıda ile temas eden materyallere ilişkin düzenlemeler yalnızca akut toksisiteyi değil, uzun dönemli endokrin ve metabolik etkileri de kapsayacak şekilde güncellenmelidir. Ayrıca klinik araştırmalar ile çevresel epidemiyoloji arasındaki iş birliğinin güçlendirilmesi, biyobelirteç temelli izlem çalışmalarının yaygınlaştırılması ve uzun süreli kohort çalışmalarının desteklenmesi bu alandaki bilgi birikimini artıracaktır.

Sonuç olarak PFAS'lar, tek bir hastalık kategorisi ile sınırlı olmayan ve metabolik ağların farklı noktalarını etkileyebilen çevresel faktörlerdir. Mevcut kanıtlar güçlü nedensellik çıkarımlarından ziyade dikkatli ve temkinli bir değerlendirme gerektirse de, giderek artan literatür PFAS maruziyetinin endokrin ve metabolik sağlık açısından göz ardı edilemeyecek bir çevresel belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bilimsel araştırmaların multidisipliner bir yaklaşımla sürdürülmesi ve düzenleyici politikaların yeni kanıtlar doğrultusunda geliştirilmesi önümüzdeki dönemde önemli bir gereklilik olacaktır.

Kaynaklar

1) Duntas LH, Chiovato L. Editorial: Thyroid endocrine disruptors. Front Endocrinol (Lausanne). 2025;16:1554563.

2) Wang J, et al. Association between per- and polyfluoroalkyl substances and risk of gestational diabetes mellitus. Int J Hyg Environ Health. 2022;240:113904.

3) Ji C, et al. Global Serum Per- and Polyfluoroalkyl Substances Exposures and Their Correlation with Lipids: A Systematic Review and Meta-Analysis. Environ Sci Technol. 2025;59(37):19611-19629.

4) Li Z, et al. Environmental pollutants as emerging disruptors of thyroid function: Mechanisms and early-life risks. Ecotoxicol Environ Saf. 2026;309:119581.

5) Hussey MR, et al. The relationship between PFAS exposure and dyslipidemia: an updated review, meta-analysis, and evaluation of bias. Eur J Epidemiol. 2025;40(9):995-1029.

6) Gui SY, et al. Association between per- and polyfluoroalkyl substances exposure and risk of diabetes: a systematic review and meta-analysis. J Expo Sci Environ Epidemiol. 2023;33(1):40-55.

7) Ribeiro CM, et al. Exposure to endocrine-disrupting chemicals and anthropometric measures of obesity: a systematic review and meta-analysis. BMJ Open. 2020;10(6):e033509.

8) Wang D, et al. Correlation of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance levels during pregnancy with gestational diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis. BMC Pregnancy Childbirth. 2025;25(1):448.

9) Quan F, et al. Associations of prenatal per- and polyfluoroalkyl substances exposure with glucose homeostasis and gestational diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. J Hazard Mater. 2026;501:140890.

10) Yao X, et al. Environmental pollutants exposure and GDM: Evidence from epidemiological and experimental studies. Chemosphere. 2023;332:138866.

11) Yan D, et al. Endocrine-disrupting chemicals and the risk of gestational diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis. Environ Health. 2022;21(1):53.

12) Wang M, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances and type 2 diabetes among older adults: Synthesizing cross-sectional population study and meta-analysis. Int J Hyg Environ Health. 2025;266:114560.

13) Zheng Q, et al. The effect of PFAS exposure on glucolipid metabolism in children and adolescents: a meta-analysis. Front Endocrinol. 2024;15:1261008.

14) Goodrich JA, et al. Metabolic signatures of youth exposure to mixtures of PFAS. Environ Health Perspect. 2023;131:027005.

15) Zare Jeddi M, et al. PFAS and metabolic syndrome. Rev Environ Health. 2022;37:211-228.

16) Begum TF, et al. Assessing PFAS mixture exposure and thyroid function in U.S. adolescents: insights from NHANES 2011-2012. Environ Sci Pollut Res Int. 2025;32(46):26114-26125.

17) Zhou Y, et al. Association and binding interaction between per- and polyfluoroalkyl substances and maternal thyroid hormones: A case study based on a prospective birth cohort in Wuxi, China. Environ Res. 2025;275:121439.

18) Noyes TS, et al. Per and polyfluoroalkyl substances affect thyroid hormones for people with a history of exposure from drinking water. Sci Rep. 2025;15(1):12502.

19) Liu C, et al. Associations of per- and polyfluoroalkyl substances and alternatives with thyroid hormones in pregnant women: A cross-sectional study in China. Ecotoxicol Environ Saf. 2025;308:119498.

20) Song Y, et al. Association of per-and polyfluoroalkyl substances with thyroid hormones in the umbilical cord blood of neonates born by spontaneous delivery. Front Public Health. 2025;13:1528588.

21) He L, et al. Associations of per- and polyfluoroalkyl substances and alternatives with subclinical hypothyroidism in children: A cross-sectional study in China. Sci Total Environ. 2024;957:177809.

22) Sultan M, et al. Association of exposure to personal care product chemicals with maternal thyroid health: a prospective cohort study integrated with targeted risk assessment for environmental chemicals strategy. Environ Int. 2026;208:110121.

23) Lin CY, et al. Longitudinal PFAS exposure and thyroid function trajectories in Taiwanese youth: a 10-year prospective cohort study. Environ Int. 2026;208:110106.

24) Zhang B, et al. The Association Between Per- and Polyfluoroalkyl Substances Exposure and Thyroid Hormones in Men and Non-Pregnant Women: A Systematic Review and Meta-Analysis. Toxics. 2025;13(3):214.

25) Chung SM, et al. Non-linear associations between exposure to a mixture of per- and polyfluoroalkyl substances and thyroid hormone levels in Korean adults. Environ Int. 2025;201:109585.

26) Coperchini F, et al. Evaluation of the effects of PFCAs on spheroid thyroid cells in primary culture: Effects on thyroid function-related genes, tumorigenesis and oxidative stress. Environ Toxicol Pharmacol. 2025;119:104799.

27) Hartmann HA, et al. PFAS Alter Thyroid Histology and Cellular Signaling In Vitro and In Vivo. J Endocr Soc. 2025;10(2):bvaf210.

28) Li SP, et al. Effects of early-life F-53B exposure on thyroid function in juvenile rats: The role of the cAMP signaling pathway. J Hazard Mater. 2025;489:137751.

29) Xie Z, et al. Maternal per- and polyfluoroalkyl substance concentrations and placental DNA methylation of thyroid hormone-related genes. J Hazard Mater. 2025;489:137545.

30) Sun Z, et al. Environmental exposure to mixtures of per and polyfluoroalkyl substances in Northeast China: exploring links to nodular goiter and papillary thyroid carcinoma. Environ Health. 2025;24(1):38.

31) Jung EM, et al. Serum per- and polyfluoroalkyl substances in relation to circulating thyroxine levels and thyroid cancer risk: results from the Prostate, Lung, Colorectal and Ovarian Cancer Screening Trial Cohort. Environ Int. 2026;207:109991.

32) Sassano M, et al. Exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and lung, head and neck, and thyroid cancer: A systematic review and meta-analysis. Environ Res. 2025;266:120606.

33) Wild LE, et al. Socioeconomic Disparities and Risk of Papillary Thyroid Cancer Associated with Environmental Exposure to Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Florida. Int J Environ Res Public Health. 2025;22(8):1290.

34) Liu B, et al. Associations between Per- and Polyfluoroalkyl Substances Exposures and Blood Lipid Levels among Adults—A Meta-Analysis. Environ Health Perspect. 2023;131(5):56001.

35) Song X, et al. Association between exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and levels of lipid profile based on human studies. Rev Environ Health. 2024;40(1):133-145.

36) Schillemans T, et al. Cross-sectional associations between exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and body mass index among European teenagers in the HBM4EU aligned studies. Environ Pollut. 2023;316(Pt 1):120566.

37) Stratakis N, et al. Prenatal exposure to persistent organic pollutants and childhood obesity: a systematic review and meta-analysis of human studies. Obes Rev. 2022; 23(Suppl 1): e13383.

38) Frigerio G, et al. Prenatal and childhood exposure to per-/polyfluoroalkyl substances (PFASs) and its associations with childhood overweight and/or obesity: a systematic review with meta-analyses. Environ Health. 2023;22(1):56.

39) Frangione B, et al. Exposure to perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and pediatric obesity: a systematic review and meta-analysis. Int J Obes (Lond). 2024;48(2):131-146.

PFAS ve maligniteler: Türkiye'den küresel perspektife görünmez tehlike

Doç. Dr. Yasin Kutlu

1987 yılında Samsun, Ladik'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Güngören Kemal Kaya İlköğretim Okulunda, lise eğitimini İzzet Ünver Lisesinde tamamladı. 2011 yılında Trakya Üniversitesi Tıp Fakültesinden mezun oldu. 2018 yılında SBÜ Okmeydanı Eğitim ve Araştırma Hastanesinden iç hastalıkları uzmanlığını aldı. 2023 yılında İstanbul Medipol Üniversitesinden tıbbi onkoloji uzmanlığını aldı. 2025 yılında tıbbi onkoloji alanında doçent ünvanını aldı. Hâlen Medipol Mega Üniversite Hastanesi tıbbi onkoloji kliniğinde eğitim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), 1940'lı yıllardan itibaren endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlanan, suya, yağa ve ısıya karşı olağanüstü dirençli sentetik kimyasallardır. En iyi bilinen üyeleri perflorooktanoik asit (PFOA) ve perflorooktansülfonik asit (PFOS) olup, günümüzde 10.000'den fazla PFAS türevi tanımlanmıştır (1). "Forever chemicals" yani "sonsuz kimyasallar" olarak adlandırılmalarının nedeni, doğada biyodegradasyona uğramamaları ve çevresel yarı ömürlerinin on yıllarla ifade edilmesidir.

Başlangıçta konfor, hijyen ve güvenlik sağlayan ürünler olarak hayatımıza giren PFAS'lar, teflon kaplamalar, yangın söndürme köpükleri, tekstil ürünleri, gıda ambalajları ve kozmetik ürünlerde yoğun biçimde kullanılmış ancak bugün gelinen noktada sadece çevresel bir sorun değil; uzun vadeli kanser riski taşıyan küresel bir halk sağlığı tehdidi olarak değerlendirilmektedir. PFAS maruziyetiyle ilişkili kardiyometabolik, üreme ve immün sistem etkilerine ek olarak, son yıllarda PFAS maruziyeti ile en tutarlı epidemiyolojik ilişki böbrek ve testis kanseri için bildirilmiştir. Tiroid, meme ve hematolojik maligniteler için ise literatürde sinyal oluşturan ancak heterojen ve nedensellik açısından daha sınırlı veriler bulunmaktadır (2).

PFAS'ların Kimyasal Özellikleri ve Maruziyet Yolları

PFAS'ların temel yapısında karbon-flor bağları bulunur. Bu bağlar, organik kimyada bilinen en güçlü bağlardan biridir ve PFAS'ları ısıya, aside, suya ve yağa son derece dayanıklı hâle getirir. Bu dayanıklılık, endüstride büyük avantaj sağlarken çevre ve insan sağlığı açısından ciddi bir dezavantaja dönüşür: PFAS'lar doğada parçalanmaz, toprak ve suda onlarca yıl kalabilir, besin zinciri boyunca taşınabilir.

İnsanlarda PFAS maruziyeti başlıca şu yollarla gerçekleşmektedir: 1) İçme suyu (özellikle endüstriyel bölgeler çevresinde), 2) Gıda zinciri (balık, süt ürünleri, et), 3) Gıda ambalajları, 4) Kozmetik ve kişisel bakım ürünleri, 5) Ev eşyaları (yanmaz kaplamalar, halılar, koltuk kumaşları).

PFAS'ların suda tamamen çözünür olması, yer altı sularına kolayca karışmasına ve geniş coğrafyalara yayılmasına neden olmaktadır. Bu yönüyle PFAS, klasik ağır metallerden farklı olarak daha sinsi ve yaygın bir maruziyet profili çizmektedir. Bu yaygınlık, PFAS'ı klasik "mesleki maruziyet" kavramının dışına taşır. Bugün PFAS maruziyeti, tüm toplumun paylaştığı kronik bir çevresel yük hâline gelmiştir.

PFAS ve Kanser: Biyolojik Mekanizmalar

PFAS'ların serbest radikal oluşumunu artırdığı, endokrin sistemi bozduğu ve hücresel proliferasyonu tetiklediği gösterilmiştir. Özellikle karaciğer, tiroid ve gonadal dokularda hormon sinyal yolaklarını etkileyerek kanser gelişimi için uygun biyolojik zemin oluşturabilmektedir (3).

PFAS maruziyetinin mitokondriyal disfonksiyon ve reaktif oksijen türlerinde artışa yol açtığı, bunun da DNA hasarı ve genomik instabiliteyi artırdığı bilinmektedir. Özellikle PFOS ve PFOA'nın tiroid hormon metabolizmasını bozduğu ve TSH düzeylerinde değişikliklere yol açtığı gösterilmiştir. Bu durum, tiroid maligniteleri açısından önemli bir biyolojik bağlantı sunmaktadır. Bunun yanı sıra bazı PFAS türleri hücresel büyüme sinyallerini etkileyerek anormal proliferasyonu tetikleyebilmektedir. Bu da uzun vadede malign transformasyon riskini artırabilir.

Hangi Kanserlerle İlişkili?

Son 15 yılda yapılan geniş çaplı kohort ve olgu-kontrol çalışmalarında, PFAS maruziyeti ile bazı kanser türleri arasında doz arttıkça güçlenen, biyolojik olarak anlamlı ve bilimsel olarak tutarlı ilişkiler saptanmıştır. En güçlü kanıtlar böbrek ve testis kanseri için mevcutken, tiroid, meme ve hematolojik maligniteler için giderek güçlenen veriler bulunmaktadır (2-6).

Böbrek Kanseri: PFAS-kanser ilişkisinin en güçlü olduğu malignite renal hücreli karsinomdur (RCC). Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yürütülen ve yaklaşık 70.000 kişiyi kapsayan C8 Health Project çalışmasında, PFOA maruziyeti ile böbrek kanseri arasında doz bağımlı ve nedenselliğe yakın ("probable link") bir ilişki tanımlanmıştır (2, 4). Ayrıca kimya tesislerine yakın bölgelerde yaşayan bireylerde yapılan coğrafi analizlerde, içme suyundaki PFOA konsantrasyonu arttıkça RCC insidansının da anlamlı biçimde yükseldiği gösterilmiştir (4). Barry ve arkadaşlarının endüstri işçileri üzerinde yaptığı analizde de, yüksek serum PFOA düzeylerinin RCC riskini anlamlı şekilde artırdığı bildirilmiştir (5). Bu ilişki, PFAS'ların renal tübüler hücrelerde birikmesi, oksidatif stres artışı ve PPAR-α aktivasyonu gibi mekanizmalar ile biyolojik olarak da desteklenmektedir (3).

Testis Kanseri: Testis kanseri, PFAS ile ilişkisi en güçlü gösterilen ikinci malignitedir. Özellikle PFOS ve PFOA düzeyleri ile testiküler germ hücreli tümörler arasında anlamlı ilişki bildirilmiştir (2, 5). C8 kohortunda testis kanseri için de "probable link" tanımlanmış, genç erişkin erkeklerde PFAS maruziyetinin gonadal hormon dengesini bozarak tümör gelişimini kolaylaştırabileceği öne sürülmüştür (2). PFAS'ların Leydig hücre fonksiyonlarını baskıladığı, testosteron metabolizmasını değiştirdiği ve spermatogenez üzerinde toksik etki oluşturduğu deneysel çalışmalarla da gösterilmiştir (3).

Tiroid Kanseri: Tiroid kanseri insidansındaki küresel artışın tamamı tanı sıklığındaki artış ve aşırı tanı ile açıklanamamakta; endokrin bozucu kimyasallara maruziyet giderek daha fazla sorgulanmaktadır. PFAS'lar tiroid hormon taşıyıcı proteinlerine bağlanabilmekte, TSH düzeylerini etkileyebilmekte ve tiroid hücre proliferasyonunu artırabilmektedir (3).

PFAS'ların temel yapısında karbon-flor bağları bulunur. Bu bağlar, organik kimyada bilinen en güçlü bağlardan biridir ve PFAS'ları ısıya, aside, suya ve yağa son derece dayanıklı hâle getirir. Bu dayanıklılık, endüstride büyük avantaj sağlarken çevre ve insan sağlığı açısından ciddi bir dezavantaja dönüşür: PFAS'lar doğada parçalanmaz, toprak ve suda onlarca yıl kalabilir, besin zinciri boyunca taşınabilir.

Finlandiya ve ABD kaynaklı kohort çalışmalarında, yüksek serum PFAS düzeyleri ile papiller tiroid kanseri riski arasında anlamlı ilişki bildirilmiştir (2, 6). Ancak bazı popülasyon çalışmalarında istatistiksel anlamlılık saptanamaması nedeniyle bu ilişki hâlen orta düzey kanıt kategorisinde değerlendirilmektedir (6).

Meme Kanseri ve Hematolojik Maligniteler: PFAS'ların östrojen reseptör sinyal yolaklarını dolaylı biçimde etkilediği, adipoz dokuda birikebildiği ve epigenetik düzeyde tümör baskılayıcı genleri susturabildiği gösterilmiştir (3). Bu mekanizmalar üzerinden meme kanseri gelişimine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Son yıllarda yayımlanan epidemiyolojik çalışmalarda, özellikle hormon reseptör pozitif meme kanseri alt gruplarında bazı PFAS türleri ile risk artışı saptanmıştır (6). Ancak genel popülasyonda sonuçlar heterojen olup nedensellik henüz kesinleşmemiştir. PFAS maruziyeti ile Non-Hodgkin lenfoma arasındaki ilişki meta-analizlerle desteklenmiştir (6). Ayrıca maternal PFAS maruziyeti ile çocukluk çağı akut lösemileri arasında ilişki bildiren çalışmalar giderek artmaktadır.

Türkiye'de PFAS: Mevcut Durum

Türkiye'de PFAS maruziyetine ilişkin veriler henüz sınırlı olmakla birlikte, son yıllarda içme suyu, şişe suyu, yüzey suyu ve sucul ürünlerde yapılan çalışmalar ölçülebilir düzeyde PFAS varlığını ortaya koymuştur. Endirlik ve arkadaşlarının Türkiye'nin 33 farklı ilinden iki farklı dönemde topladığı 94 musluk suyu ve 26 farklı marka şişe suyu örneğinde 10 farklı PFAS bileşiği araştırılmıştır. Çalışmada musluk sularında en sık saptanan bileşikler PFHxA, PFBS ve PFPeA olarak bildirilmiş; toplam PFAS konsantrasyonu musluk sularında 0.08–11.27 ng/L aralığında bulunmuştur. Şişe sularında düzeyler genel olarak daha düşük izlenmiştir (7).

Daha güncel olarak, Beyşehir ve Eğirdir gölleri ile Marmara Bölgesi yüzey sularında yapılan çalışmada PFOA ve PFOS tüm yüzey suyu örneklerinde saptanmıştır. Bu çalışma özellikle önemlidir; çünkü Beyşehir ve Eğirdir gölleri Türkiye'nin önemli içme suyu kaynakları arasında yer almakta, Marmara Bölgesi ise nüfus ve endüstriyel yoğunluk açısından yüksek riskli bir bölgeyi temsil etmektedir. Çalışmada PFOA konsantrasyonlarının yaklaşık 1.77–6.71 ng/L, PFOS konsantrasyonlarının ise LOQ altı ile 3.27 ng/L arasında değiştiği bildirilmiştir. Bazı balık örneklerinde de PFOS ve PFOA saptanması, sucul ekosistemlerde biyobirikim potansiyeline işaret etmektedir (8).

Bu veriler Türkiye'de yaygın ve yüksek düzeyli bir maruziyetin kanıtı olarak yorumlanmamalıdır; ancak PFAS'ın çevresel örneklerde ölçülebilir olduğunu ve sistematik izleme gereksinimini ortaya koymaktadır. Türkiye'de temel sorunlar şunlardır: I) PFAS için rutin su analizlerinin yapılmaması, II) Yasal sınır değerlerin net biçimde tanımlanmamış olması, III) Onkolojik verilerle çevresel maruziyetin entegre edilmemesi. Bu durum, Türkiye'de PFAS ilişkili kanserlerin tanımlanmasını zorlaştırmakta ve gerçek riskin göz ardı edilmesine yol açmaktadır.

Gelişmiş Ülkelerde Mevcut Durum

Amerika Birleşik Devletleri: ABD'de 70 milyondan fazla insanın PFAS içeren içme suyuna maruz kaldığı tahmin edilmektedir. EPA, 2023 yılında PFOA ve PFOS için içme suyunda sınır değeri neredeyse "sıfıra yakın" seviyelere indirmiştir.

Avrupa Birliği: AB, 2024 itibarıyla 10.000'den fazla PFAS bileşiğinin aşamalı olarak yasaklanmasını öngören tarihteki en geniş kimyasal kısıtlama paketini uygulamaya koymuştur (9). İsveç, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde PFAS'a bağlı kanser kümelenmeleri (cancer cluster) çevresel epidemiyoloji kapsamında resmen tanımlanmıştır.

Tablo 1. PFAS maruziyeti açısından Türkiye ve gelişmiş ülkeler arasındaki farklılıklar

Başlık	Türkiye	Gelişmiş Ülkeler
Yasal Sınır Değer	Belirsiz	Net ve katı
Rutin Ölçüm	Yok denecek kadar az	Yaygın
Kanser Kayıtları ile Entegrasyon	Yok	Var
Halk Bilinci	Düşük	Yüksek

Bu tablo, Türkiye'de PFAS maruziyetinin boyutunu değerlendirebilmek için sistematik çevresel ölçüm, insan biyomonitorizasyonu ve kanser kayıtlarıyla entegre epidemiyolojik çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Gelecekte Nasıl Bir Onkolojik Tablo ile Karşılaşabiliriz?

PFAS'ların çevresel kalıcılığı, biyobirikim potansiyeli ve uzun latent dönemli hastalıklarla olası ilişkisi nedeniyle, maruziyetin erken dönemde tanımlanması ve izlenmesi önemlidir. Burada kritik nokta, PFAS'ların latent etkilerinin uzun yıllar sonra ortaya çıkmasıdır. Bu uzun latent süre göz önüne alındığında, PFAS maruziyetinin onkolojik yansımalarının tam anlamıyla gözlenebilmesi için uzun süreli prospektif kohort çalışmaları gerekmektedir. Mevcut maruziyetin ilerideki kanser yükü üzerindeki etkisini tahmin etmek için matematiksel modelleme çalışmaları yürütülmektedir; bu çalışmalardan elde edilecek veriler gelecekteki tarama politikalarını şekillendirecektir. Bununla birlikte Türkiye için mevcut veriler, belirli kanser türlerinde geleceğe dönük nicel bir artış öngörüsü yapmaya yeterli değildir.

PFAS, "Görünmez Bir Kanserojen" mi?

Klasik kanserojenlerden farklı olarak PFAS maruziyeti: 1) Sessizdir, 2) Günlüktür, 3) Çoğu zaman fark edilmez. Sigara, asbest veya radyasyon gibi risk faktörleri belirgin ve ölçülebilirken, PFAS "normal hayatın içine gizlenmiş" bir kanserojen profilini temsil etmektedir. Bu yönüyle PFAS, geleceğin en önemli çevresel onkoloji problemlerinden biri olmaya adaydır. Türkiye açısından bakıldığında, sanayileşmenin hızlandığı ancak çevresel denetimlerin aynı hızla güçlenmediği bir geçiş dönemindeyiz. Bu durum, önümüzdeki yıllarda PFAS ilişkili kanserlerin tanı aşamasında "gecikmiş farkındalık" şeklinde karşımıza çıkma riskini artırmaktadır.

Ne Yapılmalı?

- Türkiye'de PFAS için ulusal limit değerler acilen tanımlanmalıdır.
- Kanser kayıt sistemleri ile çevresel maruziyet haritaları entegre edilmelidir.
- Riskli bölgelerde öncelikli yaklaşım, çevresel ölçümlerin, içme suyu analizlerinin, serum PFAS biyomonitorizasyonunun ve kanser kayıt sistemiyle ilişkilendirilmiş izlemin güçlendirilmesi olmalıdır.
- Onkologlar, çevresel maruziyeti hasta öyküsünün rutin bir parçası hâline getirmelidir.

Sonuç

PFAS'lar, çevresel kalıcılıkları, biyobirikim potansiyelleri ve insan sağlığı üzerindeki olası uzun dönemli etkileri nedeniyle giderek daha fazla önem kazanan bir kimyasal maruziyet grubudur. Mevcut bilimsel veriler, özellikle PFOA maruziyeti ile böbrek ve testis kanseri arasında daha tutarlı ilişkiler bulunduğunu; diğer maligniteler için ise kanıt düzeyinin daha sınırlı ve heterojen olduğunu göstermektedir.

Türkiye'de PFAS'a ilişkin çevresel ölçümler, içme suyu ve yüzey sularında ölçülebilir düzeyde kontaminasyon bulunduğunu ortaya koymakla birlikte, bu veriler ulusal maruziyet yükünü veya kanser insidansı üzerindeki etkisini belirlemek için yeterli değildir. Bu nedenle Türkiye için öncelikli ihtiyaç; içme suyu ve gıda zincirinde sistematik PFAS izlemi, insan biyomonitorizasyonu, yüksek riskli bölgelerin çevresel haritalanması ve kanser kayıtlarıyla entegre epidemiyolojik araştırmalardır.

Bu çerçevede PFAS konusu, alarmist bir yaklaşımdan ziyade, ihtiyatlılık ilkesi temelinde ele alınması gereken önemli bir çevresel onkoloji ve halk sağlığı başlığıdır.

Kaynaklar

1) Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). PFAS Global Database. Published 2023. https://www.oecd.org/chemicalsafety/pfas-global-database (Erişim Tarihi: 19.01.2026).

2) Steenland K, Fletcher T, Savitz DA. Epidemiologic evidence on the health effects of perfluorooctanoic acid (PFOA). Environ Health Perspect. 2020;128(2):026001.

3) Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Perfluoroalkyls (PFOS and PFOA). US Department of Health and Human Services; 2021.

4) Vieira VM, Hoffman K, Shin HM, Weinberg JM, Webster TF, Fletcher T. Perfluorooctanoic acid exposure and cancer outcomes in a contaminated community: A geographic analysis. Environ Res. 2013;126:81-89.

5) Barry V, Winquist A, Steenland K. Perfluorooctanoic acid (PFOA) exposures and incident cancers among adults living near a chemical plant. Occup Environ Med. 2015;72(5):353-359.

6) DeToma G, et al. Perfluoroalkyl substances and risk of non-Hodgkin lymphoma: A meta-analysis. Environ Int. 2021;146:106214.

7) Ünlü Endirlik B, Bakır E, Boşgelmez İİ, Eken A, Narin İ, Gürbay A. Assessment of perfluoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey. Chemosphere. 2019;235:1162-1171.

8) Ikizoglu B. PFOA and PFOS Pollution in Surface Waters and Surface Water Fish. Water. 2024; 16(16):2342.

9) European Chemicals Agency (ECHA). Restriction Proposal for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Published 2024.

Mikro/nanoplastik tespit teknolojileri ve halk sağlığı risklerinin değerlendirilmesi

Prof. Dr. Güleda Engin

Imperial College (İngiltere), Kimya ve Proses Mühendisliği Bölümünden doktora derecesini 2000 yılında aldı. 2012 yılından itibaren Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde görev yapmaktadır. İlgi alanları arasında ileri teknolojilerle atık su arıtımı, mikrokirletici giderimi, mikroplastik kirliliği ve su kalitesi değerlendirmesi yer almaktadır. Hâlen, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü olarak görev yapmaktadır.

Sanayi devrimiyle ivme kazanan ve özellikle 1950'lerden sonra 'Plastik Çağı' olarak adlandırılan dönem, modern hayatın konforunu artırırken küresel ölçekte bir çevre krizini de beraberinde getirmiştir. Doğada yüzyıllarca bozulmadan kalabilen sentetik polimerlerin yıllık üretiminin, 1950'lerde 2 milyon ton iken bugün 400 milyon tonu aşması, dünyamızın en el değmemiş noktalarında dahi kümülatif bir kirlilik yükü oluşturmuştur (1).

Plastik malzemelerin yaygın kullanımı endüstriyel ve teknolojik ilerlemeleri desteklemiş olmakla beraber, verimsiz atık yönetim sistemleri bu ilerlemeyi uzun süreli bir çevre yüküne dönüştürmüştür. Nitekim, üretilen plastik atıkların sadece yaklaşık yüzde 9'unun geri dönüştürülebildiği, büyük çoğunluğunun ise depolama sahalarında biriktiği veya nihai alıcı ortam olan su ekosistemlerine ulaştığı bilinmektedir (2). Karasal ve sucul ekosistemlere giren bu malzemeler, fotodegradasyon, mekanik aşınma ve biyolojik bozunma süreçlerine maruz kalarak daha küçük parçacıklara ayrışmaktadır (2). Bu parçalanma süreci, literatürde çapı 5 mm'den küçük parçacıklar olarak tanımlanan mikroplastiklerin (MP) oluşumuna neden olur. Boyut 1 µm'nin altına indiğinde ise parçacıklar 'nanoplastik' olarak tanımlanmakta ve fizikokimyasal davranışları dramatik ölçüde değişmektedir. Malzemenin boyutu küçüldükçe, etkilediği organizma çeşitliliği artmakta, toksisite potansiyeli yükselmekte, ancak tespiti teknik olarak zorlaşmaktadır. Son dönemde yapılan çalışmalar, kentsel ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan bu kirleticilerin karmaşık taşınma yolları ile ekosistemde yayıldığını ve hem toprak hem de su matrislerinde kalıcı hâle geldiğini göstermektedir (3).

Plastik kirliliğinin çevresel kaderini ve toksikolojik etkilerini anlamak, bu kirleticilerin doğru sınıflandırılmasına ve izlenmesine bağlıdır. Kaynaklarına göre mikroplastikler genel olarak 'birincil' ve 'ikincil' olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğrudan mikro boyutta üretilenler birincil, büyük plastik atıkların çevresel etkenlerle parçalanması sonucu oluşanlar ise ikincil plastiklerdir. Bu makalede, söz konusu yeni nesil kirliliğin tespitindeki metodolojik zorluklar ile insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri ele alınmıştır (4).

Örnekleme, Ekstraksiyon ve Ön Hazırlık Süreçleri

Güvenilir bir mikroplastik analizinin temeli, su, toprak veya biyolojik doku fark etmeksizin hedef matrisin dinamiklerine uygun ve temsiliyeti yüksek bir örnekleme stratejisiyle atılır. Su kolonunda 'Manta' ağları veya hacimsel pompalar, karasal ortamlarda ise karot örnekleyiciler kullanılırken; insan sağlığına yönelik araştırmalarda kan, doku, dışkı ve plasenta gibi biyolojik numunelerin alımı çok daha hassas ve etik prosedürlere bağlı süreçler gerektirmektedir (5, 6). Ayrıca, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da vurgulanan mikroplastiklerin 'her yerde bulunurluğu' (ubiquity) sebebiyle (7), laboratuvar ortamından veya ekipmanlardan kaynaklanabilecek çapraz kontaminasyon riskini minimize edecek referans numune kontrollerinin de gerçekleştirilmesi önemlidir.

Numune alımını takiben, hedef polimerlerin enstrümantal cihazlarda (FTIR, Raman, LDIR vb.) tanımlanabilmesi için, organik ve inorganik safsızlıklardan izole edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada, numunenin türüne göre özelleştirilmiş 'kimyasal degradasyon' ve 'yoğunluk

ayrımı' kombinasyonları uygulanır. Organik madde gideriminde özellikle biyolojik dokularda ve humuslu topraklarda, polimer yapısına zarar vermeden organik matrisin (protein, yağ, biyofilm) uzaklaştırılması kritik önem taşımaktadır (8). Bu amaçla H_2O_2, asidik/bazik ajanlar veya sıcaklık kontrollü Fenton reaktifi kullanılmakla (9) beraber son yıllarda polimerin oksidatif bozunmasının önüne geçmek için enzimatik degradasyon (Tripsin, Proteinaz-K vb.) yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır (10).

Yoğunluk ayırma prosedürü, inorganik sediman veya kemik/doku kalıntılarından ayırma işleminde, plastiklerin yüzdürülmesi prensibine dayanmaktadır (11). Yaygın kullanılan NaCl ekonomik olmasına rağmen, PET ve PVC gibi yüksek yoğunluklu polimerlerin ayrılması için $ZnCl_2$ veya NaI gibi daha ağır tuz çözeltilerinin kullanımı tercih edilmektedir (12).

Ekstraksiyon sürecinin başarısı, sadece partiküllerin fiziksel izolasyonuyla değil, analitik cihazların gereksinimlerine uyumuyla ölçülür. Dolayısıyla, insan dokularındaki eser miktardaki nanoplastiklerin tespiti ve toksikolojik riskin doğru haritalanması, örneklemeden nihai analiz sonucuna kadar optimize edilmiş, kayıpsız ve kontaminasyon riski azaltılmış bir hazırlık zincirine bağlıdır.

Tespit ve Karakterizasyon Teknolojileri

Mikroplastik ve nanoplastiklerin çevresel ve biyolojik matrislerdeki tespiti, parçacıkların boyutsal dağılımına ve hedeflenen veri türüne (sayısal konsantrasyon veya kütlesel miktar) göre şekillenen hiyerarşik bir analitik yaklaşımı gerektirir. Büyük boyutlu mikroplastiklerin (1-5 mm) ilk taraması ve morfolojik sınıflandırmasında stereo mikroskoplar maliyet-etkin bir çözüm sunmaktadır. Ancak bazı araştırmacılar şeffaf partiküllerin tespiti ve biyolojik doku arka planından ayırt edilmesi için Nile Red gibi polimer spesifik floresan boyaların kullanımının hassasiyeti artırdığını bildirmişlerdir (13). Ancak kesin kimyasal doğrulama için spektroskopi yöntemleri çok daha net sonuçlar vermektedir. Bu bakımdan, pek çok çalışmada Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) geniş spektral kütüphaneleriyle hızlı

Sanayi devrimiyle ivme kazanan ve özellikle 1950'lerden sonra 'Plastik Çağı' olarak adlandırılan dönem, modern hayatın konforunu artırırken küresel ölçekte bir çevre krizini de beraberinde getirmiştir. Doğada yüzyıllarca bozulmadan kalabilen sentetik polimerlerin yıllık üretiminin, 1950'lerde 2 milyon ton iken bugün 400 milyon tonu aşması, dünyamızın en el değmemiş noktalarında dahi kümülatif bir kirlilik yükü oluşturmuştur.

İnsanoğlu bugün modern hayatın getirdiği ‘plastikten vazgeçilemeyen’ bir ortamda hayatını idame ettirmek durumundadır. Dolayısıyla, mikro/nanoplastikle kontamine su ve deniz ürünleri tüketimi, havada asılı mikropartiküllerin solunması ve kişisel bakım ürünleri veya tekstil ürünleri yoluyla deri teması gibi çeşitli maruziyet yollarıyla karşı karşıya olduğumuz anlamına gelmektedir. Özellikle iç mekân havasındaki yüksek mikroplastik yoğunluğu ve besin zincirindeki biyobirikim süreci maruziyetin ana bileşenlerini oluşturmaktadır.

polimer tanımlaması için tercih edildiği görülmektedir (14). Raman spektroskopisi ise su girişiminden daha az etkilenmesi ve çözünürlüğünün yüksekliği sayesinde, özellikle hücresel boyuttaki (1-20 µm) parçacıkların analizinde öne çıkmaktadır (15).

Partikül sayısından ziyade numunedeki toplam plastik yükünün kütlesel olarak belirlenmesi gereken durumlarda, özellikle karmaşık organik kirliliğe sahip insan dokusu veya çamur örneklerinde, polimerin termal degradasyonuna dayalı daha etkili analiz yöntemleri tercih edilmektedir. Piroliz Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometrisi (Py-GC/MS) gibi teknikler, numuneyi termal olarak parçalayarak karakteristik bozunma ürünleri üzerinden hassas kütle tayini yapılmasına imkân vermektedir (16). Optik limitlerin aşıldığı nanoplastik boyutunda ise, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) kombinasyonu tercih edilmektedir (17). Bu ileri görüntüleme teknikleri, nanometre ölçeğindeki şüpheli parçacıkların yüzey topografisini ve elemental bileşimini çözümleyerek, plastiklerin inorganik katkı maddelerinden ayırt edilmesini ve toksikolojik değerlendirmelerin daha sağlam temellere oturtulmasını sağlamaktadır.

Ölçüm ve Analizdeki Metodolojik Güçlükler

Standardizasyon Eksikliği: Mikroplastik ve nanoplastik kirliliğinin küresel ölçeğini doğru haritalandırabilmenin önündeki en büyük engel validasyonu tamamlanmış bir analiz protokolünün henüz tesis edilememiş olmasıdır. Farklı çalışmalarda uygulanan örnekleme stratejileri ve raporlama birimlerindeki (adet/m³, mg/L, adet/km²) çeşitlilik, verilerin kıyaslanabilirliğini zayıflatmakta ve risk değerlendirmesinde belirsizliklere yol açmaktadır. Bu metodolojik karmaşaya ek olarak, sentetik polimerlerin laboratuvar ortamı ve ekipmanlarda yaygın bulunması ve havadan çökelme riski, özellikle düşük konsantrasyonlu hassas analizlerde ciddi bir ‘arka plan kirliliği’ riski doğurmaktadır. Analiz edilen parçacığın numuneden mi yoksa ortamdan mı kaynaklandığını ayırt etmek, süreç boyunca titiz bir şekilde referans numune kontrolleri ile sağlanmaktadır.

Analitik süreçte karşılaşılan teknik zorlukların merkezinde ise matris etkileri

ve cihazların tespit limitleri (LOD) yer almaktadır. Kan, atık su veya deniz suyu gibi kompleks matrisler, içerdikleri yoğun organik yük ve biyolojik kalıntılar nedeniyle hedef sinyalleri maskeleyebilmekte, özellikle spektroskopik analizlerde doğal pigmentlerin yarattığı floresans girişimi yanlış pozitif sonuçlara neden olabilmektedir. Bu problem, parçacık boyutu mikro seviyelerden nanometre seviyesine indikçe daha da büyümektedir. Teknolojik ilerlemelere rağmen, nanoplastiklerin tespiti için gereken sofistike yöntemler yüksek maliyetli donanımlar gerektirmektedir. Hâlihazırda, enstrümental analiz cihazlarının çözünürlük limitleri, özellikle nanoplastik kirliliğinin rutin analizler ile güvenilir bir şekilde takip edilmesinde ciddi bir engel oluşturmaktadır.

Halk Sağlığı Açısından Risk Değerlendirmesi

İnsanoğlu bugün modern hayatın getirdiği 'plastikten vazgeçilemeyen' bir ortamda hayatını idame ettirmek durumundadır. Dolayısıyla, mikro/nanoplastikle kontamine su ve deniz ürünleri tüketimi, havada asılı mikropartiküllerin solunması ve kişisel bakım ürünleri veya tekstil ürünleri yoluyla deri teması gibi çeşitli maruziyet yollarıyla karşı karşıya olduğumuz anlamına gelmektedir. Özellikle iç mekân havasındaki yüksek mikroplastik yoğunluğu ve besin zincirindeki biyobirikim süreci maruziyetin ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Vücuda giren bu parçacıklar sadece fiziksel bir kirletici olmakla kalmamaktadır. Aynı zamanda üretimlerinde kullanılan katkı maddeleri (BPA, ftalatlar) ve çevreden adsorbe edilen kalıcı organik kirleticileri ve ağır metallerin bünyemize girmesini ve kimyasal toksisite riski oluşturmasını tetiklemektedir (18).

Maruziyetin sonuçlarının, parçacıkların fizikokimyasal özelliklerine ve partikül boyutuna bağlı olduğu düşünülmektedir. Mikro ve nano ölçekteki parçacıkların histolojik bariyerleri aşma (translokasyon) potansiyeli, bilim dünyasında toksikolojik açıdan en kritik endişe kaynağı olarak bildirilmektedir (19). Hücresel çalışmalar, 150 µm altındaki parçacıkların bağırsak epitelini geçerek lenfatik sisteme ulaşabildiğini, boyut küçüldükçe (<20 µm) organlarda birikim potansiyelinin arttığını göstermektedir (20). Özellikle nanoplastiklerin, kan dolaşımına karışarak karaciğer ve böbrek gibi filtrasyon organlarında birikmesi hatta kan-beyin bariyerini veya plasental bariyeri aşarak fetüse ulaşabilmesi, hücresel inflamasyon, oksidatif stres (ROS üretimi) ve DNA hasarı gibi sitotoksik etkileri tetikleme potansiyelini gündeme getirmektedir (21).

Sonuç

Son yıllarda yürütülen çalışmalar, plastik kirliliğinin sadece çevresel bir sorun değil, aynı zamanda potansiyel bir halk sağlığı problemi olduğunu ortaya koymaktadır. Bilim dünyası tarafından 'yeni görünmeyen kirlilik' olarak nitelendirilen nanoplastikler, hücre zarlarını geçebilme kapasiteleriyle toksikolojik açıdan en yüksek riski taşıyan kirletici grubudur. Mikro/nanoplastik probleminin çözümü daha hassas ölçüm teknolojilerinin geliştirilmesi ile ortadan kaldırılamaz. Doğada yüzyılı aşkın süre kalıcılığını koruyan bu kirleticilerin yarattığı tahribatı önlemek üzere, öncelikle tek kullanımlık plastikler ve kişisel bakım ürünlerindeki mikroplastikler yasaklanmalı, atık yönetiminde kaynağında azaltım stratejileri benimsenmeli ve biyoplastik alternatiflerinin endüstriyel üretimdeki payı artırılmalıdır.

Kaynaklar

1) Ritchie, H., Samborska, V., Roser, M. (2023). "Plastic Pollution" https://ourworldindata.org/plastic-pollution (Erişim Tarihi: 19.12.2025).

2) Dey, S., Veerendra, G.T.N., Babu, P.S.S.A. et al. (2024). Degradation of Plastics Waste and Its Effects on Biological Ecosystems: A Scientific Analysis and Comprehensive Review. Biomedical Materials & Devices 2, 70-112.

3) Qiu, R., Song, Y., Zhang, X., et al. (2020). Microplastics in Urban Environments: Sources, Pathways, and Distribution. In: He, D., Luo, Y. (eds) Microplastics in Terrestrial Environments. The Handbook of Environmental Chemistry, Vol 95. Springer, Cham.

4) Laskar, N., Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to environment. Environmental Technology & Innovation, 14, 100352.

5) Karlsson, T.M., Kärrman, A., Rotander, A., et al. (2020). Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters. Environ Sci Pollut Res, 27, 5559-5571.

6) Sun, H., Su, X., Mao, J, et al. (2024). Microplastics in maternal blood, fetal appendages, and umbilical vein blood, Ecotoxicology and Environmental Safety, 287, 117300.

7) World Health Organization, Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health. https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/9cc4f66a-4c22-4a51-a910-3e7f739e3b31/content (Erişim Tarihi: 05.12.2025).

8) Prata, J.C. da Costa, J.P. et al. (2019). Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples, Science of The Total Environment, 686, 131-139.

9) Xiao, J., Guo, S., Wang, D., et al. (2024). Fenton-Like Reaction: Recent Advances and New Trends, Chemistry – A European Journal, 30, e202304337.

10) Tournier, V., Duquesne, S. Guillamot, F. (2023). Enzymes' Power for Plastics Degradation, Chem. Rev., 123, 9, 5612-5701.

11) Hooriabad Saboor, F., Hadian-Ghazvini, S., Torkashvand, M. (2022). Microplastics in Aquatic Environments: Recent Advances in Separation Techniques, Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 66(2), pp. 167-181.

12) Duong, T.T., Le, P.T., Nguyen, T.N.H. et al. (2022). Selection of a density separation solution to study microplastics in tropical riverine sediment. Environ Monit Assess 194, 65.

13) Shim, W.J., Song, Y.K., Hong, S.H., et al. (2016). Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining, Marine Pollution Bulletin, 113, 469-476.

14) Chen, Y. Wen, D., Pei, J., et al. (2020). Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects, Current Opinion in Environmental Science & Health, 18, 14-19.

15) Chakraborty, I., Banik, S., Biswas, R., et al. (2023). Raman spectroscopy for microplastic detection in water sources: a systematic review. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20, 10435-10448.

16) Picó, Y., Barceló, D. (2020). Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry in environmental analysis: Focus on organic matter and microplastics, TrAC Trends in Analytical Chemistry, 130, 115964.

17) Gniadek, M., Dąbrowska, A. (2019). The marine nano- and microplastics characterisation by SEM-EDX: The potential of the method in comparison with various physical and chemical approaches, Marine Pollution Bulletin, 148, 210-216.

18) Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., et al. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 1212.

19) Braakhuis, H.M., Kloet, S.K., Kezic, S. et al. (2015). Progress and future of in vitro models to study translocation of nanoparticles. Arch Toxicol, 89, 1469-1495.

20) Sinha, P., Saini, V., Varshney, N., et al. (2025). The infiltration of microplastics in human systems: Gastrointestinal accumulation and pathogenic impacts, Heliyon 11, 4, 28, e42606.

21) Winiarska, E., Jutel, M., Zemelka-Wiacek, M. (2024). The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks, Environmental Research, 251, 118535.

Mikroplastikler ve nanoplastikler – maruziyet yolları, ölçüm zorlukları ve halk sağlığı etkileri

Prof. Dr. Sedat Gündoğdu

2006 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümünden mezun olan Gündoğdu, 2009 yılından bu yana Çukurova Üniversitesinde plastik ve mikroplastik kirliliğini araştırmakta ve Mikroplastik Araştırma Grubu'nu yönetmektedir. Ayrıca Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezinde küresel plastik atık ticaretinin çevresel etkilerini araştırmaktadır. Gündoğdu, mikroplastiklerin insan dokusu, gıda, hava, toprak ve sucul ortamlardaki varlığı hakkında çok sayıda yayın yaptı. Prof. Gündoğdu, çeşitli dergilerin yayın kurullarında görev yapmakta ve Etkili Plastik Anlaşması için Bilim İnsanları Koalisyonunun da kurucu üyesidir.

Plastiklerin çevresel kirletici olarak tanımlandığı 1970'li yıllardan bu yana yapılan çalışmalar, mikro ve nanoplastiklerin (MNP'ler; 1 nm-5 mm) yalnızca ekosistemlerde değil, insan vücudunda da biriktiğini göstermiştir (Gündoğdu, 2022). MNP'lerin mide ve kolon dokusu, plasenta, testis, anne sütü, kan, kalp ve akciğer dokusu (Özsoy et al., 2024) gibi çeşitli biyolojik ortamlarda tespit edilmesi, plastik kirliliğinin çevresel bir sorun olmaktan çıkıp doğrudan insan sağlığını etkileyen bir tehdit hâline geldiğini ortaya koymaktadır (Zhao et al., 2024). Plastik üretimindeki artış ve yetersiz atık yönetimi devam ettikçe, insan vücudundaki MNP yükünün gelecekte daha da yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle uluslararası kuruluşlar MNP maruziyetine ilişkin riskleri değerlendiren raporlar ve gelecek projeksiyonları yayımlamış, Birleşmiş Milletler ise insan sağlığı üzerindeki etkileri de kapsayan bağlayıcı bir küresel plastik anlaşması için müzakereleri başlatmıştır (PEW, 2025). Mevcut araştırmalar, MNP'lerin insanlara çeşitli maruziyet yollarıyla aktarılabileceğini ve bu parçacıkların biyolojik sistemlerde inflamasyon, oksidatif stres ve immün yanıt bozuklukları gibi etkiler oluşturabileceğini göstermektedir (Zuri et al., 2023). Ancak bu alandaki hızlı gelişmelere rağmen MNP'lerin sağlık üzerindeki uzun vadeli etkileri hâlen yeterince anlaşılamamıştır. Ayrıca insan dokusunda MNP tespiti için standartlaştırılmış analitik yöntemlerin bulunmaması, maruziyet verilerinde tutarsızlıklara ve risk değerlendirmelerinde belirsizliklere yol açmaktadır (Morgan et al., 2024). Her ne kadar MNP'ye dair bilinmezlikler mevcut olsa da gelişen bilim bu belirsizlikleri birer birer aydınlatarak insan için tehlike çanlarının daha şiddetli çalmasına neden olmaktadır. MNP'lerin kimyasal çeşitliliği, farklı morfolojileri ve on binlerce katkı maddesi içerebilmeleri, toksikolojik özelliklerinin değerlendirilmesini daha da güçleştirmektedir (Gündoğdu et al., 2024). Bu nedenle MNP maruziyetinin boyutunu, biyolojik etkilerini ve sağlık risklerini doğru biçimde tanımlayabilmek için araştırmaların güçlendirilmesine ihtiyaç vardır. Bu yazının temel amacı, insanların MNP'lere maruz kaldığı yolları ve bu maruziyetlerin olası sağlık sonuçlarını kapsamlı biçimde ele almaktır.

Mikro ve Nanoplastiklerin Tanımı, Kaynakları ve Karşılaşılan Zorluklar

MNP'lerin küçük boyutları, yüksek yüzey/hacim oranları ve çeşitli polimer yapıları, bu parçacıkları hem ekosistemlerde hem de biyolojik sistemlerde reaktif hâle getirir. Mikroplastikler (MP'ler) 5 mm'den küçük parçacıklar olup kozmetik ürünlerdeki mikro boncuklar, tekstil lifleri ya da araç lastiği parçaları gibi birincil kaynaklardan doğrudan çevreye karışabilir veya plastik atıkların ışık, mekanik aşınma ve kimyasal süreçlerle parçalanması sonucu ikincil olarak oluşabilir (Gündoğdu, 2022). Nanoplastikler (NP) ise 1 µm'den küçük olması nedeniyle daha yüksek hareketlilik gösterir, biyolojik bariyerleri geçebilir ve çevresel ortamlarda tespit edilmeleri oldukça zordur (Mohsen et al., 2025).

MNP'ler; ambalaj atıkları, tekstil lifleri, endüstriyel ürünler ve balıkçılık ekipmanları gibi geniş bir yelpazedeki plastik materyallerin bozulması sonucu oluşur (Gündoğdu, 2022). Bu parçacıklar sucul ve karasal ortamlarda hızla yayılır, besin zincirine girer ve biyolojik dokularda birikebilir (Gündoğdu vd., 2025). Böylece hem fiziksel zararlara hem de yüzeylerinde taşıdıkları ağır metal ve organik kirleticilerin biyolojik organizmalara aktarılmasına yol açarlar (Gündoğdu vd., 2024). Özellikle NP'lerin hücresel membranları aşabilme kapasitesi, potansiyel toksisitelerini daha kritik hâle getirmektedir.

Mikro ve nanoplastikler artık yalnızca çevresel bir kirlilik unsuru değil; kan, akciğer, plasenta, anne sütü ve sindirim sistemi dâhil olmak üzere insan vücudunun pek çok dokusunda tespit edilen görünmez bir halk sağlığı tehdididir. Solunum, beslenme, deri teması ve tıbbi uygulamalar yoluyla sürekli maruz kalınan bu parçacıklar; inflamasyon, oksidatif stres ve bağışıklık sistemi bozukluklarıyla ilişkilendirilmekte, uzun vadeli etkileri ise hâlen belirsizliğini korumaktadır.

MNP'lerin çevrede tespit edilmesi için FTIR, Raman ve kütle spektrometrisi gibi ileri teknikler kullanılmakla birlikte, metodolojik ilerleme hâlâ devam etmektedir (Vural et al., 2025). Ayrıca MNP davranışına ilişkin bilgi boşlukları — parçalanma süreçlerinin dinamikleri, çevresel koşulların etkisi, taşınım modelleri ve biyolojik etkilerin uzun vadeli sonuçları — araştırmaları sınırlayan başlıca faktörlerdir. Düzenleyici eksiklikler ve uluslararası standartların yokluğu ise kirlilikle mücadelede etkili politikaların geliştirilmesini zorlaştırmaktadır.

İnsanlarda Mikro ve Nanoplastik (MNP) Maruziyet Yolları

Çevresel ve Diyet Yoluyla Maruziyet

İnsan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan MNP'ler hem iç hem de dış mekânlarda solunum, temas ve besin yoluyla sürekli maruz kalınan kirleticiler hâline gelmiştir (Coşgun et al., 2025). Dünya genelinde yapılan çalışmalar, incelenen hiçbir bölgenin MP'lerin kirletmediği bir bölge olmadığını göstermektedir (PEW, 2025). İç mekân havasında MNP konsantrasyonlarının dış mekâna göre çok daha yüksek seviyelere ulaşması, insanların zamanlarının yüzde 80'inden fazlasını kapalı ortamlarda geçirmeleri nedeniyle önemli bir risk oluşturmaktadır (Coşgun et al., 2025). Polietilen tereftalat (PET), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) iç mekân ve dış mekân tozlarında en sık raporlanan polimerlerdir (Coşgun et al., 2025). Akciğer dokusunda PP ve PET türevi MNP'lerin tespit edilmesi (Wang et al., 2023), solunumsal maruziyetin biyolojik sonuçlarını doğrulamaktadır. Farklı coğrafyalardan elde edilen bronkoalveolar lavaj örneklerinde belirgin bölgesel farklılıkların bulunması ise çevresel kirlilik düzeyleri ve yöntemsel farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Vasse & Melgert, 2024).

Deri yoluyla maruziyet daha çok iç mekân kaynaklı olup tekstil ürünleri, kozmetikler ve mikro boncuk içeren kişisel bakım ürünleri aracılığıyla gerçekleştiği düşünülmektedir (Menichetti et al., 2024). 100 nm'nin altındaki parçacıkların epidermal bariyeri aşabildiği ve bazı MNP'lerin kan dolaşımına geçebildiği gösterilmiştir (Menichetti et al., 2024). In vitro ve in vivo çalışmalar, MNP'lerin deri hücrelerinde inflamasyon, yaşlanma, yara iyileşmesinde gecikme ve fibroblastlarda gen ekspresyonu değişimleri gibi olumsuz etkiler oluşturabildiğini göstermektedir (Eom et al., 2024). Yeni bulgular, MNP'lerin genital deride bile tespit edildiğini bildirmektedir (Codrington et al., 2024).

Diyetsel maruziyet, MNP'lerin insanlara ulaşmasında en önemli yolların başında gelir. Plastik ambalajlar, tek kullanımlık kaplar, şişelenmiş su, yağ, içecekler ve bebek biberonları dâhil olmak üzere çok sayıda ürün MNP içermektedir (Gündoğdu, 2022). Taze sebze ve meyvelerde, tuzda, şeker ve balda mikroplastik varlığı doğrulanmıştır (Gündoğdu, 2018; Gündoğdu, 2022; Gündoğdu et al., 2024). Sucul ekosistemlere her yıl milyonlarca ton plastik taşınmakta ve bu ortamlar MNP birikiminin ana rezervuarları hâline gelmektedir (Gündoğdu et al., 2026). Bivalvler, plankton, balıklar ve üst trofik düzeydeki türler aracılığıyla gerçekleşen trofik transfer sonucunda MNP'ler insan besinine ulaşmakta, özellikle bütün olarak tüketilen midye ve istiridyeler aracılığıyla doğrudan sindirim sistemine geçmektedir (Gündoğdu et al., 2025). Yenilebilir dokularda MNP tespit eden çalışmaların artması, diyetsel maruziyetin halk sağlığı açısından kritik olduğunu göstermektedir (Gündoğdu et al., 2020a; 2020b). MNP'lerin kimyasal katkı maddeleri ve adsorbe ettikleri toksik çevresel kirleticiler aracılığıyla insan sağlığında inflamasyon, immün yanıt bozuklukları, üreme toksisitesi, fetal gelişim kısıtlanması ve nöroinflamasyon gibi etkiler oluşturabileceğine dair bulgular giderek artmaktadır (Gündoğdu et al., 2024).

Tıbbi ve Farmasötik Ürünler Yoluyla Maruziyet

Sağlık sektöründe plastiklerin yaygınlaşması, özellikle tek kullanımlık ürünlerin sterilite, maliyet ve erişilebilirlik açısından avantaj sağlaması nedeniyle hızla artmıştır (Gündoğdu, 2022; Çağlayan et al., 2024). Ancak bu yaygın kullanım, tıbbi işlemler sırasında MNP maruziyetini de artırmaktadır. Kateterler, enjektörler, infüzyon setleri ve implantlar gibi birçok tıbbi cihaz üretim sırasında çeşitli katkı maddeleri içerir; bunların bir kısmı endokrin bozucu, nörotoksik veya karsinojeniktir (Çağlayan et al., 2024). Cerrahi işlemler, damar içi tedaviler veya implantlar aracılığıyla MNP'lerin dokuya ve dolaşıma doğrudan aktarılabilmesi önemli bir risk oluşturmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, insanların mide, akciğer, kan, karaciğer, böbrek, plasenta, anne sütü, idrar ve dışkısında MNP'lerin tespit edildiğini göstermiştir (Özsoy et al., 2024). Bu bulgularla paralel olarak in vivo ve in vitro çalışmalar, MNP'lerin immün, sindirim, solunum ve üreme sistemlerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini ortaya koymuştur (Zhang et al., 2022). MNP'lerin çevresel kirleticileri adsorbe ederek ağır metaller ve kalıcı organik kirleticilerle birlikte taşımaları, kimyasal toksisiteyi artırmaktadır (Gündoğdu et al., 2024). Bunun yanında BPA, nonilfenol ve PBDE gibi katkı maddelerinin tıbbi plastiklerden sızarak insanlara geçebildiği bilinmektedir (Gündoğdu et al., 2024).

> Mikro ve nanoplastiklerin küçük boyutları, kimyasal çeşitlilikleri ve taşıdıkları katkı maddeleri, bu parçacıkların toksikolojik etkilerinin değerlendirilmesini son derece güçleştirmektedir. İnsan dokularında tespit edilmelerine rağmen, standart analiz yöntemlerinin bulunmaması maruziyet düzeyleri ve sağlık riskleri konusunda önemli belirsizlikler yaratmaktadır. Mevcut veriler, plastik kirliliğinin artık ekosistemle sınırlı kalmadığını, doğrudan insan sağlığını etkileyen küresel bir sorun hâline geldiğini göstermektedir.

İnsan Vücudunda Mikroplastiklerin Tespiti ve Sayımı

MNP'lerin insan vücuduna solunum, yutma ve dermal temas yoluyla girdiği artık net biçimde ortaya konmuş, buna paralel olarak biyolojik örneklerde MNP tespitine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Kullanılan örnek türüne göre örnekleme stratejileri değişmektedir: tükürük, balgam, dışkı, idrar ve nazal sekresyon gibi kolay erişilebilir örneklerde plastik içermeyen (cam/metal) kap ve ekipman kullanımı kontaminasyonu önlemede temel gerekliliktir (Vural et al., 2025). Kan örnekleri genellikle paslanmaz çelik iğne ve cam ya da plastik içermeyen sistemlerle alınırken, alt solunum yolları için bronkoalveolar lavaj uygulanmaktadır. Plasenta, akciğer, kolon, karaciğer, testis, damar plağı, trombüs gibi dokular ise çoğunlukla cerrahi işlemler sırasında, sıkı kontaminasyon kontrolü altında örneklenmektedir (Zhao et al., 2025).

Biyolojik örnekler yüksek oranda organik/inorganik materyal içerdiği için analiz öncesi ön işlem zorunludur. Organik bileşenlerin uzaklaştırılması için enzimler, oksidanlar (H_2O_2), asidik (HNO_3) veya bazik (KOH) çözeltiler; inorganik bileşenlerin ayrılması için çinko klorür veya sodyum iyodür gibi yoğun tuz çözeltileriyle yoğunluk ayrımı uygulanmaktadır (Vural et al., 2025). Seçici çözücü ekstraksiyonu ile belirli polimer sınıfları (örn. PVC, PET) hedeflenebilmektedir (Vural et al., 2025). Ekstraksiyon sonrası floresan mikroskopi, Raman, FTIR ve LDIR spektroskopisi, SEM-EDS, Py-GC/MS ve TD-GC/MS gibi tekniklerle polimer tanımlaması ve kantifikasyon yapılmaktadır (Vural et al., 2025). Nile Red ile boyalı parçacıkların floresan mikroskopi ile birkaç mikrometreye kadar tespit edilebilmesi mümkün olsa da yanlış pozitif riski ve polimer türünü ayırt edememesi önemli bir sınırlılıktır (Gündoğdu et al., 2025). Raman (~1 µm) ve FTIR/LDIR (10–20 µm) spektroskopisi polimer kimliği için güçlü araçlar olmakla birlikte nanoskopik fraksiyona duyarsızdır (Gündoğdu et al., 2025). SEM-EDS nano-ölçeğe kadar boyut/morfoloji ve elementel bileşim sağlayabilir, ancak polimer tipini ayırt edemez (Gündoğdu et al., 2025). Py-GC/MS ve TD-GC/MS polimer türü ve kütle konsantrasyonu hakkında bilgi sunar ancak termal bozunma sırasında trigliseridler gibi matriks bileşenlerinin polietilene benzer ürünler oluşturması yanlış tanımlamaya yol açabilir (Gündoğdu et al., 2025).

Hastane ortamında havadaki MP düzeylerinin yüksek olması (Özsoy et al., 2024), küçük örnek kütleleri ve sınırlı replikasyon, hem kontaminasyon hem de geri kazanım kayıpları nedeniyle sonuçların aşırı ya da eksik tahmin edilmesine neden olabilir. Çoğu çalışmada ham spektral verilerin paylaşılmaması da üçüncü taraf doğrulamayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, insan vücudundaki MNP yüküne ilişkin mevcut veriler temkinli ve eleştirel biçimde değerlendirilmelidir.

Toksikolojik Mekanizmalar ve Sağlık Üzerindeki Etkiler

Damar yolu ile maruziyet bir kenara bırakılırsa gastrointestinal sistem, MNP'lere maruziyetin ana kapısıdır. 150 µm'den büyük partiküller mukus tabakasında tutulurken, daha küçük partiküller mukozayı aşarak enterosit endositozu, Peyer plaklarındaki M hücreleri üzerinden transsitoz, villus ucunda persorpsiyon ve inflamasyona bağlı paracellular geçiş gibi yollarla dolaşıma geçebilir (Peters et al., 2022). Benzer şekilde, solunum yoluyla alınan partiküller alveol-kapiller bariyeri aşarak ya da mukosiliyer temizlenme ile yutularak gastrointestinal sisteme taşınarak sistemik dolaşıma katılabilmektedir (Sofield et al., 2025).

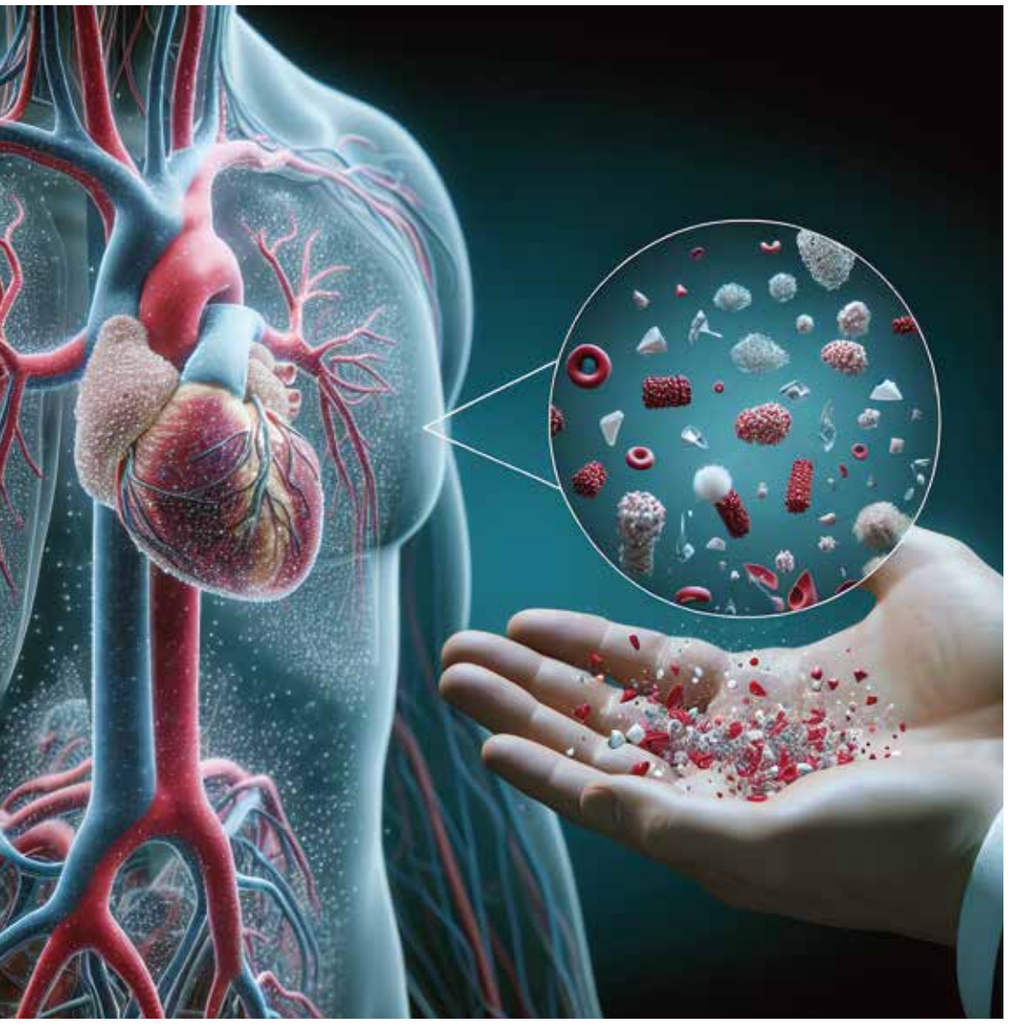
MNP'lerin biyolojik etkileri fiziksel ve kimyasal bileşenler şeklinde iki ana grupta incelenir. Boyut, şekil ve doz; partiküllerin hücre içine alımını, doku birikimini ve mekanik hasarı belirlerken, kimyasal etkiler polimere eklenen katkı maddeleri ve yüzeye adsorbe kirleticilerden kaynaklanır (Gündoğdu et al., 2024). Güncel değerlendirmeler, 16.000'den fazla katkı maddesinin kullanıldığını ve bunların 2.400'ünün kalıcılık, biyobirikim ve toksisite açısından "potansiyel endişe verici madde" sınıfında olduğunu göstermektedir (Wagner et al., 2024). Bu grupta ftalatlar, BPA, nonilfenoller, PBDE'ler, OPE'ler ve PFAS başta olmak üzere endokrin bozucu, nörotoksik, hepatotoksik ve üreme toksik etkiler taşıyan bileşikler yer alır (Wagner et al., 2024).

Bağırsak mikrobiyotasına ilişkin in vivo çalışmalar, PS ve PE MPs maruziyetinin bakteri kompozisyonunu değiştirerek disbiyoz, safra asidi ve amino asit metabolizmasında bozulma ve inflamatuvar yanıt artışına yol açtığını göstermektedir (Bora et al., 2024). Bu değişiklikler bağırsak bariyer bütünlüğünün bozulması, sıkı bağlantı proteinlerinde hasar, oksidatif stres ve kronik inflamasyonla ilişkilidir.

İmmün sistem düzeyinde MNP'lerin yabancı partikül olarak algılanması, IL-1β, TNF-α ve IL-6 gibi proinflamatuvar sitokinlerin artışıyla sistemik inflamasyonu tetikleyebilir (Vanetti et al., 2025). Düzenleyici T hücreleri (Treg) ile Th17 hücreleri arasındaki dengenin bozulması, otoimmün süreçlerin alevlenmesine zemin hazırlayabilir (Li et al., 2020). Hücre içi düzeyde reaktif oksijen türlerindeki artış, DNA hasarı, genotoksisite ve onarım mekanizmalarının bozulması, uzun vadede karsinogenez potansiyelini gündeme getirmektedir (Dzierzynski et al., 2024). Bu bulgular, MNP maruziyetinin yalnızca lokal irritasyon değil, çoklu organ sistemini ilgilendiren, kronik ve kompleks bir toksikolojik problem olduğunu ortaya koymakta; özellikle uzun dönem epidemiyolojik çalışmalara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Mikro/Nanoplastikler, İnsan Sağlığı ve Küresel Plastik Anlaşması: Politika Yansımaları

Plastikler yaşam döngülerinin tüm aşamalarında tehlikeli kimyasallar, makroplastikler, MNP'ler ve sera gazları salarak



Plastik üretimindeki artış ve yetersiz atık yönetimi devam ettikçe, mikro ve nanoplastiklere maruziyetin kaçınılmaz biçimde artması beklenmektedir. Bu durum; bağışıklık sistemi, üreme sağlığı, bağırsak mikrobiyotası ve kronik hastalıklar üzerindeki olası etkiler nedeniyle ciddi bir halk sağlığı riski oluşturmaktadır. Bilimsel belirsizliklere rağmen mevcut kanıtlar, ihtiyatlılık ilkesine dayalı, bağlayıcı ve bütüncül küresel politikaların artık ertelenemez olduğunu ortaya koymaktadır.

çevre ve insan sağlığı üzerinde çok boyutlu bir yük oluşturmaktadır. Küresel plastik kirliliğinin ölçeği, MNP maruziyetinin yaygınlığı ve bunlara bağlı sağlık risklerine dair artan bilimsel kanıtlar, 1992 Rio Bildirgesi'nde formüle edilen ihtiyat ilkesi çerçevesinde acil eylem gereksinimini ortaya koymaktadır. Bunun yanında ozon tabakasının delinmesine neden olan florlu bileşiklerin yasaklanmasını sağlayan Montreal Protokolü de uluslararası anlaşmaların gerektiğinde ne düzeyde başarı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla gerek ihtiyatlılık ilkesinin, gerekse de küresel yasakların, yürütülmekte olan Küresel Plastik Anlaşması müzakereleri dâhil, plastiklere yönelik uluslararası düzenlemelerin temel bileşeni olması gereklidir. Özellikle tıbbi plastiklerin ve bunların doğrudan MNP maruziyetine katkısının anlaşma kapsamına dâhil edilmemesi, plastik ve sağlık ilişkisine parçalı ve tutarsız bir yaklaşım doğuracaktır (Street et al., 2024). Her ne kadar bazı çevreler, sağlık hizmetlerinde kullanılan belirli polimer ve kimyasalların kısıtlanmasının hasta güvenliğini zayıflatabileceğini savunsa da medikal plastiklerin mevcut, kontrolsüz kullanımıyla ilişkili uzun dönem maruziyet ve toksisite riskleri daha ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle bağlayıcı bir küresel anlaşmanın; kimyasalları, polimerleri, ürünleri ve bunların yerine geçecek alternatifleri sürdürülebilirlik, eşitlik ve şeffaflık eksenlerinde bütüncül biçimde ele alması gerekmektedir.

Sonuç ve Gelecek Yönelimler

MNP'lerin insan vücudunda çoklu dokularda ve biyolojik sıvılarda gösterilmiş olması, bu parçacıkların küresel ölçekte ortaya çıkan bir halk sağlığı sorunu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Solunum, diyetsel alım, dermal temas ve tıbbi müdahaleler yoluyla gerçekleşen maruziyet yolları, MNP kontaminasyonunun gündelik yaşamın ayrılmaz bir bileşeni hâline geldiğini göstermektedir. Ancak hâlâ yeterli çalışma olmadığı için bazı belirsizlikler mevcuttur. Bu belirsizlikleri gidermek için, insan örneklerinde MNP tespiti ve kantifikasyonuna yönelik standartlaştırılmış metodolojilerin geliştirilmesi öncelikli olmalıdır. Bununla birlikte, özellikle kırılgan gruplarda (bebekler, gebeler, kronik hastalığı olanlar) kronik maruziyetin sonuçlarını değerlendirecek uzunlamasına epidemiyolojik çalışmalara gereksinim vardır. Bilimsel ilerlemeye paralel olarak, plastik üretimini kısıtlayan, plastik atık yönetimini güçlendiren, tehlikeli katkı maddelerini düzenleyen, biyolojik olarak daha az kalıcı alternatifleri teşvik eden ve sağlık–çevre etkileşimini merkeze alan politika araçları geliştirilmelidir. Plastik üretiminin sürekli arttığı bir dünyada, MNP'lerin risklerini anlamaya ve azaltmaya yönelik küresel kolektif çaba ertelenemez niteliktedir.

Kaynaklar

Bora, S. S., Gogoi, R., Sharma, M. R., Anshu, Borah, M. P., Deka, P., Bora, J., Naorem, R. S., Das, J., & Teli, A. B. (2024). Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 14, 1492759.

Codrington, J., Varnum, A. A., Hildebrandt, L., Pröfrock, D., Bidhan, J., Khodamoradi, K., Höhme, A. L., Held, M., Evans, A., Velasquez, D., Yarborough, C. C., Ghane-Motlagh, B., Agarwal, A., Achua, J., Pozzi, E., Mesquita, F., Petrella, F., Miller, D., & Ramasamy, R. (2024). Detection of microplastics in the human penis. Int J Impot Res.

Coşgun, M. S., Gündoğdu, S., Şahin, Ü. A., Ayvaz, B. U., Onat, B., & Ayvaz, C. (2025). Microplastics in the indoor air of subway station in Istanbul. Air Quality, Atmosphere & Health, 1-15.

Çağlayan, U., Gündoğdu, S., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2024). Intravenous hypertonic fluids as a source of human microplastic exposure. Environmental Toxicology and Pharmacology, 107, 104411.

Dzierzynski, E., Gawlik, P. J., Puzniak, D., Flieger, W., Józwik, K., Teresinski, G., Forma, A., Wdowiak, P., Baj, J., & Flieger, J. (2024). Microplastics in the Human Body: Exposure, Detection, and Risk of Carcinogenesis: A State-of-the-Art Review. Cancers, 16(21), Article 3703.

Eom, S., Shim, W., & Choi, I. (2024). Microplastic-induced inhibition of cell adhesion and toxicity evaluation using human dermal fibroblast-derived spheroids. J Hazard Mater, 465, 133359.

Gündoğdu, S. (2022). Plastik: Mucize mi Felaket mi? Yeni İnsan Yayınevi.

Gundogdu, S., Akca, M. O., Gürsoy, M., Yılmaz, M., Zhang, X., Rodríguez-Seijo, A., ... & Velimirovic, M. (2025). Microplastics in soil: a comprehensive review of analytical techniques. Frontiers in Soil Science, 5, 1614075.

Gündoğdu, S., Bour, A., Köşker, A. R., Walther, B. A., Napierska, D., Mihai, F. C., ... & Walker, T. R. (2024). Review of microplastics and chemical risk posed by plastic packaging on the marine environment to inform the Global Plastics Treaty. Science of The Total Environment, 946, 174000.

Gündoğdu, S., Köşker, A. R., Akarsu, C., Aydoğan, B., Aydoğan, B., Blettler, M., ... & Gallitelli, L. (2026). Micro-and nanoplastic pollution in urban influenced aquatic environments: Sources, pathways, and remediation strategies. Marine Pollution Bulletin, 223, 119048.

Gündoğdu, S., Köşker, A. R., Akça, H., Akça, M. O., Harada, N., & Turgay, O. C. (2025). Microplastics in food production and agricultural environments. In Microplastics in Agriculture and Food Science (pp. 285-307). Academic Press.

Menichetti, A., Mordini, D., & Montalti, M. (2024). Penetration of microplastics and nanoparticles through skin: effects of size, shape, and surface chemistry. Journal of Xenobiotics, 15(1), 6.

Mohsen, M., Gündoğdu, S., Wang, Q., Zhou, H., & Zhang, C. (2025). Impact of micro and nanoplastics on aquaculture animals: a systematic review. Aquaculture International, 33(7), 655.

Morgan, S. E., Romanick, S. S., DeLouise, L., McGrath, J., & Elder, A. (2024). Understanding Human Health Impacts Following Microplastic Exposure Necessitates Standardized Protocols. Current Protocols, 4(7), e1104.

Özsoy, S., Gündogdu, S., Sezigen, S., Tasalp, E., Ikiz, D. A., & Kideys, A. E. (2024). Presence of microplastics in human stomachs. Forensic Science International, 364, 112246.

Peters, R., de Jong, N., de Haan, L., Wright, S., & Bouwmeester, H. (2022). Release and intestinal translocation of chemicals associated with microplastics in an in vitro human gastrointestinal digestion model. Microplastics and Nanoplastics, 2(1), 3.

PEW, S. (2025). Breaking the plastic wave: An Assessment of the Global System and Strategies for Transformative Change. https://www.pew.org/en/research-and-analysis/reports/2025/12/breaking-the-plastic-wave-2025.

Sofield, C. E., Anderton, R. S., Anyaegbu, C. C., Chiu, L. S., Fuller, K. A., & Gorecki, A. M. (2025). Digestion of microplastics with simulated gastrointestinal conditions mitigates uptake by intestinal epithelial cells: Quantified by imaging flow cytometry. Journal of Hazardous Materials, 139816.

Street, A., Stringer, R., Mangesho, P., Ralston, R., & Greene, J. (2024). Why medical products must not be excluded from the Global Plastics Treaty. The Lancet, 404(10464), 1708-1710.

Vanetti, C., Broggiato, M., Pezzana, S., Clerici, M., & Fenizia, C. (2025). Effects of microplastics on the immune system: How much should we worry? Immunology Letters, 272, 106976.

Vasse, G. F., & Melgert, B. N. (2024). Microplastic and plastic pollution: impact on respiratory disease.

Vural, T., Çetinkaya, S., Yeğen, V., Şapcıoğlu, S., & Gündoğdu, S. (2025). Protocol for extraction and analysis of microplastics in freshwater, sediment, and fish samples. STAR protocols, 6(3), 104057.

Wagner, M., Monclús, L., Arp, H.P.H., Groh, K.J., Løseth, M.E., Muncke, J., Wang, Z., Wolf, R., Zimmermann, L. (2024) State of the science on plastic chemicals – Identifying and addressing chemicals and polymers of concern.

Wang, S., Lu, W., Cao, Q., Tu, C., Zhong, C., Qiu, L., Li, S., Zhang, H., Lan, M., Qiu, L., Li, X., Liu, Y., Zhou, Y., & Liu, J. (2023). Microplastics in the Lung Tissues Associated with Blood Test Index. Toxics, 11(9).

Zhang, Y., Wang, S., Olga, V., Xue, y., Lv, S., Diao, X., Zhang, Y., Han, Q., Zhou, H. (2022). The potential effects of microplastic pollution on human digestive tract cells. Chemosphere, 291, 132714.

Zhao, B., Rehati, P., Yang, Z., Cai, Z., Guo, C., & Li, Y. (2024). The potential toxicity of microplastics on human health. Science of The Total Environment, 912, 168946.

Zhao, J., Lan, R., Tan, H., Wang, J., Ma, Y., Chen, Q., ... & Xing, B. (2025). Detection and characterization of microplastics and nanoplastics in biological samples. Nature Reviews Bioengineering, 1-15.

Zuri, G., Karanasiou, A., & Lacorte, S. (2023). Human biomonitoring of microplastics and health implications: A review. Environmental research, 116966.

PFAS var ama ne anlama geliyor? Kimyasal tespitten biyolojik etkiye

Doç. Dr. Emrah Eroğlu

İstanbul Medipol Üniversitesinde SABİTA'nın müdürü olarak görev yapmaktadır. Araştırmaları; genetik olarak kodlanmış biyosensörler, redoks biyolojisi, oksidatif stres ve hücre içi sinyal dinamiklerinin gerçek zamanlı izlenmesi üzerine odaklanmaktadır. İnsanla ilişkili, hayvan kullanımı içermeyen deneysel platformların geliştirilmesi temel çalışma alanları arasındadır. Bu kapsamda, Türkiye'de SABİTA bünyesinde ilk NAM (New Approach Methodologies) merkezinin kurulmasına öncülük etmekte, aynı zamanda Türkiye'nin ilk 3R merkezinin kurulması yönünde çalışmalar yürütmektedir. Ayrıca, transgenik hayvan teknolojilerinin geliştirilmesi amacıyla SABİTA bünyesinde yeni araştırma ve altyapı çalışmaları başlatmıştır. Deney hayvanı kullanılmadan ilaç tarama sistemleri geliştirmekte ve bu alanda SABİTA'da bir referans laboratuvarı kurulmasına yönelik çalışmalarını sürdürmektedir. Bunun yanında, kişiselleştirilmiş tıp alanında klinikle entegre ortak SABİTA'da bir birimin kurulması için çalışmalar yürütmektedir. PFAS ve diğer kalıcı çevresel kirleticilerin hücresel etkilerinin fonksiyonel olarak değerlendirilmesine yönelik yenilikçi test sistemleri geliştirmekte; analitik kimya, ileri görüntüleme teknikleri ve yapay zekâ destekli veri analizini bütünleştiren disiplinler arası çalışmalarıyla tanınmaktadır. Ulusal ve uluslararası araştırma projelerinde aktif rol almakta, translasyonel araştırma ve teknoloji transferine güçlü katkılar sunmaktadır. Ayrıca 3R ilkeleriyle uyumlu yeni nesil tarama, risk önceliklendirme ve karar destek platformlarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması yönünde öncü çalışmalar yürütmektedir.

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), modern kimyanın karşı karşıya olduğu temel sorunlara çarpıcı bir örnek oluşturmaktadır. Yüksek dayanıklılık hedefiyle tasarlanan bu bileşikler, çevreye salındıklarında son derece kalıcı hâle gelmekte ve ortamdan uzaklaştırılmaları çok büyük zorluklar arz etmektedir (1, 2). PFAS'lar, 20. yüzyılın ortalarından itibaren yapışmaz yüzey kaplamaları, su itici özellik kazandırılmış tekstil ürünleri, gıda ambalajları ve yangın söndürme köpükleri başta olmak üzere çok sayıda gündelik uygulamada yaygın biçimde kullanılmaktadır (1-3). Bu geniş kullanım alanı, PFAS'ın hem çevreye yayılımını hem de insan maruziyetini artıran temel faktörlerden biridir. Şekil 1'de gösterildiği üzere, özellikle kaplamalı gıda ambalajları ve yüzey işlem görmüş materyaller, günlük yaşamda en sık karşılaşılan PFAS kaynaklarını temsil etmektedir. Bu tür kaplamalar, materyallere hidrofobik ve oleofobik özellikler kazandırarak işlevsellik sağlarken, kullanım sırasında kimyasalların gıda ile temas yoluyla taşınmasına ve dolaylı olarak insan vücuduna geçişine neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, bu ürünlerin üretimden kullanım sonrası atık aşamasına kadar geçen yaşam döngüsü boyunca çevreye salınan PFAS, su ve toprak sistemlerinde birikerek uzun süre kalıcılığını korumakta ve ekosistemler üzerinde potansiyel riskler oluşturmaktadır.

Bu maddeler, büyük bir bölümünün çevresel koşullar altında kolayca parçalanmaması nedeniyle sıklıkla "sonsuz kimyasallar" olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak, PFAS ile ilişkili bazı bileşikler zaman içerisinde tamamen ortadan kaybolmak yerine başka PFAS türlerine dönüşebilmekte; bu durum, PFAS'ların su, toprak, yaban hayatı ve insan vücudu gibi biyolojik ve çevresel ortamlarda uzun süre kalıcı olmasına neden olmaktadır (4-6).

Bu özel sayıda PFAS kaynakları, maruziyet yolları ve düzenleyici çerçeve ayrıntılı biçimde ele alındığından, konuya ilişkin daha kapsamlı bilgi için okuyucular diğer kaynaklara başvurmaya davet edilmektedir.

Topluluklar, düzenleyici kurumlar ve araştırmacılar sıklıkla iki temel soruya net yanıtlar aramaktadır:

(i) PFAS mevcut mu ve hangi PFAS türleri söz konusudur?

(ii) Özellikle gerçek yaşam maruziyetlerinde görülen karmaşık karışımlar dikkate alındığında bu maruziyetlerin olası biyolojik zararı nedir?

Bu makalede, bu sorular arasındaki pratik bir boşluğa odaklanılmaktadır: Analitik yöntemler ve gelişmekte olan doğrudan algılama teknolojileri PFAS'ın varlığını ortaya koyabilse de çoğu zaman bu maddelerin canlı hücreler üzerindeki fonksiyonel etkilerini ve insan sağlığı açısından oluşturdukları riskleri doğrudan değerlendirememektedir. Bu bağlamda, fonksiyonel, insanla ilişkili ve hayvan kullanımı içermeyen biyosensör tabanlı testlerin, PFAS ve ilişkili "sonsuz" kirleticilerin risk önceliklendirilmesini desteklemek üzere mekanistik çıktılar sağlayarak kimyasal tespit yaklaşımlarını nasıl tamamlayabileceği tartışılmaktadır.

PFAS Tespitinde Güncel Yaklaşımlar: Kanıtlanmış Laboratuvar Yöntemleri ve Gelişmekte Olan Prototipler

Günümüzde PFAS ölçümü için en güvenilir yaklaşım hâlen kütle spektrometrisine dayanmaktadır. Bu güçlü laboratuvar teknolojisi, kimyasal bileşikleri moleküler

"parmak izleri" üzerinden tanımlama olanağı sunmaktadır. Özellikle içme suyunda yürütülen rutin ve düzenlemeye tabi izleme çalışmalarında, laboratuvarlar ağırlıklı olarak hedeflenmiş LC–MS/MS yöntemlerini kullanmaktadır. Bu testler son derece yüksek duyarlılığa sahip olup belirli PFAS türlerini çok düşük konsantrasyonlarda ve yüksek doğrulukla ölçebilmektedir (5). Bununla birlikte, bu yöntemlerin bazı pratik sınırlamaları bulunmaktadır: genellikle önceden tanımlanmış sınırlı bir PFAS listesini kapsamakta, pahalı donanım ve uzman personel gerektirmekte ve numune hazırlığı ile laboratuvar iş yükü nedeniyle sonuçların elde edilmesi zaman alabilmektedir (5-8).

Kısa hedef listelerinin ötesinde daha geniş bir PFAS yelpazesini ortaya koyabilmek amacıyla, birçok laboratuvar şüpheli ve hedef dışı tarama yaklaşımlarında Yüksek Çözünürlüklü Kütle Spektrometrisini (HRMS) kullanmaktadır. Basitçe ifade etmek gerekirse, HRMS standart analiz panellerinde yer almayanlar da dâhil olmak üzere çok sayıda olası PFAS'ın araştırılmasına olanak tanımaktadır (5). Bu yaklaşım keşif açısından son derece değerli olmakla birlikte, büyük veri setlerinin yönetimi, daha karmaşık analiz süreçleri ve kimi durumlarda kesin kimyasal tanımlamada belirsizlik gibi önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Daha da önemlisi, HRMS çok sayıda PFAS ile ilişkili sinyal tespit edebilse bile, toplum açısından en kritik soru olan bu maruziyetin sağlık açısından anlamı ya da oluşturduğu tehlikenin ne olduğu sorusuna doğrudan yanıt sunmamaktadır (7, 8).

Bir diğer tamamlayıcı yaklaşım, tek tek PFAS bileşiklerini ölçmek yerine toplam veya bileşik (sum) ölçümlere odaklanan yöntemleri kapsamaktadır. Bu yaklaşımlar, bireysel maddelerin nicel analizinden ziyade, bir örnekteki toplam PFAS ile ilişkili kimyasal yükün tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Gerçek yaşam koşullarındaki PFAS maruziyetleri sıklıkla hedefli analizlerle gözden kaçabilen prekürsörleri ve dönüşüm ürünlerini içerdiğinden, bu yöntemler özellikle çok sayıda bilinmeyen ya da ölçülmesi güç PFAS'ın bulunduğu durumlarda daha bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır (7, 8).

Son olarak, immünoassayler, elektrokimyasal cihazlar ve mühendislik ürünü biyolojik algılama sistemleri gibi taşınabilir ve saha uygulamalarına uygun sensörlere yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu araçlar, gelişmiş laboratuvar yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve görece düşük maliyetli tarama olanağı sunmakta ve gelecekte yerinde (in situ) izleme çalışmalarını destekleme potansiyeli taşımaktadır. Bununla birlikte, bu sensörlerin büyük bir kısmı hâlen prototip ya da erken ticarileşme aşamasında olup, karmaşık çevresel numunelerde karışık kirleticiler, belirgin "matris etkileri" ve laboratuvar düzeyinde doğruluk gereksinimleri nedeniyle uygulamada çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır (8).

Genel olarak değerlendirildiğinde, günümüzde PFAS tespitine yönelik mevcut yöntemler güçlü ve teknik açıdan gelişmiş olmakla birlikte, kapsam ve işlevsellik açısından hâlen eksiksiz değildir. Taşınabilir ve saha temelli yaklaşımlar önemli bir potansiyel sunmakta; ancak doğruluk, tutarlılık ve standardizasyon bakımından henüz yeterli olgunluğa ulaşmamıştır. Daha da önemlisi, bu tespit yöntemlerinin hiçbiri tek başına PFAS maruziyetinin biyolojik etkileri ve olası sağlık tehlikelerine ilişkin bütüncül bir değerlendirme sağlamamaktadır.

Yaygın olarak kullanılan PFAS tespit yöntemlerinin teknik özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmiştir. Bu kapsamda LC–MS/MS, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometrisi (HRMS) ve ELISA yöntemleri; laboratuvar ve saha uygulanabilirliği, analitik duyarlılık ve biyolojik etki değerlendirme kapasiteleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. LC–MS/MS ve HRMS, oldukça yüksek analitik duyarlılık sunmalarına karşın ileri düzey laboratuvar altyapısı gerektirmeleri ve maruziyetin biyolojik sonuçlarına ilişkin doğrudan bilgi sağlamamaları nedeniyle uygulama açısından kısıtlılık göstermektedir. Buna karşılık ELISA yöntemleri daha basit bir uygulama altyapısına sahip olup kısmen saha koşullarında kullanılabilse de, duyarlılık ve özgüllük bakımından kütle spektrometrisine dayalı yöntemlere kıyasla daha düşük performans göstermektedir.

Kimyasal Varlıktan Biyolojik Anlama: Genetik Olarak Kodlanmış Biyosensörler

Farklı ancak son derece değerli bir yaklaşım, canlı hücrelerde ifade edilebilen floresans ölçümüne dayanan genetik olarak kodlanmış biyosensörlerin kullanılmasıdır. Bu biyosensörler başlangıçta hücre içi sinyal iletim moleküllerini ve hücresel

Tablo 1. Yaygın PFAS tespit yöntemlerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması

Yöntem	Laboratuvar Uygulanabilirliği	Saha Uygulanabilirliği	Duyarlılık	Biyolojik Etki Değerlendirmesi
LC–MS/MS	Var	Yok	Çok yüksek	Yok
HRMS	Var	Yok	Çok yüksek	Yok
ELISA	Var	Sınırlı	Orta	Yok

Şekil 1. PFAS içeren kaplamalı yüzeylerden gıdaya ve çevresel ortamlara geçişi ile buna bağlı potansiyel insan maruziyet yollarının şematik gösterimi

aktiviteyi gerçek zamanlı olarak izlemek amacıyla geliştirilmişken, günümüzde hücrelerin belirli alt kompartmanlar içindeki yanıtlarını ve bu yanıtların zamansal dinamiklerini ortaya koyan fonksiyonel çıktılar sağlamak üzere yaygın biçimde kullanılmaktadır (9, 10). Bu bağlamda Şekil 2'de gösterilen şematik model, substrat bağlanmasına yanıt olarak duyusal modülün konformasyonel bir değişim geçirdiğini ve bunun sonucunda floresan proteinin inaktif ("floresans kapalı") durumdan aktif ("floresans açık") duruma geçerek ölçülebilir bir floresans sinyalinin oluştuğunu göstermektedir. Bu mekanizma, biyosensörlerin kimyasal bir varlığı doğrudan optik bir biyolojik yanıta dönüştürerek hücresel düzeyde fonksiyonel bilgi üretmesini mümkün kılmaktadır.

Biyosensörlerin amacı, LC-MS/MS gibi kimyasal tanımlamaya dayalı analitik yöntemlerin yerini almak değildir. Aksine, bu sistemler paralel ve ölçeklenebilir bir bilgi katmanı ekleyerek şu temel sorulara yanıt üretir: Söz konusu maruziyet, insanla ilişkili bir biyolojik sistemde nasıl bir etki oluşturmaktadır ve hücresel yanıt ne kadar sürede tetiklenmektedir? Bu yaklaşım, gerçek dünyadaki PFAS maruziyetlerinin çoğunlukla karmaşık karışımlar hâlinde, farklı çevresel matrislerde ve ek stres faktörleriyle birlikte gerçekleşmesi nedeniyle özellikle önem taşımaktadır (9). Fonksiyonel biyosensör yaklaşımları, hangi numunelerin veya kimyasal grupların daha ayrıntılı incelemeyi gerektirdiğini belirlemeye yardımcı olabilir ve benzer düzeylerde ölçülen PFAS konsantrasyonlarının neden farklı biyolojik sonuçlara yol açabildiğine dair mekanistik açıklamalar sunabilir (9, 10).

Bu bağlamda, İstanbul Medipol Üniversitesi ve Sağlık Bilim ve Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (SABİTA) bünyesindeki laboratuvarımızda biyosensör geliştirme, temel bir araştırma odağı hâline gelmiştir. Hücre fizyolojisinde kilit rol oynayan yolakları daha gerçekçi ve fizyolojik açıdan anlamlı koşullar altında incelemek amacıyla genetik olarak kodlanmış biyosensör araçları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Araştırma grubumuz, redoks dengesi ve oksidatif stres dinamiklerini, nitrik oksit (NO) sinyal iletimini ve strese yanıt veren antioksidan yolakların aktivasyonunu raporlayan çeşitli biyosensör sistemleri oluşturmuştur. Bu araçlar, hücresel sinyal iletiminin çoğu zaman kompartmana özgü, zamana bağlı ve fizyolojik bağlam tarafından güçlü biçimde şekillendirildiğini ortaya koyarak, PFAS gibi kalıcı kirleticilerin etkilerinin yorumlanmasına yönelik mekanistik içgörüler sağlamıştır.

Bu birikimden hareketle, SABİTA'nın mevcut hedefi biyosensör araç setini yalnızca duyarlılık ve hücresel alt bölgelere özgül hedefleme açısından geliştirmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bu sistemleri ölçeklenebilir test formatlarına ve standartlaştırılabilir analiz hatlarına entegre etmektir. Nihai amaç, biyosensör temelli fonksiyonel çıktıları özellikle PFAS ve diğer "sonsuz" kirleticiler gibi çağdaş çevresel zorluklar bağlamında, translasyonel kullanıma uygun, tekrarlanabilir ve karar destek süreçlerine katkı sunabilecek araçlar hâline getirmektir.

PFAS Algılamasında Doğrudan Biyosensörler: Kimyasal Ölçümün Ötesine Geçmek

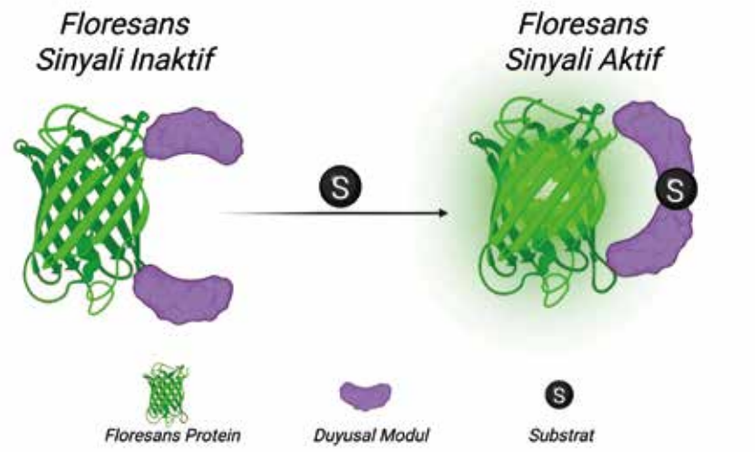
Hedeflenmiş LC–MS/MS ve HRMS gibi laboratuvar temelli yaklaşımların ötesinde, PFAS moleküllerini daha hızlı ve potansiyel olarak uzmanlaşmış laboratuvar ortamları dışında da tespit edebilen doğrudan biyosensörlere yönelik ilgi giderek artmaktadır (7-9). Bu teknolojiler; saha uygulamaları, geniş ölçekli izleme programları ve doğrulayıcı analizler öncesinde gerçekleştirilen ön eleme süreçleri için, daha hızlı, daha basit ve erişilebilir tarama olanakları sunmayı amaçlamaktadır (9, 10).

Buna paralel olarak, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Wyss Enstitüsü, mühendislik ürünü protein sensörlerini taşınabilir bir elektrokimyasal okuma sistemiyle birleştiren ve uzun vadede sahada hızlı PFAS testlerini mümkün kılmayı amaçlayan "PFASense" adlı bir prototip girişimi tanıtmıştır (11). Bu gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, doğrudan biyosensörlerin HRMS tabanlı keşif çalışmaları ve doğrulayıcı laboratuvar analizleri için güçlü bir tamamlayıcı katman oluşturabileceğine; PFAS izleme faaliyetlerine erişimi genişletebileceğine ve karar alma süreçlerini önemli ölçüde hızlandırabileceğine işaret etmektedir (4).

Bununla birlikte, doğrudan tespit yaklaşımlarının ne tür bilgiler sunabildiği ve hangi sorulara yanıt veremediği açık biçimde ortaya konmalıdır. Bir sensör PFAS'ın varlığını ve hatta konsantrasyonunu güvenilir şekilde raporlayabilse dahi, bu durum sağlık etkileri ve risk önceliklendirmesi açısından belirleyici olan bir sonraki soruya kendiliğinden yanıt üretmez: söz konusu maruziyet canlı hücrelerde hangi biyolojik sonuçlara yol açmaktadır? Varlık ve konsantrasyon bilgileri vazgeçilmezdir; ancak özellikle gerçek yaşam koşullarında karşılaşılan karmaşık karışımlar ve farklı biyolojik bağlamlar dikkate alındığında, bu ölçümler fonksiyonel etkilerle bire bir örtüşmeyebilir (1-4, 7).

Kimyasal Tespitten Biyolojik Etkiye: Fonksiyonel Tehlike Tarama Aracı Olarak R3ACT

"Kimyasal tespit" ile "biyolojik etki" arasında ortaya çıkan boşluk, fonksiyonel canlı hücre testlerinin benzersiz katkı sunabileceği temel alanı oluşturmaktadır. Bu gereksinime yanıt vermek üzere SABİTA bünyesinde, hücresel redoks biyolojisinin iki tamamlayıcı boyutunu bütüncül biçimde yakalamak amacıyla ta-



Şekil 2. Substrat bağlanmasına bağlı konformasyonel değişim sonucu floresan proteinin inaktif durumdan aktif duruma geçerek floresans sinyali oluşturmasını gösteren şematik model

sarlanmış, hayvan kullanımını içermeyen bir platform olan R3ACT (Redox & Antioxidant Capacity Tracker) geliştirilmiştir. R3ACT, (i) hücresel kompartmanlara özgü H_2O_2 dinamiklerini ve (ii) transkripsiyonel düzeyde antioksidan savunma programlarının aktivasyonunu eş zamanlı olarak izlemeyi mümkün kılmaktadır.

R3ACT iş akışı, pratik bir "tarama ve doğrulama" hattı olarak yapılandırılmıştır. İlk aşamada, oksijen düzeyi kontrollü koşullar altında yüksek verimli plaka okuyucu taramaları gerçekleştirilmekte ve otomatik "hit" tanımlaması yapılmaktadır. İkinci aşamada ise bu ön taramada elde edilen temel bulgular; hücreler arası heterojenliği ortaya koymak ve kompartmana özgü yanıtları doğrulamak amacıyla, derin öğrenme destekli analizlerle entegre edilmiş oksijen kontrollü tek hücre mikroskopisi kullanılarak ayrıntılı biçimde doğrulanmaktadır.

Perflorooktanoik asit (PFOA-bir PFAS türü) ve polistiren nanoparçacıklar (PS-NP'ler) dâhil olmak üzere temsili çevresel materyaller üzerinde uygulandığında, R3ACT kimyasal tespiti tamamlayan, yorumlanabilir hücresel düzeyde ayırt edici yanıt profilleri sunmaktadır. Özellikle bu platform, ölçülen zaman noktalarında belirgin bir H_2O_2 artışı ile karakterize edilen maruziyetler ile, belirgin bir H_2O_2 yükselmesi olmaksızın esas olarak antioksidan savunma yolaklarının aktivasyonunu tetikleyen maruziyetler arasında ayrım yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım sayesinde R3ACT, mevcut genetik olarak kodlanmış biyosensörleri PFAS moleküllerini doğrudan tanımlamak için değil; doğrudan tespit yöntemlerinin sağlayamadığı kritik bir boyutu, canlı hücrelerde ortaya çıkan oksidatif ve antioksidan fonksiyonel sonuçları, açıklığa kavuşturmak amacıyla kullanmaktadır.

Düzenleyici kurumların ve fon sağlayıcı kuruluşların insanla ilişkili, hayvan kullanımı içermeyen yaklaşımlara giderek daha fazla önem verdiği bir dönemde, R3ACT uygulaması PFAS testinin ötesine geçerek mikro ve nanoplastikler ile karmaşık çevresel karışımları da kapsayan, hızlı, ölçeklenebilir, mekanistik açıdan bilgilendirici ve uyarlanabilir bir tarama ve önceliklendirme katmanı olarak konumlanmaktadır. Bu yaklaşım, 11-14 Haziran 2026 tarihlerinde İstanbul Medipol Üniversitesinde düzenlenecek olan ve biyosensör geliştirme, ileri görüntüleme teknikleri, yapay zekâ destekli analizler ile 3R ilkeleriyle uyumlu model sistemleri alanlarında uluslararası uzmanları bir araya getirmeyi amaçlayan R3FINE Çalıştayı ("R3FINE: Pioneering the Future of Drug Screening Platforms & Biosensor Innovation") ile de doğrudan örtüşmektedir (12).

Bu doğrultuda, SABİTA bünyesinde;

(i) kimyasal güvenlik ve biyomedikal araştırmalar için hayvan kullanımı içermeyen test platformlarının geliştirilmesi ve doğrulanması,
(ii) teknoloji transferinin desteklenmesi ile standardizasyonun ve laboratuvarlar arası tekrarlanabilirliğin sağlanması,
(iii) araştırmacılar ve ilgili paydaşlara yönelik eğitim ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin yürütülmesi ve
(iv) akademi, sanayi ve düzenleyici kurumlar arasında sürdürülebilir iş birliklerinin kurulması yoluyla, insanla ilişkili yöntemlerin karar alma süreçlerine entegrasyonunu hızlandırmayı amaçlayan Türkiye'nin ilk özel 3R Merkezinin kurulması planlanmaktadır.

Yöntem geliştirme, topluluk etkileşimi ve eğitim ile ulusal düzeyde altyapı oluşturmayı kapsayan bu bütüncül girişim, yeni nesil biyosensör temelli testlerin yalnızca PFAS tespitine değil, aynı zamanda gerçek yaşam bağlamlarında güvenilir, yorumlanabilir ve karar destek süreçlerine katkı sunan tehlike önceliklendirmesine hizmet etmesini hedeflemektedir.

Sonuç

PFAS, tekil bir kimyasal sorun olmaktan ziyade, tek bir ölçüm stratejisiyle bütünüyle kapsanması mümkün olmayan, son derece çeşitli ve kalıcı bir bileşik ailesini temsil etmektedir. Bu nedenle bir sonraki pratik ve zorunlu adım entegrasyondur: altın standart kimyasal analizlerin, hızlı doğrudan algılama yaklaşımları ve biyolojik etkiye dayalı önceliklendirme yapabilen fonksiyonel testlerle birlikte ele alınması. Böyle bir bütünleşik yaklaşım, yalnızca maruziyetin varlığını değil, aynı zamanda biyolojik anlamını da karar alma süreçlerine taşımayı mümkün kılacaktır.

Türkiye, 3R ilkeleriyle uyumlu platformlar için ulusal kapasite oluşturarak; insanla ilişkili test yöntemlerini geliştirip doğrulayarak, laboratuvarlar arası standardizasyon ve karşılaştırmalı (ring) çalışmalar kurarak ve analitik kimya, biyo-görüntüleme ile yapay zekâ temelli veri analizini bir araya getiren ortak altyapılar oluşturarak bu dönüşüme anlamlı ve sürdürülebilir bir katkı sunabilir. SABİTA gibi merkezlerin açık ve iş birliğine dayalı test alanları olarak konumlandırılması ve R3FINE gibi girişimler aracılığıyla uluslararası uzmanlık birikiminin bütünleştirilmesi, yeni nesil PFAS izleme yaklaşımlarının kamu sağlığı ve çevre korumasına hizmet eden, tekrarlanabilir, yorumlanabilir ve karar almaya hazır iş akışlarına dönüşmesini önemli ölçüde hızlandıracaktır.

Teşekkür: Bu metnin hazırlanmasına katkı sağlayan Asal Ghaffari Zaki ve Esranur Yavuz'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1) Evich, M. G., Davis, M. J., McCord, J. P., Acrey, B., Awkerman, J. A., Knappe, D. R. U., Lindstrom, A. B., Speth, T. F., Tebes-Stevens, C., Strynar, M. J., Wang, Z., Weber, E., Henderson, M. W., & Washington, J. W. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science, 375(6580), eabg9065.

2) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). Guidance on PFAS exposure, testing, and health effects. National Academies Press.

3) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. (n.d.). PFOS, PFOA and PFHxS risk profiles and POP listings. United Nations Environment Programme.

4) Schymanski, E. L., Zhang, J., Thiessen, P. A., Chirsir, P., Kondić, T., & Bolton, E. E. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. Environmental Science & Technology, 57(44), 16918-16928.

5) Rehman, A. U., Crimi, M., & Andreescu, S. (2023). Current and emerging analytical techniques for the determination of per- and polyfluoroalkyl substances in environmental samples. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 38, e00195.

6) TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü. (n.d.). Kalıcı organik kirleticiler ve yeni nesil çevresel riskler.

7) Idowu, I. G., Ekpe, O., Megson, D., & Bruce-Vanderpuije, P. (2025). A systematic review of methods for the analysis of total per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Science of the Total Environment, 967, 166098.

8) U.S. Environmental Protection Agency. (2021). Method 533: Determination of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water by SPE–LC–MS/MS. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-12/documents/method-533-815b19020.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

9) Mann, M. M., & Berger, B. W. (2023). A genetically encoded biosensor for direct detection of perfluorooctanoic acid. Scientific Reports, 13(1), 1542.

10) Chen, X., Tian, X., Shin, I., & Yoon, J. (2011). Fluorescent and luminescent probes for detection of reactive oxygen and nitrogen species. Chemical Society Reviews, 40(9), 4783-4804.

11) Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University. (n.d.). PFASense: Rapid field-deployable PFAS detection technology. https://wyss.harvard.edu/technology/pfasense-fast-in-field-testing-for-forever-chemicals/ (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

12) R3FINE Conference & Workshop. (2026). R3FINE: Pioneering the future of drug screening platforms & biosensor innovation. https://r3fine.org/.

Çocuklar ve pestisit maruziyeti: Ne biliyoruz ve ne yapabiliriz?

Prof. Dr. Burcu Tokuç

2004 yılında Trakya Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalında doktorasını tamamlayan Dr. Burcu Tokuç, 2019 yılına kadar aynı üniversitede öğretim üyesi olarak çalıştı. 2014-2018 yıllarında iki dönem Halk Sağlığı Uzmanları Derneği Yönetim Kurulunda görev aldı. 2019-2022 yıllarında TÜBİTAK Sağlık Bilimleri Araştırma Grubunda Danışma Kurulu üyeliği yaptı. 2014-2024 yılları arasında Balkan Medical Journal'de editör olarak görev yaptı ve hâlen Halk Sağlığı Araştırma ve Uygulamaları Dergisi Baş Editörüdür. 2014 yılından bu yana Tıp Eğitimi ile ilgili de çalışmalarda bulunmakta ve hâlen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıp Eğitimi Ana Bilim Dalında görev yapmaktadır.

Dr. M. Berfu Tokuç Ülgen

2013 yılında Galatasaray Lisesi ve 2019 Yeditepe Üniversitesi Tıp Fakültesini bitirdikten sonra, 2024 yılında Marmara Üniversitesi Tıp Fakültesinde Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları uzmanlık eğitimini tamamladı. Düzce-Çilimli Devlet Hastanesinde mecburi hizmetini yaptı. Hâlen Zeynep Kamil Kadın ve Çocuk Hastalıkları Eğitim ve Araştırma Hastanesinde Çocuk Nörolojisi yan dal uzmanlık eğitimine devam etmektedir.

Günümüzde çocuklar yalnızca bir kuşak önce hayal dahi edilemeyecek yeni bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Dünya genelinde iklim değişikliği ve çevresel bozulma, çocukların hayatta kalmasını, sağlığını ve esenliğini tehdit etmektedir. Her yıl çoğu gelişmekte olan ülkelerde yaşayan beş milyondan fazla 0-14 yaş arası çocuk doğrudan çevreleriyle ilgili hastalıklardan dolayı hayatını kaybediyor (1).

Çocuk sağlığına yönelik en büyük çevresel tehditler aslında daha güvende olmaları gereken yerlerde yani evlerinde, okullarında ve yaşadıkları topluluklarda bulunmaktadır. Sağlıksız su, yetersiz hijyen ve temizlik, dış ortam hava kirliliği ile yemek pişirmek ve ısınmak için kullanılan kirli ev yakıtlarının neden olduğu iç ortam hava kirliliği, tütün dumanı, soluyarak ya da besin yoluyla maruz kaldıkları tehlikeli kimyasal maddeler ve diğer çevresel tehditler, çocukların sağlığını az ya da çok ciddi bir şekilde etkilemektedir. Çevresel etkenlerin çocukların gelişimine etkisini değerlendirmek zordur. Değişikliklerin kapsamı geniş olup büyüme ile fiziksel, zihinsel, duygusal ve sosyal gelişimi etkileyebilecek etkenlerin sayısı ve çeşitliliği de fazladır.

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 10 milyara ulaşacağı tahmin edilirken, dünyanın tarım ürünleri (buğday, pirinç, sebze ve meyve) talebinin de 2013 yılına göre yüzde 50 artması beklenmektedir (2). Nüfus artışı, temel gıdalara olan talebi yükseltirken kentleşme et ve süt ürünleri tüketiminin artması gibi beslenme alışkanlıklarında değişikliklere neden olmaktadır. Tarım ve diğer insan faaliyetleri nedeniyle ormansızlaşma sonucu doğal yaşam alanları dönüştürülürken veya yok edilirken zararlı böceklerin sayısının artması beklenmektedir. Aynı zamanda, iklim değişikliği gibi çevresel sorunların zararlı böceklerin direncini artırması ve yeni zararlı böceklerin ortaya çıkmasına yol açması öngörülmektedir. İklim değişikliğinin riskleri tarımsal istikrarı tehdit ederken ve tarımsal ürünler yüksek talep görmeye devam ederken, zararlıları kontrol etmek ya da verimliliği artırmak amacıyla pestisit kullanımı da katlanarak artmakta, çevre ve sağlık riskleri konusunda uluslararası endişe yaratmaktadır.

2013 itibarıyla küresel istihdamın yüzde 31'i tarımla uğraşırken sektörde çalışanların oranı özellikle gelişmiş ülkelerde gitgide azalmıştır. Ancak gelişmekte olan dünyada çocuk işçilerin yüzde 71'i hâlen tarım sektöründe çalışmakta ve yaklaşık 108 milyon kız ve erkek çocuğu pestisitlerle doğrudan temas da dâhil olmak üzere, sıklıkla tehlikeli çalışma koşullarına maruz bırakılmaktadır (3).

Kemirgenler, sivrisinekler ve keneler gibi böcekler ve diğer zararlılar, sıtma, dang humması, Zika, Batı Nil virüsü, Lyme hastalığı ve kuduz gibi vektör kaynaklı bulaşıcı hastalıklar da dâhil olmak üzere halk sağlığı için önemli riskler oluşturmaktadır. Bakteriler, virüsler ve protozoanlar gibi mikroorganizmalar evlerde, hastanelerde ve gıda işleme tesislerinde kontaminasyona ve ölümcül hastalıklara neden olmaktadır. Bu nedenle, pestisitlerin insanları bu yıkıcı sağlık risklerinden koru-

mada hayati bir rol oynadığı görülmüştür. Örneğin UNICEF ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO), 2015 yılında yaklaşık 438.000 kişinin ölümüne (Bu ölümlerin %70'i 5 yaşın altındaki çocuklardır.) neden olan sıtmanın yayılmasını kontrol etmek için böcek ilacı ile işlem görmüş sivrisinek ağlarının kullanılmasını önermektedir (4). Liberya'da ortaya çıkan Ebola salgınına yanıt olarak salgının yayılmasını kontrol altına almak için dezenfektanların bolca kullanılması gerekmiştir. Bazı pestisitler, özellikle DDT gibi kalıcı organofosfatlar, sadece halk sağlığı amaçlı kullanım için düzenlenmiştir ve tarımsal kullanımları yasaklanmıştır. Pestisitlerin olumlu etkileri için, özellikle halk sağlığı için kullanımı, etkili düzenleme ve uygulama ile dikkatli bir şekilde dengelenmelidir (5).

Pestisit Maruziyeti Açısından Çocuklar Daha Fazla mı Risk Altında?

Teknik bir raporda söylendiği gibi, "Çocuklar, gelişimsel, beslenme ve fizyolojik faktörler nedeniyle pestisitlerin alınması ve olumsuz etkilerine karşı benzersiz bir şekilde savunmasızdır. Pestisitlere maruz kalma, yutma, soluma veya deri teması yoluyla gerçekleşmekte; çocuklar, vücut ağırlığının kilogramı başına daha fazla yiyecek veya sıvı aldıkları için, istemeden aldıkları doz yetişkinlere göre önemli ölçüde daha yüksek olabilmektedir. Çocuklar sık sık ellerini ağızlarına götürürler ve bu, yetişkinlere kıyasla maruziyetin artmasının önemli bir nedeni olmaktadır." (6).

Çocuklar hızlı bir büyüme ve gelişme sürecinden geçtiği için, erken gelişim dönemindeki kritik aşamalar olan, her türlü toksik maruziyetin kalıcı hasarlara yol açabildiği "savunmasızlık dönemleri" ile karşı karşıyadırlar (5). Yaşamın ilk 12 yılında, bir çocuğun solunum hızı bir yetişkininkinin iki katıdır: Havadan püskürtülen pestisitlere maruz kalırlarsa, iki kat daha fazla miktar solurlar (7). Çocuklar genellikle vücut ağırlıklarına göre yetişkinlerden daha fazla yiyip içerler ancak karaciğerleri ve böbrekleri pestisitleri vücuttan atma konusunda yetişkinlerin kapasitesine sahip değildir; bu da toksinlerin vücutta kalma riskini artırır. Nispeten küçük boyutları nedeniyle, aynı miktardaki bir kimyasal, bir çocuk için bir yetişkine göre çok daha toksik olabilir (8).

Çocuklar Pestisitlere Nasıl Maruz Kalmaktadır?

Çocuklar, gebe kalınan andan itibaren ve fetüs olarak gelişim aşaması boyunca da pestisitlere karşı savunmasızdırlar. Bu durum, çocuklara ve onların haklarına olan etkisini göstermek için yaygın olarak kullanılan "doğuştan kirlenmiş" teriminde yansıtılmaktadır (5).

Anneden çocuğa: Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Sağlık Bakanlığının 2010 tarihli bir raporunda belirtildiği gibi, kadınlarda erkeklere kıyasla daha yüksek düzeyde toksik ve hormon bozucu maddeler sıklıkla bulunur. Bu maddeler hamile kadınların ve yeni doğmuş bebekleri olan annelerin kanında, plasenta dokusunda ve anne sütünde de bulunmuştur (9). Toprakta yüzlerce yıl kalabilen DDT, amniyotik sıvı, plasenta, göbek kordonu kanı, fetüsler ve anne sütünde tespit edilmiştir (10).

Tarımda çalışan kadınların sayısı erkeklerden her zaman fazladır ve üreme çağındaki tüm tarım işçileri arasında pestisit maruziyet düzeyleri genel nüfusa göre sürekli olarak daha yüksektir (11). Birkaç çalışma, annelerin mesleki maruziyetinin lösemi, doğum kusurları ve diğer hastalıkların yanı sıra yenidoğan ölümleri ile de ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (5).

Evde ve oyun sırasında: Çocukların doğrudan maruz kaldığı yaygın durumlardan biri, evde böcek ilaçları, fare zehirleri ve benzeri kimyasalların güvenli olmayan biçimde kullanılmasıdır. Çocuklar, kimyasallar yaşam alanlarının yakınında depolandığında veya kamuya açık alanlara atıldığında, son derece tehlikeli pestisitlerle de temas edebilirler. Her iki durum da yasaklanmış uygulamalardır ancak bilgi, farkındalık ve uygulama mekanizmalarının eksikliği nedeniyle sıklıkla meydana gelir. Tehlikeli kimyasallarla temas riski, gelişmekte olan ülkelerde, özellikle kırsal alanlarda oldukça yüksektir. Tarım arazileri veya tarım toprakları ile aile yaşam alanlarının birbirine yakın olduğu alanlar ve bölgeler, çocukların pestisitlere maruz kalma riskinin büyük ölçüde arttığı yerlerdir. Pestisitler kötü yönetildiğinde, uygun olmayan şekilde depolandığında veya çevre kirliliğine veya bozulmasına neden olacak şekilde akıtıldığında, sadece doğrudan onlarla çalışan çiftçiler ve çocuklar değil, tüm topluluk da etkilenmektedir (5).

Gıdalardaki toksik kalıntılar: Maksimum kalıntı seviyelerini düşük tutmaya yönelik yasa ve politikalar bulunmasına rağmen, farklı topluluklarda ve ülkelerde yaşayan çocuklar meyve ve sebze tüketimi yoluyla pestisitlere maruz kalmaya devam etmektedir. Tayland Pestisit Eylem Ağı tarafından 2016 yılında yapılan araştırmalar, yerel pazarlarda ve süpermarketlerde satılan meyve ve sebzelerde Tayland'da yasaklanmış olan birçok tehlikeli pestisit kalıntısının yüzde 35 ila yüzde 100 oranında bulunduğunu ortaya koymuştur (12). Türkiye'de 2025 yılında yapılan bir çalışmada alınan gıda örneklerinin yüzde 61'inde, birden fazla sayıda pestisit kalıntısı bulunmuştur. Analizi yapılan 155 örneğin 49'unda (%31.6) endokrin bozucu, nörolojik gelişim bozucu, kanserojen en az bir pestisit tespit edilmiştir (13).

Çocuk işçiliği: 108 milyon kız ve erkek çocuğun çalıştığı tarım sektörü, 5-7 yaş arası çocuklar da dâhil olmak üzere hem ücretsiz çocuk işçiliğinin hem de erken yaşta iş gücüne girişin en yüksek olduğu sektördür (14). Tarım, meslek hastalıkları açısından çalışmak için en tehlikeli üç sektörden biridir ve tehlikeli işlerde çalışan 68 milyon çocuğun yüzde 59'u bu sektördedir (15). 2002 yılında kakao endüstrisinde çocuk işçiliği üzerine yapılan bir araştırma, 284.000 çocuğun bu endüstride çalıştığını, bunların bir kısmının zorla çalıştırıldığını ve 153.000'inin herhangi bir koruyucu ekipman olmadan pestisit püskürttüğünü ortaya koymuştur (5). Pamuk endüstrisinde, en büyük yedi pamuk üreticisinden altısının çocuk işçiliği kullandığı ve zorla çalıştırmanın yaygın olduğu bildirilmiştir (5).

Yaş gruplarına göre çocukların pestisitlere maruz kalma yolları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yaş gruplarına göre çocukların pestisitlere maruziyet yolları*

	Maruziyet Biçimleri	Doğum Öncesi	0-4 Yaş	5-14 Yaş	14-18 Yaş
Ebeveynler Aracılığıyla	Gebe kalma anında babanın spermi				
	Anne aracılığıyla transplasental maruz kalma				
	Anne sütü				
	Annenin yakın zamanda pestisit püskürtülmüş tarlalarda çalışırken yanında bulundurduğu çocuklar				
	Pestisitlerle kirlenmiş ebeveynlerin giysileri				
	Ebeveynlerin kimyasallarla çalıştıktan sonra ellerini yıkamadan çocukları ile teması				
Evde ya da Okulda	Çocukların atılmış pestisit kutuları ile teması				
	Böcek kovucuların doğrudan cilde veya kafa derisine uygulanması				
	Pestisitlerin evde ve çocukların ulaşabileceği yerlerde saklanması				
	Okul bahçelerine ve içlerine kemirgenleri ve böcekleri öldürmek için püskürtülen pestisitler				
	Gıdalarda veya oyuncaklarda bulunan pestisit kalıntıları				
	Kemirgenleri, böcekleri veya tahtakuruları öldürmek için evlerde iç ve dış mekânlarda (bahçelerde) pestisit kullanımı				
	Elde tutma ve ağza götürme davranışı nedeniyle evde saklanan pestisitlerin kazara yutulması				
	Kamuya açık alanlarda ve okul bahçelerinde kullanılan ahşap koruma pestisitleri				
	Pestisit yüklü giysilerin yıkanması				
	Kasıtlı pestisit yutma (intihar)				
Dış Çevrede	Çocukların oynadığı yerlere yakın su kaynaklarındaki pestisitler				
	Kamusal alanlarda pestisitlerin uygun olmayan şekilde bertaraf edilmesi				
	İçme veya yüzme suyunda bulunan pestisitler				
	Pestisitlerin uzun mesafeli taşınması				
	Su, hava ve toprak yoluyla pestisitlere maruz kalma				
	Tarımsal atık suların içinde veya yakınında çıplak ayakla yürümek				
	Tarımsal alanlarda veya akarsu havzalarında doğrudan temas veya maruz kalma, pestisitleri doğrudan uygulamak veya püskürtüldükten kısa bir süre sonra yaprakları toplamak için çalışmak				

**UNICEF. Understanding the Impacts of Pesticides on Children: A discussion paper'dan alınmıştır.*

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 10 milyara ulaşacağı tahmin edilirken dünyanın tarım talebinin de 2013 yılına göre yüzde 50 artması beklenmektedir. Nüfus artışı, temel gıdalara olan talebi yükseltirken, kentleşme et ve süt ürünleri tüketiminin artması gibi beslenme alışkanlıklarında değişikliklere neden olmaktadır. Tarım ve diğer insan faaliyetleri nedeniyle ormansızlaşma sonucu doğal yaşam alanları dönüştürülürken veya yok edilirken, zararlı böceklerin sayısının artması beklenmektedir.

Pestisitler Çocukların Sağlığını Nasıl Etkilemektedir?

Çocuklar, fizyolojileri, davranışları ve doğum öncesi maruziyetleri nedeniyle pestisitlere karşı özellikle savunmasızdır ve olumsuz etkiler gelişimlerinin tüm aşamalarında ortaya çıkabilir. Pestisitlere kronik maruziyet, çocukluk çağı kanserleri (lösemi, beyin tümörleri); zayıf motor beceriler, gecikmiş refleksler, zayıf hafıza ve diğer nörogelişimsel sorunlar; astım; obezite; ölü doğumlar, düşükler, düşük doğum ağırlığı ve anne ölümleri ve fiziksel anomaliler ile ilişkilendirilmektedir.

Hafıza kaybı ve idrar kaçırma, baş ağrısı, kusma ve bulanık görme gibi belirtilerle seyreden akut pestisit zehirlenmeleri özellikle küçük çocuklarda ölümle sonuçlanmaktadır (6). Akut pestisit zehirlenmesinin tanısı non-spesifik belirtiler ve bu belirtilerin başka hastalıklarla karıştırılabileceği için zordur. Pestisitlerle ciddi zehirlenmelerin ve ölümlerin çoğu, tanı ve tedavi olanaklarının yetersiz olması nedeniyle gelişmekte olan ülkelerin kırsal kesimlerinde olmaktadır (16).

Fetal ölüm ve doğum kusurları: Pestisitlerin uzun süreli etkilerine karşı en savunmasız grup fetüsler ve küçük çocuklardır. Annelerin gebeliğin ilk haftalarında mesleki veya konut ortamında pestisitlere maruz kalması, ölü doğumlarla, fetal ölüm riskinde artışla ve spontan abortus riskinde artışla ilişkilendirilmektedir (17, 18). Sonraki haftalarda pestisit maruziyeti ile ilişkilendirilen en yaygın doğum kusurları yarık damak ve yarık dudak, nöral tüp defektleri, troid bezi bozukluklarıdır (19).

Kanserler: 2010 yılında ABD'de yayınlanan bir raporda, her yaştaki çocuğun kanser riski ve diğer olumsuz etkiler açısından yetişkinlere göre çok daha savunmasız olduğu, neredeyse tüm zararlı çevresel maruziyetlerden kaynaklanan risklerinin daha yüksek olduğu belirtilirken bazı toksik maddelerin sadece doğrudan maruz kalanlar (rahim içindekiler dâhil) üzerinde değil, maruz kalan bireylerin çocukları üzerinde de olumsuz etkilere sahip olduğu vurgulanmıştır (20). Ebeveynlerin pestisitlere maruz kalması, çocuklarda beyin tümörü riskinin

Çocuklar hızlı bir büyüme ve gelişme sürecinden geçtiği için, erken gelişim dönemindeki kritik aşamalar olan, her türlü toksik maruziyetin kalıcı hasarlara yol açabildiği "savunmasızlık dönemleri" ile karşı karşıyadırlar. Yaşamın ilk 12 yılında, bir çocuğun solunum hızı bir yetişkininkinin iki katıdır: Havadan püskürtülen pestisitlere maruz kalırlarsa, iki kat daha fazla miktar solurlar.

artmasının potansiyel bir nedeni olarak tanımlanmıştır (6). Böcek ilaçlarına kronik düşük düzeyde maruz kalmanın çocukluk çağı hematopoietik kanserlerine neden olduğuna dair yayınlar mevcuttur (21). Tarım ilaçlarının yoğun olarak kullanıldığı Nebraska'da yapılan bir çalışma pestisit kullanımındaki yüzde 10'luk artışın, beyin ve diğer merkezi sinir sistemi çocukluk çağı kanserlerinde yüzde 36, çocuk ve ergenlerde lösemi oranlarında yüzde 23, genel çocukluk çağı kanserlerinde yüzde 30 oranında artışa neden olduğunu ortaya koymuştur (22).

Endokrin sistem bozukluğu: Yaklaşık 800 kimyasalın hormon reseptörlerini, sentezini veya dönüşümünü bozma kapasitesine sahip olduğu bilinmekte veya şüphelenilmektedir, ancak ticari olarak kullanılan kimyasalların büyük çoğunluğu hâlen test edilmemiştir (23). Birçok çocuk sağlığı sorununun, doğum öncesi veya gelişimin kritik aşamalarında endokrin sistemin bozulması ile bağlantılı olabileceği düşünülmektedir ancak bu etkilerin çoğunlukla yetişkinliğe kadar belirti vermemesi nedeniyle, hastalığın kaynağının pestisitlerle ilişkili olup olmadığını belirlemek zorlaşmaktadır (24). Kimi çalışmalarda kalıcı olmayan pestisitlere doğum öncesi veya çocukluk döneminde maruziyetin hem erkek hem de kız çocuklarında ergenlik zamanlamasında değişikliklerle ilişkili olduğu ifade edilmektedir (25).

Sinir sistemi gelişimi: Dünya genelinde kullanılan pestisit sayısı 1.000 civarındadır. Bu pestisitlerin hangilerinin çocuklarda gelişimsel bozulmalara yol açtığı ve bu etkinin nasıl gerçekleştiği üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Anneleri mesleki olarak pestisitlerle temas eden çocuklarda, motor hız, koordinasyon ve görsel hafızada eksiklikler gösteren, iki yıla kadar uzayan gelişimsel gecikmeler tespit edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen kanıtlar, kritik nörogelişimsel dönemde pestisitlere maruz kalmanın, nörogelişimsel bozukluk olarak bilinen otizm spektrum bozukluğu (OSB) da

dâhil olmak üzere birçok hastalığa yatkınlığı artırdığını göstermektedir (26). Pestisit kullanımının yoğun olduğu bölgelerde yaşayan çocukların çoklu pestisit kalıntılarına maruz kalmasının, nörogelişimsel sorunların ve öğrenme güçlüklerinin açığa çıkması üzerinde potansiyel bir etkisi olduğu ifade edilmektedir (27). Son araştırmalar, düşük seviyelerde pestisit maruziyetinin bile küçük çocukların nörolojik ve davranışsal gelişimini etkileyebileceğine işaret etmektedir. Kanıtlar, pestisitler ile yenidoğan refleksleri, psikomotor ve zihinsel gelişim ve dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu arasında bir bağlantı olduğunu göstermektedir (28). Çocuklar anne karnında klorpirifos'a (bir organofosfat) maruz kaldıklarında, üç yaşına kadar dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu oranlarının daha yüksek olma ve yedi yaşına kadar tam ölçekli IQ ve çalışma belleklerinin daha düşük olma olasılıkları daha yüksektir (29). Küçük çocuklar arasında, düşük düzeyde akut pestisit maruziyeti bile nörolojik ve davranışsal gelişimlerini etkileyebilir. Organofosfatlı pestisitlere akut maruz kalma sonucu bebeklik döneminde hastaneye yatırılan okul çağındaki çocukların, kontrol grubundaki çocuklara kıyasla bilişsel yeteneklerinde bozulma olduğu tespit edilmiştir (30).

Çocukların Pestisitlere Maruziyetini Nasıl Önleyebiliriz?

Tüm dünyada çocuklar bünyelerinde yüzlerce tehlikeli madde ile doğmakta, bu maddeler hastalık ve sakatlıklarla sessiz bir salgın gibi çocukların sonraki yaşamlarını etkilemektedir. Bu nedenle bu maruziyetin önlenmesi gereklidir.

İhtiyatlılık ilkesini uygulayın: Risk yönetimine ilişkin ihtiyatlılık ilkesi, "tüm kanıtlar mevcut olmasa bile, elimizden geldiğince zararı önleme görevini ifade eder" (31). Bu, bir eylem veya politikanın nüfusa veya çevreye zarar verdiği şüphesi varsa, bu riskin aksine kanıtlanana kadar bu riskten kaçınmanın sorumlu bir davranış olduğu anlamına gelir. Bu ilke, politika yapıcılar tarafından zor kararlar alırken kullanılabilir ve bilimsel verilerdeki büyük değişkenlikler nedeniyle özellikle çocuklar ve pestisit maruziyeti durumunda uygulanabilir. Güçlü argümanlar, maliyet/fayda analizi gibi yöntemlerin sınırlılıkları ile gerçek çevre-sağlık maliyetlerinin hükümet ve iş dünyası tarafından dikkate alınmayabileceği gerçeği nedeniyle pestisitler konusunda da ihtiyati ilkenin uygulanması için güçlü argümanlar ileri sürülmüştür (32).

Verimi düşürmeden pestisit kullanımını azaltmak mümkündür: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), entegre haşere yönetimini, mevcut tüm haşere kontrol tekniklerinin dikkatle değerlendirilmesi yoluyla zararlı popülasyonlarının gelişimini engellemeyi; pestisitler ve diğer müdahaleleri ekonomik olarak haklı görülen düzeylerde tutmayı ve insan sağlığı ile çevreye yönelik riskleri azaltmayı amaçlayan bir yaklaşım olarak tanımlamaktadır (33). Entegre haşere yönetimi, zararlıların tamamen ortadan kaldırılmasını değil, kontrol altında tutulmasını esas alır; tarımda zararlılara ve hastalıklara karşı en güçlü savunmanın ise sağlıklı bir tarım ekosistemi olduğu varsayımına dayanır.

Pestisit kullanımını azaltmanın etkili yollarından biri, sürdürülebilir ve adil gıda sistemlerinin sosyal boyutlarını dikkate alan; bitkiler, hayvanlar, insanlar ve çevre arasındaki etkileşimleri merkeze alan agroekolojik yaklaşımdır. Uygulamalı agroekoloji; yerel ekonomiler ve pazarlarla bağlantılı yerel çözümler arar ve topluluklar arasında iklim değişikliğine karşı direnç oluşturmak için kullanılabilir. Bu yaklaşımın tüm faydalarını gerçekleştirmek için elverişli bir politika ortamı gereklidir ve bu, yenilenmiş hükümet politikaları, kamu yatırımları ve araştırma öncelikleri ile desteklenebilir. Etkili agroekoloji uygulamalarının kullanılması, tarım alanlarının yakınında yaşayanlar için pestisitlere maruz kalmanın önemli ölçüde azalması da dâhil olmak üzere, çocuklar için birçok doğrudan fayda sağlayabilir (5).

Temel iş sağlığı ve gıda güvenliği politikalarını güçlendirin: Dünya çapında şirketler, tedarik zincirlerinde kullanılan pestisitlerin çocuklara zarar vermemesini sağlamak için sorumluluklarını yerine getirmek ve fırsatları değerlendirmek üzere harekete geçmektedir. Örneğin birçok pestisit üreticisi, pestisit ambalajlarında sağlık ve güvenlikle ilgili resimler, semboller ve okunması kolay sağlık ve güvenlik bilgileri bulunmasını şart koşmaktadır. Bazı üreticiler ve distribütörler, pestisitlerin etkileri konusunda yanıltıcı olan agresif reklam kampanyalarına katılmamayı tercih ederken, diğerleri ise pestisitlerle doğrudan çalışan işçilere koruyucu ekipman sağlamayı zorunlu kılmakta ve bu ekipmanları temin etmektedir. Şirketler ayrıca, etkilerini değerlendirip bunun farkında olarak, risk yönetiminde ihtiyatlılık ilkesini uygulayarak ve verimi düşürmeden pestisit kullanımını azaltarak harekete geçebilirler.

Sistemik bir değişim için etkili bir şekilde çalışmak, şirketlerin çocukları son derece tehlikeli pestisitlerden koruyan açık ve net temel iş politikaları oluşturmasını gerektirir. Bu politikalar somut olmalı, iletilmeli, uygulanmalı ve tedarik zinciri boyunca izlenmelidir. Örneğin üreticilerin ve dağıtıcıların politikaları, bir ülkede üretilen pestisitlerin yasak olduğu ülkelere ihraç edilmemesini sağlamalıdır.

Çocukları pestisitlerin etkilerinden korumaya yönelik temel iş politikalarının uyumluluğunun izlenmesi ve etkinliğinin değerlendirilmesi, en iyi uygulamaların belirlenmesini güçlendirecektir. Test edilmiş uygulamalar, çocukları sistematik olarak koruyan ve pestisitlerin sağlık, eğitim ve refahları üzerindeki etkilerini ele alan norm ve standartların geliştirilmesini desteklemek için endüstri düzeyinde savunulabilir ve uygulanabilir. Ayrıca, işletme aktörleri hükümet, sivil toplum ve topluluklarla olumlu etkileşimi teşvik edebilir.

Güçlü ulusal mevzuat geliştirin: Hükümetler genellikle, gerekli durumlarda pestisit kullanımı ile sağlık ve çevreye yönelik olumsuz risklerin azaltılması arasında sorumlu bir denge bulmakta zorlanırlar (5). Bu zorlu bir süreç olsa da pestisit kullanımını yasaklayan veya kısıtlayan mevzuat, ulusal eylem planlarının geliştirilmesi ve mevzuatı uygulamak, gıda ve içme suyundaki kalıntıları izlemek ve pestisit kullanımının yan etkilerini araştırmak için bütçe tahsisleri gibi birçok seçenek mevcuttur. Mevzuat, çocukların özel savunmasızlıklarını dikkate alabilir ve pestisitlerden zarar görme riskini azaltabilir. Bunlardan bazıları şunlardır:

- **Yüksek derecede tehlikeli pestisitleri yasaklamak:** İlk adım olarak, tüm ülkeler, Kalıcı Organik Kirleticilerle İlgili Stockholm Sözleşmesi'nde belirtildiği gibi, yüksek derecede tehlikeli olduğu bilinen pestisitleri yasaklamalıdır. Ülkeler, Pestisit Yönetimi Uluslararası Davranış Kuralları ve diğer uluslararası kılavuzlara uygun olarak tüm pestisit türleri için en iyi uygulamaları uygulayabilir.

- **Çocukların açamayacağı kaplar ve kapların yerel dilde etiketlenmesi zorunluluğu getirmek:** Birçok pestisit zehirlenmesi, çocukların ellerini ağızlarına götürme davranışından kaynaklanmaktadır. Diğer durumlarda ise, boş kaplar çeşitli nedenlerle yeniden kullanıldığında çocuklar pestisitlerle temas etmektedir. Kapların çocukların açamayacağı şekilde tasarlanması ve açıkça etiketlenmesi, pestisitlerin kazara yutulmasını veya temasını azaltmak için çocuklara özgü önemli bir önlemdir ve yetişkinlere de fayda sağlayacaktır.

- **Havadan ilaçlamayı yasaklamak:** Kamuoyunun tepkisine rağmen, çoğu ülkede havadan pestisit ilaçlamasına izin verilmektedir. Bu pestisit uygulama yöntemi, topluluklar, özellikle çocuklar ve hamile kadınlar için son derece tehlikelidir; azaltılmalı ve ortadan kaldırılmalıdır. Tarlalara püskürtme yapılmışsa, çocukların ve hamile kadınların bölgeden uzak durmaları için açıkça görülebilen uyarılar içeren mesajların bölgede hızla yayılması ve tüm topluluğun asılan tabelalardaki kelimelerin ve sembollerin anlamını anlaması için eğitim verilmesi önemlidir.

Tarımda çalışan kadınların sayısı erkeklerden her zaman fazladır ve üreme çağındaki tüm tarım işçileri arasında pestisit maruziyet düzeyleri genel nüfusa göre sürekli olarak daha yüksektir. Birkaç çalışma, annelerin mesleki maruziyetinin lösemi, doğum kusurları ve diğer hastalıkların yanı sıra yenidoğan ölümleri ile de ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

- **Ulusal zehirlenme programı uygulamak:** Pek çok çocuk ve yetişkin, pestisit zehirlenmesi durumunda yeterli bakımı alamamaktadır. Pestisitlerle ilgili hastalıklar genellikle başka sorunlarla karıştırılır ve tedavi edilmeden ve kontrol edilmeden kalır. Ulusal bir program, özellikle küçük çocuklarda pestisit zehirlenmesinden kaynaklanan ölümleri azaltabilir.

- **Risk değerlendirmesini iyileştirmek:** Birçok ulusal risk değerlendirmesi bir ürünün teknik uygulanabilirliği ile ilgilidir ancak çok azı kadınları ve çocukları korumayı dikkate alır. Bu durumu düzeltmek için risk değerlendirmesine daha bütüncül bir yaklaşım gereklidir.

Kanıt ve farkındalık oluşturmak: Tüm paydaşlar, belirli pestisitler, çocukları kirletmek için izledikleri yollar ve çocukların sağlığı, güvenliği ve eğitimi üzerindeki etkileri hakkında sağlık, güvenlik ve eğitim gibi konularda yapılan araştırmalara katkıda bulunabilirler. Bu etkilerle ilgili olarak, güncel veriler büyük ölçüde eksiktir. Bazı çalışmalar iş gücündeki yetişkinlerin pestisit maruziyetini ele almış olsa da pestisitlerle çalışan ergenlerin veya çocukların sağlık sonuçlarını inceleyen çok az araştırma vardır (34).

Bunu değerlendirmek acil bir ihtiyaçtır ve doğru bir değerlendirme, hükümet, sağlık sistemleri, uluslararası kuruluşlar ve akademik kurumlar tarafından toplanıp paylaşılan tutarlı, kapsamlı ve hedefe yönelik verilere bağlıdır. Ayrıca, agroekolojik tarım üzerine genişletilmiş kamu araştırmaları yoluyla, aşağıdaki konuları ele alan bilgiler edinebilir ve çözümler belirleyebiliriz:

- Çocukların pestisitlere karşı özel hassasiyeti ile bu hassasiyetin sağlık ve gelişim üzerindeki olumsuz etkileri.
- Annelerin pestisitlerle doğrudan çalıştığı durumlarda, çocukların plasenta yoluyla rahim içi dönemde ve kontamine anne sütü aracılığıyla bebeklik döneminde maruz kaldığı ciddi riskler.
- Tarımsal tedarik zincirlerinde çocukların maruz kaldığı tehlikeli çalışma koşulları ile bunların sağlık, eğitim ve refahları üzerindeki etkileri.
- Yasa dışı ve tehlikeli pestisitlerin güvenli olmayan kullanım, uygulama ve bertaraf biçimleri.
- Toprak, su ve hava yoluyla gerçekleşen çevresel maruziyetlerin çocuklar üzerindeki etkileri.
- Çiftçilerin pestisitlere ilişkin algıları ile ileri düzey eğitimin daha güvenli ve iyi uygulamaları nasıl teşvik edebileceği (5).

Bu makalenin amacı, maruz kalmanın çeşitli yolları ve pestisit kullanımının çocuklar üzerindeki etkileri hakkında farkındalık yaratmaktır. Bu bilgilerin, çocuk haklarını sürdürülebilir bir şekilde ele alan sistemik eylemler hakkında tartışma için bir temel oluşturmasını umuyoruz. Bu hedefe ulaşmak için ek araştırmalar, temel birtakım politikalarda değişiklikler, ayrıntılı bir mevzuat ve çabaların çocukların yararına ve amaçlandığı şekilde sonuç verdiğinden emin olmak için sürekli izleme ve değerlendirme gerekecektir.

Kaynaklar

1) UNICEF. Children's unique vulnerabilities to environmental hazards. https://ceh.unicef.org/sites/default/files/2025-2/250210_Fragile_Beginnings_Childhood.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

2) Food and Agriculture Organization of the United Nations, The Future of Food and Agriculture: Trends and challenges, FAO, Rome, 2017. www.fao.org/publications/fofa/en (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

3) International Labour Office, Global Estimates of Child Labour: Results and trends, 2012–2016, International Labour Organization, Geneva, 2017, p. 9. www.ilo.org/global/topics/child-labour/lang--en/index.htm (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

4) United Nations Children's Fund, 'Malaria', UNICEF, New York, 22 July 2016, www. unicef.org/health/index_malaria.html (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

5) UNICEF. Understanding the Impacts of Pesticides on Children: A discussion paper. https://www.unicef.org/childrightsandbusiness/media/356/file/Understanding-the-impact-of-pesticides-on-children.pdf (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

6) Roberts, James R., and Catherine J. Karr, 'Technical Report: Pesticide exposure in children', Pediatrics, vol. 130, no. 6, December 2012, p. e1766, http://pediatrics.aappublications.org/content/early/2012/11/21/peds.2012-2758>.

7) Watts, Meriel, Poisoning Our Future: Children and pesticides, Pesticide Action Network Asia and the Pacific, Penang, Malaysia, p. 7, 2013, www.indiaenvironmentportal.org.in/content/385226/poisoning-our-future-children-and-pesticides.

8) National Research Council, Pesticides in the Diets of Infants and Children, National Academy Press, Washington, D.C., 1993, pp. 4, 23-24, 325-326, www.nap.edu/catalog/2126/pesticides-in-the-diets-of-infants-and-children.

9) Reuben, Suzanne, Reducing Environmental Cancer Risk: What we can do now – President's Cancer Panel 2008-2009 annual report, U.S. Department of Health and Human Services, Bethesda, Md., April 2010, p. iii, https://searchworks.stanford.edu/view/11944288.

10) Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 'Public Health Statement: DDT, DDE, and DDD', ATSDR, Atlanta, Ga., September 2002, pp. 2, 6, www. atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=79&tid=20.

11) Runkle, Jennifer, 'Parental Pesticide Exposure Linked to Childhood Cancer', Environmental Health Policy Institute, Physicians for Social Responsibility, Washington, D.C., 2014, www.psr.org/environment-and-health/environmental-health-policy-institute/responses/parental-pesticide-exposure-childhood-cancer.html.

12) Pesticide Action Network submission to UNICEF, 2017.

13) Greenpeace. Pestisitler ve Çocuklar: Çoklu Kalıntı, PFAS ve Gelişimsel Toksisite. https://www.greenpeace.org/static/planet4-turkey-stateless/2025/04/b49c32a7-pestisitler-ve-cocuklar_250428.pdf.

14) International Labour Office, Global Estimates of Child Labour: Results and trends, 2012–2016, International Labour Organization, Geneva, 2017, p. 9, https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/documents/publication/wcms_575499.pdf.

15) ILO Newsroom, 'The Impact of Pesticide Exposure on Child Labourers in Agriculture', International Labour Organization, Geneva, 22 June 2011, https://www.ilo.org/resource/article/impact-pesticide-exposure-child-labourers-agriculture.

16) Greenpeace India, Arrested Development: The impacts of pesticides on children's mental health and development, Greenpeace, 2003, p. 10, https://www.scidev.net/global/news/pesticides-blamed-for-mental-disorders-in-children/.

17) Watts, Meriel, Poisoning Our Future: Children and pesticides, Pesticide Action Network Asia and the Pacific, Penang, Malaysia, 2013, p. 58, https://pan-india.org/wp-content/uploads/2017/03/2013-PAN-AP-POISONING-OUR-FUTURE-Children-and-Pesticides-Book-v8-WEB-lo-res-1.pdf.

18) Bell EM, Hertz-Picciotto I, Beaumont JJ. A Case Control Study of Pesticides and Fetal Death Due to Congenital Anomalies. Epidemiology, 2001; 12(2):148-156.

19) Trevino MJS, Coelho MP, López AGR, Zarazua S et.al. How pesticides affect neonates? - Exposure, health implications and determination of metabolites. Science of The Total Environment Volume 856, 2023.

20) Reuben, Suzanne H., Reducing Environmental Cancer Risk: What we can do now – President's Cancer Panel 2008-2009 annual report, U.S. Department of Health and Human Services, Bethesda, Md., 2010, p. 45, https://deainfo.nci.nih.gov/advisory/pcp/annualReports/pcp08-09rpt/PCP_Report_08-09_508.pdf.

21) Chen, Mei, et al., 'Residential Exposure to Pesticide during Childhood and Childhood Cancers: A meta-analysis', Pediatrics, vol. 136, no. 4, October 2015, pp. 719-729, https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26371195/.

22) Taiba J, Beseler C, Zahid M, Bartelt-Hunt S, Kolok A, Rogan E. Exploring the joint association between agrichemical mixtures and pediatric cancer. GeoHealth. 2025;9(2).

23) Bergman, Åke, et al., eds., State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals: 2012, World Health Organization and United Nations Environment Programme, Geneva, 2013, p. viii, https://www.who.int/publications/i/item/9789241505031.

24) Mnif W, Hassine A, Bouaziz A, et al. Effects of Endocrine Disruptor Pesticides: A Review. Int J Environ Res Public Health. 2011 Jun 17;8(6):2265-2303.

25) Afacan FÖ, Peltek Kendirci HN. Pestisit Maruziyetinin Ergenlik Üzerine Etkileri İçinde Haspolat YK, Döneray H. Pestisitler ve Endokrin Sistemi. 2025-Ankara: 16-43.

26) Yongyong Yang, Shun Zhou, Ying Xing, Guanghong Yang, Mingdan You, Impact of pesticides exposure during neurodevelopmental period on autism spectrum disorders – A focus on gut microbiota, Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 260, 2023, 115079, ISSN 0147-6513.

27) Parrón-Carrillo, R., Nievas-Soriano, B. J., Parrón-Carreño, T., Lozano-Paniagua, D., & Trigueros, R. (2024). Environmental Exposure to Pesticides and the Risk of Child Neurodevelopmental Disorders. Medicina, 60(3), 475.

28) Liu J, Schelar E. Pesticide exposure and child neurodevelopment: summary and implications. Workplace Health Saf. 2012; 60(5): 235-42; 243.

29) Rauh, Virginia, et al., 'Seven-Year Neurodevelopmental Scores and Prenatal Exposure to Chlorpyrifos, a Common Agricultural Pesticide', Environmental Health Perspectives, vol. 119, no. 8, August 2011, pp. 1196-1201, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3237355/.

30) Kofman, Ora, 'Motor Inhibition and Learning Impairments in School-Aged Children Following Exposure to Organophosphate Pesticides in Infancy', Pediatric Research, vol. 60, 2006, pp. 88-92, https://www.nature.com/articles/pr2006201.

31) Canadian Environmental Law Association, 'The Precautionary Principle' [emphasis in the original], www.cela.ca/collections/pollution/precautionary-principle.

32) For further details on why the precautionary principle applies to children, see: Martuzzi, Marco, and Joel A. Tickner, eds., World Health Organization, Copenhagen, 2004, p.19, www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/91173/ E83079.pdf.

33) Food and Agriculture Organization of the United Nations, 'AGP - Integrated Pest Management', FAO, Rome, 2017, www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/ theme/pests/ipm/en.

34) Rasoul, Gaafar M. Abdel, et al., 'Effects of Occupational Pesticide Exposure on Children Applying Pesticides', Neurotoxicology, vol. 29, 2008, pp. 833-838, www.researchgate.net/publication/23133327_ Effects_of_occupational_pesticide_exposure_on_children_applying_pesticides.

Çevre adaleti: dezavantajlı bölgelerdeki çevresel sağlık riskleri

Dr. Huriye Çoban

2022 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Tıp Fakültesinden mezun oldu. 2023 yılında halk sağlığı alanında tıpta uzmanlık eğitimine başladı ve Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Doç. Dr. Melike Yavuz

Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalında öğretim üyesidir. 2004 yılında Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesinden mezun oldu. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalında uzmanlık eğitimini tamamladı. Sağlık Bakanlığı taşra teşkilatında bulaşıcı hastalıklar ile çocuk, ergen, kadın ve üreme sağlığı hizmetleri alanlarında şube müdürlüğü görevlerinde bulundu. 2017-2025 yılları arasında Bahçeşehir Üniversitesi Tıp Fakültesinde öğretim üyesi olarak çalıştı. 2024 yılında doçent ünvanını aldı. Çalışma alanları bulaşıcı hastalıklar, bağışıklama, çevre sağlığı, çevre adaleti, iklim değişikliği ve sağlıkta eşitsizliklerdir. Mezuniyet öncesi ve sonrası tıp eğitimine yönelik dersler ve eğitim programları yürütmektedir.

Çevre adaleti, çevresel risklerin ve çevresel kaynakların toplum içinde eşit dağılmadığını; özellikle dezavantajlı bölgelerde yaşayan toplulukların daha yoğun çevresel sağlık risklerine maruz kaldığını ortaya koyar. Aynı şehirde yaşayan bireyler arasında bile hava kalitesi, içme suyu güvenliği, konut koşulları ve çevresel maruziyetler açısından belirgin farklılıklar görülebilir. Bu durum, çevresel koşulların bireysel tercihlerden çok yapısal, ekonomik ve politik kararlarla şekillendiğini gösterir. Temiz ve sağlıklı bir çevrede yaşamak temel bir insan hakkı olmasına rağmen, çevresel bozulma ve kirlilik küresel ölçekte devam etmekte; bunun sağlık üzerindeki yükü eşit dağılmamaktadır.

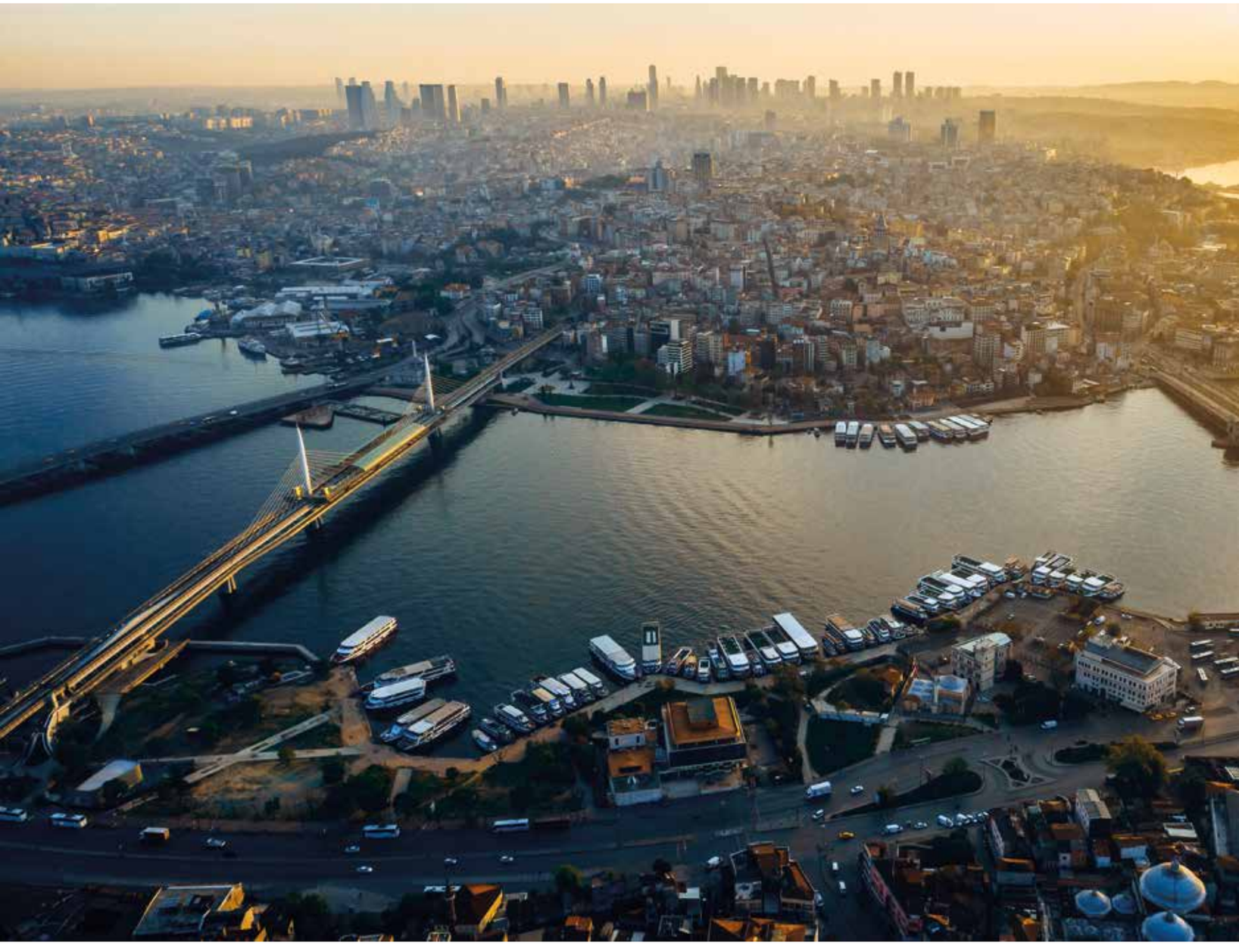
Sanayileşme ve kalkınma süreçleri, çevresel yüklerin belirli topluluklar üzerinde yoğunlaşmasına yol açarken, çevresel faydalar toplum içinde eşit paylaşılmamaktadır. Hava kirliliği, güvenli içme suyuna erişim ve iklim değişikliği, dezavantajlı bölgelerdeki çevresel sağlık risklerinin en görünür örnekleridir. Sanayi tesislerine ve yoğun trafik akslarına yakın alanlarda yaşayan, temiz enerjiye ve sağlıklı konutlara erişimi sınırlı olan topluluklar daha yüksek düzeyde kirleticilere maruz kalır. Altyapı yetersizlikleri nedeniyle güvenli içme suyuna erişimin sınırlı olduğu bölgelerde bulaşıcı hastalıklar ve gelişimsel sağlık sorunları daha sık görülür. İklim değişikliğinin yol açtığı aşırı hava olayları, kuraklık ve gıda güvensizliği de uyum kapasitesi düşük grupları orantısız biçimde etkiler.

Çevresel adaletsizlikler, sağlık hizmetlerine erişim, bilgiye ulaşma ve karar süreçlerine katılım gibi sosyal eşitsizliklerle birleşerek sağlıkta eşitsizlikleri derinleştirir. Daha adil bir çevre; eşitlik temelli politikalar, güçlü yasal düzenlemeler ve toplumun karar süreçlerine katılımıyla mümkündür.

Aynı Çevre, Farklı Sağlık Sonuçları

Aynı şehirde yaşayan insanların aynı çevresel koşullara maruz kaldığını düşünmek yaygın bir varsayımdır. Oysa bazı mahallelerde pencereler yılın büyük bölümünde kapalı tutulur; bazı çocuklar oyun oynarken egzoz dumanı solur; bazı evlerin musluklarından akan su ise sağlık açısından daha az güvenilirdir. Bu farklılıklar, bireysel yaşam tarzlarından çok, çevresel risklerin ve kaynakların toplum içinde eşitsiz biçimde dağılmasının bir sonucudur.

Temiz, sağlıklı ve sürdürülebilir bir çevreye sahip olmak herkesin temel hakkıdır. Ancak çok sayıda uluslararası anlaşma ile ulusal yasa ve politikalara rağmen



çevresel bozulma küresel ölçekte devam etmektedir. İklim değişikliği, biyolojik çeşitliliğin kaybı ve çevresel kirlilik; yalnızca ekosistemleri değil, insan sağlığını ve temel insan haklarının kullanılmasını da doğrudan tehdit eden krizler hâline gelmiştir (1).

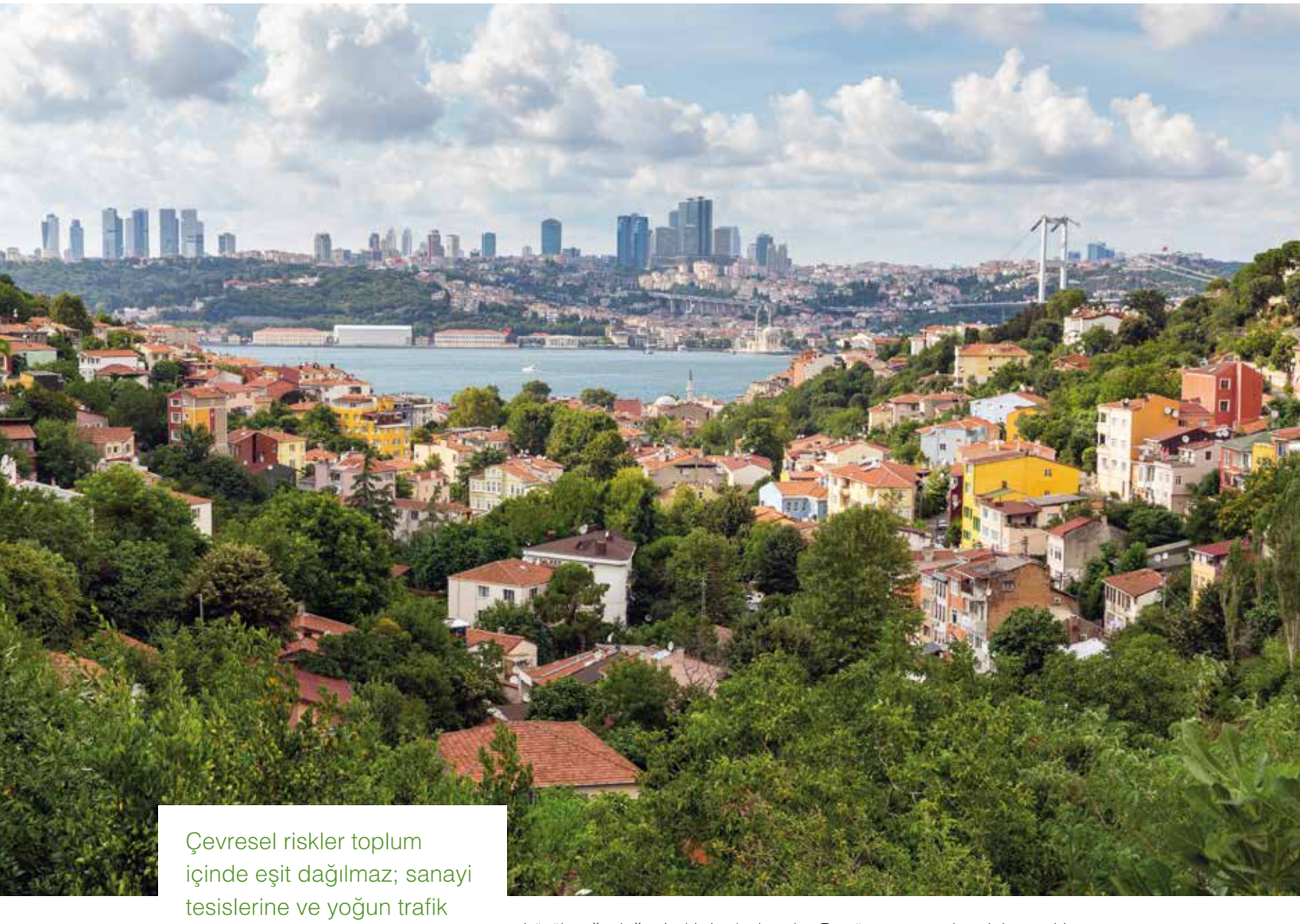
Bu çevresel bozulma herkesi etkilese de herkesi eşit biçimde etkilememektedir. Hâlihazırda kırılgan durumda olan bireyler, gruplar ve topluluklar orantısız biçimde daha fazla maruz kalmaktadır (1). Çevresel sağlık eşitsizlikleri, ülkelerin gelişmişlik düzeyinden ve çevresel ya da ekonomik koşullarından bağımsız olarak dünyanın her bölgesinde görülmektedir. Hava kirliliği, güvenli su ve sanitasyona erişimdeki yetersizlikler, temiz enerjiye erişim eksikliği ile güvensiz konutlar ve sağlıksız çalışma koşulları gibi çevresel sağlık sorunları, özellikle dezavantajlı bölgelerde yaşayan topluluklar için daha ağır ve kalıcı sağlık sonuçlarına yol açmaktadır (2). İşte bu noktada çevresel adalet kavramı, yalnızca doğayı değil, insan sağlığını da merkeze alan güçlü bir çerçeve sunmaktadır.

Çevresel Adalet Kavramının Doğuşu: Yük Kimin Omzunda?

Çevresel adalet kavramı, çevre sorunlarının yalnızca teknik ya da ekolojik meseleler olmadığının anlaşılmasıyla ortaya çıkmıştır. 1960'lı yıllardan itibaren hava, su ve toprak kirliliğinin etkileri daha görünür hâle gelmiş; bu etkilerin toplumun tüm kesimlerine eşit biçimde dağılmadığı fark edilmiştir. Özellikle yoksul ve toplumsal olarak dışlanmış grupların yaşadığı bölgelerde çevresel risklerin yoğunlaştığı görülmüştür.

Sanayileşme ve kalkınma süreçleri, çevresel yüklerin dağılımında belirgin adaletsizlikler yaratmıştır. Çevre kirliliğinden en fazla etkilenen topluluklar, çoğu zaman bu risklere karşı kendilerini koruma ve seslerini duyurma imkânı en sınırlı olan kesimler olmuştur. Buna karşılık, doğal kaynakların kullanımından ve ekonomik büyümeden elde edilen faydalar toplum içinde eşit biçimde paylaşılmamıştır. Bu durum, çevre sorunlarının yalnızca "doğayı koruma" meselesi değil, aynı zamanda bir adalet sorunu olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Çevresel adalet kavramı, 1970'lerde başta Amerika Birleşik Devletleri (ABD) olmak üzere Batı ülkelerinde, yoksulların kötü barınma koşullarını dile getirmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır (3). Kavramın somutlaşan örneklerinden biri, 1978'de Kuzey Carolina'daki Afton (Warren County) bölgesinde yaşanmıştır. Eyalet yönetimi, poliklorlu bifeniller (PCB) ile kirlenmiş 6.000 kamyon toprağı yoksul



Çevresel riskler toplum içinde eşit dağılmaz; sanayi tesislerine ve yoğun trafik akslarına yakın bölgelerde yaşayan topluluklar, kirli havaya ve zararlı çevresel maruziyetlere çok daha fazla maruz kalır. Bu alanlar çoğu zaman düşük gelirli nüfusların yaşadığı, yeşil alanların sınırlı olduğu yerlerdir. Çevresel yüklerin belirli gruplar üzerinde yoğunlaşması sağlıkta eşitsizlikleri derinleştirir. Astım, kalp-damar hastalıkları ve solunum yolu hastalıkları bu bölgelerde daha sık görülür. Çevresel koşullar, bireylerin sağlık kaderini belirleyen temel unsurlardan biri hâline gelir.

ve büyük çoğunluğu siyahi olan bu kırsal bölgeye depolamayı planlamıştır. Yerel halk ve destekçileri dört yıl süren yasal ve bilimsel itirazlarda bulunmuş ancak sonuç alamayınca 1982'de yolları kapatarak kamyonları durdurmaya çalışmışlardır. Yaklaşık altı hafta süren protestolar ve 500'den fazla tutuklamaya rağmen, devlet bölgeye 7.000 kamyon kirlenmiş toprak dökmüştür. Bu olay, çevresel adalet hareketinin hem ulusal hem de küresel ölçekte tanınmasını sağlamış ve çevresel risklerin rastlantısal olmadığını; ırk, gelir düzeyi ve politik güç ilişkileriyle yakından bağlantılı olduğunu göstermiştir (4, 5).

Çevresel adalet kavramı, sadece yerel örneklerle sınırlı kalmayıp, dünya genelindeki ekonomik ve ekolojik dengesizliklerle de ilişkilendirilmektedir. Sanayileşmiş ülkelerin atmosfere saldığı sera gazları, sorumluluğu olmayan Afrika, Asya ve ada ülkelerinde kuraklık ve aşırı yağışlara yol açmaktadır. Böylece çevresel sorunlar hem yerel hem de küresel ölçekte bir adalet sorunu olarak değerlendirilmektedir.

Bugün çevresel adalet yaklaşımı; çevresel risklerin kimlerin omzuna yüklendiğini, doğal kaynaklara kimin erişebildiğini ve çevreyle ilgili karar alma süreçlerine kimlerin dâhil edildiğini sorgulamaktadır. Bu yönüyle çevresel adalet, çevre politikaları kadar halk sağlığı ve toplumsal eşitlik açısından da belirleyici bir çerçeve sunmaktadır.

Kirli Hava: Dezavantajlı Bölgelerde Solunan Risk

Dünya nüfusunun neredeyse tamamı (%99), ince partikül madde (PM 2.5) için Dünya Sağlık Örgütünün güvenli kılavuz seviyesini aşan hava kirliliği seviyelerine maruz kalmaktadır. Dünya genelinde tahminen 4,2 milyon ölüm, çoğunlukla kalp hastalığı, inme, kronik obstrüktif akciğer hastalığı, akciğer kanseri ve akut solunum yolu enfeksiyonları olmak üzere, dış ortam hava kirliliğine bağlıdır (6).

Ancak kirli hava herkes için aynı anlama gelmemektedir. Aynı şehir içinde

bile maruziyet düzeyleri mahalleden mahalleye, hatta sokaktan sokağa değişebilmektedir. Sanayi tesislerine, yoğun trafik akslarına veya büyük otoyollara yakın bölgelerde yaşayan topluluklar, daha yüksek düzeyde hava kirleticilere maruz kalmaktadır. Bu bölgeler çoğu zaman düşük gelirli nüfusların yaşadığı, konut kalitesinin düşük ve yeşil alanların sınırlı olduğu alanlardır.

Düşük ve orta gelirli ülkelerde yaşayan insanlar hava kirliliğinin sağlık üzerindeki olumsuz etkilerine karşı daha savunmasızdır. Bununla birlikte, yalnızca ülkeler arasında değil, ülkelerin kendi içinde de belirgin eşitsizlikler söz konusudur. Gecekondu bölgelerinde yaşayanlar, açık alanlarda veya kirletici emisyonların yoğun olduğu iş kollarında çalışanlar ve temiz enerji kaynaklarına erişimi olmayan haneler, hava kirliliğinin yükünü orantısız biçimde taşımaktadır (7).

Benzer eşitsizlikler Türkiye'de de görülmektedir. Özellikle sanayi bölgeleri, termik santral çevreleri ve yoğun trafik akslarına yakın yerleşim alanlarında yaşayan topluluklar daha yüksek düzeyde hava kirleticilere maruz kalmaktadır (8). Kocaeli Dilovası gibi yoğun sanayi bölgeleri, çevresel maruziyetlerin ve buna bağlı sağlık risklerinin uzun yıllardır halk sağlığı tartışmalarının odağında yer aldığı örneklerden biridir (9). Bunun yanında, PM2.5 için ulusal bir sınır değerin hâlen bulunmaması ve bazı bölgelerde Dünya Sağlık Örgütü kılavuz değerlerinin belirgin biçimde aşılması, hava kirliliğinin çevresel adalet boyutunu daha görünür hâle getirmektedir (8).

Bu eşitsizlik, hava kirliliğinin yalnızca çevresel bir sorun olmadığını; aynı zamanda sosyal ve mekânsal bir adalet meselesi olduğunu göstermektedir. Kirli hava, rastlantısal biçimde solunmaz. Kimlerin daha kirli havaya maruz kaldığı; kentsel planlama kararları, ulaşım politikaları, sanayi yerleşimleri ve sosyoekonomik eşitsizliklerle yakından ilişkilidir. Bu nedenle hava kirliliği, dezavantajlı bölgelerde yaşayan topluluklar için yalnızca bir çevre riski değil, yaşam boyu süren bir sağlık yükü anlamına gelmektedir.

Temiz Suya Erişim: Altyapıdan Sağlığa Uzanan Bir Eşitsizlik

Güvenli ve temiz içme suyuna erişim, sağlıklı bir yaşamın temel koşullarından biridir. Ancak bu hak, dünya genelinde herkes için eşit biçimde sağlanmamaktadır. Temiz suya erişim sorunu, yalnızca kriz dönemlerine özgü geçici bir durum değil; birçok toplumda günlük yaşamı belirleyen kalıcı bir eşitsizlik alanıdır. Güvenli içme suyuna erişimin sınırlı olduğu bölgelerde yaşayan bireyler, özellikle bulaşıcı hastalıklar açısından daha yüksek risk altındadır. Çocukların temiz suya erişimi olmadığında, bu durum sağlıklarını, beslenmelerini, eğitimlerini ve yaşamlarının diğer tüm yönlerini olumsuz etkilemektedir. Özellikle kız çocukları, kadınlar ve engelli bireyler bu durumdan daha çok etkilenmektedir (10).

Dünya genelinde her dört kişiden biri hâlâ güvenli içme suyuna erişememektedir. En az gelişmiş ülkelerde yaşayan bireylerin, diğer ülkelerde yaşayanlara kıyasla temel içme suyu ve sanitasyon hizmetlerinden yoksun olma olasılığı iki kattan fazladır; temel hijyen hizmetlerinden yoksun olma olasılıkları ise üç kattan daha fazladır. Kırılgan koşullara sahip ülkelerde ise güvenli şekilde yönetilen içme suyuna erişim oranı, diğer ülkelere kıyasla yüzde 38 daha düşüktür; bu durum derin çevresel ve toplumsal eşitsizlikleri açıkça ortaya koymaktadır (11).

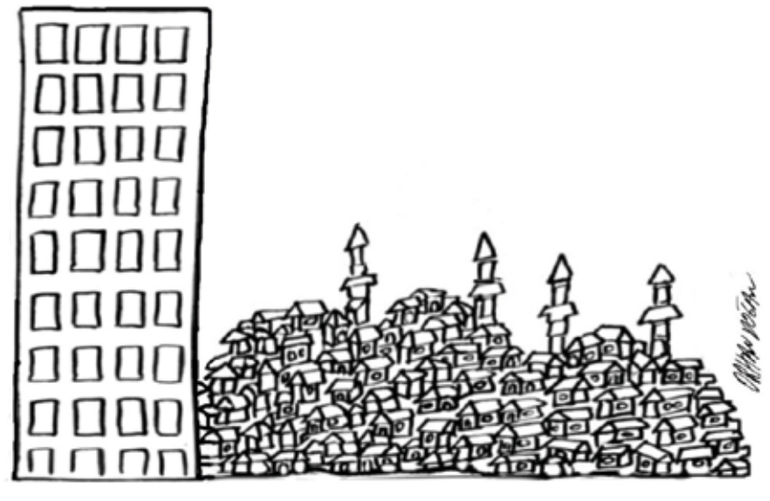
Bu eşitsizlikler yalnızca ülkeler arasında değil, aynı ülke ve şehirler içinde de görülmektedir. Bazı bölgelerde musluklardan akan su sağlık açısından güvenilir olmaktan uzakken, altyapısı güçlü bölgelerde temiz suya kesintisiz erişim mümkündür. Türkiye'de de büyük ölçüde şebeke suyu erişimi sağlanmış olsa da kırsal bölgeler, mevsimlik tarım işçilerinin yaşam alanları ve altyapı hizmetlerinin yetersiz olduğu bazı yerleşimlerde güvenli içme suyuna erişim ve su kalitesi açısından eşitsizlikler devam etmektedir. TÜİK verileri, şebeke suyuna erişimin yaygın olduğunu göstermekle birlikte, bölgesel altyapı farklılıklarının ve su kalitesiyle ilişkili sorunların çevresel sağlık açısından önemini koruduğunu ortaya koymaktadır (12). Bu tablo, temiz suya erişimin bireysel bir tercih değil; altyapı yatırımları ve yönetişimle şekillenen bir kamusal mesele olduğunu göstermektedir.

Bu nedenle güvenli içme suyuna erişim, çevresel adalet tartışmalarının merkezinde yer alan; aynı zamanda doğrudan bir halk sağlığı ve insan hakları meselesi olarak ele alınmalıdır.

İklim Değişikliği ve Sağlık Eşitsizlikleri

İklim değişikliği, günümüzde insan sağlığını tehdit eden en kapsamlı çevresel risklerden biridir. İklim koşullarındaki değişimle birlikte fırtınalar, aşırı sıcaklıklar, seller, kuraklıklar ve orman yangınları gibi hava ve iklim olayları daha sık ve daha yoğun yaşanmaktadır. Bu tehlikeler, sağlığı hem doğrudan hem de dolaylı biçimde etkileyerek ölüm riskini, bulaşıcı olmayan hastalıkları, bulaşıcı hastalıkların ortaya çıkışını ve yayılmasını ve sağlık acil durumlarını artırmaktadır.

Ancak iklim krizinin sağlık üzerindeki yükü de eşit dağılmamaktadır. Günümüzde 3,6 milyar insan iklim değişikliğine karşı son derece hassas bölgelerde yaşamaktadır. Küresel emisyonlara en az katkıda bulunan düşük gelirli ülkeler ve küçük ada gelişmekte olan devletler,



buna karşın en ağır sağlık etkilerine maruz kalmaktadır. Hassas bölgelerde son 10 yılda aşırı hava olaylarına bağlı ölüm oranı, daha az hassas bölgelere kıyasla 15 kat daha yüksek olmuştur (13).

Bu iklime duyarlı sağlık riskleri, kadınlar, çocuklar, etnik azınlıklar, yoksul topluluklar, göçmenler veya yerinden edilmiş kişiler, yaşlılar ve altta yatan sağlık sorunları olan bireyler tarafından orantısız biçimde hissedilmektedir. Aşırı sıcaklar kalp-damar ve solunum sistemi hastalıklarını ağırlaştırmakta; kuraklık ve sel gibi olaylar gıda güvensizliğini artırarak yetersiz beslenme riskini derinleştirmektedir. Bu gruplar, iklim krizine uyum sağlama ve kendilerini koruma imkânları en sınırlı olan kesimlerdir.

Bu tablo, iklim değişikliğinin yalnızca çevresel bir sorun değil; aynı zamanda küresel ölçekte bir sağlık ve adalet meselesi olduğunu göstermektedir. İklim değişikliğinin sağlık üzerindeki yükünü ele almak, eşitlik ilkesini zorunlu kılmaktadır. Emisyonlardan en fazla sorumlu olanların, azaltım ve uyum maliyetlerinin en büyük bölümünü üstlenmesi; böylece sağlıkta eşitliğin sağlanması ve savunmasız grupların önceliklendirilmesi gerekmektedir (13).

Çevresel Adaletin Halk Sağlığı Boyutu

Hastalıklar toplum içinde rastlantısal biçimde dağılmaz; büyük ölçüde insanların maruz kaldığı çevresel koşullarla şekillenir. Bu nedenle çevresel adalet, yalnızca çevre politikalarının değil, halk sağlığı yaklaşımlarının da merkezinde yer almalıdır. Dezavantajlı bölgelerde yaşayan topluluklar; kirli hava, güvenli olmayan su, tehlikeli atıklar ve aşırı sıcaklar gibi çevresel risklere daha yoğun biçimde maruz kalmakta ve bunun sağlık sonuçlarını daha ağır yaşamaktadır.

Çevresel adaletsizliklerden etkilenen topluluklar çoğunlukla düşük gelirli nüfuslar, marjinalleştirilmiş etnik gruplar, kırsal topluluklar, göçmenler ve mülteciler ile yerli halklardan oluşmaktadır. Bu gruplar, yalnızca çevresel tehlikelerin yoğun olduğu alanlarda yaşamakla kalmaz; aynı zamanda sağlık hizmetlerine erişim, bilgiye ulaşma ve karar alma süreçlerine katılım açısından da dezavantajlı konumdadır. Bu çok katmanlı eşitsizlikler, çevresel risklerin sağlık üzerindeki etkilerini daha da derinleştirmektedir.

Bu nedenle çevresel adalet, aynı zamanda bir halk sağlığı ve insan hakları meselesidir. Marjinalleştirilmiş topluluklar, kurşun, hava kirliliği, tehlikeli atıklar ve aşırı sıcağa maruz kalma açısından orantısız biçimde daha yüksek risk altındadır. Çevresel maruziyetler; kanser, astım ve diğer solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, nörolojik hastalıklar ve gelişimsel engeller dâhil olmak üzere çeşitli olumsuz sağlık sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir.

Çevresel adaletsizlikle mücadele etmek ve sağlıkta eşitliğe ilerlemek için, çevresel sağlık yükleri, sistemik ırkçılık, diğer sosyal faktörler ve önceden var olan sağlık sorunları kümülatif etkiler olarak birlikte ele alınmalı; çevresel adalet yapısal bir halk sağlığı sorunu olarak değerlendirilmelidir (14). Çevresel adalet, yalnızca bugünün değil, gelecek nesillerin de sağlığını ilgilendirmektedir.

Daha Adil Bir Çevre Mümkün

Dünya, tüm insanların kaynaklarını birlikte kullandığı bütüncül bir ekosistemdir. Bu sistemde bir kaynağın kullanımı, yapının bütünlüğü nedeniyle diğer tüm unsurları etkilemektedir. Ortaya çıkan çevresel kirlilik ise bölge sınırlarıyla sınırlı kalmayarak çok uzak alanlara yayılabilmektedir.

Doğal kaynakların kullanımı ve bu kullanımın maliyetlerinin paylaşımı konusunda ülkeler, bölgeler ve bireyler arasında derin eşitsizlikler bulunmaktadır. Küresel çevre sorunlarının sorumluluğunun tüm insanlığa eşit biçimde yüklenmesi, kalkınmış ülkelerin tarihsel ve güncel sorumluluğunu görünmez kılmaktadır. Bu yaklaşım, "kirleten öder" ilkesinin işlemesini de engellemektedir. Oysa çevresel sorunlara küresel ölçekte yol açan ülke sayısı sınırlıdır ve tüm insanlığı eşit derecede sorumlu tutmak toplumsal ve çevresel adaletle bağdaşmamaktadır. Bu nedenle evrensel bir çevresel adalet anlayışının ilkelerinin belirlenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu anlayış; çevresel değerlerin insanlığın ortak mirası olarak kabul edilmesini, bu değerleri etkileyen faaliyetlerin denetlenmesini, çevresel varlıklara eşit erişimin sağlanmasını ve yaşam için hayati öneme sahip çevresel unsurların temel bir hak olarak tanınmasını içermelidir (3).

Daha adil bir çevreye ulaşmak, temiz ve sağlıklı bir çevre hakkını güvence altına alan güçlü yasal çerçevelerle mümkündür. Bu sorumluluk yalnızca hükümetlere değil; özel sektöre, kurumlara ve yerel yönetimlere de aittir. Savunmasız toplulukların bilgiye erişiminin, adalete ulaşmasının ve karar alma süreçlerine katılımının sağlanması, çevresel adaletin hayata geçirilmesinde kilit öneme sahiptir. Kadınlar ve yerel topluluklar, bu alanlarda söz sahibi olduklarında güçlü çevresel adalet savunucuları hâline gelebilmektedir. Bu nedenle çevre politikalarının oluşturulmasında toplumun geniş kesimlerinin sürece dâhil edilmesi ve gelecek nesillerin sağlıklı bir çevrede yaşama hakkının gözetilmesi zorunludur (15).

Çevresel adalet yaklaşımı pratikte; çevresel risklerin belirlenmesi, çevresel etki değerlendirme süreçlerinin yürütülmesi, kirletici tesislerin yer seçimlerinin denetlenmesi, kırılgan toplulukların karar alma süreçlerine katılımının sağlanması ve çevresel sağlık göstergelerinin eşitsizlik perspektifiyle izlenmesi gibi politika alanlarında karşılık bulmaktadır. Türkiye'de de çevrenin korunması Anayasa'nın 56. maddesi ile güvence altına alınmış; herkesin sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahip olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte çevresel karar alma süreçlerinde halk katılımı, hava kirliliği sınır değerleri, sanayi bölgelerinin yerleşim alanlarına yakınlığı ve çevresel sağlık etkilerinin izlenmesi gibi alanlarda önemli eşitsizlikler ve uygulama sorunları devam etmektedir.

Doğal kaynakların kullanımı ve bu kullanımın maliyetlerinin paylaşımı konusunda ülkeler, bölgeler ve bireyler arasında derin eşitsizlikler bulunmaktadır. Küresel çevre sorunlarının sorumluluğunun tüm insanlığa eşit biçimde yüklenmesi, kalkınmış ülkelerin tarihsel ve güncel sorumluluğunu görünmez kılmaktadır. Bu yaklaşım, "kirleten öder" ilkesinin işlemesini de engellemektedir.

Bu nedenle daha adil bir çevre için çevresel sağlık eşitsizliklerinin düzenli olarak izlenmesi, hava kirliliği ve su kalitesi verilerinin şeffaf biçimde paylaşılması, çevresel etki değerlendirme süreçlerinde halk katılımının güçlendirilmesi ve dezavantajlı bölgelerin öncelikli olarak korunması gerekmektedir. İklim değişikliğiyle mücadele ve çevre politikaları, sağlıkta eşitlik perspektifiyle birlikte ele alınmalıdır. Çevresel adalet yaklaşımı, yalnızca bugünün çevresel risklerini azaltmayı değil; gelecek kuşaklar için daha sağlıklı ve eşitlikçi yaşam koşulları oluşturmayı da hedeflemelidir.

Kaynaklar

1) United Nations Development Programme (UNDP). (2023). What is the right to a healthy environment? United Nations Development Programme. https://www.undp.org/publications/what-right-healthy-environment (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

2) World Health Organization (WHO). (2023). Environmental health inequalities. World Health Organization. https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/environmental-health-inequalities (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

3) Kılıç, S., Tok, N. (2014). Geleneksel adalet anlayışlarından çevresel adalet anlayışına. Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi, 6(3), 213-228.

4) National Resources Defense Council (NRDC). (2025). The environmental justice movement. National Resources Defense Council. https://www.nrdc.org/stories/environmental-justice-movement (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

5) UNC University Libraries. (2025). We birthed the movement: The Warren County PCB landfill protests, 1978–1982. UNC University Libraries. https://library.unc.edu/exhibition/we-birthed-the-movement-the-warren-county-pcb-landfill-protests-1978-1982/ (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

6) World Health Organization (WHO). (2025). Exposure and health impacts of air pollution. World Health Organization. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/exposure-air-pollution (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

7) World Health Organization (WHO). (2025). Equity impacts of air pollution. World Health Organization. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/equity-impacts (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

8) Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) (2024). Kara Rapor 2024. https://temizhavahakki.org/kararapor2024/ (11.05.2026).

9) Yavuz, C. I., & Tanık, F. A. (2012). Türk Tabipleri Birliği Dilovası Raporu. İkinci Baskı. Ankara. Türk Tabipleri Birliği Yayınları.

10) United Nations Children's Fund (UNICEF). (t.y.). Water. United Nations Children's Fund. https://www.unicef.org/wash/water (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

11) World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF). (2025). 1 in 4 people globally still lack access to safe drinking water. World Health Organization. https://www.who.int/news/item/26-08-2025-1-in-4-people-globally-still-lack-access-to-safe-drinking-water---who--unicef (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

12) Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2025). Su ve Atıksu İstatistikleri, 2024. Erişim adresi: https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/54109 (Erişim Tarihi: 11.05.2026).

13) World Health Organization (WHO). (2023). Climate change and health. World Health Organization. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

14) American Public Health Association (APHA). (t.y.). Environmental justice. American Public Health Association. https://www.apha.org/topics-and-issues/environmental-health/environmental-justice (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

15) United Nations Development Programme (UNDP). (2022). Five steps to environmental justice. United Nations Development Programme. https://www.undp.org/blog/five-steps-environmental-justice (Erişim Tarihi: 26.01.2026).

Yüzey ve yer altı su kaynakları kirlenmesi ile çevre şartlarına göre suyun etkileri

Zekâi Şen

1947 yılında Kastamonu'nun Çatalzeytin ilçesine bağlı Samancı köyünde doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) İnşaat Fakültesinden 1971 yılında mezun oldu. 1974 yılında İngiltere Imperial College and Technology'de doktorasını tamamladı. 1979 yılında İTÜ'de doçent, 1984 yılında Suudi Arabistan'daki Kral Abdülaziz Üniversitesi (KAÜ) Yer Bilimleri Fakültesinde profesör oldu. 1975-1982 yılları arasında İTÜ İnşaat Fakültesi, 1982-1991 yılları arasında Suudi Arabistan'da KAÜ'de Hidrojeoloji Bölümünde çalıştı. 1992- 2020 yılları arasında İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesinde çalışmalar yaptı. 2003-2014 yılları arasında İTÜ İnşaat Fakültesi Hidrolik Bölümünde çalışarak 2014 yılında emekli oldu. 2017 yılında göreve başladığı İstanbul Medipol Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Bölümünde çalışmaktadır.

İklimin doğrudan etkileri, hidroloji ve su kalitesini etkileyen değişkenler aracılığıyla; yağmur rejimleri, kar erimesi ve deniz düzeyi yükselmesi gibi süreçler üzerinden ortaya çıkacaktır (IPCC 2007, 2012, 2014). Dolaylı etkiler ise gıda zincirini değiştiren ve toprak erozyonunu artıran değişen bitki kalıplarından doğacaktır. Balıkçılık üzerinde etkili olan insan kaynaklı baskıların —nüfus artışı, taşkından korunma, artan su çekimi, arazi kullanımındaki değişiklikler ve aşırı balık avlama gibi— iklimsel etkilerden daha güçlü olması olasıdır. Bununla birlikte, bu baskılar önemli ölçüde birbiriyle ilişkilidir.

İklim değişikliği su tabanlı hastalıklar üzerinde sıklıkla mikrobiyal su kalitesinin bozulduğunu gösteren bir etkiye sahiptir (Patz vd., 2004, 2005). Dünya Sağlık Teşkilatı (World Health Organization, WHO, 2023) tarafından iklim değişikliğinin dünya çapındaki ishallerin yaklaşık yüzde 2,4'ünden sorumlu olduğu tahmin edilmiştir. Kolera ENSO etkinlikleriyle ve oksijen yoksunluğundan kaynaklanan alg çiçeklenmeleriyle ilişkilendirilmiştir (Rodó vd., 2002). Koleranın mevsimleri izlediği ve bu mevsimlere ortam ısısıyla paralellik gösterdiği ileri sürülmüştür (D'Souza vd., 2004). İklim değişikliğiyle bağlantılı olarak fırtına, sel ve siklon gibi aşırı hava olaylarının artması; fiziksel hasarlara, nüfusun yer değiştirmesine ve gıda üretimi ile tatlı suyun miktarı ve kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açacaktır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde bulaşıcı hastalık salgınlarının görülme riskini artıracaktır.

Aslında saf su diye bir şey yoktur. Atmosferdeki karbondioksit nedeniyle bulutlardan oldukça saf olarak çıkan yağışlar atmosferdeki bu gaz ile birleşerek asitlik özelliği kazanarak saflığını yitirir. Hiç bozulmamış doğal ortamlardaki sularda çözülmüş mineraller bulunur ve bunlar o suyun doğal kalitesini artırır ve içimlerini kolaylaştırır. Dünyada tatlı su gölleri kadar tuzlu su gölleri de yaygındır ve bazı durumlarda bunlar birer su kaynağı olarak yakınlarında bulunan topluluklara hizmet verirler.

Kirlenme, doğal olarak sularda bulunması gerekli minerallerden daha yoğun olarak kimyasal ve diğer bileşenlerin bulunması ile ortaya çıkar. Temel su kirleticileri arasında mikroplar, besleyiciler, ağır metaller, organik kimya bileşenleri, yağ, petrol ve askı maddeleri ile taşınım malzemesi bulunur. Bazı durumlarda yüksek sıcaklık da kirletici etkenler arasında sayılır. Bu kirleticiler, dünya genelinde su kalitesinin azalmasına neden olmakta olup, bu durum ülkelerin gelişmişlik düzeyine bağlı olarak büyük farklılık göstermeyebilir.

Yegâne fark kirli su kalitesi ölçütleri algılamasındadır. Tatlı suların kirlilik ölçütleri bir ülkenin ekonomik gelişmişliği ile de ilişkilidir. Aslında su kalitesi ekonomik ve teknolojik seviyesi ile ülke gelişmişliğinin bir işlevidir. Su kalitesi değişik insan faaliyetlerinde kullanılacak suyun miktarını da etkiler.

Aşırı Çekim

Doğanın yenileyebileceğinden daha fazla suyun çekilmesi aşırı çekim olarak nitelendirilir (Şen, 2009). Özellikle gıda ihtiyacı dolayısı ile tarımda kullanılan suyun miktarı sürekli artma eğilimindedir. Doğal su sıkıntısı çeken yörelerde

iklim değişikliği etkisinin suyu oldukça yeterli olan yerlerden daha fazla olması beklenmektedir. Su kirlenmesi ayrıca su sıkıntısını arttırıcı bir etken olarak rol oynar. Her yıl karalara ortalama 110.000 km^3 yağış düşmesine rağmen, bunun yalnızca yaklaşık 12.000 km^3'ü insan kullanımına uygun durumdadır. İklim değişikliğinin hâlihazırda gözlemlenen etkileri ve bazı bölgelerde gelecekte ortaya çıkması beklenen değişimlere ilişkin literatür, su kalitesi üzerindeki olası etkilerin ve su kaynaklarının karşı karşıya olduğu kırılganlıkların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Göller ve biriktirme haznelerinde katmanlaşma kalıpları, karışım rejimleri, çözülmüş bileşikleri ve özellikle de oksijeni etkileyen yüksek su sıcaklıklarına bağlı olarak sorunlar ortaya çıkacaktır.

Yağmurun artması ve sıklaşması beklenen bölgelerde kirleticiler (nitrojen, fosfor, haşere ilaçları, organik madde, ağır metaller vs.) topraktan su yapılarına akacaktır. Göller ve biriktirme haznelerindeki besin yüklerindeki artış alg çiçeklenmelerini artırarak eko-sistemleri değiştirecek ve su kaynaklarını kötü seviye ve tat şeklinde etkileyecektir. İklim değişikliği nehirlerde su sıcaklığını artıracak ve böylece temelde balıklar olmak üzere eko-sistemler olumsuz yönde veya üretkenliğin artmasıyla olumlu yönde etkilenecektir. Göller ve biriktirme haznelerinde olduğu gibi toplam yağmur artışı ve yoğun yağış etkinliklerinin daha sık görülmesi toprak erozyonunu başlatacak ve suda bulunan askıdaki maddelere çeşitli bileşikler katacaktır.

Küresel olarak küçük kapasiteli yoksul bölgeler suyun nitelik ve niceliği üzerindeki etkilerden deniz düzeyi yükselmesinden, aşırı hava etkinliklerinden, gıda güvenliğinden, sağlık risklerinden ve kent bölgesi hava sıcaklığı ile bağlantılı hastalıklardan daha çok etkilenecektir.

Diğer taraftan 2050 yılına kadar dünya nüfusunun yüzde 15-20'sinin su sıkıntısı altında yaşaması beklenmektedir. Bu durum özellikle yoğun su kullanımı olan bölgelerde (su kullanımının %20'sinden fazlası yenilenebilir su kaynaklarıyla bağlantılıdır) suyun daha akılcı (rasyonel) ve kesinlikle yeniden kullanımını gündeme getirecektir. Suyun güvenli bir biçimde yeniden kullanımı için birkaç bölgede su kalitesi sorunlarının ele alınması gerekmektedir. Bu yüzden tarımsal yeniden kullanım önemli ölçüde artacaktır.

1. Yüzey Sularında Su Kalitesi

Göller ve barajlar gibi biriktirme haznelerinde; oksijen rejimleri, oksitlenme potansiyelleri, göl katmanlaşması, karışım oranları ve o bölgedeki tüm canlı topluluğunun (biyota) gelişimi hava sıcaklığına bağlıdır. İklim değişikliği, nehirlerde su sıcaklığını etkilerken, suyun kendi kendini arıtma kapasitesini önemli ölçüde azaltacak ve biyolojik çözünme için gerekli çözünmüş oksijen miktarını düşürecektir.

Mikrobiyal kirlenme de önemli bir sorundur. Çalışmalar, iklim ile koliform yoğunluğu ve nehirlerle bu nehirlerden su alan körfezlerdeki tuzluluk düzeyi arasında ilişki olduğunu göstermektedir (Chigbu, 2004). Su kaynaklarında gözlenen kirleticilerin, özellikle organik madde artışının, büyük olasılıkla iklim değişiklikleriyle bağlantılı olduğu belirlenmiştir (Mohammadizade, 2025).

Seller sırasında su hizmetlerinin birkaç sebepten dolayı askıya alınması yaygındır ve normale dönmeleri zaman alır. Bu durum sıklıkla halkı bütün ihtiyaçları için ağır derecede kısıtlanmış su miktarına ve düşük su kalitesine mahkûm eder. Benzer şekilde atık su hizmetleri (kanalizasyon, arıtma tesisleri ve diğer temizlik tesisleri) hizmet dışı kalır ve kirlenme kaynağı işlevi görür. Kimyasal kirlenme de sanayi ya da petrol hatlarının ve depolama tanklarının bozulmasının sonucu olarak seller esnasında suya karışabilir. Seller ayrıca suların her türlü materyalle kirlenmesi ile de ilişkilidir. Su kalitesi bozuklukları biri nokta diğeri de nokta olmayan kirleticilerden kaynaklanır. Nokta kaynaklar arasında boru uçlarından verilen kirleticiler ile bir nokta civarına merkezlenen kirleticiler gelir. Noktasal olmayan kirleticiler yağışların getirdiği ve yüzey sularının toplanması sonucunda ortaya çıkar.

2. Yer Altı Sularında Su Kalitesi

Yer altı suları dünyada kaynak olarak en fazla bulunan doğal depolama hazneleri olarak bilinir (Şen, 1995). Bunların incelenmesinde jeoloji kayaçlarının özellikleri rol oynar. Yer altı suyu taşıyan tabakalara "akifer" denir. Bunun Türkçe anlamı "suya hamile kayaç"tır ve bunlara "hidrojeoloji" yapıları adı verilir. Akifer tuzlanması da yalnızca deniz seviyesi yükselmesinin neden olmadığı bir sorundur. Daha sıcak ve daha kurak dönemler, yer altı suyunun yeniden beslenmesini azaltarak tuzlu suyun tatlı su alanlarına karışmasına yol açmaktadır. Artan yağış kirlenmesinin (asit yağmuru) yer altı suyu kalitesini çeşitli şekillerde etkilemesi de mümkündür. Su kalitesini doğrudan etkileyen etmenler arasında, artan su sıcaklığı; iklim değişikliği nedeniyle kıyı yer altı su kaynaklarına deniz suyunun karışması sonucu oluşan tuzlanma; kirleticilerin yağmur suları ile taşınması (asit yağmurları) veya buharlaşma yoluyla yoğunlaşması yer almaktadır. Tüm su kalitesi problemleri arasında, yer altı suyunun tuzlanması, yalnızca akiferler ve deniz seviyesi yükselmesinden etkilenen insan sayısına bağlı olarak, su kaynakları için en ciddi sorunlardan biri olabilir. Daha fazla buharlaşma oranlarının görüleceği kıyı bölgelerinde su tuzlanmasının büyük bir sorun olacağı beklenmektedir. Aynı zamanda daha yüksek buharlaşma yüzünden iç karalarda da tuzlanmanın sorun olması beklenmektedir. Akiferlerde artan su çekilmesi ve süzülme esnasında daha fazla kirletici yüklenmesi sonucunda diğer su kalitesi sorunları da beklenmektedir. Değişik nedenlerle aşırı yer altı suyu çekimi de tatlı su kaynaklarının hem azalmasına hem de kirlenmesine yol açar. Özellikle yer altı sularının beslenme miktarlarından daha fazla çekilmesi sadece enerji masraflarının artmasına değil, ilave olarak su kalitesinin de giderek düşmesine sebebiyet verir.

İklim değişikliği yalnızca sıcaklık artışı değil, suyun kimyasını ve yaşamla bağını kökten dönüştüren bir krizdir. Artan yağış düzensizlikleri, sel ve kuraklık döngüleri; su kalitesini bozarak mikrobiyal kirlenmeyi ve hastalık risklerini büyütmektedir. Kolera gibi salgınların iklim olaylarıyla bağlantısı artık bilimsel olarak ortaya konmuştur. Su kaynakları üzerindeki insan baskısı ise bu etkileri daha da derinleştirir.

3. Çevrede Su ve Etkileri

Çevre, doğal ya da insan kaynaklı faaliyetlerle değiştirilmiş olsun, sürekli bir değişim içindedir. Doğal çevre, insan ve diğer canlıların fiziksel olarak faydalandığı; yiyecek, içecek ve yaşamı sürdürebilmek için gerekli tüm kaynakları sağlayan bir ortam sunar. Doğal çevrenin en gerekli bileşeni olan su; sucul ve kara hayatları için temel bir maddedir. Suyun göreceli olarak var olması kendi içinde bir kısıtlamadır ve bu sebeple insan yerleşim bölgeleri ilk zamanlarda su kenarlarında kurulmuş bugün ise buralardaki su kaynaklarının yetersiz kalması durumunda sular uzak bölgelerden buralara taşınır hâle gelmiştir. Tüm ekonomik gelişme ve faaliyetler için suyun miktarı kadar, kalitesi de büyük önem taşımaktadır. Su kalitesi de insan ve canlı hayatının sürdürülebilirliği için sınırlayıcı bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk zamanlarda suyun doğrudan kullanılması toplum için yeterli olmasına karşılık son 100 yıl içinde suyun değişik sebeplerle kirlenmesi sonucunda artık arıtma yapmadan kullanılmaz hâle gelmiştir. Artık su kaynakları ile diğer sosyoekonomik olaylar ve çevre sorunları birbirine karmaşık biçimde bağlantılı sorunlar yumağı hâlindedir. Bir taraftan su kalitesinin korunması için değişik önlemler alınırken diğer taraftan da su kaynaklarının kirlenmesi istenilen seviyede önlenememektedir. Bunun neticesinde insan ve canlı hayatının kalitesi de oldukça karmaşık bir süreç olarak ortaya çıkmakta ve bunun iyileştirilmesi için epey gayret sarf edilmektedir. Miktar kadar kalite de artık sürdürülebilir hayat için bir şarttır. Kalitedeki iyi olmama canlı hayatını, ekosistem ve çevreyi arzu edilmeyen yönlerde etkilemektedir.

Doğal ve henüz insan etkisine uğramamış bir ortamda, çevre şartları korunabilir ve canlılar buna uyum sağlayabilir; özellikle su kaynaklarının korunmasıyla, doğal sürdürülebilirlik sağlanabilir. Bu nedenle, bir bölgenin coğrafi özellikleri, fiziksel yapısı ve çevresi, insanların o alanı kendi faaliyetleriyle aşırı derecede etkilememe bilincine ulaşmalarını sağlayabilir. Canlı kütle değişik kara canlılarını ihtiva eder ve bunların her biri o yerdeki yağış, sıcaklık, nem, doğal yüzey örtüsü ile bağlantılıdır. Mesela yüksek enlemlerdeki ormanlık yerler ve donmuş alanlar sıcaklığın düşük olması dolayısı ile ne tarım ne de endüstri çalışmaları için pek uygun değildir. Bu tür faaliyetlerin sıcaklığın daha fazla olduğu orta enlemlerde ve ekvatora yakın tropikal bölgelerde olmasında yarar vardır. Böylece, mevcut doğal yüzey şekilleri ve örtüleri, hangi tür faaliyetlerin doğayla daha uyumlu şekilde yürütülebileceğini gösterir. Arazi kullanımının doğrudan etkisinde çevrenin rolü büyüktür ve buralarda gerektiği kadar ekonomik faaliyetlerde bulunulmalıdır. İnsan kaynaklı salgıların dışında doğal iklim elemanlarının değişkenliği de buralardaki çevre şartlarını etkileyerek miktar ve kalite bakımından değişikliğe uğramasına sebep olabilir. Bunu özellikle yağış deseninde ortaya çıkabilecek etkilerle ortaya koyabilir. Doğanın kendisine sürdürülebilir bir hayat şartı temin etmesi için insanların da bu yerlerin kendi kurallarına ve uyarlanabilme derecelerine göre etkinliklerini göstermele-

ri gereklidir. Bu doğal yöreler insanın yapay faaliyetlerinden doğrudan etkilenerek içinde bulunan su ve diğer kaynakların bozulmasına yol açabilir. Kendisinden ölçüsüzce istifade edilen, kirletilen ve doğallığının derecesi azaltılan yörelerde tatlı su kaynakları dâhil tüm doğal zenginliklerin bu etkilerden hizmet verebilme sınırları aşağı çekilmiş olur. Kaynakların bir kere kötüleşmeye başlamasıyla, birbirine bağlı çeşitli bileşenlerin etkileşimi sonucunda doğa ve doğal kaynaklar arasında suların da gittikçe önü alınmayacak bir biçimde kötüleşmesinin yolu açılmış olur. Bu kötüleşmeler insanın sosyal hayatı ile ekonomik faaliyetlerini bozar ve diğer canlılarında ekosistemlerinin kendisine hizmet edemez hâle gelmesine meydan verir.

Yeryüzünde kirlenmiş sular dolayısı ile ortaya çıkan ve yayılan hastalıklar sonucunda binlerce kişi ölmektedir. İşte bunun önlenmesi için tatlı su kaynaklarının muhafaza edilmesine önem verilmelidir. İklim değişikliği ise bu bozulma sürecini hızlandıran ek bir etken olarak rol oynamaktadır. Bu nedenle, bir bölgenin doğal çevresi, coğrafi ve iklimsel özellikleriyle birlikte sosyal ve ekonomik faktörler de göz önünde bulundurularak, insan kaynaklı kirlenmenin önlenmesine titizlik gösterilmelidir. Tatlı su kaynaklarının kalitesinin kötüleşmesine meydan verebilecek etkenleri şöylece sıralayabiliriz: 1) Kirlenme, 2) Aşırı su çekimi, 3) Çevrenin kötüleştirilmesi, 4) Farklı canlı türlerinin dengesinin bozulması.

Bu etkenler tekil olarak iklim değişikliği ve su kaynaklarının kötüleşmesine tesir etmezler ve kendi aralarında da etkileşimleri vardır. İşte bu türlü bir yapı etkileşimin incelenmesinin oldukça zor olduğunu gösterir. Genel olarak su kaynakları kalitesinin kötüleşmesinde bunların birkaçı bir arada etki yapmaktadır.

4. Su Kaynaklarının Nicelik ve Nitelik Yönleri

Noktasal kaynak kirlenmesine ilişkin olarak atık su arıtması su kalitesi için önemli bir itici güçtür. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki atık su arıtmadaki artışın gelecekte iyileşmesi beklenebilir. Organik mikro-kirleticilerin (endokrin maddeleri) yerüstü ve yer altı sularında artan yoğunlaşmalar hâlinde görülmesi beklenmektedir. Bunun sebebi insan kaynaklı kimyasalların üretimi ve tüketiminin gelecekte hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde artması ihtimalidir. Bu kirleticilerden bazıları günümüz atık su arıtma teknolojisi ile

Dünya genelinde suyun miktarı kadar kalitesi de hızla tehdit altındadır. Aşırı su çekimi, kirlenme ve iklim değişikliği birlikte hareket ederek tatlı su kaynaklarını geri dönüşü zor bir sürece sürüklemektedir. Özellikle gelişmekte olan bölgelerde bu durum; hastalıklar, gıda güvenliği sorunları ve yaşam kalitesinde ciddi düşüşler anlamına gelir. Üstelik PFAS gibi kalıcı kimyasallar, suyun görünmeyen ama en tehlikeli kirleticileri arasında yer almaktadır. Suyun korunması artık yalnızca çevresel değil, doğrudan insan sağlığını koruma mücadelesidir.

yok edilememektedir. Gelişmekte olan ülkelerde besinlerin, ağır metallerin ve organik mikro-kirleticilerin noktasal salımlarında büyük bir artış beklenmektedir. Gelişmiş ülkelerde tarım alanlarında besinler ve haşere ilaçlarının yaygın salımları önemli bir kirlenme kaynağı olmaya devam edecektir.

Artan CO_2, mevcut fotosentezin optimizasyonunu daha yüksek hava sıcaklıklarına kaydıracak ve su kullanım verimliliği ile kuraklık direncini artıracaktır. Toprak ve su kalitesi, hastalıklar ve haşereler kaynak rekabeti gibi birçok faktör deney ortamında gözlemlenen kazanımları azaltmaktadır. Arazide yapılan deneyler ekosistem süreçlere ilişkin anlayışımızı geliştirmek ve tahmin modellerini sınamak için gerekli verileri sağlar. Ayrıca yönlendirmeli deneylerde iklim değişikliği faktörleri küçük arazi bölgelerine uygulanır. İklim değişikliği senaryosunun tahmin ettiği iklimdeki aşamalı değişikliklere karşıt olarak bu deneylerde etki faktörlerindeki değişiklikler aniden gerçekleşir. Ekosistemlerin karmaşık yapısı iklim parametrelerindeki değişikliklere geciken reaksiyon ve geri beslemeler, bu parametreleri kontrol etme güçlükleri ve oldukça yavaş büyüme süreçleri, özellikle çok yıllık bitki sistemlerinde, iklim etkilerinin doğrudan ölçümünü karmaşık hâle getirmektedir. Araştırmalar, yükselen CO_2 konsantrasyonlarının fotosentezi artırarak bitki üretkenliğini yükselttiğini ve su ile besin zincirlerinde değişikliklere yol açtığını gösteren önceki gözlemleri teyit etmekte ve genişletmektedir.

Kereste üretimi bir yana orman kompozisyonundaki uzun vadeli değişikliğin görünüm, su kalitesi, toprak erozyonuna karşı koruma, tatil ve turizm gibi ekolojik hizmetler açısından değeri çok az veya en yüksek ihtimalle ortada olacaktır. Nehir kıyısı ormanları sellerin önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Üstelik iklim değişikliği tohum, sert kabuklular, avlanma, reçine, eczacılıkta, botanik ilaçlarında ve kozmetik sanayisinde kullanılan bitkiler gibi yarı piyasa hizmetleri üzerinde önemli etkiler yapabilir.

İklim değişikliği ve deniz düzeyi yükselmesinin -özellikle biyofizik etkilerle karşılaştırıldığında- sosyal veya kültürel sistemler

açısından potansiyel sosyoekonomik etkilerini değerlendirmede daha sınırlı bir ilerleme kaydedilmiştir. Hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde kıyı altyapısı, ulaşım tesisleri, enerji iletim sistemleri, kıyı kaynakları ve aynı zamanda atık tesisleri, septik tank sistemleri, su kalitesi ve arzı üzerinde etkileri vardır.

İklim değişkenleri, özellikle yağış ve hava sıcaklığı, içme suyu kaynaklı hastalıklar, gıda kaynaklı hastalıklar ve kıyı suyu kalitesi sorunları ile bağlantılıdır. Hava, kara ekosistemleri ve insan sağlığı arasındaki bağlantılar, özellikle kemirgenlerden insanlara geçen hastalıklar açısından önemlidir. Örneğin hantavirüs, küçük kemirgenleri etkileyen ve solunum yoluyla veya kemirgenlerin salgı ve dışkılarıyla temas sonucu insanlara geçebilen bir virüstür; semptomları arasında yüksek ateş, baş ağrısı, mide bulantısı ve kusma yer almaktadır. Ayrıca bazı önemli sıtma taşıyıcıları, acı su bulunan sulak alanlarda yetişir ve bu nedenle bu habitatlar hastalığın yayılmasını etkileyebilir (artırabilir veya azaltabilir).

Su ile bağlantılı hastalıklar bulaşma rotasıyla sınıflandırılabilir; böylelikle sudan kaynaklanan (bağırsakla ilgili) ve suda yıkananları (hijyen eksikliği) birbirinden ayırmak mümkün olur. İklim değişkenliği suyun hem varlığını hem de kalitesini etkileyebilir. İyileştirilmiş suya ulaşma, hâlâ aşırı derecede önemli bir küresel sağlık sorunu olmayı sürdürmektedir. Yağış ve yerüstü suyu varlığındaki değişiklikler küresel iklim değişikliği etkisinin başlıca kaygı verici sorunlarıdır. Mevcut iklim ve sağlık sonuçlarını (temelde ishal hastalığını) değerlendirirken, değerlendirmeye alınacak dört ana husus vardır: 1) Suyun varlığı ile ishal hastalıklarına bağlı sağlık yükü arasındaki bağlantılar, 2) Aşırı yağışların (yoğun yağış veya kuraklığın) şebeke suyu veya yerüstü suyunda su tabanlı hastalık salgınlarını kolaylaştırmadaki rolü, 3) Hava sıcaklığı ve akışın kıyı, tatil ve yerüstü sularının mikrobiyolojik kirlenmesi üzerindeki etkileri, 4) Hava sıcaklığının ishal hastalığı üzerindeki doğrudan etkileri.

Atık suyun ve sulama suyunun yeniden kullanımı gibi su kıtlığı ile mücadele önlemlerinin insan sağlığı açısından etkileri vardır. Atık su sulaması için su kalitesi kılavuzları, patojenik organizmalardan gelen sağlık riskini önlemek ve ürün kalitesini teminat altına almak gayesi ile hedeflenmelidir. Ancak gelişmekte olan ülkelerin büyük çoğunluğunda kırsal ve yarı kentsel bölgelerde, sulama için kanalizasyon ve atık suların kullanımı yaygın bir uygulamadır ama dışkı ve ağız yolu ile hastalık bulaşmasının da kaynağıdır. Birçok ülkede; su kalitesi, hava kalitesi, gıda güvenliği ve güvenilirliğinin etkileneceği ve gelecekte iklim değişikliği sebebi ile daha da fazla etkileneceği ortaya konulmuştur.

Su kalitesi sorunları ve bunların etkileri gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde daha çok mikrobiyal bakış açısından farklıdır. Bu farklılıklar iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle birlikte artacaktır. Gelişmiş ülkelerde taşkın ve aşırı yağmurlar ile bağlantılı su tabanlı hastalıklar çok iyi işletilen su ve kanalizasyon hizmetleri sayesinde büyük ölçüde azaltılmıştır ancak gelişmekte olan ülkelerde bunun tersi görülmektedir.

5. PFAS Nedir?

Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency - EPA), tarafından açıklandığına göre perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler, PFAS olarak bilinir. Burada sunulan bilgiler, EPA'nın PFAS'a yönelik belirli eylemlerinin ve PFAS ile ilgili diğer yeni olayların ayrıntılarını anlamak için gereken önemli arka plan bilgilerinin bir kısmını açıklamayı amaçlamaktadır. Aşağıda internetten alınan bilgiler ışığı altında PFAS'ın ne olduğu kısaca açıklanmıştır. Ayrıca, PFAS ile kirlenmiş toprak, su veya biyolojik katıların ürün yetiştirmek, gıda amaçlı hayvanları beslemek veya balık ya da diğer deniz ürünlerini yetiştirmek için kullanılması, PFAS'ın gıda tedarikine girmesine yol açabilir. Ters ozmos (RO) sistemi, filtrelenmemiş suyu yarı geçirgen bir membrandan basınçla geçirir. Membran, PFAS gibi kirleticileri engelleyen küçük gözeneklere sahiptir ancak temiz suyun diğer tarafa akmasını sağlar. Ters ozmos, kirleticileri gidermek için en kapsamlı su arıtma yöntemlerinden biridir.

Bu maddeler karaciğer hasarı, tiroid hastalığı, obezite, doğurganlık sorunları ve kanser gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS) su geçirmez giysilerde, kozmetik ürünlerde, mobilyalarda, leke tutmayan ürünlerde ve yangın önleyicilerde de bulunuyor. Kimyasalların hamilelik sorunları, karaciğer hastalığı, kanser ve diğer hastalıklarla bağlantılı olduğu bilimsel olarak ispatlandı.

Not: Bu yazının büyük bir kısmı yazar tarafından yazılan ve kaynak listesinde gösterilen eserlerden alıntılar içermektedir.

Kaynaklar

Chigbu, P., Gordon, S., & Strange, T. (2004). Influence of inter-annual variations in climatic factors on fecal coliform levels in Mississippi Sound. Water Research, 38(20), 4341-4352.

D'Souza, R. M., Becker, N. G., Hall, G. M., & Keith, B. A. (2004). Does ambient temperature affect foodborne disease? Epidemiology.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Summary for policy makers. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, & P. M. Midgley (Eds.), A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate change 2014: Synthesis report. In R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

Mohammadizade, A. (2025). The impact of climate change on soil organic matter. Journal of Agricultural Sciences and Engineering, 7(2), 61-65.

Patz, J. A., Daszak, P., Tabor, G. M., Aguirre, A. A., Pearl, M., Epstein, J., Wolfe, N. D., Killpatrick, A. M., Foufopoulos, J., Molyneux, D., & Bradley, D. J. (2004). Unhealthy landscapes: Policy recommendations on land use change and infectious disease emergence. Environmental Health Perspectives, 112, 1092-1098.

Patz, J. A., & Kovats, R. S. (2005). Hotspots in climate change and human health. British Medical Journal, 325, 1094-1098.

Rodo, X., Pascual, M., Fuchs, G., & Faruque, A. S. (2002). ENSO and cholera: A nonstationary link related to climate change? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(20), 12901–12906.

Şen, Z. (1995). Applied hydrogeology for scientists and engineers. Taylor & Francis/CRC Press.

Şen, Z. (2009). İklim değişikliği, tatlı su kaynakları ve Türkiye. Su Vakfı Yayınları.

Şen, Z. (2022). İklim değişikliği ve Türkiye. Çevre, Şehir ve İklim Değişikliği Dergisi, 1(1), 1-19.

World Health Organization (WHO). (2023). Drinking water. World Health Organization.

Çevre sağlığı izleme sistemleri: Türkiye'nin mevcut durumu ve gelecek perspektifleri

Dr. A. Alp Aker

1992 Marmara Üniversitesi Tıp Fakültesi mezunudur. 1999 yılında Marmara Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalından uzmanlığını aldı. Bir süre özel sektörde medikal direktör olarak çalıştı. İstanbul Halk Sağlığı Müdür Yardımcısı, İstanbul Kartal Toplum Sağlığı Merkezi Başkanı, İstanbul Tuzla İlçe Sağlık Müdürlüğünde Halk Sağlığı Uzmanı olarak görev yaptı. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Ana Bilim Dalında Dr. Öğretim Üyesi olarak göreve başladı. Hâlen çalışmalarına aynı pozisyonda devam etmektedir. Ulusal-uluslararası dergilerde çıkmış çeşitli makaleleri ve çevre sağlığı ağırlıklı kitap bölümleri vardır.

Çevre kaynaklı sorunlar çok çeşitlidir ve birbiriyle ilişkilidirler. Günümüzde iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, çevre kirliliği dünyadaki yaşamı ve tüm insanları tehdit etmektedir. İnsan kaynaklı istenmeyen atıkların dış ortama salınması olan kirlilik, yılda yaklaşık 9 milyon ölüme yol açmaktadır ki bu tüm ölümlerin 6'da 1'idir. Sanayileşme ve kentleşmenin yan ürünleri olan "modern kirlilik risklerine," yani dış ortam hava kirliliği ve toksik kimyasal kirliliğe bağlı ölümler dünyada 2000 ile 2022 arasında yüzde 66 artış göstermiştir. Bu ölümlerin çoğu düşük ve orta gelirli ülkelerde meydana gelmektedir. Kirlilik bugüne kadar çoğunlukla yerel bir sorun olarak kabul edilirken giderek gezegensel bir tehdit olduğu ve etkilerinin sınır ötesi olduğu ve küresel yanıt verilmesi gerektiği daha iyi anlaşılmaktadır (1). Doğru tanı koyup çevre sorunlarının çözümüne yönelik politikalar geliştirebilmek için çok sayıda ve yüksek kalitede veriye ihtiyaç vardır (2).

Çevresel izleme, çevre koşullarının ve bu koşullardaki değişimlerin belirlenmesi, önleyici tedbirler alınması, geliştirilecek politikaların desteklenmesi ve politika yapıcılar, uluslararası kurumlar ve kamunun bilgilendirilmesi için vazgeçilmez bir araçtır. Çeşitli ortamlarda kirliliğin yaygın olduğu bir dünyada, karmaşık kimyasalları izlemek için hızlı, hassas ve uygun maliyetli çevresel izleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sabit ve hareketli kaynaklardan salınan çok sayıda kirletici maddenin emisyonunu azaltma amaçlı uygulanan düzenleyici programların etkinliğini değerlendirmek ve çevre koruma çalışmalarının yönetiminde bilgiye dayalı karar alabilmek için uzun süreli çevresel izleme kritik öneme sahiptir (3).

Çevresel izleme ile insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkilerini tespit etmek için hava, su, toprak ve gıda gibi fiziksel ortamdaki maddelerin konsantrasyonları izlenir, ölçülür ve analiz edilir. Bu sistemler, çevresel parametrelerin sürekli takibi için sensör ağları ve ölçüm istasyonları kullanarak veri toplar. Çevresel izleme sistemleri tespit edilen bu kirliliklerle ilgili erken uyarı sağlayabilir. Yine hedef değeri aşma durumlarında, bileşenlerin kaynaklarının tespit edilerek önlem için harekete geçilmesine yardımcı olurlar (4).

İzleme, bir veya daha fazla çevresel parametrenin veya özelliğin durumunu ve/veya eğilimini belirlemek için yeterli bir süre ve sıklıkta veri (kimyasal, fiziksel ve/veya biyolojik) toplama ve analiz etme anlamına gelir. İzleme, "anlık bir ölçüm" üretmemeli, aksine açıkça tanımlanmış hedeflerle ilgili parametrelerdeki değişiklikleri belirlemek için zaman içinde tekrarlanan numune almayı içermelidir (5).

Çevresel izleme için yüksek kaliteli, standardize verilere ihtiyaç vardır. Gelişmekte olan ülkelerde daha fazla olmak üzere, hava kirliliği, katı atıklar, toksik atıklar, atık sular gibi çevresel sorunların yönetimi için yeterli veri toplanmasında, değerlendirilmesinde ve yasal sınırların uygulanmasında sorunlar yaşanmaktadır. Veriler çevre ve insan sağlığına etkileri tespit etmek için yeterli sayı ve sürede toplanmamakta, temsiliyeti yetersiz olmakta, kalibrasyon sorunları yaşanmakta, verilerin analizi ve anlamlı modeller oluşturulmasında, yine sonuçların halka açıklanması ve gerekli uyarıların yapılmasında aksaklıklar gözlenmektedir. Oysa halk sağlığının korunması, sürdürülebilir kalkınma, döngüsel bir ekonomi için bu veriler önemlidir. Dünyada korunması gereken sulak alanlar, çayırlar ve diğer önemli ekosistemler için ayırt edici uzaktan algılama teknolojileri de yeterince gelişmiş değildir (2).

Maruziyet değerlendirmesi için ilk gereklilik, bir etkenin varlığının (veya yokluğunun), konsantrasyonlarının ve dağılımının, zaman içindeki dalgalanmalar da dâhil olmak üzere anlaşılmasıdır. Çevre

ve insan sağlığı için tehlikeli maddeler çevresel izleme ile çeşitli veri kaynaklarından (örneğin gıda, hava, su ve toprak) tespit edilebilir.

Çevresel örnekleme verilerinin toplanması ve analizi risk değerlendirme süreci için kritik öneme sahiptir. Toplanan verilerin kalitesi ve temsil gücü de önemlidir. Örnek toplama işlemindeki en büyük endişe, alınan örneklerin, araştırılan kirletici için potansiyel maruz kalma durumlarını yeterince temsil etmesini sağlamaktır. İncelenen ortamda kirleticiler homojen bir şekilde dağılmazlar. Farklı çevresel bölgelerdeki koşulların etkilerini anlamak ve kimyasal maddelerin çevresel bölmeler arasında nasıl hareket ettiğini saptamak için örnekleme planları geliştirmek ve bütün bu farklı bölgelerde maruziyeti değerlendirmek gereklidir.

Çevresel örnekleme ve analizde bir diğer önemli bir nokta, çevrenin durağan olmaması ve örnekleme sonuçlarının zaman içinde değişebilmesidir. Çevresel izleme ve tahmin modelleri, maruz kalma yolağında belirli noktalardaki maruz kalma düzeylerini belirlemek için kullanılabilir (6). Çevresel izleme yapılırken, eş zamanlı meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Meteorolojik veriler, hem noktasal kaynaklı hem de genel hava kirliliğini ve nüfusun potansiyel maruziyetini değerlendirirken özellikle önem kazanmaktadır.

Çevresel izleme, çevre kirliliğinin kontrolü dâhil olmak üzere çevresel sağlığını koruma amacına yönelik olan herhangi bir programın başarıya ulaşması için gereklidir. Etkili bir kontrolün gerçekleştirilmesi için gereken dört unsur vardır: 1) Uygun çevresel standartlar, 2) Kanunlar ve yönetmelikler, 3) Yaptırım gücü, 4) Mahkemelerde yönetmeliklere göre yaptırım uygulamak üzere, düzenleyici kuruluş tarafından istenen verilerin elde edilmesi için yeterli izleme. İzleme yapılmadan uygunsuzluğun farkına varılamaz (5).

Çevresel izleme dolaylı bir maruziyet değerlendirme yöntemi olup bir kişinin etrafındaki dış ortamın bileşimini ölçer. Biyolojik izleme ise kişisel maruziyeti değerlendirir ve vücuda emilen kirletici madde miktarını ölçer. Biyolojik izleme yüksek risk altındaki bireyleri veya alt popülasyonları belirlemede faydalı olabilir ancak biyolojik izleme gerçekleştirmek her zaman mümkün olmaz (6).

Coğrafi bilgiler ile bilgi işlem teknolojisinin birleştirildiği Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) uzamsal ilişki ve örüntülerin anlaşılması için kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, halk sağlığı alanındaki verilerin büyük çoğunluğunun mekânsal bir bileşeni bulunmaktadır. Bu bağlamda CBS çevre sağlığı araştırmalarına, kişi, zaman ve genellikle ihmal edilen konum üçlemesini bir araya getirerek güçlü bir grafiksel ve analitik boyut ekler (7). CBS etkin bir karar destek sistemi olarak da yardımcı olabilir. Çevresel izleme verilerinin CBS'ye daha fazla entegrasyonu toplanan bilgilerin görüntülenmesine, yer ve zaman boyutlarının daha iyi değerlendirilmesine, sorgulama ve analiz yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Yapay zekânın (YZ) coğrafi bilgi sistemleri teknolojileriyle entegrasyonundaki son gelişmeler ise çevresel izleme alanında devrim yaratmayı vadetmektedir. YZ, makine öğrenimi (ML) algoritmaları, uzaktan algılama verileri ve CBS aracılığıyla çok sayıda çevresel parametrenin hassas ve gerçek zamanlı izlenmesi ve analizinin sağlanması mümkün olabilmektedir.

Yapay zekâ tabanlı yöntemler, büyük veri kümelerini hızlı bir şekilde işleme ve sonuç üretme yeteneğine sahiptir. YZ teknolojisi, iklim değişikliği, su kirliliği ve bitki örtüsü dinamiklerinin simülasyonları gibi çevresel sorunlarla ilgili çeşitli alanlarda ve ayrıca doğal afetler için erken uyarı sistemlerinde uygulanmıştır. Gelişmiş veri analizi teknikleri, çevresel anormalliklerin erken tespiti, ekolojik eğilimlerin tahmine dayalı modellenmesi ve verimli kaynak yönetimini kolaylaştırmaktadır. YZ teknolojileri su kalitesi, atık su, hava kirliliği izlemleri ve katı atıkların kontrolü ve tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yine çevresel izlemede, uydu görüntülerinin değerlendirilmesinde YZ'nin kullanımı hızlı ve derinlikli analizler için yeni olanaklar sağlamaktadır. Yüksek çözünürlükle görüntülerin geleneksel piksel özellikleri olan ton ve renge ek olarak komşu piksellerle birlikte ele alınmasıyla detaylı ve bağlamsal analizler yapılabilmektedir (8).

Çevresel göstergeler çevresel performansları değerlendirmede kullanılmaktadır. Çevresel Performans İndeksi (EPI) ülkelerin BM Sürdürülebilir Kalkınma

Hedeflerine ulaşma yönündeki gelişmelerini takip etmede yardımcı bir değerlendirme aracıdır. Genel olarak EPI'den, dünyadaki en önemli çevresel sorunlara yönelik olarak ülkelerin attığı adımları değerlendirmede yararlanılmaktadır. EPI'de, 11 çevresel kategoride 58 çevresel indikatör kullanılarak 180 ülke 0-100 ölçeğinde puanlanmaktadır. Yüksek puanlar ülkelerin çevresel sorunlara yönelik mücadelede başarılı olduğuna işaret etmektedir. 2024 yılı EPI'ye göre dünyada ilk 3 sırayı Estonya (75.7 puan), Lüksemburg (75.1 puan) ve Almanya (74.5) almıştır. ABD'nin 57.2 puanla 35. sırada, Çin'in 35.4 puanla 156. sırada olduğu indekste, Türkiye 37.2 puanla 143. sırada yer almaktadır. Analizler, dünyada sera gazı emisyonlarının 2050'de sıfıra indirilmesi hedefinden, indekste yüksek puan alan ülkeler dâhil, giderek uzaklaşıldığına işaret etmektedir. Yine biyoçeşitlilik kaybı devam etmektedir (2).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek bölgelerden biri Akdeniz Havzası'dır ve Türkiye bu bölgede yer almaktadır. Dolayısıyla Türkiye sera gazı emisyonlarının azaltılmasından en büyük yararı görecek ülkeler arasında yer almaktadır. Son yıllarda ülkemizde iklim değişikliğiyle ilişkili seller, kuraklık ve sıcak dalgaları gibi afetlerde artış görülmektedir. 2010-2021 yılları arasında Türkiye'de 8.274 meteorolojik afet yaşanmıştır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Doğa Kaynaklı Olay İstatistiklerine göre sadece 2022 yılında 450 adet sel/su baskını, 18 çığ, 859 heyelan yaşanmıştır. 2021 yılında Türkiye genelinde 2.793 adet orman yangını meydana gelmiş, bu yangınlarda 139.503 hektar orman zarar görmüştür. Türkiye'de yaşanan kuraklık nedeniyle ortaya çıkan zarar Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH)'nın yüzde 1.2'si olarak hesaplanmıştır. İklim değişikliği kaynaklı afetler için yıllık ortalama kayıp GSYH'nin yüzde 2.2'sine ulaşmıştır (9).

Türkiye'de Çevresel Sürekli İzleme

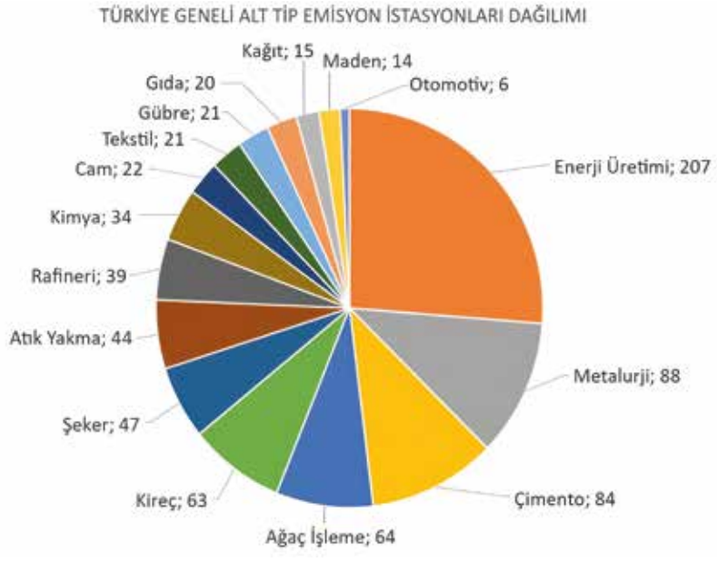
Türkiye'de havza, deniz, hava alıcı ortam izleme verileri ile "Sürekli Atık Su İzleme Sistemleri" (SAİS) ve "Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri" (SEÖS)'nden alınan çevre yönetimi izleme verileri için 2018 yılında Sürekli İzleme Merkezi (SİM) kurulmuştur.

Yurt çapında hava kalitesi, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) (https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality adresinden ulaşılabilinir.) ile 81 ilde takip edilmektedir. Kirletici vasfı yüksek sanayi tesislerinden yayılan kirletici parametrelerin (baca gazı emisyonlarının) sürekli olarak ölçülmesi zorunludur. SİM üzerinden, SEÖS istasyonlarında, sanayi ve enerji üretim tesislerine ait bacalardaki emisyonlar izlenmektedir. Yine SİM üzerinden, SAİS istasyonları ile atık su arıtma tesisleri izlenmektedir. Ayrıca Evsel ve Endüstriyel Kirlilik İzleme Programı (EKİP) ile havzalarda kirlilik tespiti ve takibine yönelik çalışmalar yönetilmektedir. Tüm denizlerde, "Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı" ile çok sayıda istasyonda düzenli olarak izleme yapılmakta, SİM üzerinden raporlanmaktadır (10). Hava Emisyon Yönetim (HEY) Portalı ile hava kirleticileri kayıt altına alınmakta, sanayi tesislerinin bacalarından, evsel ısınmadan ve kara/deniz/hava/demir yolu ulaşımından kaynaklanan kirletici miktarları ayrı ayrı hesaplanmaktadır (10).

Hava kirliliği: Hava kirliliği insan sağlığını ve ekosistemleri tehdit eden başlıca kirlilik yollarındandır. İnsan kaynaklı hava kirliliğinin başlıca nedeni fosil yakıt emisyonlarıdır. Hava kirliliği kronik bronşit, astım gibi solunum yolu hastalıklarına, kalp-damar yolu hastalıklarına, inmelere, akciğer kanseri dâhil çeşitli kanserlere ve erken ölümlere neden olmaktadır. Yine hava kirliliği asit yağmurlarına neden olmakta ve sera gazları yoluyla iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır.

Hava kirliliğinin çevre ve sağlık üzerindeki etkilerini azaltmak için benimsenecek stratejiler arasında, kirletici kaynaklarının saptanması ve PM10 (parçacık madde <10 mikrometre), PM2.5, ozon, kükürt dioksit (SO2) ve azot oksitleri (NOx) düzeyleri başta olmak üzere, kirlilik parametrelerinin sürekli takibi yer almaktadır. İzleme sistemleriyle verilerin toplanması ve değerlendirilmesi için önemli bir konu, diğer çevresel izleme sistemleri için de geçerli olmak üzere, izlem verileri temelinde yaptırım uygulanması hususunda,

Şekil 1. İstasyonlarda ölçülen parametre sayıları (10)



Şekil 2. Türkiye geneli sürekli emisyon ölçüm sistemleri alt emisyon istasyonları sektör dağılımı, 2023 (10)

Şekil 3. 2022 ve 2023 yıllarında kirletici parametreleri için altyapısı olan ve yıllık yeterli veri alım oranını sağlayan istasyon sayıları (14)

ruhsat verme yetkisi olan ve özellikle de uygulama sorumluluğunu üstlenen kurumların, merkezi otoriteden bağımsız olmasıdır (11).

Hava kalitesi izleme sistemleri ulusal hava kalitesi değerlendirme ve yönetim sistemlerinin asli bir unsuru olmalıdır. Hava kirliliği izleme ve yönetim sistemlerinin temel bileşenleri arasında kurumsal yapı (merkezi otorite: genellikle çevre bakanlığı, bölgesel ve yerel birimler), politik hedefler, düzenleyici enstrümanlar (standartlar, teknik zorunluluklar, uygulanacak cezalar, vergilendirme), izleme sistemleri ve bilgi yönetimi (hava kalitesi izleme sisteminin çalıştırılması, modelleme, senaryo analizleri, etkilerin insan sağlığı ve çevreye etkilerinin değerlendirilmesi, raporlama), karar alma ve harekete geçme mekanizmaları yer alır (11).

Ülkemizde hava kirliliği izleme süreci 1961 yılında başlamış, Ankara'da Sağlık Bakanlığına bağlı Refik Saydam Hıfzıssıhha Merkezinde kükürt dioksit ve partiküler madde konsantrasyonları günlük olarak izlenmiştir. Hava kalitesi izleme ağına daha sonra NO, NO2, NOX, CO, O3, PM2.5 ve BTEX (benzen, toluen, etilbenzen, ksilenler) gibi kirleticilerin ölçümleri eklenmiştir. Ayrıca, ağda ağır metal örneklemesi de gravimetrik yöntemle gerçekleştirilmektedir. Hava kalitesi ölçüm verileri, istasyonlardan elde edilen saatlik ortalamalar şeklinde toplanmakta ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına (ÇŞİDB) bağlı Veri İşletim Merkezinde izlenmektedir (4).

Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA), ÇŞİDB tarafından yönetilmektedir. Bakanlık tarafından hava kalitesinin ülke genelinde izlenmesi amacıyla 81 ilde hava kalitesi ölçüm istasyonları kurulmuştur. 2005 yılında 35 istasyonla başlayan, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağına dâhil olan istasyon sayısı 2023 yılı itibarıyla toplam 380'e ulaşmıştır (10). Ölçüm istasyonlarından alınan veriler ÇŞİDB resmî sitesi olan "Sürekli İzleme Merkezi" https://sim.csb.gov.tr ve www.havaizleme.gov.tr adresinde eş zamanlı olarak yayınlanmaktadır. Ancak hava kalitesi izleme merkezleri şehirlerde sınırlı sayıda bulunmaktadır (4). Bölgesel olarak etkin hava yönetiminin sağlanması amacıyla, Temiz Hava Merkezleri kurulmuştur. Doğrudan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi Genel Müdürlüğüne bağlı olarak kurulan sekiz adet Bölgesel Temiz Hava Merkezi Müdürlüğü bulunmaktadır (12).

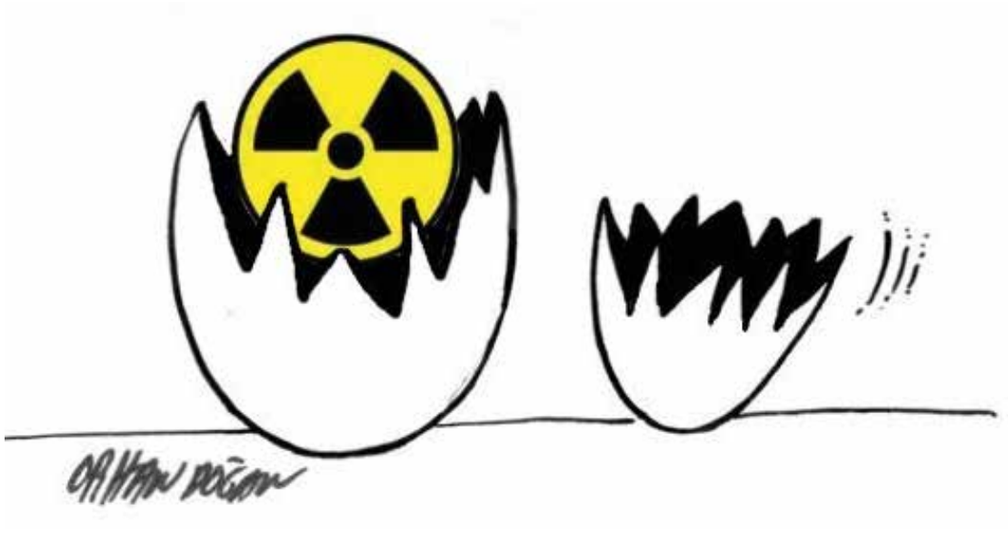
17 Mayıs 2014 tarih ve 29003 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren "Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik" kapsamında 2015 yılından itibaren yüksek emisyon hacmine sahip sanayi tesislerinin tamamına yakını izlenmektedir. Sera gazı emisyonlarının doğrulanması işlemi doğrulayıcı kuruluşlar tarafından yapılmaktadır (13). Konuyla ilgili diğer yönetmelikler de, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmeliktir. ÇŞİDB verilerine göre, 2023 yıl sonu itibarıyla toplam 390 tesise ait 776 bacaya izleme sistemleri kurulmuş olup CO, NOx, SO2, toz vb. kirletici parametreleri çevrim içi olarak izlenmektedir (10).

Türkiye'de 1990 ve 2021 yılları arasında emisyonlardaki değişim incelendiğinde, 1990 yılına göre 2021 yılında SO2 emisyonlarının yüzde 372, NOx emisyonlarının yüzde 643, PM10 emisyonlarının ise yüzde 135 arttığı görülmektedir. Öte yandan, SO2 emisyonları 2021 yılında, bir önceki yıla göre dahi yüzde 17 artmıştır. SO2 emisyonlarının, yüzde 68.6'sı elektrik santrallerinden, yüzde 13.9'u evsel ısınmadan kaynaklanırken, NOx emisyonlarının yüzde 37'si ile elektrik santrallerinden kaynaklanmıştır (10).

2008 yılından itibaren, Avrupa Birliği (AB) Mevzuatına uyum süreci kapsamında, Türkiye genelindeki hava kalitesini artırmaya yönelik hava kalitesi sınır değerleri kademeli olarak azaltılmaktadır. Partikül madde (PM10), kükürt dioksit, azot dioksit parametreleri için AB sınır değerleri benimsenmiştir (10).

Hava kirliliğine yol açan emisyonlar atmosfere salındıktan sonra olduğu gibi kalmamakta, hem fotokimyasal reaksiyonla şekil değiştirmekte hem de atmosfer hareketleriyle uzaklara taşınmaktadır. Bölge topografisine göre kirliliğin yayılması farklılık gösterebilmektedir (12). Dolayısıyla izleme istasyonlarının bu farklılıklar dikkate alınarak konumlandırılması önemlidir. Bu bilgi de dikkate alındığına, Türkiye'de hava kalitesi ölçümlerinin istenen seviyede olduğunu söylemek mümkün değildir. Hava kirliliği ve sağlık etkilerinin incelendiği 2024 tarihli Kara Rapor'a göre, Türkiye genelinde 2023 yılında 380 hava kalitesi izleme istasyonu mevcut olmasına rağmen, mevzuata göre izlenmesi gereken parametreler istasyonların tümünde izlenmemektedir. Örneğin PM2.5 var olan istasyonların yarısından azında izlenmektedir. Bazı şehirlerde PM2.5 tek bir istasyonda, o da şehrin dışında olan bir istasyonda ölçülmektedir. Üstelik PM2.5 için ulusal mevzuatta bir limit değer henüz tanımlanmamıştır.

İstasyonlardan veri alımı da yeterli düzeyde değildir. Bir istasyondan alınan verilerin değerlendirilebilmesi için, her bir kirletici parametre açısından yıl boyu belirli bir oranda veri alınmış olması gerekmektedir. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde (HKDY) bu oran, PM10, SO2 ve NO2 için yüzde 90 olarak belirlenmiştir; yani bu parametrelere dair konsantrasyon düzeyleri değerlendirilirken, söz konusu istasyonda yılın en az yüzde 90'ında (329 gün ve üzerinde ya da 7.884 saat ve üzerinde) ölçüm yapılmış olması gerekmektedir (14).



Ülke genelinde en yaygın izlenen parametre PM10 olmasına rağmen, 365 istasyonun sadece 225'inden, yani yüzde 61'inden yeterli PM10 verisi alınabilmektedir. Bu oran ince partikül maddede (PM2.5) yüzde 25, kükürt dioksitte (SO_2) yüzde 54, azot dioksitte (NO_2) ise yüzde 43'tür. 2023 yılında toplam istasyon sayısı artmış olmasına rağmen, yeterli veri alımı sağlanan istasyon sayısı 2022 yılına göre azalmıştır. Üretimde fosil yakıt, özellikle de kömür kullanan ağır sanayinin yoğun olduğu bölgelerdeki partikül madde izlemesi çok sınırlıdır. Kirliliğin en yoğun olduğu bilinen Sakarya-Hendek Organize Sanayi Bölgesi (OSB), Kocaeli-Gebze OSB ve Kocaeli-Dilovası-İMES OSB 2 istasyonlarında 2022 ve 2023 yılları boyunca hiç partikül madde (PM10) ölçümü yapılmamıştır. Ülke genelinde bulunan 30 endüstriyel hava kalitesi izleme istasyonunun sadece yarısında ince partikül madde (PM2.5) altyapısı vardır ve 2022 yılında bunların sadece 9'undan, 2023'te ise 12'sinden yeterli veri alınabilmiştir. Ayrıca, raporlanan verilerin güvenilirliği ve kalitesiyle ilgili de sorunlar olduğunu düşündüren örnekler olduğu gibi, yine istasyonların kirlilik ölçüm cihazlarında kalibrasyon sorunu olduğunu düşündüren hatalara da rastlanmaktadır (14).

Belediyelere ait hava kirliliği ölçümleri: İstanbul'da, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma Şube Müdürlüğü faaliyeti olarak 1995 yılında iki mobil hava kalitesi ölçüm istasyonuyla başlayan ölçümler, günümüz itibarıyla İstanbul'un 27 noktasında sabit ve iki adet mobil ölçüm istasyonuyla devam etmektedir. Bu istasyonlarda SO_2, PM10, PM2.5, NO_x, CO, O3, VOC_s (uçucu organik bileşikler) ve ağır metal analizleri yapılmaktadır. Çevre Bakanlığının 12 istasyonuyla birlikte İstanbul'da hava kalitesi 39 istasyonda takip edilmektedir (15).

Yoğun kara yolu trafiğine bağlı hava kirliliğinin yaşandığı İstanbul'da otoyollara yakın izleme istasyonlarında 90 µg/m^3 gibi yüksek PM2.5 düzeyleri ölçülmekte, ancak çevredeki diğer istasyonların ölçümleri hep birlikte değerlendirilip ortalama değerler alındığından söz konusu trafik kaynaklı seviyeler limit değerlerin altında gözükmektedir. Buna göre, hava kalitesi izleme istasyonu verilerinin istasyon bazında ayrıca değerlendirilmesi önemlidir (15).

Bazı hava kirleticileri (örneğin PM, yer seviyesi ozon) iklim üzerinde önemli etkilere sahiptir ve hava kirleticileri ile sera gazları arasında karmaşık bir ilişki vardır. Yine hava kirleticileri ve sera gazları çoğunlukla aynı antropojenik kaynaklardan çevreye verilmektedir. Dolayısıyla hava kalitesi izlemeye ve iklim değişikliğini hafifletmeye yönelik çalışmalarda bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir (11). Sera gazı envanteri sonuçlarına göre, Türkiye'nin 2022 yılı toplam sera gazı emisyonu 558.3 milyon ton (Mt) CO_2 eşd. (eş değeri) olarak hesaplanmıştır. Bu miktarın 441.4 milyon tonu CO_2'den, 72.2 milyon tonu CH_4'ten, 34.3 milyon tonu N_2O'dan ve 10.4 milyon tonu florlu gazlardan kaynaklanmaktadır. Kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4.1 ton CO_2 eşd., 2022 yılında 6,6 ton CO_2 eşd. olarak hesaplanmıştır. Enerji sektörü emisyonları 2022 yılında, 1990 yılına göre yüzde 179.8 artarak 400.6 Mt CO_2 eşd. olarak hesaplanmıştır. Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı emisyonları ise 1990 yılına göre yüzde 208 artarak 69.9 Mt CO_2 eşd. olmuştur (10).

Toprak kirliliği: Toprak yapısının doğası gereği, toprak kirliliği izleme süreci çeşitli zorluklarla yürütülmektedir. Topraktaki kirleticiler, su veya hava ortamındakilere göre daha zor ölçülebilmektedir. Bu durum büyük ölçüde, kirleticilerin toprak parçacıklarıyla etkileşime girmesinden kaynaklanmaktadır. Kimyasal ve fiziksel etkileşimler, kirleticileri toprak parçacıklarına bağlamak için hareket edebilir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, t.y.).

Tarımsal kaynaklı kirliliğin tespiti ve nitrata hassas bölgelerin belirlenmesi amacıyla oluşturulan tarımsal kaynaklı nitrat kirliliği izleme ağında 2.533 yer üstü, 2.319 yer altı suyu olmak üzere toplam 4.852 istasyonda, sularda tarımsal kaynaklı nitrat kirliliği izleme çalışmaları yürütülmektedir (10).

Su kullanımı ve su kirliliği: Ülkemizin tüketilebilir yer üstü ve yer altı su potansiyeli yılda ortalama toplam 112.0 milyar m^3'tür. 2021 yılı itibarıyla kullanılan su, tüketilebilir yer üstü ve yer altı su potansiyelinin yüzde 52.2'sini oluşturmakta olup 57 milyar m^3'tür. Türkiye'de kullanılan suyun yüzde 77'si tarımda, yüzde 12'si içme-kullanma ve yüzde 11'i endüstriyel amaçlı kullanılmaktadır. Tarımda sulama yöntemleri içinde en fazla su kaybı (%35-%60) yüzey sulama yönteminde oluşmaktadır. Öte yandan, sulama sistemlerine bakıldığında, sulamaların yaklaşık yüzde 73.4'ü klasik ve kanaletli sistemler (açık) ile, yüzde 26.6'sı ise borulu sistemler (kapalı) ile sulanmaktadır. Yine içme suyu sistemlerinde kayıp oranı 2022 yılında ortalama yüzde 32'dir (9).

2022 referans dönemi Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verileri doğrultusunda Türkiye'de belediyeler ve köyler tarafından temin edilen yüzey ve yer altı suları toplamı 7.07 milyar metreküp olup imalat sanayi, termik santral ve maden işletmeleri tarafından, deniz suları hariç temin edilen yüzey ve yer altı suyu toplamı ise 1.24 milyar metreküptür (10). Son dönemde, organize sanayi bölgeleri ve maden işletmelerinin kullandığı su miktarı gizli bilgi sınıfına sokularak paylaşılmamaya başlanmıştır. Bu tesislere ait son verinin olduğu yıl olan 2018'de organize sanayi bölgeleri 0.18 milyar m^3/yıl ve maden işletmeleri 0.24 milyar m^3/yıl su kullanmıştır.

Tarım ve Orman Bakanlığının yayımladığı Ulusal Su Planı'nda, Su Çerçeve Direktifi'ne göre izlenmesi gereken bazı parametrelerin (hidrolojik, hidromorfolojik, hidrojeolojik, biyolojik, ekolojik, öncelikli maddeler ve belirli kirleticiler) izlenemediği ve dolayısıyla elde edilen izleme verilerinde eksiklikler olduğu, ayrıca yeterli sayıda

gözlem ve izleme istasyonu bulunmadığı tespitine yer verilmektedir (16). Suyun miktar ve kalite bilgilerinin bir veri tabanı üzerinde toplanması ve bu verilerin bir sistem üzerinden kullanıcıya ve karar vericilere servis edilerek etkin su yönetiminin tesis edilmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla Ulusal Su Bilgi Sistemi (USBS) kurulması çalışmaları devam etmektedir. Bu sistemle ulusal düzeyde yer altı ve yer üstü su kaynakları ile ilgili verilerin tarihsel ve mekânsal analizinin yapılması, verilerin etkin yönetimi ve paylaşımı mümkün olabilecektir (17).

Sularda gerçek zamanlı izleme: Sularda kirletici maddelerin tespitinin yapılabilmesi için, bu maddelerin varlığını temsil edebilecek parametrelerin sürekli takip edilmesi gereklidir. Sularda kirliliği gerçek zamanlı olarak tespit etmek, sürekli analiz yapılarak suların kontrol altında olması ve herhangi bir olumsuz durumda hızlıca su yönetim politikalarının ortaya konarak önlemlerin alınması için kullanılmaktadır.

Gerçek zamanlı izlemenin birçok avantajı vardır: kirliliğin hızlı bir şekilde yerinde tespit edilmesi, alarm sistemi sayesinde ani deşarjların önüne geçilmesi, istenilen her saat diliminde gerçek zamanlı verilere kolayca ulaşılabilmesi, çok fazla sayıda istasyonun aynı anda tek bir merkezden izlenebilmesi, geçmiş verilere kısa sürede ulaşılabilmesi, elde edilen tüm verilerdeki değişimlerin istenilen zaman aralığı için kolayca anlamlı tablo ve grafiklere dönüştürülebilmesi, ölçümün hep aynı cihaz ve yöntemlerle yapılmasından dolayı klasik izlemede numune alımından analizlerin yapılmasına kadar olan süredeki insan etkisinin ortadan kaldırılması, acil durumlarda müdahale edilebilmesi vb.

Nehir havzalarında ekolojik su kalitesi izlemeleri için, AB normlarında izleme programları hazırlanmış ve izlemelere başlanmıştır. Türkiye, hidrolojik özellikleri doğrultusunda 25 havzaya ayrılmıştır. Bu 25 havzada insani faaliyetlerden etkilenmemiş veya doğala yakın referans alanlar tespit edilerek, bu alanlarda izlenecek parametreleri ve izleme sıklıklarını içeren Referans İzleme Ağı ve Referans İzleme Programları oluşturulmuştur (10).

ÇŞİDB tarafından yürütülen Evsel ve Endüstriyel Kirlilik İzleme Programı (EKİP) ile Ergene, Küçük Menderes, Gediz, Kuzey Ege, Sakarya ve Susurluk Havzalarında 2014 yılından bu yana düzenli izleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir (10). EKİP ile toplam 12 noktadan izleme çalışması yapılmaktadır.

Söz konusu nehir ve havzalarda su kalitesi sorununa neden olan faktörler; doğrudan evsel atık su deşarjları, düzensiz katı atık depolama tesislerinden kaynaklanan kirlilik, sanayi kaynaklı atık suların yetersiz arıtılması, kontrolsüz pestisit ve gübre kullanımı, madencilik faaliyetleri, jeotermal faaliyetlere bağlı kirlilik ve zeytincilik işletmeleri kaynaklı sızıntı sulardır (18).

Gerçek zamanlı izleme sistemleri dünyada uzun süreden beri kullanılmakta olup Türkiye'de ilk olarak 2009 yılında, 10.000 m^3 üzerinde atık su deşarjı olan endüstriyel tesislerin atıksu arıtma tesisleri çıkışlarına kurulmaya başlanmıştır (19).

SİM üzerinden, 480'den fazla atık su arıtma tesisi sürekli atık su izleme sistemi istasyonları ile izlenmektedir. Toplam 154 tesisten 132 tanesinde arıtma sonrası deşarjlar gerçek zamanlı olarak izlenmektedir. Böylece yüzeysel suların kalite açısından mevcut durumu ortaya konulmakta, ayrıca ani deşarjların tespiti yapılmaktadır. Tesis çıkışlarının kontrol ve denetimi, ÇŞİDB tarafından gerçekleştirilmektedir (10).

Suların insan sağlığına etkileri Sağlık Bakanlığı bünyesinde Bulaşıcı Hastalıklar ve Erken Uyarı Cevap Dairesi Başkanlığınca, İZCİ sistemi üzerinden izlenmektedir. Bu sistemle 81 il, ilçe ve hastanelerdeki Akut Gastroenterit Sendromik Sürveyansı (belirlenen ICD-10 kodlarına yönelik acil servis verileri) anlık olarak takip edilebilmekte, sağlık tehditlerinin erken tespitine yönelik sinyal ve analiz sonuçları dijital ortamda izlenebilmektedir (9). Özellikle su ve gıda kaynaklı ishalli hastalıkların sürveyansı açısından bu sistemin varlığı önemlidir.

Denizler: Türkiye'nin denizlerinden mevsimsel oşinografik veriler toplanmaktadır. Bunlar arasında sıcaklık, tuzluluk, iletkenlik, pH, oksijen ve klorofil-a konsantrasyonları yer almaktadır (10). Meteoroloji Genel Müdürlüğü tüm kıyıları temsil edecek nitelikte deniz suyu sıcaklığı ölçüm çalışmalarına kıyısı olan bütün denizleri kapsayacak şekilde devam etmektedir. 2023 yılı ortalama deniz suyu sıcaklıkları Akdeniz'de 22,6°C, Ege Denizi'nde 20,5°C, Marmara Denizi'nde 17,6°C ve Karadeniz'de 16,8°C olarak gerçekleşmiştir.

2014 yılından bu yana düzenli olarak sürdürülen "Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı (DEN-İZ)" ile denizlerimizde meydana gelen kirlilik izlenmektedir. Karadeniz, Marmara Denizi ve Boğazlar, Akdeniz ve Ege Denizi olmak üzere tüm denizlerimizde kıyı suları, geçiş suları ve deniz sularında toplam 425 noktada; deniz suyu, sedimanda ve biyotada; fizikokimyasal, kimyasal ve biyolojik izleme, ayrıca 9 noktada mikroplastik çalışması yapılmaktadır. İzlemeler Karadeniz, Akdeniz ve Ege Denizi'nde, yaz ve kış olmak üzere yılda iki dönem, Marmara Denizi'nde ilkbahar, yaz ve kış olmak üzere yılda üç dönem yapılmaktadır (20).

Marmara Denizi için kurulan çevre izleme sistemleri ve takip edilen parametreler, özellikle 2021 yılında yaşanan müsilaj kirliliği sonrası yoğunlaşan ve teknolojik altyapı ile desteklenen kapsamlı bir yapıya sahiptir. Marmara Denizi'ni izleme sistemleri arasında DEN-İZ, Marmara Denizi Bütünleşik Modelleme Sistemi (MARMOD), Marmara Bölgesi Atık Su Arıtma Tesislerinin Gerçek Zamanlı İzlenmesi (MARBİN), Sürekli Atık Su İzleme Sistemleri (SAİS) sayılabilir. MARBİN ile Marmara Denizi'ne kirlilik taşıyan noktaların kontrolü için, kapasitesi 1.000 m^3/gün ve üzeri olan tüm arıtma tesisleri çevrim içi (online) olarak izlenmektedir (10).

Atık yönetimi uygulaması: Atık Yönetim Uygulaması (ATYÖN) ülkemizde oluşan atıkların kaynağından itibaren Atık İşleme Tesislerine gidene kadarki süreci çevrim içi olarak takip etmek amacıyla hazırlanan ve ÇŞİDB Entegre Çevre Bilgi Sistemi altında yer alan çevrim içi bir uygulamadır. ATYÖN; Atık Beyan Sistemi (TABS), Mobil Atık Takip Sistemi (MoTAT) ve Kütle Denge Sistemini (KDS) kapsamaktadır (10).

Radyasyon izleme sistemi: Radyasyon İzleme ve Uyarı Sistemi Ağı (RADİSA) Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından işletilmektedir. 1986 yılında kurulmaya başlanan sistem ile havadaki gama radyasyon düzeyindeki artışın algılanması hedeflenmektedir. Başlangıçta özellikle sınır bölgelerimizde radyasyon izleme istasyonları kurulmuştur. Günümüzde 81 il merkezinde, 111 ilçe merkezinde, 12 termik santralde, dört Nükleer/Radyasyon uygulaması içeren tesiste, üç sınır karakolunda ve 28 Akkuyu Nükleer Güç Santrali etrafında olmak üzere eş zamanlı olarak çalışan toplam 239 RADİSA istasyonu mevcuttur (21).

Gelecek Perspektifi

Günümüzde artan sanayi, kentleşme, ulaşım, nüfus artışı, tarım faaliyetleri, enerji kullanımı ve çevreye bırakılan atıklar insan sağlığını ve gezegendeki hayatın bağlı olduğu ekosistemi tehdit etmektedir. Sürdürülebilir bir çevre olmadan sağlıklı bir toplum ve insan yaşamı mümkün değildir. Kapitalist ekonominin sürekli büyümeye ve maliyetleri dışsallaştırmaya dayalı yaklaşımı sürdürülebilir değildir. Çevresel bozulma ve kirliliğin yerel ve küresel ölçekte insan sağlığını ve varlığını tehdit ettiği bu dönemde, çevre kaynaklı sorunların ve nedenlerinin ortaya konması, bunlara ait göstergelerin sürekli izlenmesi, sınır değer ihlallerinin erken tespiti, önleyici ve cezalandırıcı tedbirlerler alınması ulusal ve uluslararası alanda halk sağlığının korunması ve sürdürülebilir bir dünya açısından zorunludur. Bu alandaki gelişmelerin takibi de önemlidir. Yeni bilimsel araştırmalar ve ölçme-değerlendirme sistemlerindeki gelişmeler, kirleticilerin sağlık ve çevre etkilerinin daha iyi anlaşılmasına ve mevcut sınır değerlerin aşağıya çekilmesine neden olmaktadır. Çevresel etkilenim bağlamında olumsuz sağlık etkisinin görülmediği kesin bir eşik değerin belirlenmesi zordur.

Hava kalitesinin iyileştirilmesi için kirletici parametrelere dair ulusal sınır değerler gözden geçirilmeli ve Düya Sağlık Örgütünün (DSÖ) önerdiği ara ve nihai hedefler doğrultusunda yeniden belirlenmelidir. PM2.5 solunması hâlinde, alveollerden kana karışır ve vücuda yayılır. İnsan sağlığı için büyük bir tehlike oluşturan PM2.5 için ulusal sınır değer belirlenmeli ve yürürlüğe konmalıdır. Ayrıca hava kalitesi izleme istasyonlarının sayısının ve ölçümlerin niteliğinin artırılması, izleme kapsamındaki alanın genişletilmesi, hava kalitesinde gelecekteki gelişmelere dair öngörülerde bulunulması, izlem verilerinin modellenmesi yoluyla sağlık ve çevreye etkilerin değerlendirilmesi, enerji, sanayi ve ulaşım başta olmak üzere emisyonların kaynakta azaltılması, kömürden çıkışın ve temiz enerjiye geçişin hızlandırılması öncelikli hedefler arasında yer almalıdır.

İklim değişikliğine yönelik olarak, Türkiye, Net Sıfır Emisyon'a 2053 yılında ulaşmayı hedeflemektedir. Öte yandan, 2015 yılında sunulan beyandaki referans senaryoya kıyasla, 2030 yılına kadar Türkiye'nin sera gazı emisyonunu yüzde 41 azaltacağı açıklanmıştır (9). Fosil yakıt kullanımının ve buna bağlı emisyonların düşürülmesinin hava kirliliğiyle ilişkili önlenebilir hastalık ve ölümleri azalttığı hatırlandığında, Net Sıfır Emisyon hedefinin öncelikli yararının ekonomiye değil, insan sağlığına olduğu görülecektir.

Kentlerin iklim değişikliklerine karşı uyum kapasitelerinin ve dirençliliğinin artırılması için çevre sağlığı izleme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik stratejik hedefler belirlenmelidir. Bunlar arasında, kent iklimi izleme istasyonları kurulması, drenaj sistemlerinin yeniden yapılandırılması ve akıllı sistemlerin (sensörler vasıtasıyla izleme yapan) kullanılması yer almaktadır.

Ticari olarak üretilen binlerce kimyasal, kullanım sonrası atık olarak veya kazalarla çevreye karışmaktadır. Üstelik bunların metabolizma, üreme ve bağışıklık sistemleri üzerindeki toksik etkileri tam bilinmemektedir (1). Toksik kimyasal atıkların kirliliğe yol açmaması için, üretim süreci ve emisyonların denetlenmesinin yanında sürekli çevresel izlemlerin yapılması ve çevreyi kirletenlere caydırıcı yaptırımların uygulanması gereklidir.

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ancak arz-talep dengesinin başarılı bir şekilde oluşturulması ile mümkündür. Tarım, sanayi, turizm, hizmet, madencilik, hayvancılık ve benzeri sektörlerde kullanılan yer altı ve yer üstü sularının kayıt altına alınması, izlenmesi, verimli kullanılması ve geri kazanımı önemlidir. Kullanılabilir suyun yüzde 77'sinin kullanıldığı tarımda vahşi sulamaya son verilerek kapalı sistem sulamaya geçilmeli, ürün deseni daha az su gerektiren ürünlere doğru değiştirilmelidir. Su kaynaklarının miktar ve kalitesi ile sektörel su ihtiyaçları ve tüketimlerinin doğru biçimde belirlenmesi için Su Kaynakları Gözlem Ağının yaygınlaştırılması ve bilgi yönetimi sisteminin güçlendirilmesi gerekmektedir. Yer altı ve yer üstü su kalitesi ve emisyon/deşarj izlemlerinin sürekli iyileştirilmesi önemlidir.

"İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik"e göre Büyükşehir Belediyelerinde su kayıp oranının 2023 yılına kadar en fazla yüzde 30, 2028 yılına kadar ise en fazla yüzde 25 düzeyine; ilçe belediyelerinde ise 2023 yılına kadar en fazla yüzde 35, 2028 yılına kadar en fazla yüzde 30, 2033 yılına kadar ise en fazla yüzde 25 düzeyine indirilmesine yönelik çalışmalara başlanılması hedeflenmekle birlikte, bu hedefler yetersiz olup susuzluğun tüm yurtta artık aleni bir tehdit olduğunun anlaşıldığı günümüzde, tüm belediyelerce su kayıp-kaçaklarını yüzde 10'lar düzeyine indirecek şebeke izleme sistemleri kurulmalıdır. Yağmur Suyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik ile Planlı Alanlar İmar Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik'e göre 2.000 m²'den büyük parsellerde yapılacak yapılarda yağmur suyu toplama sistemlerinin kurulması; gri su kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmektedir (9).

Kentsel ve endüstriyel atık su arıtma tesislerinin verimli işletilmesi sağlanmalı, online izleme sistemleri yaygınlaştırılmalı ve denetim faaliyetleri etkinleştirilmelidir (16). Tüm kentsel ve endüstriyel atık suların çevreye zarar vermeyecek şekilde arıtılarak ortama verilmesi veya tekrar kullanımı sağlanmalıdır.

1950'li yıllardan beri kullanılan ve çevrede bozunmadan yıllarca kaldıkları için sonsuz kimyasallar adı da verilen per- ve polifluoroalkil maddelerin (PFAS) içme suyu ve gıdalarla vücuda girerek insan sağlığını tehdit ettiği anlaşıldığından üretimlerine birçok ülkede sınır getirilmiş, çevresel izlemlere başlanmıştır. Avrupa Birliği'nde içme suyundaki PFAS düzeyleriyle ilgili getirilen sınır sonrasında, Ocak 2026'dan itibaren üye ülkelerin içme sularında PFAS konsantrasyonlarını izlemeleri zorunlu kılınmıştır (22). Türkiye'de de AB İçme Suyu Direktifi ile uyumlu olarak, içme sularında PFAS toplamı için limit değerlerin uygulanması ve sistematik izlemenin başlaması beklenmektedir.

İklim değişikliklerine uyum stratejisi ve eylem planında arıtılmış atık su miktarının artırılması, arıtılmış atıksuların yeniden kullanım oranının 2030 yılına kadar yüzde 15 seviyesine çıkarılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, il düzeyinde atık suların izlenmesi için Sürekli Atık Su İzleme Sistemleri ile kurulu kapasitesi 5.000 m³/gün ve üzerinde olan atık su arıtma tesisleri çıkış sularını izleme çalışmalarının güçlendirilmesi gerekmektedir (9).

Dijital teknolojilerin gelişmesi çevre izleme sistemlerinin yaygınlaşmasına, daha etkili ve hızlı karar alınmasına yardımcı olmaktadır. Dijital dönüşüm ile çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanmakta, kaynakların daha etkin kullanılması mümkün olabilmektedir. Örneğin insan müdahalesi olmadan birbiriyle iletişim

kurabilen sensörler çok çeşitli veriler temin etmekte ve çevre kirliliğinin önüne geçecek önlemler alınmasını kolaylaştırmaktadır. Dijital teknolojilerin benimsendiği akıllı kentlerden İsveç'in Stockholm kenti belediyesi "Akıllı Su Yönetimi" sistemi aracılığıyla, özel sektör kuruluşları ve diğer kamu kurumlarıyla iş birliği içerisinde, kentteki su kalitesini sürekli olarak izlemektedir. Bu çerçevede su kalitesi ve tüketim düzeyine ilişkin veriler, bulut bilişim altyapısı kullanılarak dijital ortamda depolanmakta ve analiz edilmektedir.

İspanya'nın Barselona kentinde, akıllı su yönetimi uygulaması ile, kamusal arazilerdeki sensörler aracılığıyla su tüketiminin azaltılması sağlanmış ve böylelikle de su ve maliyetten tasarruf edilmiştir. Japonya'nın Tokyo kentinde de su yönetiminde etkinliğin ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile kurulan sensörler sürekli olarak ölçümler yapmakta, verileri merkeze iletmekte ve merkezde de bu veriler anlık olarak takip edilmektedir. Bu uygulama ile kentteki su akışı takip edilerek, kayıp, kaçak, sızıntı gibi durumların yanı sıra, su yönetiminde insan sağlığı açısından gerekli olan parametrelerin de takip edilebilmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Danimarka'nın Kopenhag kentinde ise akıllı kent uygulamaları ile, karbondioksit emisyonları 180 bin ton düşürülmüş, su tüketimi 5.5 milyon metreküplük bir azalma göstermiş ve 1.7 milyon litre yakıt tasarrufu sağlanmıştır (23). Türkiye'de de dijital sistemlerin ve akıllı sensörlerin yaygın kullanımıyla daha fazla çevresel parametrenin sürekli takibi, daha çabuk ve kapsamlı analizi ve ihlal durumlarında da daha erken müdahale edilebilmesi mümkün olabilecektir.

Türkiye'de afet riski azaltma amaçlı hızlı ve yavaş gelişen olaylar için uyarı sistemleri de dâhil olmak üzere, toplumun tüm kesimlerine ulaşmayı amaçlayan, öngörü ve müdahale eylemlerini içeren Çoklu Tehlike Erken Uyarı Sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir (9). Hava, su, orman varlığı, biyoçeşitlilik, gürültü ve atıklar gibi çeşitli alanlardaki spesifik izleme sistemlerinin entegrasyonu çevresel izlemenin etkinliğini artıracak ve birikimli kirliliğin etkilerinin dikkate alınmasına yardımcı olacaktır.

Mersin Akkuyu'da inşası devam eden Akkuyu Nükleer Santrali ve Sinop'ta yapılması planlanan nükleer santraller Türkiye'de iyonlaştırıcı radyasyon kaynaklı riskleri artırmaktadır. Komşu ülkelerdeki santrallerin yarattığı sağlık tehlikelerine ek olarak, ülkemizde nükleer santrallerin devreye alınmasıyla birlikte çevresel izleme ve bağımsız denetim süreçlerinin güçlendirilmesi daha da önem kazanmaktadır.

Son olarak, çevresel bilgiye ulaşabilmek için bilgi edinme hakkının etkin biçimde kullanılabilmesi sağlanmalıdır. Anayasa ve uluslararası sözleşmeler tarafından garanti altına alınmış bilgi edinme hakkı çerçevesinde çevresel bilgiye erişim taleplerini engelleyen keyfi idari uygulamalar kaldırılmalı, hukuki kararlar uygulamaya geçirilmelidir (14).

Kaynaklar

1) Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, Bathan G, Bose-O'Reilly S, Brauer M, vd. Pollution and health: a progress update. Lancet Planet Health. 2022;6(6):e535-47.

2) Block S, Emerson JW, Sherbinin A de, Wendling ZA. 2024 Environmental Performance Index : Policymakers' summary. Yale Cent Environ Law Policy [Internet]. 2024. https://epi.yale.edu/downloads (Erişim Tarihi: 13.01.2026).

3) US EPA. Environmental Monitoring [Internet]. 2020. https://www.epa.gov/power-sector/environmental-monitoring (Erişim Tarihi: 08.01.2026).

4) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Çevre Kirliliği İzleme Sistemi Uygulaması- Akıllı Şehirler Uygulama Rehberlik Kılavuzu [İnternet]. 2024. https://akillisehirler.csb.gov.tr/wp-content/uploads/fizibilite-rapor/58-%C3%87evre%20Kirlili%C4%9Fi%20%C4%B0zleme%20Sistemi.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

5) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Çevresel Kirlilik İzleme Rehberi [İnternet]. 2007. https://webdosya.csb.gov.tr/dosyalar/images/file/izleme-rehberi.pdf.

6) Australian Centre for Disease Control. enHealth guidance – Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards [Internet]. Australian Centre for Disease Control; 2012. https://www.cdc.gov.au/resources/publications/enhealth-guidance-guidelines-assessing-human-health-risks-environmental-hazards (Erişim Tarihi: 08.01.2026).

7) Gupta M, Srinivasan P, Aedla P, Yadav S, Singh R, Darjee D. Geographic Information Systems (GIS) and Public Health: Applications in Disease Surveillance and Management. J Appl Bioanal. 2025;02:206-18.

8) Wani AK, Rahayu F, Ben Amor I, Quadir M, Murianingrum M, Parnidi P, vd. Environmental resilience through artificial intelligence: innovations in monitoring and management. Environ Sci Pollut Res. 2024;31(12):18379-18395.

9) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı 2024-2030 [İnternet]. 2024. https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan_%202024-2030.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

10) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 7. Türkiye Çevre Durum Raporu [İnternet]. 2025. https://ced.csb.gov.tr/haberler/7.-turkiye-cevre-durum-raporu-yayimlandi-298088 (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

11) UNECE. Guidelines for Developing National Strategies to Use Air and Water Quality Monitoring as Environmental Policy Tools [İnternet]. 2012. https://unece.org/environment-policy/publications/guidelines-developing-national-strategies-use-air-and-water-quality (Erişim Tarihi: 22.01.2026).

12) Marmara Belediyeler Birliği. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Kapsamında Hava Kalitesi ve Belediyelerin Sorumlulukları [İnternet]. 2020. https://www.marmara.gov.tr/UserFiles/Attachments/2020/05/05/6ffd20d8-ee1c-45c8-aeba-dc14e1317c1b.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

13) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik [İnternet]. 2014. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19678&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5 (Erişim Tarihi: 02.01.2026).

14) Temiz Hava Hakkı Platformu. Kara Rapor 2024 Hava kirliliği ve sağlık etkileri [İnternet]. 2024. https://temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2024/12/Kara-Rapor-2024_final.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

15) İstanbul Büyük Şehir Belediyesi. Hava Kalitesi İzleme Merkezi - Çevre Koruma ve Kontrol Dairesi Başkanlığı Web Sitesi [İnternet]. 2024. https://cevre.ibb.istanbul/hava-kalitesi/hava-kalitesi-izleme-merkezi/ (Erişim Tarihi: 29.12.2025).

16) T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. Ulusal Su Planı (2019-2023) [İnternet]. 2019. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/NHYP%20DEN%C4%B0Z/ULUSAL%20SU%20PLANI.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

17) T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. Ulusal su bilgi sistemi (USBS) veri entegrasyonu toplantısı bakanlığımız ilgili genel müdürlükleri ile gerçekleştirildi [İnternet]. 2023. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Haber/1178/Ulusal-Su-Bilgi-Sistemi-_usbs_-Veri-Entegrasyonu-Toplantisi-Bakanligimiz-Ilgili-Genel-Mudurlukleri-Ile-Gerceklestirildi (Erişim Tarihi: 06.01.2026).

18) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İzmir Milletvekili Sayın Tuncay Özkan'ın TBMM 7/39471 Esas Sayılı Yazılı Soru Önergesine Ait Sorular ve Cevabı [İnternet]. 2021. https://cdn.tbmm.gov.tr/KKBSPublicFile/D27/Y4/T7/WebOnergeMetni/1093dad5-e4e4-4875-aa48-8e3666cdaaf4.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

19) Şükran Deniz. Gerçek zamanlı izleme sistemleri: Meriç-Ergene örnek çalışması [İnternet]. 2014. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/TEZLER/%C5%9E%C3%BCkran_DEN%C4%B0Z_Uzmanl%C4%B1k_Tezi.sflb.pdf (Erişim Tarihi: 14.05.2026).

20) T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. SİM (Sürekli İzleme Merkezi) [İnternet]. https://sim.csb.gov.tr/ (Erişim Tarihi: 08.01.2026).

21) Nükleer Düzenleme Kurumu. Radyasyon İzleme ve Uyarı Sistemi Ağı (RADİSA) [İnternet]. https://www.ndk.gov.tr/radyasyon-izleme-ve-uyari-sistemi-agi-radisa (Erişim Tarihi: 09.01.2026).

22) European Commission. PFAS pollution, What are the threats from PFAS "forever chemicals", and how will the EU tackle them? [Internet]. https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/pfas-pollution_en (Erişim Tarihi: 12.05.2026).

23) Kayan A, Mardinli İ. Dijital Dönüşüm Sürecinde Akıllı Kent Uygulamalarının Çevresel Sürdürülebilirliğe Etkisi. J Polit Adm Local Stud. 2025;8(2):79-93.

Su ve atık sulardan PFAS gideriminde güncel yaklaşımlar

Dr. Öykü Mutlu Salmanlı

2012 yılında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2023 yılında İstanbul Teknik Üniversitesinde doktorasını tamamladı. Doktora çalışmaları kapsamında TÜBİTAK bursuyla Duke University'de araştırmalar yürüttü. 2015 yılından itibaren MEMTEK'te araştırmacı, 2024 yılından itibaren ise İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üye. olarak görev almaktadır.

Doç. Dr. Kübra Ulucan Altuntaş

2007 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2018 yılında aynı üniversitede doktorasını tamamladı. Yüksek lisans, doktora ve doktora sonrası çalışmalarını İtalya ve Almanya'da sürdürdü. TÜBİTAK ve Marie Skłodowska-Curie bursları başta olmak üzere çeşitli ulusal ve uluslararası burs ve ödüllere layık görüldü. 2022 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde doçent olarak çalışmaktadır.

Dr. Ayşegül Derya Altınay

2010 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Bölümünden mezun oldu. Yüksek lisansını Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde, doktorasını ise 2023 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Programı'nda tamamladı. Yüksek lisans çalışmaları sırasında Almanya'daki TU Braunschweig'da araştırmalar yürüttü. 2015 yılından itibaren MEMTEK UYG-AR Merkezinde araştırmacı, 2019 yılından itibaren ise İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır.

Tuğçe Akça

2021 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve 2024 yılında aynı üniversitede yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans çalışmalarını MEMTEK bünyesinde yürüttü ve çeşitli araştırma projelerinde görev aldı. 2022 yılında İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Hâlen çevre mühendisliği alanındaki doktora çalışmalarını sürdürmektedir.

Prof. Dr. İsmail Koyuncu

2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde profesör ünvanını aldı. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü ve İTÜ Rektörlüğü dâhil çeşitli idari görevlerde bulundu. 2019 yılından itibaren Michigan State University'de misafir profesör olarak çalışmalarını yürütmektedir. Araştırmalarını membran prosesleri, su ve atık su arıtımı, konsantre yönetimi ve kaynak geri kazanımı alanlarında sürdürmektedir.

Dünya genelinde, gelişmiş izleme yöntemleriyle tespit sınırlarının düşmesi, regülasyonların sıkılaşması ve kamuoyu duyarlılığının artması, belediye ve endüstri ölçekli arıtım yatırımlarını hızlandırmaktadır. Bugün, yüzbinlerce nüfusa hizmet veren içme suyu tesislerinden farmasötik, metal kaplama ve tekstil sektörlerindeki endüstriyel deşarj hatlarına kadar geniş bir alanda, PFAS giderimi için çok kademeli arıtım hatları devreye alınmaktadır (Beak vd., 2026; Ćurić vd., 2025; "Directive - EU - 2024/3019 - EN - EUR-Lex", 2026; "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) | US EPA", 2026; Vershinin vd., 2026).

PFAS bileşikleri, karbon-flor bağının olağanüstü kararlılığı nedeniyle çevrede kalıcı, hidrofobik ve lipofilik özellikler gösterir. Bu güçlü bağ enerjisi (yaklaşık 485 kJ/mol) PFAS'ların biyolojik, kimyasal ve termal bozunmaya dirençli olmasına yol açar. Bu nedenle arıtım süreçleri, çoğunlukla fiziksel ayırma (adsorpsiyon, membran filtrasyonu) veya kimyasal

dönüşüm (oksidasyon, indirgeme, plazma yıkımı) ilkelerine dayanır. PFAS gideriminde hedef yalnızca uzaklaştırma değil; aynı zamanda mineralizasyon, yani organoflor bileşiğin CO_2 ve diğer inert son ürünlere parçalanmasıdır. Ancak bu süreçlerin verimliliği; PFAS türünün zincir uzunluğuna, fonksiyonel gruplarına, pH, iyonik güç ve çözünmüş organik karbon gibi matris etkilerine duyarlıdır. Bu nedenle PFAS arıtımı, termodinamik kararlılıkla kinetik erişilebilirlik arasındaki hassas dengeyi çözümlemeye dayanan çok disiplinli bir yaklaşıma ihtiyaç duyar. Bu bilimsel çerçevede, laboratuvar ölçekli araştırmalar farklı PFAS türlerinin kimyasal stabilitesini, adsorpsiyon eğilimlerini, oksidatif parçalanma davranışlarını ve yan ürün üretim mekanizmalarını aydınlatmayı amaçlamıştır. Bu bağlamda PFAS gideriminde uygulanan fiziksel, kimyasal prosesler ve bu prosesler esnasında ortaya çıkan yan akımlardan PFAS'ların giderimi, bu bileşikler ile ilgili gelecek perspektifi de ele alınarak incelenmiştir.

PFAS Arıtımında Fiziksel Giderim Teknolojileri

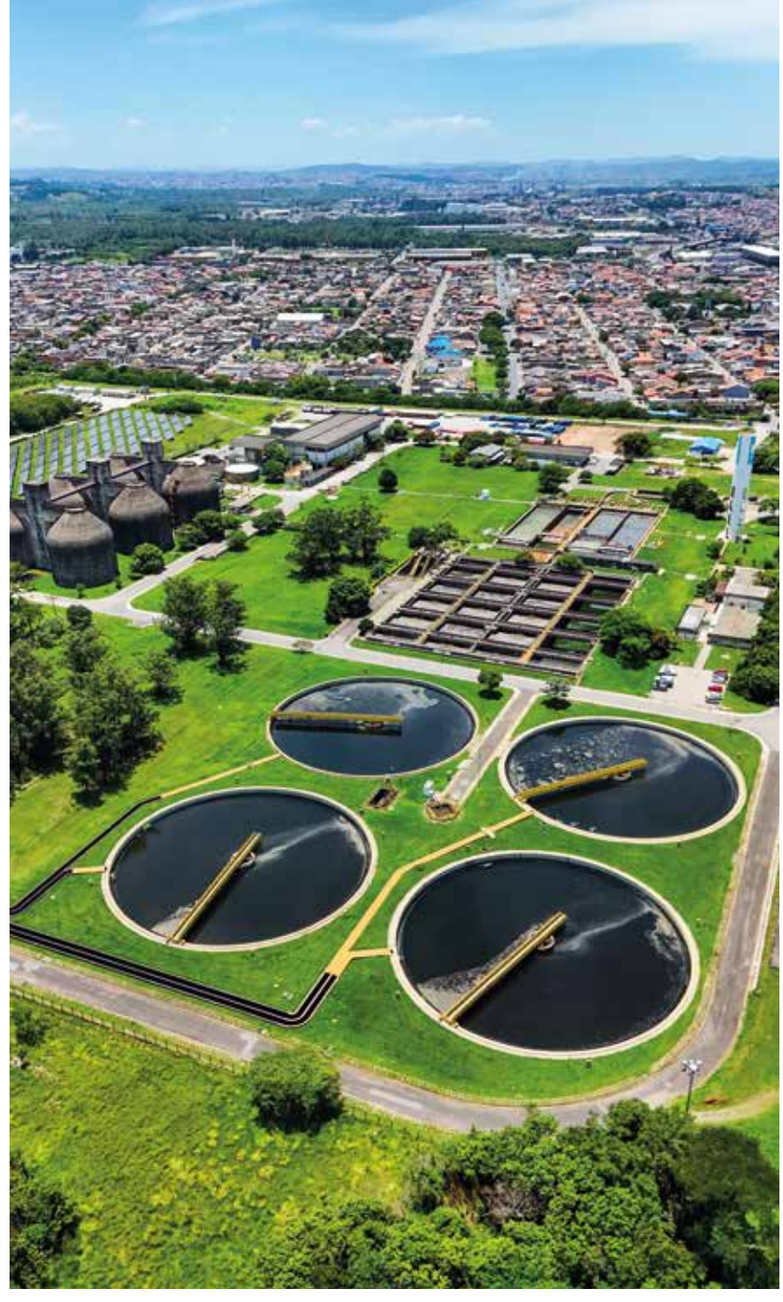
Adsorpsiyon ve İyon Değiştirme (IX): Ülkemizde PFAS kirliliği üzerine son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, durumun ciddiyetini ortaya koymaktadır. 2017–2018 yıllarında 33 ildeki musluk sularından alınan 94 örneğin analizi, toplam PFAS düzeyinin 0,08 – 11,27 ng/L aralığında olduğunu göstermiştir (Eren ve Application, 2019). Hâlihazırda yürürlükte, PFAS için özel bir içme suyu standardı bulunmamakta; ancak 2023 yılında Avrupa Birliğinin yeni içme suyu direktifine uyum süreci kapsamında mevzuat geliştirmeye başlayarak kısıtlama getirmesi beklenmektedir (Yurtsever, 2025). İSKİ gibi büyük su idareleri, bazı tesislerinde yıllardır aktif karbon filtrasyonu prosesi uygulamaktadır ancak bu proses daha çok genel organik madde ve tat/koku giderimine yöneliktir. PFAS özelinde arıtım teknolojilerinin kurulumu ise Türkiye'de henüz pilot ve laboratuvar ölçekli araştırmalar düzeyindedir.

Fiziksel mekanizmalara sahip kum filtreleri gibi geleneksel su arıtma teknikleri PFAS'ları gideremediğinden, ileri arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, granüler aktif karbon (GAC) adsorpsiyonu ve iyon değiştirici reçine (ion exchange, IX) sistemleri, su kaynaklarındaki PFAS kirliliğini gidermede en yaygın ve kanıtlanmış yöntemler olarak öne çıkmaktadır. GAC, yüksek gözeneklilik ve geniş yüzey alanına sahip karbon partikül-

Ülkemizde PFAS kirliliği üzerine son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, durumun ciddiyetini ortaya koymaktadır. 2017-2018 yıllarında 33 ildeki musluk sularından alınan 94 örneğin analizi, toplam PFAS düzeyinin 0,08 – 11,27 ng/L aralığında olduğunu göstermiştir. Hâlihazırda yürürlükte, PFAS için özel bir içme suyu standardı bulunmamakta; ancak 2023 yılında Avrupa Birliğinin yeni içme suyu direktifine uyum süreci kapsamında mevzuat geliştirmeye başlayarak kısıtlama getirmesi beklenmektedir.

leri sayesinde su içindeki PFAS gibi organik kirleticileri yüzeylerinde tutarak adsorbe eder. PFAS molekülleri de GAC yüzeyine fiziksel-kimyasal etkileşimlerle bağlanarak sudan uzaklaştırılır. Uygun tasarım ve işletme koşullarında GAC, PFOA ve PFAS gibi uzun zincirli PFAS bileşiklerini etkili bir şekilde tutabilirken, zincir uzunluğu kısaldıkça adsorpsiyon verimi ciddi ölçüde düşer. Kısa zincirli PFBS veya PFBA gibi bileşikler GAC tarafından zayıf tutulur ve filtreyi çok daha hızlı geçebilir (Y. Zhang vd., 2025). Örneğin İtalya'nın Veneto bölgesinde PFAS ile kirlenmiş yer altı suyunu arıtan ve 100.000 kişiye hizmet veren tam ölçekli bir içme suyu tesisinde 5 yıllık GAC verimi incelendiğinde, kısa zincirli PFBA'nın en önce filtreden geçmeye başladığı, onu sırasıyla PFBS ve PFOA'nın takip ettiği görülmüştür. Bu tesiste aktif karbonun PFAS tutma kapasitesi, PFBA için ton başına yalnızca 1,7 gram iken, PFOA için ton başına 24,6 grama ulaşmıştır. Tüm PFAS türlerinin toplam yükü yaklaşık 40 g/ton karbon olarak ölçülmüştür (Bertanza vd., 2020). GAC performansını etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar, karbonun ham maddesi ve gözenek yapısı, tane büyüklüğü, yatak derinliği, suyun sıcaklığı, boş yatak temas süresi, sudaki çözünmüş organik madde ve kirleticilerin varlığı bunların başında gelir (Yuan vd., 2022). GAC filtreleri doygunluğa ulaştığında granül karbon yenisiyle değiştirilir. Kullanılan doymuş karbon ise genellikle yüksek sıcaklıkta rejenere edilir veya tehlikeli atık olarak bertarafa gönderilir. Bu noktada önemli bir sorun, PFAS tarafından doyurulmuş aktif karbonun güvenli ve sürdürülebilir bertarafıdır. Çünkü tehlikeli atık olarak değerlendirilebilecek PFAS içerikli medyaların yakma işlemleri ekonomik ve çevresel açıdan zorlayıcıdır (Sonmez Baghirzade vd., 2021). Son yıllarda daha düşük maliyetli biyokömür (biochar) adsorbentler laboratuvar ölçekli de olsa, GAC'ye alternatif olarak sunulmaktadır (D. Zhang vd., 2021). Bu malzemelerin geliştirilmesi gelecek için umut verici bir yaklaşımdır.

PFAS gideriminde GAC'ye kıyasla bir diğer güçlü seçenek, anyon değiştirici reçine (ion exchange, IX) teknolojisidir. İyon değişimi sürecinde, sudaki hedef kirletici iyonlar katı fazdaki zıt yüklü yüzeylere kimyasal olarak bağlanarak sudan uzaklaştırılır. PFAS bileşikleri genellikle anyonik yani eksi yüklü formda oldukları için, artı yüklü anyon değiştirici



reçine tanecikleri PFAS moleküllerini bir mıknatıs gibi çekerek bünyelerine hapseder (Al-Maqtari vd., 2025). IX prosesi, çoğu zaman GAC'den daha geniş bir PFAS yelpazesini ve özellikle daha kısa zincirli türevleri yüksek verimle sudan uzaklaştırabilir. Nitekim bazı çalışmalarda GAC'nin ancak yüzde 30–40 oranında tutabildiği kısa zincirli PFBA, PFBS gibi bileşiklerin uygun anyon reçinelerle yüzde 90-100 verime kadar giderilebildiği gösterilmiştir (Fang vd., 2021). Genel olarak, eş şartlar altında IX reçineler adsorpsiyon kapasitesi ve servis süresi bakımından GAC'yi geride bırakmaktadır. Örneğin pilot ölçekli bir karşılaştırmada, IX reçineleri test edilmiş ve özellikle kuaterner amonyum gruplu anyon reçinelerinin PFOA ve PFOS gibi perflorlanmış bileşiklere yüksek afinite gösterdiği bulunmuştur. Reçineler, kısa ve uzun zincirli PFAS türlerini GAC'ye göre daha etkili şekilde gidermiştir (Woodard ve Newman, 2017). Ayrıca IX prosesiyle yapılan çalışmalarda, rejenerasyon işlemi sonrası PFAS gideriminin tekrar benzer kapasiteyle çalışarak elde edildiği söylenmektedir (Y. Liu ve Sun, 2021). Ancak rejenerasyon uygulamasında, organik çözücü ve tuzlu su karışımı kullanarak doymuş reçineler yıkanır. Yıkanan reçinelerden elde edilen yüksek konsantrasyonlu PFAS içeren atık su çözeltisi (yan akım olarak da adlandırılır) ayrı bir arıtım ve bertaraf ihtiyacı doğurmaktadır. Bunun için, reçine bertarafında en tercih edilen yöntem yakmadır. Reçine medyası doygunluğa ulaştığında yenisiyle değiştirilir. Çıkarılan PFAS yüklü reçine yüksek sıcaklıkta yakılarak imha edilir. Son dönemde araştırmacılar, reçinelerin kullanım ömrü sonunda daha düşük sıcaklıklarda parçalanabilen, yenilikçi yöntemlerin gerekliliğini belirtmiştir (Mohammadi vd., 2025). Ayrıca, reçinelerin birim maliyetinin GAC'ye 6,5 kat kadar daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle IX teknolojisinin işletme maliyeti GAC'ye kıyasla daha yüksek kalır (Murray vd., 2021).

GAC ve IX teknolojilerinin genellikle seri hâlde bütünleşik biçimde kullanılması önerilir. Amaç, GAC'nin yüksek hacimli suyu arıtabilme ve büyük PFAS moleküllerini tutmadaki faydasını, ardından IX reçinesinin daha küçük ve zor yakalanan PFAS türlerini giderme kabiliyeti ile birleştirmektir. Örneğin İsveç'in Uppsala kentindeki Kungsängsverket atık su arıtma tesisinde gerçekleştirilen uzun vadeli pilot ölçekli çalışmada, GAC ve IX teknolojilerinin birlikte kullanımı, PFAS gideriminde yüksek verimle sonuçlanmıştır. Çalışmada, GAC'nin özellikle uzun zincirli PFAS türlerinde etkili olduğu, ancak etkinliğinin belirli bir boş yatak hacmi sonrasında azaldığı, bu noktada devreye giren IX sisteminin hem kısa hem uzun zincirli PFAS'ların gideriminde performansı sürdürdüğü gösterilmiştir. Kombinasyon sisteminin, gerçek atık su koşullarında 200.000 boş yatak hacmine kadar stabil çalışabildiği rapor edilmiştir (Baresel vd., 2025).

Membran Teknolojileri

Çevrede kalıcılıkları, biyobirikim potansiyelleri ve toksisiteleri sebebi ile sonsuz kimyasallar olarak adlandırılan ve atık su arıtma tesislerinde öncelikli kirletici grubu olarak ele alınan PFAS'ı geleneksel arıtma yöntemlerinin etkin şekilde gidermekte yetersiz kalması sebebi ile membran teknolojilerinin araştırılması ve kullanılması önemli hâle gelmiştir. PFAS gideriminde ters osmoz (RO), nanofiltrasyon (NF), membran distilasyon (MD) ve elektrodiyaliz (ED) yöntemleri yüksek giderim verimliliği göstermektedir. En yaygın kullanılan basınç sürücülü membran proseslerden RO ve NF uzun zincirli PFAS bileşiklerinin gideriminde %90-99 üzerinde giderim verimine ulaşabilmektedir (Gulver vd., 2026).

NF membranları kullanılarak PFAS gideriminde birincil mekanizma, negatif yüklü membranların anyonik PFAS moleküllerini ittiği elektrostatik itmedir. Bu etki, membran yüzeyindeki konsantrasyon polarizasyonu ile geçici olarak artırılabilir ve bu da ret oranlarını artırır; ancak bu fayda zamanla membran kirlenmesine de neden olur. Ayrıca, kimyasal etkileşimler de giderim sürecine katkıda bulunur. NF membranlarının genellikle Mg^{2+} ve Ca^{2+} gibi çok değerlikli katyonları gidermede etkili olduğu bilindiğinden, özellikle bu katyonlar PFAS moleküllerini daha büyük kompleksler hâlinde bağlayarak membran tarafından reddini artırabilir ve genel arıtma verimliliğini artırabilir (Sanzana vd., 2025). Laboratuvar koşullarında, PFAS moleküllerinin giderimi için NF membranlarının kullanılması, çoğunlukla yüzde 90-95'in üzerinde ret oranlarıyla mükemmel sonuçlar göstermektedir. Ancak, gerçek hayattaki bu uyarım eksikliğinin, PFAS gideriminde NF için doğal sular veya atık sular üzerinde deneyler yapılarak gözden geçirilmesi gerekmektedir.

NF ile benzer çalışma ilkelerine dayanan RO, genellikle tuzdan arındırmada kullanılır ve daha düşük membran boyutları, tek değerlikli iyonların giderilmesini sağlar. RO sistemlerinin verimliliğini etkileyen çeşitli etkenler vardır; bunlar arasında çalışma koşulları, PFAS konsantrasyonu, pH ve membran özellikleri, iyonik güç ve organik madde sayılabilir. Basınç farkı ve sıcaklık gibi çalışma koşulları, membranların çalışma mekanizmasını doğrudan etkilediğinden ve pH'ın düşmesi gözenek boyutlarının küçülmesine ve dolayısıyla daha yüksek giderim oranlarına yol açtığından, bu parametreler dikkatlice değerlendirilmelidir. Ayrıca, besleme suyunda çeşitli iyonların bulunması, iyonların değerliğine bağlı olarak verimliliği artırabilir veya azaltabilir çünkü bunların hepsi membran ve besleme suyu arasındaki elektrostatik etkileşimlere katkıda bulunur (Jin ve ark., 2021).

Literatürdeki RO ve NF'in birlikte kullanıldığı çalışmalarda da özellikle farklı zincir uzunluğundaki PFAS bileşiklerinin gideriminde verim farklılıklarının olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin PFBA, PFBS, PFHxS, PFOA ve PFOS'un farklı RO/NF membranları kullanılarak giderimi test edildiğinde RO membranın yüzde 98,5 üzerinde verime sahip olurken, NF membran kullanımında yüzde 42-91 arası giderim verimlerine ulaşılabildiği gösterilmiştir. Bu sonuçlar PFAS zincir uzunluğu ve membran gözenek boyutunun giderim verimi üzerinde kritik olduğunu göstermektedir (Cao ve ark., 2025; Safulko ve ark., 2023).

GAC ve IXR ye göre RO ve NF membranları daha yüksek giderme verimi göstermekte, daha az sıklıkta değişim gerektirmekte, ayrıca GAC ve IXR kullanımında rejenerasyon ve geri yıkama zorunlulukları olması sebebi ile membranların uygulama kolaylığı sağladığı da söylenebilir.

Basınca dayanan NF ve RO'nun aksine, MD buhar basıncı farkı ile çalışan termal bir membran sürecidir; bu sürecin temel ilkesi, hidrofobik ve mikro gözenekli membrandan yalnızca su buharının geçmesine izin verirken, PFAS dâhil olmak üzere uçucu olmayan kirleticileri engellemektir (Patel vd., 2025). Arıtılacak su, membran yüzeyi ile doğrudan temas hâlindedir ve yalnızca membran yüzeyiyle temas eder, çok sayıda gözeneğin iç kısımlarıyla temas etmez. Hidrofobik yapısı sayesinde membran, gözeneklere su sızmasını engelleyerek gözenek açıklıklarında sıvı ve buhar arayüzlerinin ortaya çıkmasını sağlar (El-Bourawi ve ark., 2006). Literatürde PFAS giderimi için MD kullanımı ile yüzde 95'in üzerinde giderim verimlerine ulaşılmıştır (Yousefi ve ark., 2024). MD, GAC ve IXR gibi sorpsiyon teknolojilerine kıyasla sorpsiyon performansına bağlı kalmak yerine fiziksel bir ayırma sergiler. MD'nin temel kısıtı düşük akı ve membran ıslanması riskidir, bu nedenle membran yüzey değişiklikleri ve süperhidrofobik membran tasarımı çalışmaları son yıllarda önem kazanmıştır.

Membran teknolojileri PFAS bileşiklerinin atık sulardan gideriminde en etkili yöntemlerden biri hâline gelmiştir. Uzun zincirli PFAS türlerinin gideriminde RO, NF, MD ve ED gibi membran süreçleri yüksek verim göstermekte, kısa zincirli PFAS ve konsantre yönetimi gibi problemlerde ise hibrit sistemlerin entegrasyonu gibi çözümler uygulanabilmektedir.

İleri Oksidasyon Teknolojileri

PFAS arıtma teknikleri arasında fiziksel arıtma prosesleri yüksek oranda PFAS giderimi sağlamaktadır ancak meydana gelen konsantre akım ve bertaraf edilmesi gereken adsorban malzeme gibi ikincil bir kirletici kaynağına neden olurlar. İleri oksidasyon prosesleri ise güçlü C-F bağlarının kırılmasını sağlayan proseslerdir ve günümüzde en çok araştırılan teknolojiler arasında yer alırlar. İleri oksidasyon prosesleri dendiğinde elektrokimyasal bozundurma (Soriano vd., 2017; Wang vd., 2020), sonokimyasal bozundurma (Shende vd., 2019), fotokatalitik bozundurma (Gomez-ruiz vd., 2018) ve soğuk atmosferik plazma teknolojileri (Saleem vd., 2020; Stratton vd., 2017a; Ulucan-Altuntas vd., 2024) öne çıkmaktadır. Bu proseslerin büyük bir kısmında PFAS'ların mineralizasyonunda etkili başlıca oksidan türler $\bullet OH$, $SO_4^{\bullet-}$ ve hidratlanmış elektrondur. Perflorokarboksilik asitler (PFCAs) ve perfloroalkansülfonik asitler (PFSAs) için

ise ardışık CF_2 kaybı sonucu daha kısa zincirli ara ürünlerin (PFHpA, PFHxA, PFPeA, PFBA, PFPrA, TFA) ortaya çıktığı; bu bileşiklerin zaman içinde birikime eğilim gösterdiği rapor edilmiştir (Gar Alalm & Boffito, 2022).

Foto-bazlı ileri oksidasyon prosesleri (fotokataliz, fotoelektrokataliz, fotosonoliz ve psödo-fotokataliz) son yıllarda PFAS giderimi için çalışılan yaklaşımlar arasındadır. Fotokatalitik sistemlerde yarı iletken yüzeyinde oluşan e^-/h^+ çiftleri, bir yandan PFAS moleküllerinin baş grubunda dekarboksilasyon veya desülfonasyon başlatırken, diğer yandan su veya yüzey –OH gruplarından •OH üreterek zincir kısalmasına ve deflorinasyona yol açar. Metal-organik iskeletler (MOF'lar), fotokatalitik PFAS gideriminde bir sınıf ileri oksidasyon malzemesi olarak öne çıkmaktadır. MOF'lar, metal iyonlarının (veya kümelerinin) organik ligandlarla üç boyutlu bir ağ yapısı meydana getirdiği melez kristalin malzemelerdir ve olağanüstü yüksek özgül yüzey alanı ile bol miktarda adsorpsiyon bölgesine sahiptir. Bu yapı, PFAS moleküllerinin C-F zincirinin hidrofobik gözeneklere, fonksiyonel baş grubunun ise koordinatif veya elektrostatik etkileşimler yoluyla metal merkezlere ya da ligand fonksiyonlarına tutunmasına imkân verir (Najafidoust vd., 2026). MOF'larda ligand foksiyonelleştirilmesi, hem PFAS adsorpsiyonunu artırmak (hidrofobik–hidrofilik dengeyi ayarlayarak uzun zincirli PFAS'a özgü çekim sağlamak) hem de bant aralığını güneş spektrumuna daha uygun hâle getirmek için kullanılır (Yan vd., 2025). Karışık metal merkezler ise, farklı redoks çiftleri sağlayarak hem oksidatif (•OH, $SO_4^{\bullet-}$) hem de indirgen (e_aq^-) türlerin üretimini kolaylaştırır ve F– iyonlarının salımı ile deflorinasyon hızını artırır. MOF/yarı iletken heteroeklemlerinde (örneğin TiO_2, BiOX, g-C_3N_4 ile kombine yapılar) oluşan heteroeklem arayüzleri, yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesini baskılayarak fotokatalitik etkinliği ciddi ölçüde yükseltir (Kong vd., 2022).

Karbon-bazlı partiküller, karbon nanotüpler (CNT), grafen, grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit (rGO), biyokömür (biochar) ve karbon nanolifler (CNF)– hem adsorpsiyon hem de fotokatalizör destek malzemesi olarak PFAS arıtımında dikkat çekmektedir. Bu malzemeler yüksek özgül yüzey alanları, ayarlanabilir yüzey fonksiyonel grupları ve iletkenlikleri sayesinde PFAS'ı yoğunlaştırmak, fotokatalizörler üzerindeki yük taşınımını hızlandırmak ve çok fazlı sistemlerde kütle taşınımını iyileştirmek için kullanılmaktadır (Kong vd., 2022). Benzer şekilde, MOF/karbon kompozitlerinde (MOF/rGO, MOF/CNT, MOF-bazlı karbon iskeletleri) karbon fazı; elektron iletkenliği, gözeneklilik ve mekanik kararlılığı artırarak hem fotokatalitik hem de adsorptif süreçleri güçlendirmektedir (Regmi vd., 2025).

Geleneksel ileri oksidasyon prosesleri olarak geçen ozon ve hidroksil radikalleri kullanan sistemlerin (O_3, O_3/H_2O_2, UV/H_2O_2 vb.), PFAS'ların alkil zincirindeki çok güçlü C–F bağlarını kırma konusunda sınırlı kaldığı ve çoğu durumda yalnızca öncü bileşikleri (prekürsörleri) daha kısa zincirli perfloroalkil asitlere oksitleyerek toplam PFAS yükünü artırabildiği pilot ölçekli çalışmalarla gösterilmiştir (Venkatesan vd., 2022; Xu vd., 2024). Buna karşılık, soğuk atmosferik plazma ile arıtımda gaz–sıvı arayüzünde PFAS'ların hidrofobik zorlanma ile yüzeye zenginleşmesi ve plazma fazında meydana gelen metastabil Ar^{+*} türleri, yüksek enerjili elektronlar, UV fotonları ve reaktif oksijen türleri (•OH, O, O_3, H_2O_2) arasında gelişen sinerji, C–F bağlarının kırılması ve hızlı deflorinasyon için çok daha elverişli bir mikro-reaksiyon ortamı yaratmaktadır (Stratton vd., 2017b). Son yıllarda yapılan yüksek etkili çalışmalar, soğuk atmosferik plazma jetleri ve diğer non-termal plazma yapılanmalarının, hem sularda çözünmüş PFAS türleri için (Nau-Hix vd., 2021; Topolovec vd., 2024; Ulucan-Altuntas vd., 2024) hem de PFAS yüklü katı fazların (ör. çamur, adsorban) gliding-arc plazma reaktörlerinde arıtımı için (Murillo-Gelvez vd., 2025) geleneksel AOP'lere kıyasla çok daha kısa temas süresinde daha yüksek mineralizasyon verimi ve enerji verimi sağladığını ortaya koymuştur (Murillo-Gelvez vd., 2025; Topolovec vd., 2024; H. Zhang vd., 2024). Bu bulgular, özellikle Ar^{+*} gibi metastabil türlerin ve plazma kaynaklı hidratlanmış elektronların, klasik ozon ve •OH temelli ileri oksidasyon proseslerine göre PFAS mineralizasyonunu anlamlı ölçüde hızlandırdığını ve soğuk atmosferik plazmayı PFAS gideriminde yeni nesil bir "destrüksiyon teknolojisi" olarak konumlandırdığını göstermektedir (Stratton et al., 2017; Topolovec et al., 2024; Zhang et al., 2024).

> Granüler aktif karbon ve iyon değiştirici reçine sistemleri, su kaynaklarındaki PFAS kirliliğini gidermede en yaygın ve kanıtlanmış yöntemlerdir. Aktif karbon uzun zincirli PFAS bileşiklerini etkili şekilde tutarken, kısa zincirli PFAS'ların gideriminde performansı düşmektedir. İyon değiştirici reçineler ise daha geniş bir PFAS yelpazesini, özellikle kısa zincirli türleri, yüksek verimle sudan uzaklaştırabilmektedir.

İleri oksidasyon ve indirgeme prosesleri PFAS'ı çözeltiden uzaklaştırmak ve mineralize etmek için güçlü araçlar sunsa da çoğu zaman "yoğunlaştır–yok et" yaklaşımının bir parçası olarak termal proseslerle birlikte düşünülmektedir. GAC veya iyon değişim reçinelerine adsorplanmış PFAS'ın rejenerasyonu için uygulanan yüksek sıcaklıklı işlemler, PFAS'ın uçucu fluorlu türlere dönüşerek giderilmesini hedefler; ancak bu durum hem mikro gözenek yapısının bozulması, hem de baca gazı içinde ikincil PFAS veya HF oluşumu gibi riskler taşır (Lin vd., 2025; Vakili vd., 2024). Yüksek sıcaklıklı yakma, süperkritik su oksidasyonu, termal plazma destekli piroliz veya termal oksidasyon gibi termal prosesler, uygun koşullarda PFAS'ı CO_2, HF ve inorganik tuzlara kadar mineralize edebilen nihai "destrüksiyon teknolojileri" olarak önerilmektedir; ancak enerji tüketimi, malzeme korozyonu ve yan ürün kontrolü, bu teknolojilerin ölçeklenmesinde hâlen kapsamlı değerlendirme gerektiren başlıklar olarak kalmaktadır (Chiang vd., 2023; Webb vd., 2025).

Sonuç olarak, PFAS gideriminde yalnızca faz ayırma teknolojilerine dayalı çözümler yetersiz kalmakta; bu nedenle

ileri oksidasyon/indirgeme proseslerini içeren çok kademeli arıtım yaklaşımlarına yönelim kaçınılmaz görünmektedir. Membran filtrasyon ya da adsorpsiyon, seyreltik sular için ön yoğunlaştırma adımı olarak işlev görürken; foto-bazlı AOP'ler, elektrokimyasal oksidasyon, UV/sülfit ve soğuk atmosferik plazma esaslı süreçler özellikle konsantre akımların kimyasal parçalanması ve mümkün olduğunca mineralizasyonu için tamamlayıcı teknolojiler olarak öne çıkmaktadır.

Konsantre Yönetimi ve Nihai Bertaraf Stratejileri

Membran prosesler kompakt yapıları, diğer arıtma proseslerine adapte edilebilirlikleri ile bahsedildiği gibi PFAS gideriminde kullanılan teknolojilerdendir. Membran prosesler ile bir arıtım uygulandığında, membranın ayırma özelliğine göre (por boyutlarına, konsantrasyon ya da elektrik yükü vb.) giderilmek istenen maddeler membran tarafından ret edilerek membrandan geri çevrilerek, ilgili kirlilik açısından çok daha yüksek konsantrasyona sahip konsantre akımlarını meydana getirirler. Çevre ve insan sağlığı için ciddi risk teşkil etmeyen konsantre akımlarında dahi ortaya çıkardığı bu akımları alıcı ortama en az zarar oluşturacak şekilde buharlaşma, derin kuyu boşalımı gibi yöntemler belirlenerek bertaraf edilmektedir. Fakat söz konusu parçalanabilirliği düşük ve giderimi son derece zor olan PFAS'lara geldiğinde oluşan membran konsantreleri daha ciddi bir sorun hâlini almaktadır (Ali ve ark., 2024). Ortaya çıkan konsantre iyi yönetilmezse, içerdiği PFAS bileşikleri tekrar çevreye salınarak su döngüsüne girebilir; böylece insanlara ve ekosistemlere zararlı hâle gelirler. Konsantre akımına yönelik etkili arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi için öncelikle üretilen hacim, konsantre akımında meydana gelen PFAS konsantrasyonu, ham suyun özellikleri ve işletme koşulları gibi önemli etkenlerin değerlendirilmesi ve iz miktarlardaki kirleticileri tespit edebilecek güvenilir çözümleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Konsantre akımın ortaya çıkmasını PFAS gideriminde kullanılan ters osmoz (RO) prosesi üzerinden örnekleyecek olursak; gelen akımın yüzde 10-30'u aralığında değişebilen bir konsantre akımı elde edilecektir. PFAS içeren konsantrelerin arıtımında kademeli membran proses kullanımı ile konsantre hacminin azaltılması uygulanan yöntemlerdendir. Membran proseslerinden elde edilen konsantre hacmi, ek RO ve NF membran proseslerinin kesikli ya da yarı-kesikli yapılandırılmasında uygulanması ve bu sistemlerin yüksek geri kazanım için en uygun hâle getirilmesiyle konsantre akımını yüzde 3 mertebesine kadar azaltabilmektedir. Konsantre hacmi azaltma ya da seyreltme yoluyla PFAS içeren membran konsantrelerinin yönetiminde bir elektro-membran prosesi olan elektrodiyalizin RO konsantresine uygulandığı çalışmalar mevcuttur. Her ne kadar ED, direkt henüz PFAS ayrımı için uygulanmamış olsa da perfloroalkil asitler (PFAAs) gibi anyonik PFAS bileşenlerini ya da PFAS yıkım süreçlerinden kaynaklanan florür iyonlarını RO konsantresinden doğrudan ayırmak için potansiyel taşımaktadır. ED uygulaması RO konsantresindeki yüklü iyonları azaltarak, aynı PFAS konsantrasyonuna sahip fakat daha az iyon içeren bir seyreltik akım oluşturabilir ve bu seyreltik akım daha sonra RO sistemine yeniden besleme suyu olarak döndürülerek PFAS'ların daha fazla yoğunlaştırılmasına katkı sağlayabilirdir (Tow ve ark., 2021). PFAS'ların özellikleri bilindikçe uygulanabilir giderim yöntemleri de çeşitlenmektedir. Örneğin PFAS'lar yüzey aktif madde benzeri özellik göstererek su hava ara yüzeyine ilgi duyarlar. Sıvı yüzeyinde bulunan PFAS'ların yapılan çalışmalarda köpük parçalama (fraksiyonlama) tekniği ile ayrıştırıldığı görülmüştür. Örneğin PFAS yüklü düzenli depolama sahası sızıntı suyu üzerinde yapılan çalışma ile havalandırma–köpük toplama yöntemiyle yüzde 92 genel PFAS ayırma verimi elde edilmiştir (Robey et al., 2020). Dolayısıyla membran konsantrelerine havalandırma köpük toplama yöntemi uygulanabilir bir yöntemdir ancak PFAS içeren sıvılardaki hava kabarcıkları köpük hâlinde yakalanmadan serbest yüzeyde patladığında, PFAS açısından zengin bir aerosol meydana getirebilirler. Bu nedenle daha ileri bir arıtma için toplanmaları önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalarda PFAS açısından zengin akımlar için ozonlu hava kullanımı ile muamelenin, yalnızca hava kullanımına kıyasla daha yüksek PFAS giderimi ile sonuçlandığı görülmüştür. Köpük ayırma (fraksiyonlama) yöntemi ultraviyole (UV), foto degradasyon gibi yöntemler ile birleştirilerek PFOS'un hem yoğunlaştırılması hem de parçalanması da bir diğer alternatiftir. Havalandırma–köpük toplama sürecinde iyonik gücün (örneğin 5 mM NaCl) artırılmasının PFAS ayrım verimini artırdığını göstermiştir. Bu bulgu, PFAS yüklü konsantre akımlarının yüksek tuz içeriğinin, bu yönteme uygun bir ortam oluşturabileceğini göstermiştir (Tow ve ark., 2021). Membran konsantrelerinin ya da konsantre edilerek hacmi azaltılmış PFAS akımlarının bertarafında uygulanan düzenli depolama bertaraf tesisinde olabilecek sızıntı ya da taşınımlar mutlaka göz önünde bulundurularak uygulanmalıdır. Bu yöntemler PFAS'ları veya bozunma ürünlerini yeniden çevreye geri verme potansiyeline sahiptir ve bu nedenle PFAS'lar döngüsel bir problem oluşturmaya devam ederler (Stoiber ve ark., 2020). Bu bağlamda PFAS konsantrelerinin arıtımı için biyolojik arıtım, UV temelli bozundurma, fotokatalitik yöntemler ileri oksidayon prosesleri, C-F bağlarına etki eden hidrate elektronlar, plazma yöntemi ya da elektron ışını (electron beam), sonikasyon gibi PFAS'ların parçalanması temelli yöntemlerin kullanılması çok daha çözüm odaklı bir yaklaşım olacaktır. Fakat bu proseslerin yapılacak çalışmalarla araştırılması ve PFAS gideriminde karşılaşabilecek negatif ve pozitif yönlerinin aydınlatılması hâlâ önemli bir konudur. Örneğin, süperkritik su oksidasyonu (SCWO), PFAS dâhil olmak üzere organik bileşikleri başarıyla parçalayabilen bir yöntemdir. Bu nedenle, PFAS içeren konsantrelerin arıtımında kullanılan tuzlu çözeltileri ve adsorbanlar (örneğin granüler aktif karbon – GAC) gibi maddelerin bertarafı için potansiyel taşımaktadır. Fakat SCWO sürecinde oluşabilecek çökelme ve tıkanma sorunları ve membran konsantrelerinin yüksek tuzluluğu, bu yöntemin uygulanabilirliğini zorlaştıran başlıca etkenlerdir. Dolayısıyla PFAS'lı membran konsantrelerinin arıtımında uygulanacak yöntem seçimi için yapılacak fizibilite çalışmaları, giderim ve uygulanabilirlik açısından önem arz etmekte; konsantre arıtımı ve yönetimine ilişkin alternatifler, hâlen aktif bir araştırma alanı olmayı sürdürmektedir.

Küresel Gerçek Ölçekli Arıtım Uygulamaları

Gerçek ölçekli uygulamalarda granüler aktif karbon (GAC) ve anyon değiştirici reçineler (IX), özellikle uzun zincirli PFAS'ların tutulmasında birincil bariyer olarak öne çıkar. Nanofiltrasyon/ters ozmoz (NF/RO), kısa zincirli PFAS ve toplam PFAS yükünü düşürmede etkilidir ancak konsantre akımların

yönetimi kritik bir sorundur. Bu nedenle ileri oksidasyon süreçleri (UV/H_2O_2, ozon, elektrokimyasal oksidasyon) ve termal/ısıl yıkım yaklaşımları, konsantrelerin nihai bertarafı veya hacim küçültme-mineralizasyon amacıyla devreye alınmaktadır. Küresel deneyimler, tek teknolojiyle "tam uyum"un nadir olduğunu; GAC/IX + membran + konsantre yönetimi gibi entegre trenlerin sürdürülebilirliği artırdığını göstermektedir. Ayrıca çevre-sağlık odaklı risk iletişimi, düzenleyici sınırların kademeli sıkılaştırılması, saha-özgül doğrulama ve izleme-doğrulama çerçeveleri başarıyı belirler. Sonuç olarak, PFAS yönetiminde kaynakta azaltım ve endüstri-belediye-akademi iş birliği ile desteklenen, enerji ve atık ayak izi düşük, konsantreye çözüm üreten, çok kademeli arıtım stratejileri, güvenli su hedefleri için en gerçekçi yol haritasını ortaya koymaktadır.

Gelecek Perspektifi

PFAS'ın biyobirikim özellikleri, çevrede kalıcılığı ve toksik etkilerine yönelik farkındalığın her geçen gün artması; küresel ölçekte daha sıkı düzenlemelerin ve gelişen arıtma teknolojilerinin yaygınlaşma hızının artacağının göstergesidir. Dolayısı ile PFAS yönetiminin önümüzdeki 5-10 yıl içerisinde gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde önemli bir dönüşüm geçirmesi beklenmektedir. Membran teknolojileri açısından değerlendirdiğimizde yeni nesil düşük enerji gerektiren, yüksek geçirgen ve kirlenmeye karşı daha dirençli membranların tasarımı ile hem maliyeti düşüren hem de daha verimli sistemlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar hız kazanacaktır. Bununla birlikte yalnızca giderime odaklanmanın aksine konsantre akımların güvenli nihai bertarafı hususu da bir o kadar önemli ve kritik bir konudur. GAC ve IX gibi sistemler için ise daha seçici reçinelerin geliştirilmesi, yüksek PFAS tutunumu sağlayacak yeni fonksiyonel grupların geliştirilmesi ve rejenerasyon süreçlerinin kimyasal ve enerji perspektifinde optimize edilmesi konuları önem kazanacaktır. Türkiye özelinde bakıldığında PFAS limit değerlerinin belirlenmesi, artan akademik çalışmaların ivme kazanması ve ulusal PFAS envanterinin oluşturulması konularının temel adımlar olması beklenmektedir. Bu bağlamda su ve atık su arıtma tesislerimizde PFAS taramalarının yapılması, PFAS kaynaklarının karakterizasyonu ve yönetim planlarının yapılması gibi somut adımlar atılması gerekmektedir. Türkiye'de arıtma tesislerinde kullanılan RO ve NF sistemlerinin PFAS giderimi açısından avantaj sağlayabileceği durumu söz konusu olmasına karşın PFAS'a özgü proses tasarımı, konsantre yönetimi ve pilot ölçekli uygulamaların artırılması bir zorunluluktur. Dolayısı ile PFAS yönetimi yalnızca artıma teknolojileri özelinde değil; ürün tasarımı, atık yönetimi ve çevre politikalarını da kapsayan çok yönlü bir yaklaşım gerektirmektedir.

Kaynaklar

Al-Maqtari, Q. A., Mahdi, A. A., Othman, N., Noman, A. E., Alsubhi, L. M., AlAnsi, W., … Al-Gheethi, A. 2025. "Comprehensive review of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water: Physiochemical properties, sources, health impacts, regulatory limits, and future perspectives". Results in Engineering, 28(August), 107169.

Baresel, C., Andersson, J., Olofsson, L., Sundin, A. M., Malovanyy, A., Högberg, C. J., Björkman, L. 2025. "Assessing the potential of activated carbon and anion-exchange in combination to remove organic micropollutants from wastewater – Long term pilot trials at Kungsängsverket WWTP, Uppsala, Sweden". Science of the Total Environment, 964(November 2024).

Beak, S., Kim, E., Jung, T., Lee, J., Bae, J. 2026. "Pilot-scale performance of a UV-regenerable Iron-based activated carbon system for pharmaceutical and PFAS removal". Journal of Water Process Engineering, 82, 109468.

Bertanza, G., Capoferri, G. U., Carmagnani, M., Icarelli, F., Sorlini, S., Pedrazzani, R. 2020. "Long-term investigation on the removal of perfluoroalkyl substances in a full-scale drinking water treatment plant in the Veneto Region, Italy". Science of the Total Environment, 734, 139154.

Cao, J., Feng, S., Dolatabad, A. A., Zhi, Y., Deng, B., Liu, C., … Xiao, F. 2025. "PFAS removal from reverse osmosis and nanofiltration brine by granular activated carbon: Thermodynamic insights into salinity effects". Water Research, 282, 123758.

Chiang, S. Y. D., Saba, M., Leighton, M., Ballenghien, D., Hatler, D., Gal, J., Deshusses, M. A. 2023. "Supercritical water oxidation for the destruction of spent media wastes generated from PFAS treatment". Journal of Hazardous Materials, 460, 132264.

Ćurić, I., Saračević, E., Krampe, J., Dolar, D. 2025. "Removal of PFAS from real textile wastewater using a UF-RO hybrid system: Efficiency, mechanisms, and environmental implications". Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(5), 118608.

Directive - EU - 2024/3019 - EN - EUR-Lex. t.y. Geliş tarihi 23 Mart 2026, gönderen https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj/eng.

Dixit, F., Dutta, R., Barbeau, B., Berube, P., Mohseni, M. 2021. "PFAS removal by ion exchange resins: A review". Chemosphere, 272, 129777.

Ellis, A. C., Boyer, T. H., Fang, Y., Liu, C. J., Strathmann, T. J. 2023. "Life cycle assessment and life cycle cost analysis of anion exchange and granular activated carbon systems for remediation of groundwater contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)". Water Research, 243, 120324.

Eren, Z., Application, D. 2019. "Chemosphere Assessment of per fl uoroalkyl substances levels in tap and bottled water samples from Turkey", 235.

Fang, Y., Ellis, A., Choi, Y. J., Boyer, T. H., Higgins, C. P., Schaefer, C. E., Strathmann, T. J. 2021. "Removal of Per- And Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Aqueous Film-Forming Foam (AFFF) Using Ion-Exchange and Nonionic Resins". Environmental Science and Technology, 55(8), 5001-5011.

Gomez-ruiz, B., Ribao, P., Diban, N., Rivero, M. J., Ortiz, I. 2018. "Photocatalytic degradation and mineralization of perfluorooctanoic acid (PFOA) using a composite TiO 2 – rGO catalyst". Journal of Hazardous Materials, 344, 950-957.

Gulver, I., Mutlu-Salmanli, O., Koyuncu, I. 2026. "Efficient removal of per-polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water by using membrane distillation technology: a review". Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 25(1), 8.

Han, J., Choong, C. E., Jang, M., Lee, J., Hyun, S., Lee, W.-S., Kim, M. 2024. "Causative mechanisms limiting the removal efficiency of short-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by activated carbon". Chemosphere, 365, 143320.

Kong, Z., Lu, L., Zhu, C., Xu, J., Fang, Q., Liu, R., Shen, Y. 2022. "Enhanced adsorption and photocatalytic removal of PFOA from water by F-functionalized MOF with in-situ-growth TiO2: Regulation of electron density and bandgap". Separation and Purification Technology, 297, 121449.

Lin, Z., Doudrick, K., Herckes, P., Chester, M., Westerhoff, P., Boyer, T. H. 2025. "Life cycle assessment of the thermal oxidation and pyrolysis of granular activated carbon loaded with perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)". Journal of Cleaner Production, 501, 145325.

Liu, B., Chen, J., You, Y., Sun, M. 2025. "Cyclic removal and destruction of per- and polyfluoroalkyl substances from water using ion exchange, resin regeneration, and UV/sulfite reduction". Water Research, 272, 122915.

Liu, Y., Sun, M. 2021. "Ion exchange removal and resin regeneration to treat per- and polyfluoroalkyl ether acids and other emerging PFAS in drinking water". Water Research, 207(August), 117781.

Mohammadi, N., Guclu, S., Atespare, A. E., Koseoglu-Imer, D. Y., Unal, S., Dizman, B. 2025. "Sustainable ion exchange-based remediation of per- and polyfluoroalkyl substances; recent progress and future prospects". Journal of Water Process Engineering, 71(February), 107345.

Murillo-Gelvez, J., Rabinovich, A., Sales, C. M., Fridman, A., Fridman, G., McKenzie, E. R. 2025. "Treatment of PFAS-laden solids via fluidized bed gliding arc plasmatron". Journal of Hazardous Materials, 494.

Murray, C. C., Marshall, R. E., Liu, C. J., Vatankhah, H., Bellona, C. L. 2021. "PFAS treatment with granular activated carbon and ion exchange resin: Comparing chain length, empty bed contact time, and cost". Journal of Water Process Engineering, 44(September), 102342.

Najafidoust, A., Ghanbari, R., Farahbakhsh, J., Permala, R., Iglauer, S., Zargar, M. 2026. "Emerging trends in photocatalyst-based metal-organic frameworks for PFAS degradation". Coordination Chemistry Reviews, 549, 217264.

Nau-Hix, C., Multari, N., Singh, R. K., Richardson, S., Kulkarni, P., Anderson, R. H., … Thagard, S. M. 2021. "Field Demonstration of a Pilot-Scale Plasma Reactor for the Rapid Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Groundwater". ACS ES&T Water, 1(3), 680-687.

Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) | US EPA. t.y. Geliş tarihi 23 Mart 2026, gönderen https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas

Regmi, S., Sarker, M. S., Oglesby, A. K., Banning, K. N., Lanier, E. E., Xia, C., … Liu, J. 2025. "Fabrication of nZVI/rGO via an innovative thermal co-reduction method for enhanced PFAS removal through sequential adsorption and photocatalytic degradation". Journal of Hazardous Materials, 497, 139586.

Saleem, M., Biondo, O., Sretenović, G., Tomei, G., Magarotto, M., Pavarin, D., … Paradisi, C. 2020. "Comparative performance assessment of plasma reactors for the treatment of PFOA; reactor design, kinetics, mineralization and energy yield". Chemical Engineering Journal, 382, 123031.

Shende, T., Andaluri, G., Suri, R. P. S. 2019. "Kinetic model for sonolytic degradation of non-volatile surfactants: Perfluoroalkyl substances". Ultrasonics Sonochemistry, 51, 359-368.

Sonmez Baghirzade, B., Zhang, Y., Reuther, J. F., Saleh, N. B., Venkatesan, A. K., Apul, O. G. 2021. "Thermal Regeneration of Spent Granular Activated Carbon Presents an Opportunity to Break the Forever PFAS Cycle". Environmental Science and Technology, 55(9), 5608-5619.

Soriano, Á., Gorri, D., Urtiaga, A. 2017. "Efficient treatment of perfluorohexanoic acid by nanofiltration followed by electrochemical degradation of the NF concentrate". Water Research, 112, 147-156.

Stratton, G. R., Dai, F., Bellona, C. L., Holsen, T. M., Dickenson, E. R. V., Mededovic Thagard, S. 2017a. "Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater". Environmental Science and Technology, 51(3), 1643-1648.

Stratton, G. R., Dai, F., Bellona, C. L., Holsen, T. M., Dickenson, E. R. V., Mededovic Thagard, S. 2017b. "Plasma-Based Water Treatment: Efficient Transformation of Perfluoroalkyl Substances in Prepared Solutions and Contaminated Groundwater". Environmental Science and Technology, 51(3), 1643-1648.

Tisler, S., Mrkajic, N. S., Reinhardt, L. M., Jensen, C. M., Clausen, L., Thomsen, A. H., … Christensen, J. H. 2025. "A non-target evaluation of drinking water contaminants in pilot scale activated carbon and anion exchange resin treatments". Water Research, 271, 122871.

Topolovec, B., Jovanovic, O., Puac, N., Skoro, N., Lumbaque, E. C., Petrovic, M. 2024. "Plasma water treatment for PFAS: Study of degradation of perfluorinated substances and their byproducts by using cold atmospheric pressure plasma jet". Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(3), 112979.

Ulucan-Altuntas, K., Foglia, S., Saleem, M., Tomei, G., Ceriani, E., Carmagnani, M., … Paradisi, C. 2024. "Application of Response Surface Methodology for the Optimization of Operating Conditions of a Self-Pulsing Discharge (SPD) Plasma Reactor for the Degradation of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Water". Plasma Processes and Polymers, e2400155.

Vakili, M., Cagnetta, G., Deng, S., Wang, W., Gholami, Z., Gholami, F., … Blaney, L. 2024. "Regeneration of exhausted adsorbents after PFAS adsorption: A critical review". Journal of Hazardous Materials, 471, 134429.

Venkatesan, A. K., Lee, C. S., Gobler, C. J. 2022. "Hydroxyl-radical based advanced oxidation processes can increase perfluoroalkyl substances beyond drinking water standards: Results from a pilot study". Science of The Total Environment, 847, 157577.

Vershinin, P., Seemann, O., Dror, I., Berkowitz, B. 2026. "Electrochemical per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) removal from tap water: proof-of-concept and laboratory scale pilot". Environmental Technology & Innovation, 104897.

Wang, Y., Pierce, R. "david", Shi, H., Li, C., Huang, Q. 2020. "Electrochemical degradation of perfluoroalkyl acids by titanium suboxide anodes". Environmental Science: Water Research and Technology, 6(1), 144-152.

Webb, H., Rosansky, S., Al-Dirani, S. M., Dasu, K., Scheitlin, C. G., Davis, J., Chiques, L. 2025. "PFAS destruction using supercritical water oxidation (SCWO) at Peterson Space Force Base". Journal of Hazardous Materials Letters, 6, 100156.

Woodard, S., Newman, B. 2017. "Ion exchange resin for PFAS removal and pilot test comparison to GAC", 19-27.

Xu, X., Li, Y., Vo, P. H. N., Shukla, P., Ge, L., Zhao, C. X. 2024. "Electrochemical advanced oxidation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Development, challenges and perspectives". Chemical Engineering Journal, 500, 157222.

Yan, C., Zhong, Z., Wang, J., Feng, K., Xing, D. 2025. "Enhanced photocatalytic defluorination of perfluorooctanoic acid through integrated hydrogen atoms/electrons reduction and ROS oxidation with metal–organic framework heterogeneous catalysts". Chemical Engineering Journal, 513, 163058.

Yuan, J., Passeport, E., Hofmann, R. 2022. "Understanding adsorption and biodegradation in granular activated carbon for drinking water treatment: A critical review". Water Research, 210(August 2021), 118026.

Yurtsever, M. 2025. "Çevredeki Per ve Polifloroalkil Madde (PFAS) Kirliliği: Tarihçesi, Kaynakları, Analizi, Riskleri ve İlgili Düzenlemeler". Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 403-427.

Zhang, D., He, Q., Wang, M., Zhang, W., Liang, Y. 2021. "Sorption of perfluoroalkylated substances (PFASs) onto granular activated carbon and biochar". Environmental Technology (United Kingdom), 42(12), 1798-1809.

Zhang, H., Zhu, L., Zhang, Y., Héroux, P., Cai, L., Liu, Y. 2024. "Removal of per- and polyfluoroalkyl substances from water by plasma treatment: Insights into structural effects and underlying mechanisms". Water Research, 253, 121316.

Zhang, Y., Lee, C. S., Li, D., Zheng, S., Hsiao, B. S., Venkatesan, A. K. 2025. "Hydrophobic Ion Pairing as a Pretreatment to Enhance the Removal of Short-Chain Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Granular Activated Carbon". Environmental Science and Technology, 59(38), 20761-20771.

PFAS: Türkiye için stratejik bir çevre ve halk sağlığı tehdidi, AB mevzuatı ve gelecek projeksiyonu

Dr. Baran Bozoğlu

ODTÜ Çevre Mühendisliğinden 2005 yılında mezun oldu. ODTÜ Kentsel Politika Planlama ve Yerel Yönetimler alanındaki yüksek lisansının ardından Ankara Üniversitesinde İklim Değişikliği üzerine doktorasını tamamladı. ABD'de Georgetown Üniversitesinde liderlik eğitimi aldı. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığında çevre baş denetçisi ve uzman, Türk Akreditasyon Kurumunda uzman ve baş denetçi, Washington DC Belediyesinde uzman, Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresinde Genel Müdür Yardımcısı olarak çalıştı. TMMOB 41. Dönem Yönetim Kurulu Üyesi, Çevre Mühendisleri Odasında beş Dönem Genel Başkan olarak Türkiye'deki çevre sorunlarına dair bilimsel, teknik ve çözüm odaklı çalışmalar yaptı. 2018'de İklim Değişikliği Politika ve Araştırma Derneğini kuran Bozoğlu hâlen bu derneğin başkanlığını yapmaktadır.

Görünmez Bir Kirletici Olarak PFAS'ın Evrimi

Per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), 1940'larda teflon ve benzeri kaplamaların keşfiyle endüstriyel devrimini yaşamıştır. Yaklaşık 10.000'den fazla sentetik bileşiği içeren bu aile, moleküler yapısındaki karbon-flor (C-F) bağları sayesinde kimyasal ve termal bozunmaya karşı doğadaki en dirençli maddelerden biridir. Başlangıçta havacılık, otomotiv ve tekstil sektörlerinde bir "mucize bileşen" olarak görülen bu maddeler, zamanla çevresel kalıcılıkları (persistanlık) ve canlı dokularda birikme (biyobirikim) kapasiteleriyle küresel bir tehdide dönüşmüştür.

Günümüzde PFAS sadece sanayi bölgelerinde değil, Kuzey Buz Denizi'nin (Arktik Okyanusu) derinliklerinden Alp Dağları'nın kar örtüsüne kadar yerkürenin her noktasında tespit edilmektedir. Bu durum, kirleticinin sınır tanımayan doğasını ve ekosistem üzerindeki uzun vadeli baskısını ortaya koymaktadır.

Sağlık Riskleri: Biyolojik Mekanizmalar ve Uzun Vadeli Etkiler

PFAS'ın insan sağlığı üzerindeki etkileri, düşük dozlarda bile uzun süreli maruziyet sonucu ortaya çıkan kronik bozukluklardır. Bu kimyasallar vücuda girdikten sonra proteinlere bağlanarak kan dolaşımıyla organlara yayılır ve vücuttan atılmaları (yarılanma ömürleri) türüne göre üç ila 10 yıl sürebilir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), belirli PFAS türlerini (örneğin PFOA) insanlar için "kesin kanserojen" olarak sınıflandırmıştır. Özellikle böbrek ve testis hücrelerinde DNA hasarına yol açmasa bile, hücresel sinyal yollarını bozarak kontrolsüz hücre çoğalmasını (tümör oluşumunu) tetiklediği bilinmektedir.

Bununla birlikte PFAS molekülleri, doğal hormonların (özellikle östrojen ve tiroid hormonları) yapısını taklit ederek endokrin sistemin işleyişine müdahale eder. Bu "hormonal sabotaj", kadınlarda erken menopoz ve gebelik zehirlenmesi (preeklampsi) riskini artırırken; erkeklerde sperm kalitesinde ve sayısında ciddi düşüşlere yol açmaktadır. PFAS maruziyetinin bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri de dikkat çekicidir; en endişe verici bulgulardan biri, çocuklarda bağışıklık yanıtını zayıflatmasıdır. Yapılan klinik çalışmalar, yüksek PFAS birikimi olan çocuklarda rutin aşıların (tetanoz, difteri vb.) etkinliğinin azaldığını göstermiştir. Bu, toplum sağlığı genelinde enfeksiyonlara karşı savunmasız bir nesil riskini doğurmaktadır.

Avrupa Birliği Mevzuatı: REACH ve İhtiyatlılık İlkesi

Avrupa Birliği (AB), PFAS sorununa "ihtiyatlılık ilkesi" çerçevesinde, dünya tarihinin en kapsamlı kimyasal kısıtlama hamlesiyle karşılık vermektedir. Bu ilke doğrultusunda, bilimsel belirsizliklerin bulunduğu durumlarda dahi insan sağlığı ve çevrenin korunmasını önceleyen düzenleyici mekanizmalar devreye sokulmaktadır.

Bu yaklaşımın temel hukuki dayanağını oluşturan Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanmasına İlişkin Tüzük (REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) kimyasalların insan sağlığı ve çevre üzerinde oluşturabileceği risklere karşı korunmayı amaçlayan Avrupa Birliğinin temel mevzuatıdır. Bu amaç, kimyasal maddelerin içsel özelliklerinin daha iyi ve daha erken aşamada belirlenmesi ve çok yüksek derecede endişe verici maddelerin aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması veya kısıtlanması gibi önlemler alınması yoluyla gerçekleştirilmektedir. REACH ayrıca, AB kimya

endüstrisinde yenilikçiliğin ve rekabet gücünün artırılmasını hedeflemektedir.

REACH, kimyasallardan kaynaklanan risklerin yönetilmesi ve maddelere ilişkin güvenlik bilgilerinin sağlanması sorumluluğunu sanayiye yüklemektedir. Bu kapsamda, üreticiler ve ithalatçılar kimyasal maddelerinin özelliklerine ilişkin bilgileri toplamak ve bu bilgileri Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA - European Chemicals Agency) bünyesindeki merkezi bir veri tabanına kaydetmekle yükümlüdür. Ajans, REACH sisteminin merkezinde yer almakta; sistemin işleyişi için gerekli veri tabanlarını yönetmekte, kimyasallara ilişkin sunulan bilgilerin ayrıntılı değerlendirilmesini koordine etmekte ve tüketiciler ile profesyonellerin tehlike bilgilerine erişebileceği herkese açık bir veri tabanı işletmektedir.

REACH tüzüğü altında "grup yaklaşımı" kapsamında geleneksel kimyasal yönetimi, maddeleri tek tek analiz edip kısıtlamayı öngörür. Ancak PFAS ailesinin büyüklüğü (10.000+ tür), bu yöntemi imkânsız kılmaktadır. ECHA, tüm PFAS'ları tek bir grup olarak değerlendirmekte ve "zorunlu olmayan tüm kullanımların" (essential use) yasaklanmasını tartışmaktadır. Bu durum, üreticilerin PFAS'ın bir türevini bırakıp başka bir türevine geçerek (regülasyondan kaçma) süreci uzatmasını engellemektedir. İçme suyu direktifi ve 2026 hedefleri kapsamında ise 2020/2184 sayılı AB İçme Suyu Direktifi, PFAS kirliliği için milat niteliğindedir. 2026 itibarıyla yürürlüğe girecek sınır değerler, sadece toplam PFAS miktarını değil, tekil bileşiklerin (PFOA, PFOS vb.) nanogram düzeyindeki derişimlerini de denetim altına almaktadır. Bu, su idareleri için ileri arıtma teknolojilerine (aktif karbon, iyon değişimi veya ters osmoz) geçiş zorunluluğu anlamına gelmektedir.

Dünyadan İyi Uygulama Örnekleri ve Teknolojik Dönüşüm

PFAS kirliliğiyle mücadelede bazı bölgeler, yasakçı politikaları teknolojik inovasyonla birleştirmiştir.

Danimarka, patlamış mısır paketlerinden hamburger kâğıtlarına kadar gıda ile temas eden her türlü ambalajda PFAS'ı yasaklayarak sanayiyi bitkisel bazlı, doğada çözünür yağ bariyerlerine yöneltmiştir. Maine (ABD), "bildirim zorunluluğu" getirerek eyalette satılan her ürünün PFAS içerip içermediğinin etiketlenmesini şart koşmuştur. Bu, tüketici farkındalığıyla pazarın kendiliğinden temizlenmesini sağlamaktadır. İtfaiyecilikte devrim olarak nitelendirilen bu dönüşüm kapsamında, havalimanları ve askerî üslerde uzun yıllar kullanılan ve yüksek miktarda PFAS içeren geleneksel yangın söndürme köpükleri (AFFF) terk edilerek flor içermeyen yangın söndürme köpükleri (Fluorine-Free Foams – F3) standart hâle getirilmiştir. Özellikle Schiphol Havalimanı ve çeşitli Avrupa askerî tesislerinde hayata geçirilen bu uygulama sayesinde, söndürme tatbikatları sırasında toprağa ve yer altı sularına sızan yüksek miktardaki kimyasal yükün önüne geçilmiştir. Başlangıçta jet yakıtı yangınlarında yeterli performansı sağlayamayacağı yönünde tereddütler bulunsa da, gerçekleştirilen testler ve saha uygulamaları F3 köpüklerinin bu tür yangınlarda da etkili olabildiğini ortaya koyarak söz konusu dönüşümü teknik ve operasyonel açıdan mümkün kılmıştır.

Türkiye'deki Mevcut Durum ve Kritik Eksikler

Türkiye, tekstil ve otomotiv gibi PFAS kullanımının yoğun olduğu sektörlerde güçlü bir üretim kapasitesine sahiptir. Ancak yasal altyapı bu sanayi hızıyla aynı paralelde ilerlememiştir.

Mevzuat parçalanmışlığı çerçevesinde baktığımızda Türkiye'de PFAS izleme çalışmaları şu an için sadece belirli araştırma projeleri ve kısıtlı gıda tebliğleri ile sınırlıdır; içme suyu şebekelerinde düzenli bir PFAS taraması bulunmamaktadır. Sanayi farkındalığı bağlamında Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ) düzeyindeki üreticiler, kullandıkları ham maddelerin (kaplamalar, boyalar vb.) PFAS içerdiğinden ve AB'ye ihracatta karşılaşacakları olası engellerden çoğunlukla habersizdir. Analitik kapasite açısından ise Türkiye'deki akredite laboratuvarların sayısı, binlerce PFAS türevini nanogram düzeyinde analiz etmek için henüz yeterli kapasiteye ulaşmamıştır.

Türkiye için Stratejik Yol Haritası ve Öneriler

PFAS ile mücadele sadece T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı değil; T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, T.C. Sağlık Bakanlığı ve T.C. Tarım ve Orman Bakanlığının ortak yürüteceği bir "Ulusal Strateji" gerektirir. Bu stratejinin öncelikli adımlarından biri, Türkiye'de PFAS üreten ve kullanan tesislerin envanter çalışmasıyla haritalandırılmasıdır. Mevzuatın modernizasyonu da kritik bir gerekliliktir. Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması (KKDİK - Türkiye REACH) yönetmeliğine AB'deki grup kısıtlamaları hızla eklenmelidir. Ayrıca, özellikle organize sanayi bölgelerinin (OSB) atık su arıtma tesislerinde PFAS'ı tutabilecek membran sistemleri teşvik edilmelidir. Stratejiyi tamamlayıcı olarak yeşil Ar-Ge hayati önem taşımaktadır.

Yerli sanayicinin PFAS yerine kullanabileceği flor içermeyen ham madde geliştirmesi için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) benzeri kurumlar üzerinden özel fonlar ayrılmalıdır.

Sonuç: Gelecek Nesillerin Güvenliği

PFAS kirliliği, telafisi olmayan ve etkisi yüzyıllar süren bir mirastır. Türkiye, AB ile olan ticari bağları ve halkının sağlıklı çevre hakkı gereği bu mücadelede pasif kalma lüksüne sahip değildir. Bugün atılacak her adım; topraklarımızın temiz kalmasını, su kaynaklarımızın güvenliğini ve en önemlisi gelecek nesillerin hormon bozuculardan arındırılmış bir yaşam sürmesini sağlayacaktır.

Kaynaklar

European Chemicals Agency (ECHA). Annex XV Restriction Report: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). (2023).

European Union Council. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. U.S. EPA. PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021-2024.

World Health Organization (WHO). PFAS in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines. (2022).

Schiphol Group. (n.d.). PFAS at Schiphol. https://www.schiphol.nl/en/schiphol-as-a-neighbour/about-pfas (Erişim Tarihi: 29.03.2026).

European Commission. (2025). EU guidance for transitioning to fluorine-free firefighting foams. https://asegre.com/wp-content/uploads/2025/11/EU_guidance_for_transitioning_to_fluorine-free_firefighting_foams_en.pdf (Erişim Tarihi: 29.03.2026).

Prof. Dr. Ersi Kalfoğlu: "PFAS çok tehlikeli bir zehir; bu görünmez istila karşısında hiçbirimiz güvende değiliz"

Röportaj: Doç. Dr. Emrah Eroğlu
Hazırlayan: Emel Murtezaoğlu
Fotoğraf: Ahmet Ensar Topaloğlu

Türkiye'de adli bilimler alanında profesör ünvanı alan ilk bilim insanı Prof. Dr. Ersi Kalfoğlu ve SABİTA Enstitü Müdürü Doç. Dr. Emrah Eroğlu; Antarktika'nın buzullarından insan beynine kadar sızan, bilim dünyasının "sonsuz kimyasallar" olarak tanımladığı bariyer tanımaz zehir PFAS'ı enine boyuna konuştu. Avrupa Birliği destekli projelerle çalışma alanına çevre faktörünün de eklenmesiyle derinleşen bu moleküler istilayı; laboratuvardaki hücresel süreçlerden sanayi atıklarına, mutfağımızdaki tencereden adli tıp kürsüsüne uzanan bir "suç ve ceza" perspektifiyle inceleyen bu yol gösterici söyleşi, çözümün en önemli adımının kirliliği kaynağında durdurmak olduğunun altını çiziyor.

Ersi Hocam hoş geldiniz. Sizi çoğunlukla çalışmalarınız ve akademik üretiminiz üzerinden tanıyoruz ancak biz biraz da bu yolculuğun arka planını konuşmak isteriz. Kimyadan adli bilimlere, oradan toksikoloji ve çevre boyutuna uzanan bu akademik çizgi nasıl şekillendi?
Hoş bulduk, teşekkür ederim. Kariyer yolculuğum, aslında birbirini besleyen iki temel alanı bir araya getirmesi bakımından oldukça kritik bir noktada duruyor. Akademik hayatıma adli bilimler alanında başladım; 1993 yılında doçent, 1999 yılında ise profesör ünvanını aldım. Henüz çok genç bir yaşta profesör olmanın yanı sıra, Türkiye'de adli bilimler alanında bu akademik dereceye sahip ilk kişi olmanın haklı gururunu yaşıyorum.

Eğitim kökenime bakacak olursak; Boğaziçi Üniversitesi Kimya Bölümü mezuniyetimin ardından Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde Klinik Biyokimya uzmanlığı aldım. Prof. Dr. Sevil Atasoy ile tanışmam kariyerimin dönüm noktası oldu. Kendisinin "Geliştirmemiz gereken bambaşka bir alan var." diyerek işaret ettiği adli bilimler yoluna böylece girmiş oldum. Kimya ve biyokimya temelli insan metabolizması bilgimi, adli toksikolojiyle birleştirmek benim için son derece ufuk açıcı bir deneyimdi.

2005 yılında ise çevre sorunları ile ilgili vizyonumuzu daha da genişleterek "Interdisciplinary Environmental Synergy – Disiplinler Arası Çevresel Sinerji" adında uluslararası bir örgüt kurduk. Avrupa Birliğinden aldığımız destekler, çalışma sahamıza çevre faktörünün de eklenmesini sağladı. Adli bilimler ile çevre disiplinini harmanlamak gerek akademik gerekse pratik açıdan oldukça isabetli bir karar oldu.

Bugün geldiğimiz noktada, dünya genelinde ciddi bir krizin varlığı yadsınamaz. Aslında bu sorunlar çok eski olsa da insanlığın bunu bir "sorun" olarak algılaması ve farkındalık kazanması oldukça yeni. Ben de bu küresel sıkıntıların farkına vardığım andan itibaren enerjimi bu yöne kanalize ettim.

Bir adım geri giderek okuyucularımız için temel bir noktayı netleştirmek isterim Ersi Hocam. Sizin uzmanlığınız tıbbi, adli ve çevresel toksikolojiyi kapsıyor. Herkesin anlayabileceği bir dille; toksikoloji tam olarak nedir? 'Toksik' denildiğinde akla doğrudan 'zehir' geliyor ama biliyoruz ki suyun bile fazlası belirli bir noktadan sonra zehirleyici olabilir. Bu kavramı nasıl anlamalı ve yorumlamalıyız?
Şimdi, 1500'lü yıllarda aslında bu konu anlaşıldı ve Paracelsus adlı bilim insanı dedi ki: "Her madde zehirdir." Bir maddenin zehir olup olmadığı tamamen onun miktarına bağlıdır. Belirttiğiniz gibi su bile bize zarar verir; yeri gelir bizi boğar, buz olur bizi yakar. Yani su dahi, zarar verici bir zehir olarak değerlendirilebilir. Toksikoloji; doğal olan veya sentetik olarak hazırlanan moleküllerin organizmamıza verdiği zararı inceleyen bir bilim dalıdır. Konu genel olarak insan organizmasıyla

ilgilidir. Örneğin ilaçlar toksik etki yapabilir, gıdalar zehirli bir duruma neden olabilir, havadaki bir uçucu gaz bizi zehirleyebilir. İşin içinde bir suç varsa, orada adli toksikoloji devreye girer.

Bir de çevre toksikolojisi var ki; biz de maşallah son yıllarda elimizden gelen her yolu deneyerek çevremizi, atmosferimizi zehirli bir hâle getiriyoruz. Bu da tabii ki canlı sağlığı için ileri derecede zararlı bir durum.

Tam da bu noktada bir şey sormak, bir tespitte bulunmak istiyorum. Az önce çevremizi zehirlemekte ne kadar 'istikrarlı' olduğumuzdan bahsettiniz; hakikaten de öyle. Bütün dünya şu anda PFAS denen, Prof. Dr. Recep Öztürk Hocamızın deyimiyle deccal molekülü, İngilizcede "forever chemicals – sonsuz kimyasallar" adı verilen moleküllere maruz kalmış durumda. Türkiye'de bu konu henüz yeterince gündeme gelmedi. Peki, nedir bu PFAS? Herkesin anlayabileceği bir dille; hem kimyasal yapısı hem de günlük hayattaki karşılığıyla bu konuyu biraz açabilir misiniz?
Öncelikle ifade etmek isterim ki bu hiç de yeni bir madde değil; bilakis çok eski. Teflon, aslında 1950'li yıllarda kazara keşfedilmiş bir ürün, bir polimerdir. Çok da özel bir madde çünkü ne su geçirir, ne yağ geçirir, ne dağılır ne de herhangi bir çözücüde çözünür. Dönemin büyük kimya devlerinden birinde çalışan bir kimyacı bu maddeyi keşfediyor. Madde o dönemde katı fazda.

O zamanlar günlük yaşamdaki kullanılırlığı hakkında pek bir bilgi yok. Katı bir maddenin olduğu şekliyle kullanılmasının normal şartlarda pek bir faydası da yok. Hiçbir şekilde bozunmayan, parçalanmayan bu maddeyi tutup tencerelere, tavalara öylece koyamıyorduk; bunun daha pratik bir yolunun bulunması gerekiyordu. İnanılmaz güzel bir molekül, bir polimer, harika bir katı madde ama dediğim gibi kullanamıyorduk. Ta ki yine iki dev şirket birlikte araştırmalar yaparak bunu suda çözünür hâle getirene kadar. Nasıl yaptılar? Birtakım benzer yapıda yardımcı kimyasallar kullanarak başardılar bunu.

İşin kimya kısmını hiç anlatmayacağım çünkü oldukça karmaşık. Ancak bu madde suda çözündüğü zaman alıp metalin üzerine püskürtebiliyorsunuz. Püskürttüğünüzde esas istediğiniz teflon metale yapışıyor ve katılaşıyor; teflonu çözünür hâle getiren yardımcı moleküller ise 'çöp' oluyor. O molekülleri atıyorsunuz ama işte o atılanlar büyük bir felakete neden oluyor.

Çünkü aslında asıl zehir olan o yardımcı moleküllerdir, teflonun kendisi değil. Teflon zaten hiçbir şeyle etkileşime girmiyor, bıraktığınız gibi duruyor. Hatta o kadar sağlam bir madde ki ameliyatlarda bile kullanılıyor. Teflondan yapay organ parçaları oluşturuyoruz, vücudumuza yerleştiriyoruz ve iyileşiyoruz. İşimize yarıyor; ortopedistler kullanıyor, kalp damar cerrahları kullanıyor ancak onu sentezlemeye yarayan o moleküller o kadar berbat ki! Çünkü o moleküllere de hiçbir şey olmuyor, tepkimeye girmiyorlar, bozunmuyorlar. Bunlar polimer değil, küçücük moleküller ama hiçbir zaman farklı ve zararsız moleküllere dönüşemiyorlar, yok olmuyorlar. Doğada, diyelim ki bir sürü karbonlu bileşik var; karbondioksit, karbonmonoksit dâhil... Bunların hepsi

PFAS bugün yalnızca sanayi bölgelerinde değil; Antarktika'nın buzullarında, içme sularında, yabani domuzların karaciğerinde ve insan beyninde bile tespit ediliyor. Dünyada bünyesinde PFAS taşımayan tek bir insan bile kalmadı desek yeridir. Bu görünmez istila karşısında hiçbirimiz güvende değiliz. Asıl çözüm, kirliliği kaynağında durdurmak ve çevre suçlarını ciddi yaptırımlarla engellemektir.

Bir madde toprağı, suyu ve nihayetinde insan hücresini bu denli istila ediyorsa, bunun adı artık çevre kazası değil; sistematik bir suçtur. PFAS yalnızca çevreyi değil; karaciğerden beyne, spermden fetüse kadar insan biyolojisini tehdit eden küresel bir kriz hâline gelmiştir. Türkiye'nin artık multidisipliner bir mücadele modeli geliştirmesi şarttır.

zehirli olabilir, çok kötüdürler ama bir şekilde parçalanırlar. Biz parçalarız, biz parçalayamıyorsak bakteriler parçalar, bitkiler kullanır ve geri kazanılırlar. Ama bu 'kötü molekül' PFAS dediğimiz moleküllerin parçalanması yok, öylece kalıyorlar. Kalınca da yok olmadıkları için dünyanın her tarafına dağılıyorlar.

Bir cümleyle özetlemek gerekirse; PFAS, teflon üretiminde kullanılan bir ham maddedir. Teflonun kendisi zehirli değildir ancak üretim sürecinde kullanılan PFAS çevrede kalıcı olduğu için çevre açısından ciddi bir sorun oluşturur.

Evet, aynen öyle. Kullandığımız tencerelerde geriye kalan aslında yalnızca teflon kaplamadır. Teflonun kendisi oldukça dayanıklı ve zehirsiz bir maddedir. Ancak sentezinde kullanılan moleküller ileri derecede zararlıdır.

O zaman önceki sorunuza binaen yine aynı noktaya gelmek istiyorum. Avrupa'da bu PFAS hikâyesi uzun zamandır tartışılıyor; buna uygun takip metotları, analizler geliştirildi. Hatta yapılan araştırmalarda çok çarpıcı bulgulara rastlandı. "PFAS doğada en çok nerede birikiyor?" diye bakıldığında; organik tavukların yumurtasında, hatta yabani domuz ve geyik gibi vahşi doğada yaşayan hayvanların karaciğerlerinde yüksek oranlar görüldü. Yani bu maddeler, ormanların en derin yerlerine kadar ulaşmış durumda. Şimdi diyeceksiniz ki: "Yumurtaya nasıl ulaşıyor?" Büyük ihtimalle tavuk solucan yediği için... Solucan, ekolojik bir ayrıştırıcı olarak topraktaki maddeleri topluyor ve bünyesinde akümüle ediyor. Hayvan hem o topraktaki solucanı yiyor hem de oradaki suyu içiyor. Aslında biz de o suyu içiyoruz. Özetle şunu sormak istiyoruz dünyada PFAS bu kadar detaylı tartışılıyorken; Türkiye bu tartışma konusunda tam olarak nerede duruyor?

Bakın, bu gerçekten çok hayati bir soru; müsaade ederseniz meselenin kökenine inerek bir giriş yapayım. Teflon, püskürtülebilir ve pratik forma getirildiği an, aslında bu işlemde kullanılan yardımcı minik moleküllerin sağlığa ne kadar zararlı olabileceği de gün yüzüne çıktı. İlk etapta "Bakın ne kadar muazzam, hiçbir şeyle etkileşime girmiyor." diye pazarlanan bu yapıların, aslında hiç de masum olmadığı kısa sürede anlaşıldı.

Ancak bu fark edildikten sonra, ne yazık ki üretim dünyasının o klasik refleksi devreye girdi. Hemen molekülün bir köşesini değiştirip, başka bir isimle yeni bir molekül sürdüler piyasaya. "Biz artık o kötü molekülü bıraktık, yerine bu güvenli olanı getirdik." dediler. Ama bakıyorsunuz; o da tehlikeli, bir sonraki de tehlikeli, öbürü de... Neticede bugün karşımızda on binlerce farklı PFAS türevi var ve biz hangisinin, ne zaman, nerede karşımıza çıkacağını bilemiyoruz.

Az önce konuştuğumuz gibi; bu maddeler bugün Antarktika'da bile mevcut. Oraya nasıl ulaştı derseniz; çünkü bu molekül bozunmuyor! Topraktan suya karışıyor, suyla beraber binlerce kilometre yol kat ediyor. Canlı organizmaların içine sızıyor; o canlılar ölüp doğaya karıştığında yağmurla, rüzgârla döngü yeniden başlıyor. Sonuç... Antarktika'nın buzunda bile karşımıza çıkıyor. Bugün dünyada bünyesinde PFAS barındırmayan tek bir insan bile kalmadı desek yeridir; istisnasız herkeste bu izlere rastlanıyor. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri menşeli bir sorun olarak doğup tüm dünyaya yayılan bir krizden bahsediyoruz.

Peki, "Biz bu işin neresindeyiz?" sorunuza gelirsek; üzülerek söylüyorum ki henüz hiçbir yerindeyiz. Hiçbir yerindeyiz çünkü biz bunun bir 'sorun' olduğunu dahi çok yeni konuşmaya başladık. Sizin de vesilenizle, kendi çalışma grubumuzda bu konuyu ilk kez yüksek sesle dillendirdik. Hatta bir adli tıp yayınıyla konuyu camiaya taşıdım ve orada şunu vurguladım; "Ortada büyük bir zehir var ve bununla topyekûn mücadele şart!".

Buradaki en kritik nokta şu; bu zehri doğaya kontrolsüzce salanlar aslında bir suç işliyor. Bu suçun ispatı ve takibi için de biz adli toksikologların sahaya inmesi lazım. Ancak önümüzde büyük bir engel var; şu anda ülkemizde bu maddelerin detaylı tahlilini, taramasını yapabilecek donanımda ve nitelikte bir laboratuvarımız bulunmuyor. Kısacası, kendi insanımızda ne kadar PFAS yükü var, şu an için bunu bilemiyoruz.

Tam da bu konuda hemen bir soru daha ekleyeyim. SABİTA laboratuvarımızda özellikle cilt hücreleri üzerinde PFAS'ın nasıl bir etki yarattığını, oksidan ve antioksidan seviyelerini nasıl değiştirdiğini inceleyen bir çalışma yürüttük; şu an hakem değerlendirme sürecinde. Bu çalışmayı ileride beyin, solunum ve kalp hücrelerine de yaymayı planlıyoruz; hatta bu konuda Avrupa Birliği projeleri için başvurularımızı yapıyoruz. Literatürde PFAS'ın metabolik ve kardiyovasküler hastalıklar üzerindeki etkileri artık yüksek sesle tartışılmaya başlandı. Öyle ki, en korunaklı alanlar olan kadın yumurtası ve erkek sperminde bile bu maddelere rastlanabiliyor. Hiçbir bariyer tanımayan ve her dokuya sızabilen bu moleküllerin

sağlığımız üzerindeki gerçek etkisi hakkında neler biliyoruz?
Öncelikle yürüttüğünüz bu kıymetli çalışma için sizi tebrik ederim; adli ve tıbbi açıdan çok değerli bir adım. Sorunuza gelecek olursak; PFAS ile ilgili bugün elimizde ciddi bir literatür ve çalışmalar zinciri mevcut. Bu maddelerin karaciğeri doğrudan etkilediği artık net bir gerçek. Ayrıca spermatozoid ve yumurtada ciddi harabiyet yarattığı gibi, fetüs üzerinde de olumsuz etkileri olduğu ifade edilmektedir. Yani henüz doğmamış bebeklerin bile bu tehdit altında olduğunu söyleyebiliriz.

Sadece karaciğerle de sınırlı değil; beyinde ciddi hasarlara yol açarak nörodejenerasyona neden olabileceği araştırma konusu. Ve tabii ki en büyük tehdit; kanser. PFAS'ın, miktar ve maruziyet süresine bağlı olarak vücuttaki tüm organ sistemlerine nüfuz edebilecek bir potansiyele sahip olduğu ile ilgili çalışmalar mevcut.

Miktar elbette kritik bir faktör ancak maruz kaldığımız bu etkiler bugün tıbbi makalelerde çok ciddi birer 'alarm' olarak ele alınıyor. Dünya artık PFAS'lardan korunmamız gerektiğinin farkında; bizlerin de bu farkındalığa acilen ulaşması gerekiyor. Mesele sadece "Tenceremde PFAS yok." demekle çözülmeyecek kadar derin ve karmaşık. Bu görünmez tehlikenin çok ötesine bakmalı ve ulusal bir koruma stratejisi geliştirmeliyiz.

Çok önemli bir noktaya değindiniz hocam. PFAS dediğimiz şey tek bir madde değil; binlerce farklı bileşikten oluşan devasa bir aile. Bunların içinde volatil, yani uçucu olanlar var, çok daha dayanıklı ve stabil olanlar var. Tam da bu yapısal çeşitlilik nedeniyle, bu maddelerin büyük bir kısmını ölçmekte zorlanıyoruz. Mevcut kütle spektrometresi (MS) veya HPLC gibi yöntemlerle deteksiyon (saptama) yapmak her zaman mümkün olmuyor; karşımızda hâlâ ciddi bir 'karanlık alan' var. Tespit edemediğimiz, dolayısıyla etkisini ölçemediğimiz birçok farklı form mevcut.
Meseleye üretim boyutuyla bakalım. Bu maddeler teflon gibi ürünlerin imalatında sıvılaştırılmış hâlde kullanılıyor. Dolayısıyla atık sular yoluyla çevreye çok daha yoğun bir şekilde karışıyorlar. Peki, ne yapmak lazım? Her şeyden önce kirliliği kaynağında durdurmak, yani miktarı daha fabrikadan çıkmadan tayin etmek ve bertaraf etmek gerekiyor. Fabrika üretim yaparken, atık suyundaki PFAS miktarını belirlemek zorunda. Ancak dediğim gibi, on binlerce farklı molekülün varlığı bu işi hiç de kolay kılmıyor. Hangi molekülün hangi süreçten geçip nereye ulaştığını tespit etmek ciddi bir teknik takip gerektiriyor. Dolayısıyla aslında nereden başlayacağımızı kestirmenin bile güç olduğu devasa bir alanın içinde boğuşuyoruz. Ve asıl amacımız; bu belirsizliğin içinde boğulmamayı başarmak.

Ersi Hocam, Türkiye'de ulusal bir PFAS izleme, analiz ve biyolojik etki araştırma enstitüsü kurulacak olsa; Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bize gelip "Hadi, bu işe başlayın" dese, sizce nereden başlamalıyız? Nasıl bir yol haritası izlemeliyiz?
Aslına bakarsanız deteksiyon teknolojisi, yani bu maddeleri tespit etmek sanıldığı kadar ulaşılamaz değil. Bir NASA teknolojisi gerekmiyor; klasik laboratuvar altyapısının doğru kurgulanmasıyla yapılabilecek, hızla akredite edilebilecek bir iş. Burada kritik olan, multidisipliner bir yapı kurmak. Biyolojik, fizyolojik, çevresel, kimyasal ve toksikolojik açıdan meseleyi ele alan, aynı zamanda endüstriyle de dirsek temasında olan bütüncül bir proje oluşturulmalı ki her koldan gelen sorulara cevap bulunabilsin. Teknik altyapıyı kurmak işin kolay kısmı; zor olan bu koordinasyonu sağlamak.

Ortada bir suç varsa, birine bu suçu isnat etmek gerekir. PFAS'ı çevreye salan kaynakların tespiti artık yalnızca çevre meselesi değil; doğrudan adli toksikolojinin konusudur. Çünkü kullanılan her PFAS türevinin kendine özgü bir kimyasal parmak izi vardır. Bu izler sayesinde kirleticinin hangi tesisten, hangi üretim hattından çıktığı dahi belirlenebilir. Adli toksikolojinin temel görevi de tam olarak budur: Kaynağı ortaya çıkarmak, suçu tanımlamak ve bilimsel delili üretmek.

Bir adli tıp uzmanı olarak bu konunun hukuki boyutuna da değinelim. Semptomatik çözümlerle, yani "PFAS doğaya yayıldıktan sonra nasıl temizleriz?" diye uğraşmaktansa neden, nedene yönelik bir yaklaşımla kaynağa yönelmiyoruz? Adli tıp, kirletenlerin cezalandırılması ve yasakların uygulanması noktasında nasıl bir rol üstlenebilir?

Çok haklı bir noktaya değindiniz. Yurt dışındaki mücadele şeklinde "kaynak belirleme" işlemi esastır. PFAS'ı çevreye salan endüstriler için en ideal senaryo, atık sularını bu maddelerden tamamen arındırarak doğaya bırakmalarıdır. Bu yapıldığında, en azından yeni kirlenmenin önüne geçeriz ve zamanla insanların bu yükten temizlenmesine imkân tanırız. "Temizleyerek atıyorum." diyen kuruluştan numune alınır; tahlil edilir ve doğrulanırsa konu kapanır. Ama ne yazık ki gerçekler her zaman böyle olmuyor.

PFAS bir kez suya karıştı mı nehre, denize yani her yere ulaşıyor. Burada asıl önemli olan, kirleten kaynağı, yani 'suçluyu' tespit etmektir. Çünkü ortada bir suç varsa, birine bu suçu isnat etmek gerekir. Peki, bu tespiti yapmak kolay mı? Evet, kolay!

Şöyle ki; kullanılan PFAS'ların her birinin kendine has kimyasal bir 'parmak izi' vardır. Her tesis farklı bir türev kullanabilir. Siz 'A' bileşiğini kullanıyorsanız, ben 'B'yi kullanıyor olabilirim.

Diyelim ki bir kirletici Doğu Karadeniz'in bir noktasından suya atılıyor. Ben bunu Marmara'da yakaladığımda, o spesifik molekül yapısından yola çıkarak 'Bu, Doğu Karadeniz'deki şu kaynaktan gelmiş' diyebilirim. Bu belki uç bir örnek ama kaynağın belirlenmesi; suçun isnat edilmesi ve suçlunun tespiti açısından son derece hayatidir. Adli toksikolojinin temel görevi de budur. Ancak bunun için ciddi bir ön çalışma yani kimin ne kullandığına dair devasa bir veri tabanı ve dağılım haritası gerekiyor.

Yayınlanan son araştırmalara göre, yetişkin bir insanın beyninde yaklaşık bir plastik kaşık ağırlığına eş değer mikroplastik bulunuyor. Özellikle kış aylarında balık tüketmeyi çok seven bir toplum olduğumuz için bu durum bizi doğrudan etkiliyor. Denizlerimiz o kadar kirletildi ki; balıklar âdeta bir sünger gibi ağır metalleri, mikroplastikleri ve PFAS'ı bünyesine çekiyor, biz de onları yediğimizde bu zehirler vücudumuzda birikiyor. Avrupa'da henüz birkaç gün önce içme suyundaki PFAS değerlerinin belirli bir sınırın üzerine çıkmasını yasaklayan bir kanun yürürlüğe girdi. Türkiye'de bu konuda yasal bir düzenleme veya bir sınır değer mevcut mu?

Ne yazık ki hayır, henüz böyle bir düzenlememiz yok. Daha da vahimi; biz şu anda bu maddelerin hangi laboratuvarlarda, hangi standartlarda tetkik edilebileceğine dair bir altyapı stratejisine dahi sahip değiliz. Avrupa bu işin kanununu koyup sınırlarını çizerken, biz henüz ölçüm aşamasının bile çok başındayız.

Peki, bu süreci hızlandırmak için nasıl bir bakış açısı geliştirmeliyiz Ersi Hocam?

Dünyada PFAS meselesi çok daha sert regülasyonlarla, ciddi yaptırımlarla ve ağır cezalarla gündemdeyken; biz de bu küresel gündemi yakından takip etmeye ve kendi zeminimizi oluşturmaya başladık. Birçok alanda dünya standartlarına uyum sağlamak zaman alsa da PFAS konusunda şimdiden

farkındalık geliştirmiş olmamız önemli bir adım. Artık meselenin 'varlığından' haberdarız; bundan sonraki aşama ise bu farkındalığı; laboratuvar altyapısına, yasal düzenlemelere ve endüstriyel denetimlere dönüştürmek olacak. Yani aslında bir 'farkındalık süreci' yaşıyoruz ve bu süreci doğru yönetirsek dünyadaki uygulamalara hızla entegre olabiliriz.

Meseleyi sosyoekonomik bir perspektifle değerlendirmek istiyorum. Konuştuklarımızdan da anlaşıldığı üzere PFAS, artık hayatın her alanına nüfuz etmiş durumda. Normalde çevresel riskler söz konusu olduğunda düşük gelirli grupların daha savunmasız olduğunu düşünürüz ancak bu molekül, zengin-fakir ayrımı gözetmeksizin, her kesimi aynı ölçüde tehdit ediyor. Bu konuda toplumsal bir farktan söz etmek mümkün mü yoksa hepimiz aynı görünmez çemberin içinde miyiz?

Aslına bakarsanız, bu konuda sosyoekonomik bir bariyer kalmadı. Sizin tükettiğiniz su ile bizim tükettiğimiz su aynı; bugün kapalı havzalarda dahi neler olup bittiğini, ne ölçüde kirlendiğimizi tam olarak bilemiyoruz. Çünkü ortada henüz işleyen bir denetim mekanizması yok. PFAS bu büyük çevre felaketinin sadece bir parçası. Hazır bu konuyu açmışken, başka bir hayati tehlikeye daha dikkat çekmek istiyorum; antibiyotikler.

Her türlü antibiyotiği bilinçsizce çevreye salıyoruz. İlacı çöpe atıyoruz, tuvalete döküyoruz; daha da fenası endüstriyel hayvancılıkta kontrolsüzce kullanıyoruz. Bunlar toprağa sızıyor, oradan deniz suyuna ve içme suyu kaynaklarımıza karışıyor. Bu neden çok önemli bir hikâye biliyor musunuz? Çünkü sudaki bakteriler ve mikroorganizmalar bu antibiyotiklerle sürekli temas ettikleri için onlara karşı direnç geliştiriyorlar. Sonuçta 'antibiyotik rezistansı' dediğimiz o korkunç tabloyla karşılaşıyoruz. Bu ne demek? Yarın öbür gün en basit bakteriyel enfeksiyonla bile mücadele edemez hâle geleceğiz; ilaçlar artık işe yaramayacak. Ben bunu insan sağlığı için en büyük tehditlerden biri olarak görüyorum. Çevre ve sağlık temelinde insanları bilinçlendirebileceğimiz o kadar çok alan var ki...

Konuyu açtığınız için aslında gündemimde olmayan ama tam da bu uyarılarınıza çözüm sunabilecek bir çalışmamızdan bahsetmek isterim. Şu an üzerinde çalıştığımız bir TÜBİTAK projesinde, sucul ekosistemler için antimikrobiyal peptitler geliştiriyoruz. Bunlar, klasik antibiyotiklerin aksine kısa amino asit zincirlerinden oluşan ve doğadaki pek çok organizmada hâlihazırda bulunan savunma molekülleri. Amacımız, bu peptitleri sentezleyerek antibiyotiklerin yerine ikame edebilmek. Hatta bunlar sadece ilaç değil; balıklardan tüylü hayvanlara kadar pek çok türde hem yem hem de koruyucu birer bileşen olarak kullanılabilir. Antibiyotik kirliliğine karşı böyle bir alternatif üzerinde çalışıyoruz.

Gerçekten çok kıymetli ve vizyoner bir çalışma; tebrik ederim. Ancak sohbetimizin başında da vurguladığımız gibi; her zaman "kaynağında dur demek", kirlilik oluştuktan sonra onunla mücadele etmekten çok daha kolay ve etkili bir yoldur. Sizin bu peptit çalışmanız gibi bilimsel inovasyonlar, sistemin kökten dönüşümü için harika araçlar. Önemli olan bu çözümleri kirlilik henüz ekosisteme yayılmadan devreye sokabilmek.

Aslında dönüp dolaşıp aynı hayati noktaya geliyoruz: Türkiye'nin önümüzdeki 5-10 yıllık stratejik planlamasında bu meseleyi merkeze alması gerekiyor. Gerek araştırma projeleri gerekse metodolojik ve teknolojik geliştirme süreçleri

açısından, Türkiye'nin hem kendini koruyabilmesi hem de dünya standartlarını yakalayabilmesi için hangi alanlara öncelik vermesi gerektiğini düşünüyorsunuz?
Bence bu mesele o kadar nev-i şahsına münhasır, o kadar kendine has bir alan ki; başka disiplinlerin altına bir alt başlık olarak sıkıştırılmasını doğru bulmuyorum. Bu konuda müstakil ve özgün bir 'Çalışma Grubu' oluşturulması şart. Bu grup; insan sağlığı üzerindeki etkilerden tutun, doğadaki temizleme yollarına, kaynak tespitinden suçlunun belirlenmesine ve cezalandırılmasına kadar her adımı uçtan uca yönetmeli.

Burada özellikle bir noktanın altını çizmek istiyorum: yaptırım. Siz ne kadar az ceza verirseniz, kirletenler bu meseleyi o kadar az umursayacaktır. Avrupa'da bugün bu konuda devasa tazminatlar ve çok ciddi yaptırımlar uygulanıyor. Dolayısıyla, teknik araştırmanın yanı sıra hukukla sıkı bir iş birliği içerisinde çalışan; araştırma, geliştirme ve uygulamayı aynı potada eriten bir yapı kurulmalı.

Üniversitelerimiz bilimsel altyapıyı sağlamalı, TÜBİTAK bu projeleri stratejik olarak desteklemeli ve ilgili bakanlıklar koordinasyonu yürütmeli. PFAS o kadar çok farklı odağı ilgilendiren çok katmanlı bir sorun ki ancak bu şekilde bir devlet politikası hâline getirilirse başarılı olabiliriz.

Peki, bu mesele toplumun gündemine nasıl taşınabilir? PFAS'ın artık sıradan insanların da konuştuğu bir konu hâline gelmesi nasıl sağlanabilir?
Bugün PFAS kullanılmayan malzeme neredeyse yok. Gözümüze taktığımız lenslerden gıdaların sarıldığı yağlı kâğıtlara kadar pek çok üründe PFAS bulunuyor. Kıyafetlerimizde de var; kırışmayan, ütü gerektirmeyen ya da dış mekânda su geçirmeyen özellikteki ürünlerde kullanılıyor. Toplumdaki farkındalık potansiyelini harekete geçirmek gerek. İnsanların PFAS'ın ne kadar sakıncalı olabileceğini bilmesi önemli. Ancak bireylerin tek başına yapabileceği çok fazla şey yok. Bu sorunun varlığını görmeleri ve bunun bir problem olduğunu dile getirmeleri, bizim bilgilendirdiğimiz yetkililer üzerinde bir itici güç oluşturabilir diye düşünüyorum.

PFAS davalarında dünyada çok büyük tazminatlar gündeme geliyor. Bir hastalığın belirli bir kaynaktan gelen PFAS maruziyeti sonucu ortaya çıktığını kanıtlamada adli toksikolojinin sınırları nelerdir? Nedensellik bağı bu kadar karmaşıkken adalet nasıl sağlanabilir?
Çok güzel bir soru, teşekkür ederim. Aslında biraz önce de buna kısmen değinmiştim. Dünyada bu konuda artık yavaş yavaş bazı adımlar atılmaya başlandı. Bu işin iki boyutu var. Birincisi PFAS'ların tespit edilmesi; bu esasen bir laboratuvar meselesi. Örneğin bir üretici firmanın ne kadar PFAS ürettiğini, bu maddeleri nasıl kullandığını ya da Marmara Denizi'ne ne kadar PFAS bırakıldığını analitik yöntemlerle tespit etmek mümkündür.

İkinci olarak elde edilen verileri karşılaştırabileceğimiz bir veri bankasına da ihtiyaç var. Böyle bir veri tabanının oluşturulabilmesi için ayrıca kapsamlı araştırma programlarının yürütülmesi gerekiyor. Yani işin bir uygulama, bir de hazırlık aşaması var. Eğer gerekli hazırlık yapılır ve kimlerin neyi ne ölçüde kullandığı ortaya konulabilirse, o zaman çevrede nerede ne bulunduğunu ve kirlenmenin kaynağını daha net biçimde tespit etmek mümkün olur. Buna bağlı olarak sorumlulukların ve yaptırımların belirlenmesi de kolaylaşır.

Ancak burada kanun koyucunun ve özellikle bakanlıklar gibi yetkili kurumların sürece aktif biçimde öncülük etmesi gerekiyor. Çevre suçlarının en büyük sorunlarından biri de bu noktada ortaya çıkıyor: Kirletici çoğu zaman çok düşük cezalarla karşılaşıyor, bu cezayı ödeyip faaliyetlerine devam edebiliyor. Oysa çevreye verilen zarar bazen onlarca hatta yüzlerce yıl sürebilecek etkiler yaratabiliyor.

Ancak bir gerçeğimiz daha var. Türkiye; tekstil, deri ve yangın söndürme ekipmanları gibi sektörlerde dünyanın devleri arasında. Ve takdir edersiniz ki bu sektörlerin tamamı yoğun şekilde PFAS kullanıyor. Bir yanda böylesine devasa bir ekonomik güç, diğer yanda "Sınır getirin." diyen bir çevresel talep varken; bu iki kutup arasındaki gerginliği nasıl çözeceğiz?
Bakın, biz "Bu maddeyi asla kullanma!" demiyoruz. Tekstilciye veya sanayiciye "PFAS'tan vazgeç!" diye bir dayatmada bulunmuyoruz. Bizim söylediğimiz şey çok net: PFAS'ını kullan ama ondan sonra ortaya çıkan atığını usulüne uygun şekilde yönet! Kirli suyunu, kimyasalını olduğu gibi doğaya salma. Eğer atık kontrolü ciddi bir disiplinle sağlanırsa, ekonomik üretimle çevre sağlığı pekâlâ bir arada yürüyebilir.

Burada en kritik nokta, o meşhur 'farkındalık' hikâyesinin hangi boyuta ulaşacağıdır. Sizin de az önce belirttiğiniz gibi; eğer kamuoyu bu maddelerin zararını bizzat idrak eder ve talebini bu yönde şekillendirirse, üretici de üretim tarzını değiştirmek zorunda kalır. Tüketici bilinçlenip, "Üzerinde PFAS kalıntısı olan ürünü almıyorum." dediği anda pazarın kuralları yeniden yazılır. Üretici o zaman gerçekten "PFAS içermez." etiketini hak etmek için uğraşır.

Bu süreç ilk bakışta uzun vadeli bir değişim gibi görünebilir ancak insan topluluklarının mekanizmalarını ve tepki potansiyellerini küçümsememek lazım. Bazen bu tür toplumsal dönüşümler öngörülemeyecek kadar hızlı gerçekleşebilir. Bizim görevimiz, bu farkındalık ateşini yakmak ve süreci bilimsel verilerle desteklemektir.

Ersi Hocam, anlattıklarınızdan anlıyoruz ki PFAS meselesi sadece tıbbi ya da ekonomik bir sorun değil; malzeme biliminden ekolojiye, gıda güvenliğinden tekstile kadar hayatın her alanını kuşatan, tam manasıyla multidisipliner bir problem. Bu 'PFAS hikâyesi' aslında toplumun her kesiminin duyarlı olması ve çözüm üretmesi gereken ortak bir mesele. Bizi bu denli aydınlattığınız için teşekkür ederiz. Son olarak eklemek istediğiniz bir mesajınız var mı?
Böyle hayati ve çetrefilli bir konuyu gündeme taşıyan, sayfalarında bu meseleye özel bir alan açan Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi (SD) olarak sizler aslında birer öncüsünüz. Şimdi bu bayrağı elinize alın ve bu yayıncılık anlayışıyla en ön safta yürüyün. Gerekli farkındalık ortamını sağlayabileceğinizden ve bu bilimsel sorumluluğu başarıyla sırtlanacağınızdan eminim. Yolunuz açık olsun; tıp kültürü ve toplum sağlığı adına attığınız bu adımlar çok kıymetli.

Nurettin Topçu düşüncesinin tıp ve sağlık alanına yansımaları

Prof. Dr. Recep Öztürk

1962 yılında Rize İkizdere'de doğdu. Tulumpınar Köyü Mehmet Akif İlkokulu, İkizdere Ortaokulu, Rize Lisesini bitirdi. İstanbul Üniversitesi (İ.Ü.) Cerrahpaşa Tıp Fakültesinden 1984 yılında mezun oldu. Enfeksiyon hastalıkları ve klinik mikrobiyoloji uzmanlığını İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde yaptı. 1994'te doçent, 2000'de profesör oldu. İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Öğretim Üyeliğinden 2016'da emekli oldu. 2009-2013'te Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Üyeliği, 2011-2015'te Tıpta Uzmanlık Kurulu (TUK) üyeliği ve başkan vekilliği yaptı. Sağlık Bakanlığı Ulusal Enfeksiyon Önleme ve Kontrol Kurulu ile Bağışıklama Danışma Kurulu, Grip Bilim Kurulu ve Koronavirüs Bilim Kurulu üyesidir. Öncelikli uğraş alanları hastane enfeksiyonları, enfeksiyöz ishaller, enfeksiyon hastalıkları laboratuvar tanısı ile yükseköğretimde kalite ve akreditasyondur. Dr. Öztürk, hâlen İstanbul Medipol Üniversitesi Rektör Yardımcısı, Üniversite Kalite Koordinatörü, Tıp Fakültesi Enfeksiyon Hastalıkları ve Klinik Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalı Başkanıdır.

Nurettin Topçu (1909–1975), Türk düşünce tarihinin en özgün ve ahlak merkezli filozofları arasında yer alır. Vefatının 50. yılında, ardında bıraktığı felsefi mirasının, günümüz tıp ve sağlık profesyonelleri için ne ifade ettiğini değerlendirmek, 'iyi hekimlik' değerleri kapsamında anlamlı görünmektedir. Topçu, fikirlerini samimiyetle yaşayan bir dava insanıdır; fikriyatı yaşantısından ayrı ele alınamaz. Hayatını irade, sorumluluk, hizmet ve merhamet gibi temel ilkelere adamıştır. Toplumun farklı kesimlerine yönelttiği eleştirileri de bu değerler etrafında kurmuştur (İrğat, 2016; Kara, 2012; Kara, 2025a; Topçu, 2022b).

Modern tıp günümüzde; teknolojikleşme, yabancılaşma ve manevi boşluk gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Topçu'nun yaklaşımı, sağlık alanındaki ahlaki arayışlara yeni bir derinlik kazandırabilir. Tıbbın teknikleşen yüzü, hekimi yalnızca teşhis ve tedavi ile görevli bir teknisyene indirgeme riski taşımaktadır. Topçu'nun ahlak merkezli insan anlayışı ise hekimliği bir 'şifa sanatı' olarak anlamlandırmaya imkân verir. Tıbbi pratiğin ruhunu muhafaza etmek, teknik yetkinliğin ötesinde bir ahlaki derinlik ve bilgelik gerektirmektedir.

Bu yazıda; hekimliği salt biyomedikal bir teknisyenliğe indirgeyen modern yaklaşımlara karşı, onu insanın varoluşsal krizine dokunan bir 'şifa sanatı' ve ahlaki bir mesuliyet alanı olarak yeniden konumlandırmak hedeflenmektedir. Temel gayemiz; Topçu'nun tefekküründe tecessüm eden erdem ve irade nizamını çağdaş tıbbın etik krizleriyle yüzleştirerek, hekimlik idealinin manevi temellerini yeniden tahkim etmeye katkı sunmaktır.

Benzer bir çizgi, tıp felsefecisi Edmund D. Pellegrino'da da karşımıza çıkar. Pellegrino'ya göre hekimlik, özü itibarıyla ahlaki bir girişimdir. Hastalığın doğası, hastayı savunmasız ve başkasına bağımlı bir duruma sokar. Bu durum, hekim-hasta ilişkisini bir 'emanet ilişkisi' hâline getirir; hekimin bilgi ve gücünü hastanın iyiliği için kullanmasını ahlaki bir zorunluluk kılar (Engelhardt ve Jotterand, 2008; Fins, 2015). Benzer görüşler, Dünya Tabipler Birliğinin 2022'de güncellediği Uluslararası Tıp Etiği Kodu'nda da yer almaktadır. Örtüşen bu ilkeler: "hekimin vicdani kanaatle, dürüstlükle, bütünlükle ve hesap verebilirlikle mesleğini icra etmesi; insan hayatına ve onuruna en yüksek saygıyı göstermesi"dir (Parsa-Parsi vd., 2024; World Medical Association, 2022). Söz konusu evrensel etik ilkelerle paralellik arz eden bu yaklaşım, Topçu'nun felsefi sisteminde daha derin bir ontolojik zemine oturur.

Nurettin Topçu'nun düşünceleri, tarihsel bir miras olmanın ötesinde, günümüz tıbbındaki insani ve ahlaki arayışlara cevap verebilecek bir entelektüel derinlik taşır. Topçu'nun düşünce dünyasının temelinde, Fransa'daki öğrencilik yıllarında tanıdığı Maurice Blondel'in 'hareket felsefesi'nin büyük etkisi olmuştur. Blondel, o dönemde resmî görevde değildi (emekliydi); irade ile eylemin zorunlu bütünlüğüne ilişkin fikirleri Topçu üzerinde kalıcı bir etki bırakmıştır. Ona göre insan, düşünerek ve ayrıca eylem aracılığıyla da hakikate yaklaşabilir. Blondel, eylemi irade etme, bilme ve var olmanın bir sentezi olarak görmüş; hakikate ancak bu bütüncül fiille yaklaşılabileceğini savunmuştur (Hartog, 2008). Topçu, bu düşünceyi kendi ahlak felsefesine taşımıştır. İnsan varoluşunu

salt zihinsel bir süreçle sınırlamaz; onu ahlaki eylemle iç içe, kesintisiz bir oluş hâli olarak kavrar (Gündoğan, 2016). Bu minvalde, Blondel'in hareket felsefesi Topçu'da, iradeyi iman ve ahlakla bütünleştiren bir iç hamleye dönüşmüştür (Kara, 2025a).

Bu düşünsel miras, Paris'te tanıştığı oryantalist Louis Massignon aracılığıyla yeni bir manevi ufka açılmıştır. Massignon'un Hallâc-ı Mansûr üzerine yaptığı çalışmalar, Topçu'ya 'mistik isyan' kavramı üzerinde düşünme imkânı sağlamış; hakikat uğruna nefse karşı ahlaki direnişin imkânını göstermiştir (Çetin, 2017). Türkiye'ye döndükten sonra Topçu, bu iki kaynağın etkisini Nakşibendî geleneğinin önde gelen isimlerinden, zühd ehli âlim Abdülaziz Bekkine ile kurduğu kişisel ilişkiyle bütünleştirmiştir. Söz konusu temas, teorik arayışı yaşanan bir manevi tecrübeye dönüştürmüştür. Bu süreçte Topçu, hareketi felsefi bir kavrama ek olarak, varoluşun ahlaki temeli olarak yorumlamıştır (Gündoğan, 2016). İrade–eylem birliğinin, düşüncenin hayata geçirilmesiyle anlam kazandığını ifade etmiştir (Kara, 2025a). Neticede Blondel'in hareket (eylem) felsefesi, Massignon'un mistik yorumu ve Bekkine'nin irşadı; Topçu'nun dünyasında ahlaki eylemle ruhsal derinliğin birleştiği bir sistem hâline gelmiştir (Gündoğan, 2016; Kara, 2012; Kara, 2025a).

Topçu'nun vefatının üzerinden yarım asır geçti. Bu sürede Türkiye'de ve dünyada büyük dönüşümler yaşandı. İnsanlık değerlerinin ne kadar kırılgan ama vazgeçilmez olduğu görüldü. Bugün teknoloji baş döndürücü hızla ilerlemeye devam ediyor; ekonomik rekabet ve toplumsal kutuplaşmalar sertleşiyor. Tüm bunlar, Topçu'nun ahlak/erdem merkezli insan anlayışı konusunda düşünüp tartışmanın ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir.

Topçu, insanı akıl, vicdan ve irade üçlüsüyle kavrayan; düşünceyi hayatla buluşturan ender mütefekkirlerdendir (Kara, 2025a). Son yıllarda Nurettin Topçu'ya artan büyük bir ilgi vardır ve bu ilgi felsefe ve eğitim çevrelerinin ötesine taşmıştır (Gündoğan, 2016; Kara, 2025a). İnsanı bütüncül bir varlık olarak ele alan yaklaşımı sayesinde tıp, psikoloji ve sağlık etiği, iyi hekimlik alanlarında da Topçu'nun fikirlerine karşı bir ilgi olduğu görülmektedir. Bu yönelim, çağdaş literatürde giderek öne çıkan "insancıl tıp" (humanistic medicine) anlayışıyla da derinden örtüşür.

Günümüz tıbbında, 19. yüzyıl pozitivizminden beslenen ve insanı yalnızca biyolojik bir varlığa indirgeyen biyomedikal modelin hakimiyeti giderek sorgulanmaktadır. Bu süreçte insan; kadim tıp geleneklerinde olduğu gibi beden, zihin ve ruh bütünlüğü içinde yeniden kavranmaya başlanmış; hastalık da salt fizyolojik bir bozulma değil, bireyin ruhsal ve ahlaki dünyasını sarsan varoluşsal bir kırılma olarak yeniden tanımlanır hâle gelmiştir (Çelik, 2016; Schattner, 2020). Topçu'nun fikriyatında da insan yalnızca biyolojik bir varlık değildir; akıl, vicdan ve ruh bütünlüğü içinde insana bütüncül bir bakışla yaklaşılır. Topçu'nun beden, akıl ve ruh bütünlüğü içinde ele aldığı insan tasavvuru, hekime ve sağlık çalışanına mesleğini insan onuru ekseninde yeniden kavrama zemini sunar. Bu tasavvurun kuramsal ifadesi olan 'ahlak nizamı', modern tıbbın teknik başarılarının gölgede bıraktığı insani özü görünür kılma gücü taşır (Kara, 2025a; Topçu, 2022b).

Nurettin Topçu'nun irade, sorumluluk, ruh terbiyesi ve hizmet ahlakı eksenli düşüncesinin, medeniyetimizin asırlardır sürdürdüğü iyi hekimlik değerleriyle ilişkilendirilebileceği kanaatindeyiz. Topçu, bir tıp etiği filozofu olmamakla birlikte, insanı akıl ve vicdan bütünlüğü içinde kavrayan yaklaşımıyla hekimliği yalnızca teknik bir uğraş değil, insanın insana emanet edildiği ahlaki bir alan olarak görmeye imkân tanır (Topçu, 2025b; Topçu, 2025c). Bu çerçevede yazımızda, Topçu'nun sağlık ve hekimlik alanına doğrudan temas eden metinlerini esas alarak; hareket, emanet, hizmet, teknoloji eleştirisi ve şehirleşme bağlamlarında yeniden bir okuma yapmayı; modern tıp etiği ve humanistik tıp yaklaşımlarıyla karşılaştırmalı ve eleştirel bir değerlendirme sunmayı hedefliyoruz. Böylece gayemiz, Topçu'nun düşüncesinden hareketle, hekimlik pratiğinde insanın onurunu ve tıbbın ruhunu diri tutabilecek ahlaki bir pusulanın imkânlarını tartışmaya açmaktır.

Topçu, özellikle "Yarınki Türkiye" eserinde, büyük bir sabır ve gösterişsiz bir azimle çalışan ideal şahsiyetleri 'ruh amelesi' olarak tanımlar. Bu niteleme hekimler açısından nasıl okunmalıdır? İlk bakışta bu ifade, hekimi teknik bir uygulayıcıdan 'şifa sanatkârı' mertebesine taşıyor gibi görünür; hekimlik, bedene yönelmiş bir müdahaleden insanın iç dünyasına temas eden manevi bir eyleme dönüşür. Ne var ki Topçu, ideal insanları tarif ederken 'sanatkâr' değil 'amele' kelimesini bilinçli olarak tercih eder (Topçu, 2024b). 'Amele'yi sanatkârın estetik inceliğine değil; maden işçisinin çilesine, alnının terine ve sessiz tahammülüne yaslar. Hekimlik bu kavramla düşünüldüğünde hekim; hastanın acısını sırtlanan, yorgunluğu ve çaresizliği içine gömülü ağır bir manevi işçidir; parıltılı bir sanat icracısı değil, karanlık kuyularda cevher arayan bir 'ruh amelesi'dir. Hekimliğin manevi özünü tanımlayan şey, bu yüzden, ustalıktan önce çiledir; maharetten önce tahammüldür.

Günümüzde hekimler ve diğer sağlık mensuplarının iş yükü fazladır. Süreçte etik sorunlar, teknoloji ve sanayi (ilaç sektörü) yönlendirmeleri olabilmektedir. Böylesi olumsuzluklar karşısında, Topçu'nun ahlak temelli insan tasavvuru ve mesuliyet anlayışı hekimlere vicdani bir dayanak noktası, manevi bir tutamak sunar. Yazımızın amacı, Topçu'nun ahlak felsefesinin hekimler ve sağlık çalışanlarına yönelik ne gibi katkılar sunabileceği konusunda bilimsel bir tartışma başlatmak ve konuyu akademik gündeme taşımaktır.

Topçu Felsefesinin Temel Esasları: Ahlak, İrade ve Sorumluluk

Topçu'nun felsefesinin esası üç kavram üzerinde şekillenir: 1) ahlak, 2) irade, 3) sorumluluk. Onun "hareket felsefesi"nin temelinde yer alan bu üçlü, eserlerinde değişik yönleriyle ele alınmaktadır: "İradenin Davası"nda insan varoluşunun anlamı irade gücüne bağlanır; "Ahlâk Nizamı"nda irade, sorumluluk ve hizmet ilkeleriyle bütünleşir; "İsyan Ahlâkı" ise yapının vicdani ve eylemci cephesini öne çıkarır (Topçu, 2012; Topçu, 2022a; Topçu, 2022b).

İnsanı; düşünce, irade ve eylem bütünselliği içinde kavrayan bu epistemolojik sacayağının (Cihan, 2016; Gündoğan, 2016), modern tıbbın klinik karar alma süreçlerine ve hekimin ahlaki konumlanışına (mesleki otonomisine) doğrudan tatbik edilebileceği kanaatindeyim. Topçu'nun fikirleri, tıp ve sağlık alanında, mesleki sorumluluk ile ahlaki bilinç arasında denge kurucu etki sağlayabilir (iradenin ahlaki olgunlaşması, empati, vicdan ve hizmet bilinci vd.).

İsyan Ahlakı: Hekimin İçsel Otoritesi ve Mesleki İdealizmi

Topçu felsefesinin özgün, kalıcı kavramlarından biri, Sorbonne'da savunduğu doktora tezinde (Conformisme et Révolte) sistemleştirdiği 'İsyan Ahlakı'dır (Kara, 2025a; Topçu, 2022a). Yüzeysel olarak "anarşizm" çağrışımı yapan bu tezde, Topçu'nun "isyan"ı yıkıma değil, inşaya yönelen bir eylemdir. 'İsyan', insanın kendi nefsine, ihtiraslarına ve menfaat tutkusuna karşı; hakikate yönelme iradesiyle yürüttüğü ahlaki bir mücadeleyi ifade eder. Topçu'ya göre isyan, kişinin kendini özgürleştirmesi ve her adımda ruhsal olgunlaşmasıdır. Bu olgunlaşma, Tanrı'nın iradesine yönelen ahlaki bir yükselişin ifadesidir. Nitekim o, tüm dinlerin temelinde ahlakın, nefse karşı isyanın ve Tanrı'nın iradesine karşı uysallığın bulunduğunu belirtir (Basat, 2022; Kara, 2025a; Öner, 2016; Topçu, 2022a). İsyan kavramı bu hâliyle, hekimlik mesleğindeki ahlaki duyarlılığı yeniden düşünmemiz için elverişli bir hareket noktası oluşturur.

Günümüzde sağlık sistemlerinde performans baskısı, bürokratik zorlayıcılıklar ve ticarileşme önemli sorunlardır. Hekimler mesleki ideallerini bu şartlarda korumakta zorlanmaktadır. Topçu'nun 'İsyan Ahlakı' anlayışı, hekime dışarıdan gelen sistem zorlamalarına karşı kayda değer bir destek sağlar; ayrıca hekimin kendi nefsinin menfaat arzusuna da karşı durabileceği ahlaki bir davranış kazandırır. Böylesi bir vicdani direniş, tıp etiğinde 'ahlaki yıpranma' (moral distress) diye adlandırılan sürece karşı bir savunma hattı kurabilir (Aghakhani vd., 2025). Hekimlerin maddi kazanç hırsına yönelik somut eleştirileri olan ve "Parası olana itina ederek olmayanlara yüz çevirmek, akılların alabildiği zulümlerin en büyüğüdür." diyen Topçu'nun fikriyatı bu kapsamda olumlu katkıda bulunabilir (Topçu, 2025b, s. 551). Bu perspektiften 'isyan', hekim için yalnızca bir karşı çıkış olmayıp vicdani bir uyanış ve mesleki özerklik bilincidir.

Topçu; öğretmen, hukukçu gibi diğer kamu hizmeti mesleklerinde de adalet ve fedakârlık anlayışını öne çıkarır; isyanı sadece nefse karşı değil, aynı zamanda 'sosyal adaletsizliğe' ve 'kapitalist sömürüye' karşı da bir başkaldırı olarak telakki eder. Topçu, günün şartlarında "Genç doktorların, çoğu fukara olan bu milletin hastalarına 'meccanen bakma cemiyeti' diye bir cemiyet kurmalarını çok bekledik." arzusunu da dile getirmiştir (Topçu, 2025c). Böyle bir bilinç, hekimi mesleğini metalaştıran yapılar karşısında ahlaki bir özne durumuna yükseltir. Topçu'nun isyan anlayışı bu yolla 'iyi hekimlik'te (Öztürk, 2016) yer alan kanaatkârlık, merhamet ve hizmet erdemlerinin felsefi dayanaklarından birine dönüşür. Topçu'nun isyan ahlakı, yalnızca tükenmişliğe karşı değil, hekimlerin etik kırılmalara (ahlaki yıpranma) karşı direncini de besleyebilecek bir içsel otorite zemini sunmaktadır. Bu bakışla hekim, mesleğini salt bir kazanç kapısı olarak görmekten vazgeçip, insanı yaşatma görevini mesleki varoluşunun merkezine yerleştirir.

Vicdan ve Mesuliyet: "Yaşatma Aşkı"nın Kaynağı

Topçu'nun düşünce sisteminde vicdan, dış etkilerden bağımsız biçimde ödevi emreden içsel bir güç; mesuliyet ise bu vicdanın eyleme dönüşmüş hâlidir. Ona göre özgürlük, sorumluluğun sonucu değil; tam tersine kaynağıdır. İnsan, sorumluluğu üstlendiği ölçüde gerçekten hürdür ve gerçek şahsiyet bu bilinci taşıyabilen insanda tezahür eder (Kösedağ, 2015; Özbay, 2021; Şimşek, 2017). Topçu, "Yarınki Türkiye"nin ideal insanlarını "Yaşama zevkini bırakıp yaşatma aşkına gönül veren; sabırlı, azimli fakat gösterişten uzak, ruh cephesinin maden işçileri" olarak tasvir eder (Bergen, 2016; Topçu, 2024b). Onun ahlak anlayışında 'mesuliyet' ve 'yaşatma aşkı' merkezi bir yere sahiptir. 'Mesuliyet kahramanları', insana ve insan ruhuna değer vermeyi ahlaki varoluşun temel şartı sayarlar (Cihan, 2016; Topçu, 2022b).

Vicdan ve mesuliyet vurgusu, hekimlik mesleğinin ruhunu kavramak için de verimli bir zemin sunar. Hekimin sorumluluğu, hukuki veya idari bir yükümlülüğün çok ötesindedir: Hastanın acısına ve kırılganlığına şahitlik ederek onun varoluşuna ortak olmaktır. Bu köklü mesuliyet bilinci, hekimin tükenmişlik ve duygusal körleşmeye karşı ayakta kalmasını sağlayan 'yaşatma aşkı'nı besler. Böyle bir bilinçle hareket eden hekim, yalnız bir hizmet sağlayıcı olmaktan çıkar; Topçu'nun ifadesiyle bir "mesuliyet kahramanı"na dönüşür. Öyle ki bir hayatı kurtarmak, "Sanki bütün insanları yaşatmış olma şuuruna erişmektir." (Mâide 5/32). Bu 'dava bilinci', 'iyi hekimlik' değerleri arasında sayılan vefa, hastaya zaman ayırma, ilgi ve sabır gibi erdemlerin ardındaki manevi temel olarak değerlendirilebilir (Öztürk, 2016).

Ancak burada önemle vurgulanması gereken bir nokta vardır: Topçu'nun etik çerçevesi doğal olarak hekim merkezli görünür; zira odağında mesleğini bir ahlak davası olarak yüklenen kişi vardır. Buna karşılık çağdaş tıp etiği, hekim sorumluluğunu hasta özerkliği, bilgilendirilmiş onam, mahremiyet ve hasta hakları çerçevesinde yorumlar. Bu nedenle Topçu'nun vicdan ve mesuliyet vurgusunu, otoriter bir paternalizmi meşrulaştıran bir çerçeve gibi değil; bilakis hastanın onur ve özerkliğine saygıyı pekiştiren emanet bilinci ile desteklenen bir içsel motivasyon alanı olarak okumak gerekir. Böylece hekim merkezli ahlak tasavvuru ile hak temelli modern tıp etiği arasında bir gerilim yaratılmadan, Topçu'nun yaklaşımı bu etiği derinleştiren bir etik zemin sunabilir (Kara, 2025a; Parsa-Parsi vd., 2024; Topçu, 2022b; Varkey, 2021; World Medical Association, 2022).

Hareket Felsefesi ve Var Olmak: Hekimlik Bir Eylemdir

Topçu'nun fikriyatının temeli, 'hareket felsefesi'dir. Bu felsefeyi Maurice Blondel'den tevarüs ettiğine yukarıda değinmiştik. Topçu, var olmayı; düşünmek, sevmek ve iradeyle eyleme geçmek olarak tanımlar. Varlık durağan değildir; sürekli değişir, tazelenir, anlam kazanır. Hareket, insanın kendisini ve toplumu dönüştürme, tedricen mükemmele doğru yol alma gayretidir. Sonuçta kişi kendi varoluşunu devam ettirir. Bu zeminde Topçu, "Gerçek ideal hayat, yüksek değerlerin hizmetinde geçen hayattır." tespitini yapar (Topçu, 2012; Topçu, 2024a). Varoluş yolculuğunun nihai hedefi, insanın her şeyiyle (tüm benliğiyle) baki (sonsuz) olan Allah'a yönelmesidir. Blondel'in hareket felsefesini İslâm ahlakındaki irade anlayışıyla yeniden yorumlayan (İrğat, 2016) Topçu'ya göre hareket, insanın kendi benliğiyle birlikte toplumu dönüştürmesinin adıdır (Kuvancı, 2020). Hekimlik, özünde bir 'hareket' mesleğidir. Teşhis koymak, tedavi planlamak, ilaç düzenlemek, ameliyat yapmak, hastayı dinlemek ve teselli etmek gibi her fiil, bu hareketin ahlaki boyutunu yansıtır. Böylece hekimlik yalnızca teknik bir uğraş değil, insana dokunan ahlaki bir eylem alanı hâline gelir.

Topçu'ya göre insan, bu eylemleri 'yaşatma aşkı' ve 'mesuliyet' bilinciyle gerçekleştirdiğinde onları sıradan teknik işlemlerden ayırır. Böylece hekimlik, bir meslek olmakla kalmaz; hekimin kendi ahlaki benliğini inşa ettiği bir yola dönüşür. Topçu'ya göre ahlak, gerçek anlamına ancak sorumluluk duygusuyla ulaşır. Bu sorumluluk, yaşatma bilincinin ilahî olana yönelmesiyle derinleşir. Bu anlayış, tıbbî müdahaleyi sıradan bir klinik işlem olmaktan çıkarır; hekimin eylemine, insanî ve aşkın bir değer kazandırarak onu varoluşsal bir sorumluluk alanına taşır.

'İnsan Mektebi'nden 'Şifa Sanatı'na: Topçu'nun Eğitim Felsefesi ve Hekimlik

Nurettin Topçu, mesleğini çok seven bir 'muallim' olarak uzun yıllar vazife ifa etmiştir. Türkiye'nin en köklü meselesinin 'maarif davası' olduğuna inanmış ve baş eserini de bu konuda yazmıştır (Topçu, 2025a). Topçu sahih maarif anlayışına büyük önem vermiştir; ahlak felsefesi temel ilkelerinin gelecek nesillere aktarılmasının ancak bu yolla başarılabileceğini belirtmiştir. Topçu, maarifin, ahlakı yaşantıya dönüştürebilecek bir nitelikte olması gerektiğini vurgulamıştır (Güneş, 2016). Eğitim alanındaki ticarileşmeye yönelik sert uyarıları tıp/sağlık dâhil diğer alanlar için de geçerlidir. Onun eğitim felsefesi, tıp eğitiminin insani ve ahlaki temelleri konusunda çalışacaklar için de yol gösterici olabilir. 'İyi hekimlik' idealinin, sadece teknik donanımla sağlanamayacağı bilinmektedir. Vicdan, karakter ve hizmet bilincine dayanan bir eğitim modeliyle sürecin desteklenmesi gerekir. Tıpta insan bilimleri alanındaki güncel yaklaşımlar, Topçu'nun maarif tasavvuruyla birden fazla noktada kesişir.

Maarif Davası ve Ruh Terbiyesi: İnsani Tıp Eğitiminin Felsefi Temelleri

'Türkiye'nin Maarif Davası' Topçu'nun başeseridir. Bu eserinde, Batı'dan şekilci biçimde aktarılan; teknik bilgiye ve maddeci bir zihniyete dayalı eğitim anlayışı eleştirilir. Böyle bir maarifin, 'millet ruhu'nu zayıflatıp, bireyi manevi temellerinden uzaklaştırdığı anlatılır (Güneş, 2016; Topçu, 2025a). Topçu'nun eleştiri okları sadece müfredata değil, bizzat eğiticilere ve akademik yapıya da yönelir. O, üniversite kürsülerinin ilmi liyakat yerine şahsi münasebetlerle, hatta 'kendi öz oğlunu kayıran' bir nepotizmle doldurulmasına şiddetle karşı çıkar. Profesörlük ünvanının, ilmi bir çilenin ürünü olmaktan çıkıp 'her eli kalem tutana dağıtılan' bir rütbeye dönüşmesi, ona göre eğitimdeki ahlaki çöküşün de habercisidir (Topçu, 2025b). "Şahsiyetsizliğin sığındığı kapı" diyerek çok sert eleştiri yaptığı bu tabloya karşı Topçu, "Bizi kendi ruhumuza kavuştursun; her hareketimizin ahlaki değeri olduğunu tanıtsın; hayaya hayran gönüller, insanlığı seven temiz yürekler yetiştirsin." diyerek 'insan mektebi' adını verdiği bir eğitim modelini önerir (Topçu, 2025a). Bu modelde, salt bilgi aktarımı değil; ahlak, karakter ve 'ruh terbiyesi' öne çıkarılır (Güneş, 2016).

Topçu'nun yalnızca teknik bilgiye yönelen 'ruhsuz' maarif eleştirisi (Turan, 2016), günümüz tıp eğitiminde sıkça tartışılan 'insani ve ahlaki boyut eksikliği' sorunsalıyla ilişkilendirilebilir. Bu paralellik, günümüz tıp eğitiminin yeniden yapılandırılması ve 'iyi hekimlik' idealinin güçlendirilmesi için verimli bir düşünsel zemin oluşturabilir. 'Tıpta insan bilimleri' (medical humanities) tıp eğitiminde giderek önem kazanmaktadır. Yalnız biyomedikal bilgiye odaklanan eğitim modellerinin; empati, iletişim ve ahlaki muhakeme becerileri zayıf 'teknisyen hekimler' yetiştirdiği bilinmektedir (Çelik, 2016). Topçu'nun 'insan mektebi' kavrayışı, bu riske karşı insan merkezli ve bütüncül bir eğitim yaklaşımının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu doğrultuda tıp fakültesi, yalnızca bilgi aktarımının yapıldığı bir kurum değil; hekim adayının karakter inşası ve ruh terbiyesinin beslendiği bir 'insan yetiştirme ocağı' olarak tasavvur edilmelidir. Ahlak, felsefe, sanat, tarih ve edebiyat gibi kültür dersleriyle desteklenen bir müfredat, hekim adayının insanı bütüncül biçimde kavramasına; kendi varoluşsal sorularıyla yüzleşmesine ve mesleğinin manevi boyutunu fark etmesine yardımcı olabilir.

Değer merkezli bir eğitim, 'iyi hekimlik' için gerekli insani yeterlikleri kazandıramayan salt bilgi aktarımını tamamlayıcı olur. Topçu'nun maarif kapsamında kazandırılmasını istediği nitelikler, Mezuniyet Öncesi Tıp Eğitimi Ulusal Çekirdek Eğitim Programı (UÇEP) 2020'de tanımlanan birçok yeterlikle genelde örtüşmektedir. UÇEP'te 'iyi hekimlik' yeterlikleri arasında etik davranış, iletişim, insan haklarına saygı ve sürekli mesleki gelişim temel alanlar olarak belirlenmiştir (Yükseköğretim Kurulu, 2020). Tıpta insan bilimleri de hekimliğin insani yönünü canlı tutan bir entelektüel zemin sağlar (Çelik, 2016). Bununla birlikte, Türkiye'deki tıp fakültelerinin önemli bir kısmında, söz konusu yeterlikleri bütünüyle karşılayabilecek öğrenme ortamları ve güvenilir ölçme–değerlendirme araçlarının henüz yeterince geliştirilemediği görülmektedir. Topçu'nun eğitim anlayışı, yalnızca tarihsel bir fikir olarak arşivlenmemeli; tıp eğitiminin insani boyutunu güçlendirecek, yaşayan bir düşünce kaynağı olarak değerlendirilmelidir. Onun farklı eserlerinde ısrarla vurgulanan 'ruh terbiyesi, ahlak ve irade eğitimi' perspektifi, hem tıp eğitim programlarının yeniden yapılandırılmasına hem de UÇEP 2020'nin öngördüğü fakat uygulamada sınırlı ölçüde karşılanabilen yeterliklerin hayata geçirilmesine ilham verebilecek bir çerçeve sunduğu düşüncesindeyim.

Muallimden Hekime: Bir Ruh Sanatkârı Olarak Profesyonel

Topçu'nun eğitim anlayışında 'muallim' (öğretmen) özel bir yere sahiptir. Ona göre muallim, bir memur ya da salt bilgi aktarıcısı değildir, "ruhlar sanatkârı"dır. "Muallim, Âdemoğlunu beşikten mezara kadar götürüp teslim eden, dünyanın en büyük mesuliyetine sahip insandır; görevi, genç ruhları bir örs üzerinde döverek işlemektir." (Güneş, 2016; Topçu, 2025a). Eğitim ile insan ruhu arasında kurulan ahlaki ve manevi bağ benzetmesi iyi bir örnektir. Bu yaklaşımı tıp için de kullanabiliriz. Hekimi, bir muallim gibi düşünebiliriz. Hekimlik de bir 'memuriyet' değil, bir 'ruh sanatkârlığı' olarak görülebilir. Hekim; merhamet, sevgi ve kendini bilme erdemlerini ruhlara işleyen bir rehber olarak vazifesini ifa eder. 'İyi hekim', bedensel hastalıkları tedavi ederken, hastanın ruhuna da temas etmeli, umut ve teselli sunan bir 'insan sanatkârı' olarak davranmalıdır. Hastalık, salt biyolojik bir bozukluk değildir. İnsanın acı, kırılganlık hatta ölümle yüzleşebildiği varoluşsal bir süreçtir. Bu süreçte hekim, Topçu'nun örnek 'muallim'inde olduğu gibi, hastaya rehberlik etmeli, şefkat göstermeli ve onun yaşama iradesini destekleyen bir konum üstlenmelidir. Böyle bir bakış, hekim–hasta ilişkisini teknik bir müdahale olmaktan çıkarır. İki insan arasında anlamlı bir karşılaşma ve ortak bir iyileşme süreci olarak geliştirir.

Makine Medeniyeti: Tekniğin Gölgesinde Manayı Korumak

Topçu'ya göre, günümüz uygarlığı sanayileşme ve teknolojinin hâkimiyetine girmiştir. Topçu, insanı öz benliğinden

uzaklaştıran bir 'makine medeniyeti' olarak görür günümüz uygarlığını. Hâlbuki teknik, tabiaten insanın hizmetinde bir araç olmalıydı ancak çağdaş dünyada çoğu kez kutsanan bir amaca dönüşmüştür. Topçu, "ilmin ve bütün ilimlerin yardımlarından faydalanmak şartı ile" hakikatin aranmasını savunur. Sorun teknoloji değil, teknolojinin 'tahakküm aracı' olmasıdır. Topçu'ya göre 'ilim, hakikatlerin hizmetkârı' olmalıdır, teknik ise çoğu zaman hırsların hizmetindedir. Bu kapsamda amaç sapması, insanın ürettiği teknoloji karşısında eleştirel mesafesini yitirmesine yol açmıştır. Ne yazık ki araç olan şey anlamın önüne geçmiştir. Topçu'nun 'makine medeniyeti' eleştirisi, teknik aklın insanı nesneleştiren yönüne dikkat çekmesi bakımından Heidegger'in Gestell kavramı ve Frankfurt Okulu'nun araçsal akıl eleştirisiyle bazı paralellikler taşımakla birlikte, metafizik ve dinî referansları itibarıyla onlardan farklı, özgün bir çizgide durmaktadır (Yerlikaya, 2016).

Topçu'nun uyarısı, modern tıbbın teknoloji bağımlılığı eğilimini anlamak bakımından önemlidir. Gelişmiş görüntüleme, laboratuvar analizleri ve robotik cerrahi sayesinde tıpta ciddi ilerlemeler sağlanmıştır. Süreçte daha sessiz bir dönüşüm de yaşanmaktadır: Hekim–hasta arasındaki doğrudan ve insani ilişki giderek zayıflamaktadır. Gözlem, dokunuş ve sezgi gibi klinik sanatın unsurları dijital verilerin gölgesinde kalmaktadır. Ne var ki bu baş döndürücü teknolojik tahakküm, hekim-hasta ilişkisinde sessiz bir ontolojik kopuşu da beraberinde getirmiştir. Hekimin nazarının hastanın çehresinden monitörlere kaymasıyla birlikte tıbbın o kadim dokunma ve sezgi sanatı, sayısallaşmış verilerin soğuk gölgesinde yitip gitme tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. 'İyi hekimlik' açısından bu tehdit durumu daha ne kadar varlığını sürdürebilir? Yapay zekâ destekli sistemlerin yaygınlaşması bu mekanikleşme riskini daha da büyütecektir.

Topçu'nun 'mekanizmaya mahkûm edilme' olarak nitelediği yabancılaşma ne yazık ki tıbba da olumsuz şekilde yansımıştır. Ona göre mekanikleşme, insanın ruhî özünü yitirerek salt işlevsel bir unsura indirgenmesidir (Topçu, 2022a; Topçu, 2022b; Topçu, 2024a). Benzer şekilde hekimlikte bu süreç, hekimin 'şifa sanatkârı' rolünden uzaklaşıp makinelerin rehberliğinde iş gören bir teknisyene; hastanın da onarılacak bir biyolojik nesneye indirgenmesi tehlikesini beraberinde getirir. Oysa tıbbın esası yalnız biyolojik bedenle değil, insanın manevi bütünlüğüyle ilgilenen bir 'şifa hikmeti'ne dayanır. Bu nedenle hekimlik, mekanik etkinliklerin ötesinde, insanın varlık değerini korumayı hedefleyen etik bir meslektir (Varkey, 2021). Topçu'nun bu kapsamdaki hatırlatması, çağdaş sağlık profesyonelleri için bir hikmet çağrısıdır: Teknoloji, insanı tanıma ve ona hizmet etme aracıdır; kendine ait bir otoriteye dönüşmemelidir. Hekimlik, sadece hastalığı teşhis etme sanatı ile sınırlı olmayan; insana dokunabilme ve onun acısına eşlik edebilme erdemidir (Çelik, 2016; Engelhardt ve Jotterand, 2008). İnsana dokunabilme erdemini yaşatmak modern tıbbın önündeki en temel insani ödevlerden biridir.

'İyi Hekimlik' Anlayışı ile Topçu'nun Ahlak Felsefesi Arasında Paralellikler

Nurettin Topçu doğrudan tıp etiği alanında yazmamıştır ancak iyi hekimlikteki erdem ve değerler, Topçu'nun ahlak anlayışıyla derin bir örtüşme sergiler. Bu benzerlik, ortak bir ahlaki temele işaret etmektedir. Ayrıca, değişik yazılarında sağlık, hastalık ve hekimlere yönelik görüş serdetmiştir. İslam medeniyetinde, özellikle Osmanlı Dönemi'nde hekimlik idealleri ahlaki bir temele oturmuştur. Bu temelde, insanı yaşatmak ve hizmeti bir görev bilmek ön plandadır. Topçu'nun düşünce sistemi de benzer biçimde, mesleği manevi bir sorumluluk olarak görür. Topçu'nun fikriyatı, tıbbi etik tartışmalarına yol gösterici olabilir.

Topçu'ya göre ahlak yalnızca bireysel davranışları düzenlemez. O, insanın ruhi derinliğinde kök salan ve bütün varlığını kuşatan ilahi bir yöneliştir. Ahlâk Nizâmı'nda ahlakı, insanın Allah'a yönelişini mümkün kılan 'samimi bir cehd' olarak tanımlar. Bu çaba, sadece dinî alana özgü değildir; mesleki ve toplumsal bir boyuta sahiptir. Ona göre ahlâkın özü 'mesuliyet duygusu'nda görünür hâle gelir. Bu öz, 'kendini aşma iradesi'yle derinlik kazanır (Topçu, 2022b). Bu anlayış, İslam tıbbi geleneğinde önemlidir. Merhamet, hizmet, sadakat ve fedakârlık gibi erdemlerle ilişkilidir. Osmanlı hekimliğinde "Şifa bir ibadettir." görüşü çerçevesinde ahlaki eylem ilahi bir sorumluluk kabul edilir. Buna göre tıp yalnızca bir meslek değildir; manevi bir hizmet alanıdır (Öztürk, 2016). Bu erdemler, hekimi sadece bir uygulayıcı olmaktan çıkarır. Onu, insan ruhuna dokunan bir iyileştiriciye dönüştürür. Topçu'nun 'hareket ahlakı' da eylemi, insanın anlam arayışını besleyen bir ahlaki yol olarak görür. Bu yolda insan, kendi varoluşunu adım adım gerçekleştirir. Bu perspektiften bakıldığında Topçu'nun ahlak tasavvuru, medeniyetimizdeki 'iyi hekimlik' idealinin felsefi bir iç sesi olarak okunabilir. Bu yaklaşım hekimin vicdanını olgunlaştırır ve klinik eylemlerine manevi bir anlam katar. Böylece ahlak, hekimin mesleki varlığını anlamlandıran bir bilinç hâline gelir.

Tevazu ve Kanaatkârlık: Maddecilik ve Kibre Karşı Duruş

'İyi hekimlik' anlayışında, hekim şifanın gerçek sahibinin kendisi olmadığını bilir. Gerçek sahibin Allah olduğunu bilerek tevazu içinde davranır, kanaatkâr olur (Öztürk, 2016). Bu farkındalık hekimi kibirden korur. Aynı zamanda maddeci bir anlayışa karşı durmasını sağlar. Bu tutum, Nurettin Topçu'nun felsefesinde de açık biçimde görülür. Topçu, insanın menfaat odaklı bir hayat anlayışına yönelişini ahlaki bir yozlaşma olarak görür; "Aşırı servet, menfaat veya şöhret tutkusu insanı düzensizliğe, geleneksizliğe ve itaatsizliğe götürür; ahlaki nizamı bozar." der (Çetin, 2017; Topçu, 2022b). Bu bakış açısından 'iyi hekim', Topçu'nun İsyan Ahlâkı'nda vurguladığı gibi, iç dünyasında hırsa, gösterişe ve çıkar arzusuna karşı durabilen kişidir. Böylece hekimlik, bir kazanç aracı değil; emanet bilinciyle sürdürülen bir hizmet olarak anlaşılır. Bu yaklaşım, mesleğe tevazu ve kanaatkârlık ruhu kazandırır. Bu değerler, hem bireyde hem de toplumda karşılık bulur.

Topçu, eserlerinde hastayı bir 'müşteri' gibi gören, hatta taşralı hastaları avlamak için 'simsar' kullanan zihniyeti tiksintiyle anlatır. Hekimin, muayenehanesinde çaresiz bir kadınla pazarlık yapmasını veya cerrahlığın bir 'soygunculuk şebekesine' dönüşmesini, mesleğin kutsiyetine sürülmüş en büyük leke olarak görür (Topçu, 2025c). Bu sert uyarılar, günümüzdeki etik ve iyi hekimlik değerleri dışına taşan anlayışlara karşı da tarihî bir ihtardır. Topçu, sert uyarılarını sadece hekimlere yönlendirmez; meslek ahlakına aykırı hareket eden herkes onun sert eleştirilerinden nasibini alır: "Muhasebeci hürdür, istediği zaman vezneyi kilitler. Doktor hürdür, isterse vizitenize gelir. Hele başhekim, o kimi isterse hastaneye

yatırır, kimi isterse dışarı atabilir. Evinizin önünde şoförden dayak yememek mi istiyorsunuz? İstediği parayı hemen verin. Gazeteciler aleyhinde bir satır yazamaz, hiçbir şey söyleyemezsiniz. Kepaze ederler. Hocayı kızdırmaya hiç gelmez, sınıfta bırakır." (Topçu, 2025b, s. 421).

Aynı eleştirel uyarı, Türk-İslam tıp geleneğinde de kendini açık biçimde gösterir. Nitekim 15. yüzyılın önemli cerrahlarından Şerefeddin Sabuncuoğlu şöyle der: "İyileşme ümidi olmayan hastayı ameliyat etmeye kalkışmayın; erdemli olmaya çalışırken para düşkünü biri gibi görünmemeye dikkat edin." (Öztürk, 2016). Bu uyarı, tıbbın etik boyutunu yalın biçimde ortaya koyar. Ayrıca kanaatkârlığın, mesleki onurun ayrılmaz bir parçası olduğunu hatırlatır. Topçu'nun ahlak anlayışında olduğu gibi, hekim şifanın yalnızca bir 'vesile' olduğunu idrak ettiğinde mesleki kibirden korunur; insana hizmeti kendi varoluşunun anlamı hâline getirir (Öztürk, 2016). Böyle bir bakış açısı, hekimlikte asıl olanın kazanç değil, hizmet olduğunu hatırlatır. Gerçek değer, manevi tatmine dayalı bir etik duruşta ortaya çıkar. Bu duruş, mesleğin ahlaki zeminini sağlamlaştırır.

Vefa ve Hizmet: Sorumluluk Fedakârlığa Nasıl Dönüşür?

Hekim, sorumluluğunu aldığı bir hastanın tedavisini ve takibini imkânları ölçüsünde devam ettirmelidir. Hasta zaman zaman uygunsuz ya da kırıcı davranışlar sergilese bile hekim hastasının takibini devam ettirmelidir (Öztürk, 2016). Hekim, hastasını keyfî gerekçelerle yarı yolda bırakmaz; bu profesyonellik ve sadakat ilkesinin esaslarındandır. Hekimlikteki sorumluluk bilinci, Nurettin Topçu'nun 'hizmet' ve 'fedakârlık' anlayışıyla benzeşir. Topçu'ya göre hizmet, karşılık beklemeksizin, insanlık görevi bilinciyle yapılan ahlaki bir eylemdir (Güneş, 2016; Topçu, 2022b). Bu anlayış 'yaşatma aşkı'nın gereği olup hekimi yalnız hastalığın fiziksel yönüyle değil insanın bütünlüğüyle ilgilenmeye çağırır.

Yorgunluk, zorluk, kısıtlı zaman bu süreçte sorumluluğu terk gerekçesi olamaz. Hatta kimi zaman hastanın veya yakınlarının yanlış davranışlarıyla karşılaşılsa bile görev sonuna kadar sürdürülmelidir. Bu zorlu süreçteki azmi içsel motivasyon destekler. Hekimlik, salt teknik bir uğraş değildir, ahlaki bir adanmışlık anlayışıyla yaşanır. Topçu'nun hizmet felsefesi, tıbbi ahlaktaki fedakârlık, kanaatkârlık ve insanlığa hizmet değerleriyle benzerlik gösterir. Topçu, "hizmet ehli gençler" ifadesiyle, mesleğini menfaat beklentisiyle değil, sonsuzluk bilinciyle sürdüren insan idealini anlatır; bu düşüncesini şu sözlerle aktarır: "Hünerleri hep fedakârlık olan bu hizmet ehli gençler, hizmetlerinin mükâfatını da hizmet ettikleri insanlardan beklemeyecekler; sonsuzluğa sundukları eserin sesinin akislerini yine sonsuzluktan dinleyeceklerdir." (Topçu, 2025a; Topçu, 2025c, s. 1220–1221). Hekimliğin özündeki insana sadakat ve hizmet sorumluluğu kapsamında bu anlayış felsefi dayanaklardan biri olabilir.

Ruhun Tedavisi: Hürmet ve Adaletle Beslenen Merhamet Anlayışı

Topçu'nun ahlak anlayışında hürmet, merhamet ve hizmet birlikte ele alınır. Bu üçü, bütünsel ahlakın esasını oluşturur. Ona göre "Bu hareket, merhamet hareketidir. Merhamet, ruhu Allah'a birleştiren ilahi kudrettir. Dinî hayata girişin kapısı, mutlaka merhamettir." (Topçu, 2025c, s. 1305). Topçu, merhamet ile adalet ilişkisini hiyerarşik bir düzende ele alır: Gerçek adalet ancak merhametten

Tablo 1: Nurettin Topçu'nun ahlak felsefesi ile iyi hekimlik değerlerinin karşılaştırılması*

İyi Hekimlik Değeri (Öztürk, 2016)	Nurettin Topçu'daki Felsefi Karşılığı (Kara, 2025b)	Tıbbi Uygulamalardaki Yansımaları	Günümüz Tıbbındaki Pratik Karşılığı ve Zorlukları
Tevazu	Şifanın mutlak sahibinin Allah olduğu bilinci, kibre ve gurura isyan	Hekim, bilgi ve deneyim sınırlarını bilir; meslektaşlarıyla istişare eder (konsültasyon vd.); tedavide kendisini bir 'vesile' olarak konumlandırır.	Gelişmiş teknolojiler 'teknolojik kibir'i körükleyebilir; uzmanlık kibri disiplinler arası öğrenmeyi ve ekip uyumunu zayıflatabilir.
Kanaatkârlık / Maddiyatçı Olmama	Menfaatçi ahlaka karşı "İsyan Ahlâkı"; "Para düşkünü olmayın, hakkınız olana razı olun."	Maddi kazançtan çok hastanın faydasını öncelemek; gereksiz tetkik ve tedavilerden sakınmak; kaynakları akılcı (rasyonel) kullanmak.	Ticarileşen sağlık ortamı ve performans baskısı kanaatkârlığı aşındırabilir; çıkar çatışması riskini artırabilir.
Vefa	"Mesuliyet Ahlâkı", "hizmet" ve "fedakârlık" ideali. "Hünerleri hep fedakârlık olan bu hizmet ehli gençler..." vurgusu	Umutsuz görünen vakalarda dahi tedavi ve bakım sürecini imkânlar ölçüsünde sürdürmek; hastayla ve ailesiyle iletişimi, bilgilendirmeyi ve duygusal desteği devam ettirmek.	Yoğun iş yükü, performans baskısı, tükenmişlik gibi durumlar, hekimin bu insani adanmışlığı sürdürebilme direncini zayıflatabilir; bakım sürekliliği ve takip süreçleri aksayabilir.
İyimser (Ümitvar) Olmak	Ruhun maddeye üstünlüğü inancı; "Yaşatma Aşkı". "Ruhun zaferi fedakârlık, af, sabır, sevgi..."	Hastaya ve yakınlarına umut ve moral aşılamak; gerçekçi bir dille iyi ihtimaller görünür kılmak; hastanın içsel iyileşme gücünü ve baş etme kapasitesini harekete geçirmek, iradesini güçlendirmek.	Kanıta dayalı tıbbın katı, ölçü ve rakam odaklı dili umudu canlı tutmayı güçleştirebilir; malpraktis kaygısı hekimi aşırı temkinli ve karamsar bir söyleme itebilir; iletişimde denge kurmak zorlaşabilir.
Merhamet ve Hürmet	Ahlakın ve adaletin kaynağı olan içsel, ruhani hareket; "Hürmet, insanlık cevheri karşısında yaşanan sevgi ile karışık hayranlıktır." vurgusu	Empatik iletişim kurmak; hastanın acısını içtenlikle kavramak ve paylaşmak; şefkatle ve incelikli bir dille yaklaşmak; her insana ontolojik saygı göstermek.	Yoğun iş yükü, duygusal tükenmişlik ve "zor hasta" algısı, şefkat ve merhametin sürekliliğini zayıflatabilir; iletişimde sabır ve öz-düzen ihtiyacını artırır.
Adalet	Merhametten doğan ve kul hakkını gözeten nizam; "Merhamet ruhta, adalet dışarıda kurulan düzendir" ilkesi	Kısıtlı kaynakların adil dağıtımı; klinik önceliklendirmede hakkaniyet; hastalar arasında sosyoekonomik, etnik veya yaşam tarzına dayalı ayrım yapmamak.	Sınırlı kamu kaynakları, başvuru yoğunluğu ve özel sigorta modelleri adil hizmet sunumunu güçleştirebilir; triyaj, bekleme listeleri ve geri ödeme kuralları etik gerilimler yaratır.
Sabır	İrade terbiyesinin bir sonucu; "ruhun zaferi"nin temel unsuru. "İş bilir bir hekimin sabrı, tedavinin bir yoludur" vurgusu	Zorlu hastalar, uzun ve belirsiz tedavi süreçleri ile hasta ve yakınlarının yoğun talepleri karşısında metaneti korumak; süreklilik ve istikrarla bakım vermek; istikametli olmak.	Artan şiddet olayları, performans baskısı ve yükselen beklentiler sabrı zorlaştırır; zaman kısıtı hekim–hasta iletişiminde tahammül eşiğini düşürebilir.
Dürüstlük (Emin Olmak)	"Ahlâk Nizâmı"nın temel taşı olan samimiyet; "Kendine karşı ödevlerin başında doğru ve samimi olmak gelir" ilkesi	Hastaya ve yakınlarına doğru, anlaşılır ve zamanında bilgi vermek; tıbbi hataları saklamadan kabul etmek ve düzeltici adımları şeffaf biçimde paylaşmak.	Hukuki korunma kaygıları, kurum imajını koruma baskısı ve malpraktis endişesi açıklığın önünde engel oluşturabilir; açık iletişim kültürü ve hatadan öğrenme sistemleri gerektirir.

** Kara, 2025b; Locke vd., 2025; Topçu, 2012; Topçu, 2025a; Topçu, 2022a; Topçu, 2022b; Topçu, 2024a; Topçu, 2024b*

doğduğunda meşruiyet kazanır; aksi hâlde merhametten yoksun bir adalet, zalim bir mekanizmaya dönüşebilir (Topçu, 2022b).

'İyi hekimlik'in ahlaki temeli bu düşünceyle örtüşür. Merhamet, hekimi statüye, gelire ya da yaşam tarzına bakarak hüküm vermekten alıkoyar. Topçu'nun satırlarında, hastane kapısında "Doktorun vakti yok." denilerek geri çevrilen ve oracıkta can veren Anadolu insanının dramı, merhametsizliğin en acı tablosu olarak resmedilir. O, başhekimin "Çirkin manzarayı görmesin." diye ölüme terk edilen hastaların atıldığı bir düzeni, 'ilkçağ krallıklarına' benzeterek reddeder (Topçu, 2025b). Bu isyan, hekimliğin teknik bir beceri değil, evvela bir vicdan meselesi olduğunun kanıtıdır. Herkese şefkatle yaklaşmayı gerektiren adalet duygusu, klinikte etik açıdan 'adalet' ilkesinin esas kaynağıdır. Ayrıca hekimin ümide dayalı iyimserliği, hastanın 'yaşama iradesi'ni güçlendirir (Öztürk, 2016).

Topçu'nun 'ruhun madde üzerindeki üstünlüğü' düşüncesiyle de uyumludur bu anlayış. Topçu, "Ruhun zaferi; fedakârlık, af, sabır, sevgi ve sonsuz tahammüldür" diyerek (Koç ve Topluk, 2019), insanın içsel dayanıklılığını ahlaki bir direniş olarak tarif eder. Hekim, bedenin yanında hastanın ruhuyla da ilgilenir. Bu nedenle hekimlik, incelikli bir ustalık gerektirir. Umudu diri tutmak, 'yaşatma aşkı'nı tedavinin merkezine alırsa hasta umudunu diri tutar. Merhamet ile adalet arasında denge sağlanması Topçu'nun genel ahlak yaklaşımıdır; tıp etiğine duygusal ve rasyonel bir ortam sağlar. Unutulmamalı ki, hekimlik salt bir meslek değil, insanın ruhuna da şifa arayan ahlaki bir sorumluluk gerektirir.

Nurettin Topçu'nun ahlak felsefesi ile 'iyi hekimlik' değerleri arasındaki bu eşleşme, günümüz tıbbının karşı karşıya olduğu yapısal krizlerle yüzleştiğinde daha da anlam kazanmaktadır (Tablo 1). Şüphesiz; teknolojik gücün doğurduğu kibir, ticarileşme baskısı ve yoğun iş temposu gibi unsurlar hekimin ahlaki dayanıklılığını zorlayan ciddi sınamalardır. Ancak bu sistem baskıları, Topçu'nun erdem merkezli ahlakını bir 'nostalji' olmaktan çıkarıp tam da bugün hayata geçirilmesi gereken bir 'isyan ahlakı' ve vicdani direniş alanı hâline getirmektedir. Dolayısıyla karşılaşılan zorluklar, iyi hekimlik idealinin önündeki aşılamaz engeller değil; aksine hekimin 'sefer şuuru' ile insan onurunu koruma azmini perçinleyen birer irade imtihanıdır. Bu bakış açısıyla Topçu'nun ahlak nizamı, sistemin mekanikleşmiş çarkları arasında hekimin 'şifa veren insan' kalabilmesini sağlayan en güçlü manevi pusuladır.

Tablo 1'de listelenen değerler, erdemler ve ahlaki prensipler yalnızca hekimlerin ya da diğer sağlık çalışanlarının omuzlarına binen bir yük olmamalıdır. Hekimhasta ilişkisindeki etik denge, sadece doktorun tutumuyla açıklanamaz; hasta ve yakınları da bu bağın ahlaki bütünlüğüne katkı yapan öznel aktörlerdir (Varkey, 2021). "Empatik iletişim" sıkça doktorun sahip olması gereken bir yeterlilik olarak görülse de asıl mesele karşılıklı anlayış ve saygı çerçevesinde hastaların da sürece destek vermesidir. Tedaviye özen göstermek, randevu saatlerine riayet etmek ve sağlık çalışanlarına şiddetten kaçınmak, göz ardı edilemeyecek önemli hususlardır. Aynı zamanda kişisel mahremiyeti korumak ve beklentileri gerçekçi tutmak, sorumluluğun ayrılmaz bir parçasını oluşturur. Tüm bu davranışlar, hasta ve yakınlarının etik sorumluluk sınırlarını çizer (Varkey, 2021). Bilginin şeffaf ve açık bir dille aktarılması, tedaviye etkin bir biçimde katılımı teşvik eder, yanlış bilgilere yönelmeyi engeller ve sağlık hizmetinin kalitesini yükseltir. Destek aşamasında hasta yakınlarının, hekim ve sağlık ekibiyle iletişimde saygılı ve yapıcı bir üslup benimsemesi sürecin iyileşmesine katkı sağlar. Bu yaklaşım, tedavi başarısını artırırken, karşılıklı güvene dayalı, insani bir sağlık kültürünün gelişip güçlenmesine de olanak tanır.

Bu süreçte sağlık yönetiminin üstlendiği sorumluluk da ayrı bir öneme sahiptir. Kaynakların adil bir şekilde dağıtılması, iş yükünün dengeli bir planlamayla dağıtılması ve etik performansın sürdürülebilirliğine yapılan katkılar, sistemin sağlıklı işleyişini destekler. Süreçlerin şeffaf bir biçimde yürütülmesi ve hatalardan ders almayı teşvik eden bir kurum kültürünün oturtulması da hayati bir gerekliliktir. İhmaller, uzmanlık kibri, tüketicinin beklentileri ve ticarileşme baskısı, hekimlik erdemlerini yavaş yavaş aşındırır. Bu durum güveni sarsar; adalet–verimlilik dengesi bozulur. Sistem, etik kültürün yaygınlaşmasını sağlayamadığı sürece bu erdemler kalıcı olamaz.

Güncel araştırmalar, ahlaki sıkıntı ile tükenmişlik arasında çift yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ahlaki sıkıntı tükenmişliğe yol açarken, tükenmişlik de hekimin duyarsızlaşmasını artırarak ahlaki sıkıntıyı derinleştirir; böylece kısır bir döngü oluşur. Bu döngünün kırılması için bireysel dayanıklılığın yanı sıra, kurumsal düzeyde etik iklimin güçlendirilmesi ve ahlaki direnç kapasitesinin geliştirilmesi gerekir. Topçu'nun "isyan ahlakı" anlayışı, bu bağlamda sadece sistem zorlamalarına değil, hekimin kendi tükenmişliğine karşı da iç direniş geliştirmesine zemin hazırlayabilir (Maunder vd., 2023).

Hekimin Duruşu: Karmaşık Dünyada İlke ile Vicdan Arasında

Topçu'nun fikriyatında "İsyan Ahlâkı", özünde derin manalar içerir. Yorumu en güç kavramlarından biridir. Topçu'nun "isyan" derken kastettiği, ne kör bir başkaldırı ne de anarşiyi çağıran bir tavırdır; o, düşünmeksizin uyuma, ruhsuz itaate ve mekanikleşmiş düzene karşı vicdanın geliştirdiği bilinçli bir direniştir (Karaman, 2009; Öner, 2016; Topçu, 2022a). Bu isyan, tesadüfi bir tepki değildir; insanın önce kendini hesaba çekmesi gereken, ahlaki bir vicdan muhasebesidir. Kişi hakikatin huzurunda tevazu içinde; tutkuları ve menfaat beklentileriyle yüzleşir. Bu sebeple isyan, kör bir reddedişten çok, hakikate, vicdana ve sorumluluğa yönelen iradi bir teslimiyet olarak anlaşılmalıdır (Karaman, 2009; Topçu, 2022a). Topçu sadece bireysel ahlak çağrısı yapmaz. Günümüz meslek hayatında, bürokrasilerde ve kurumsal ilişkilerde sıkışan insana, etik bir şuur ve iç özgürlük alanı varlığını hatırlatır. İsyan Ahlâkı bu yönüyle hangi çağda olursa olsun insanı mesleki ve toplumsal sorumluluğunu sorgulamaya davet eden kalıcı bir çağrı olarak okunabilir (Kara, 2025b).

'Makinenin Dişlisi Olmaya' Karşı Ahlaki Direniş (İsyan)

Günümüzde sağlık çalışanları giderek genişleyen ve aynı zamanda otomatikleşen bir sistemin dişlisi hâline getirilmektedir. Bu dönüşüm, mesleki idealizmin giderek aşınmasına yol açmaktadır. Topçu'nun düşüncelerinden ilham alarak bu tabloya karşı 'isyan ahlâkı' çerçevesinde bir vicdan direnişi geliştirmek mümkün gözükmektedir.

Bu direniş evvela klinik mekânın mahremiyetinde cereyan eden mikro ölçekli vicdani müdahalelerle başlar.

Görünüşte mütevazı fakat derin anlamı olan bu eylemler, hasta memnuniyetinde gözle görülür bir artışa neden olur. Klinik ortamda, günün koşturmacası, zamanın daralması ne kadar zorlasa da hasta ile insani temasın sürdürülmesi büyük önem taşır. Sadece laboratuvar sonuçlarına dayanarak hastaya yönelmek yetersiz kalır; öncelikle hastanın anlattıklarını büyük bir özenle dinlemek, detaylı bir fizik muayene yapmak, göz temasıyla sıcak bir bağ kurmak ve nazik, incelikli bir dille muhatap olmak, sabrı elden bırakmadan ilerlemek çok daha hayati bir öneme sahiptir. Kontrol muayenelerinde de ilk muayenede sergilenen özen aynı titizlikle sürdürülmelidir. Zorlayıcı konuşmaları aceleye getirmekten kaçınılmalı ve tıbbın özündeki insani duyarlılık her daim diri kalmalıdır.

Hastanın onurunu merkeze alan bu bireysel hamlelerin ötesinde mesele, eş zamanlı olarak makro düzeyde kolektif bir mesleki tutumu da zorunlu kılar. Bu noktada, hekimliğin kamusal itibarını sürdürebilmesi adına ortak ilkelerin tasarlanması, tıp eğitiminde insan bilimlerine ayrılan payın artırılması ve etik performans ölçütlerinin yönetişim politikalarına entegrasyonu göz ardı edilemeyecek bir gündem maddesidir (Çelik, 2016; Varkey, 2021). Topçu'nun "mekânın dili" vurgusuyla örtüşen bir gerçek de vardır: Küçük ölçekli, insan odaklı hastanelerin yerini devasa sağlık komplekslerine bırakması, mesleğin ruhsal özünü sessizce aşındırma potansiyelini içinde barındırmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, hasta odaklı mimariyi, şeffaf yönetişimi ve etik katılım kültürünü savunmak, çağdaş bir 'mesleki isyan'ın somut tezahürlerinden biri olarak değerlendirilmelidir.

"Hak Bellediğin Yolda Yalnız Gideceksin": Kendi Mahallesine Karşı Sorumluluk

Nurettin Topçu'nun en dikkat çekici yönlerinden biri, gerektiğinde kendi düşünsel çevresine dahi eleştirel bir tutum takınabilmesidir. Bu duruşun çarpıcı örneklerinden biri, 1969'daki "Kanlı Pazar" olaylarının ardından yaşanmıştır. Topçu olaylar sonrası kaleme aldığı "Kin ile Din Birleşmez" başlıklı yazısında dönemin muhafazakâr çevrelerinde yaygın olan Amerikan 6. Filo'sunu savunma eğilimine açıkça karşı çıkar. Dinin siyasete ve şiddete alet edilmemesi gerektiğini vurgular. Bu tavır, düşünsel aidiyetin sınırlarını aşan, daha yüksek bir ahlaki sadakatin ifadesidir (Kara, 2025b). "Kin ile Din Birleşmez" yazısı, ahlaki eylemin en çetin imtihanını - kendi cemaatine karşı durabilmeyi - somut biçimde ortaya koyar.

Samimi bir ahlaki cesaret, kişinin kendi çevresine, mesleki topluluğuna ya da kurumsal aidiyetine karşı durmasını gerektirebilir. Bu kapsamda hekimin gösterebileceği farklı tavır örnekleri şunlardır: 1) Klinikte yerleşmiş ancak bilimsel temeli zayıf bir uygulamayı sorgulamak; 2) Uzmanlık derneği veya ilişkili olduğu başka bir kuruluşun ticari veya bilimsel olmayan başka kaygılarla şekillenmiş bir tavsiyesini eleştirel süzgeçten geçirip tavır geliştirmek; 3) Meslektaşlar arasında yaygın bir kanaate bilimsel dürüstlük adına karşı çıkmak. Elbette bu tutumun bir bedeli olabilir: Mesleki yalnızlık. Topçu'nun bir yazısında Tevfik Fikret'ten aktardığı "Hak bellediğin bir yola yalnız gideceksin" sözü (Topçu, 2025b, s. 162), bireyin kimi zaman yalnız kalma pahasına da olsa vicdanına sadık kalabilmesini simgeler. Bu, ahlaki özerklik ile vicdani cesaretin kesiştiği noktadır; hakikate bağlılığın, aidiyetin konforuna tercih edilmesini gerektirir.

"Zafer İhtirası Değil, Sefer Şuuru"

Günümüz tıbbı bürokrasi ve teknolojik gelişmelerin olumsuz etkisi ile karmaşık bir duruma gelmiştir. Böyle bir ortamda sağlık çalışanları yüksek ahlaki idealleri hayata geçirebilir mi; geçirmesini beklemek ne kadar doğrudur? Doğrusu bu her zaman mümkün değildir. Böylesi durumlar, hekimlerde zamanla başarısızlık duygusu ve mesleki yılgınlık yaratabilir (Kara, 2025b). Topçu'ya göre ahlaki hayatın gayesi, kusursuz sonuçlara varmak değil; kusursuzluğa yönelen iradeyi diri tutmaktır. Onun düşüncesinde esas olan 'zafer' - yani nihai ve eksiksiz başarı - değil, 'sefer'dir: doğru bildiği yolda azimle yürümeye devam etmek (Kara, 2025a; Topçu, 2022b).

Bu kavram çifti hekimliğe uygulandığında ortaya çarpıcı bir tablo çıkar. Hekimlik, yapısı gereği bir 'sefer' mesleğidir: İmkânlar sınırlı, iş yükü ağır, zaman dardır; idari kısıtlamalar ve bürokratik baskılar gündelik pratiği kuşatır. Bütün bu olumsuz şartlarda bile insan onuruna yaraşır özeni sürdürme çabasıdır iyi hekimlik. Bir hekimin hastasına istese de gereken kadar zaman ayıramaması durumuna 'sefer ahlakı' ile bakılırsa, hekim için bu durum bir adım olarak kabul edilir. Bu durumda hekim yoluna umutla ve gayretle devam etmelidir. Benzer şekilde, bir hastanın tedaviye rağmen durumunun kötüleşmesi, terminal bir hastada artık tıbben yapılabileceklerin tükenmesi hekime yenilmişlik duygusu vermesini de sefer anlayışı engeller. Bu ve benzeri durumlarda hekim, "sefere" odaklanmalı, süreçte gösterilen özen, şefkat ve mesleki gayretle vicdani tatmine ulaşıp gayretine devam etmelidir. Bu anlayış, tükenmişliğe karşı manevi destek sağlar. Gerçekten de sağlık hizmetlerinde etik dayanıklılık, mükemmellikte değil; ahlaki çabaya sadakatte yatar (Locke vd., 2025). Topçu'ya göre de asıl olan, mükemmelliğe ulaşmak değildir; mükemmele sadakati koruyarak ilerlemeye devam etmektir. Böylelikle mesleki ahlak, kuru bir ideal olmanın ötesine geçip emek ve sabır isteyen insani bir sefer hâline gelir.

Toprağa ve Tabiata Dönüş: Bütüncül Bir Yaşam Felsefesi

Topçu'nun mesleki ahlak çerçevesi değişik mesleklere (öğretmenler vd.) yönelik önemli tespitler ve öneriler içerir. Bu mesleki ahlak anlayışından, hekim ve diğer sağlık çalışanlarının da istifade etmesi gerektiği kanaatindeyim. Sağlık profesyonellerinin de insan, toplum ve tabiata daha bütüncül bakmasına imkân sağlayabilir. Topçu'nun felsefesinin merkezinde "toprak", "tabiat" ve "Anadolu ruhu" kavramları yer alır (Şafak, 2017; Topçu, 2024b).

Bütüncül Sağlığa Anadolu Ruhuyla Doğal Yaşamda Kavuşmak

Topçu, büyük sanayi ve sermaye merkezli kalkınma modellerini eleştirir; emeği, adaleti ve tabiata hürmeti önceleyen bir toplum düzenini savunur. Bu tasavvuru 'Anadolu sosyalizmi' kavramıyla ifade eder. Burada bir kavram karışıklığını baştan gidermek gerekir: Topçu'nun 'sosyalizm'den anladığı, Marksist sınıf mücadelesine, diyalektik materyalizme veya kolektif mülkiyet modeline dayanan bir ideoloji değildir. O, 'sosyalizm' kelimesini etimolojik köküne sadık kalarak - toplumculuk, içtimaîlik anlamında - kullanır. Nitekim Topçu bu kavramı, Batılı bir ekonomi-politik program olarak değil, İslam'ın adalet, infak ve kul hakkı ilkeleriyle beslenen, Anadolu'nun

tarım toplumu gerçekliğine yaslanan ve ruhçu bir ahlak zeminine oturan yerli bir toplum tasavvuru olarak inşa eder. Buradan hareketle toprak, salt bir üretim aracı değil; milletin sürekliliğini sağlayan 'şahsiyet mayası'dır (Bergen, 2016; Kara, 2012; Topçu, 2024b). Dolayısıyla 'Anadolu sosyalizmi', Marksizmle terminolojik benzerliğe rağmen, epistemolojik ve aksiyolojik kökleri itibarıyla ondan temelden ayrışan, özgün bir düşünce çerçevesidir.

Ona göre, "İnsanın doğayla kurduğu dengeli ilişki hem beden hem de ruh sağlığının temelini oluşturur." (Bergen, 2016; Kösedağ, 2015). Topçu'nun insan ile doğa arasında kurduğu bu sarsılmaz ahlaki denge fikri, günümüzde bilimsel bir zorunluluk olarak öne çıkan 'bütüncül sağlık' ve 'Tek Sağlık' yaklaşımlarının metafizik ve etik izdüşümü olarak okunabilir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından insan, hayvan ve ekosistem sağlığının ayrılmazlığı üzerine inşa edilen 'Tek Sağlık' vizyonu, Topçu'nun yarım asır önce işaret ettiği 'tabiata hürmet' ve 'canlılık dengesi' ilkelerinin günümüz tıbbındaki biyofiziksel karşılığı niteliğindedir. Topçu'nun ruhçu ekolojisi, bugün pandemilerle sarsılan modern dünyaya, sadece teknik bir iş birliğinden öte, doğayla yeniden kurulacak derin bir 'ahlaki sözleşme' teklif etmektedir (WHO, 2023).

Topçu emeğe ve sosyal adalete vurgu yapar. Sağlık hizmetlerine eşit/adil erişim, kamusal sorumluluk ve kâr odaklılığa karşı etik tutum tartışmaları kapsamında Topçu'nun anlayışından istifade edilebilir. Hekim, sadece hasta tedavi edip takip etmez. Onun görev alanı klinik sınırın ötesindedir. Toplum sağlığının korunması, çevre bilincinin sağlanması, insanın varoluş değerlerinin savunulması da hekimlik faaliyetlerindendir (Yükseköğretim Kurulu, 2020). Bu yönüyle Topçu'nun ahlak felsefesi, bu ilkelerle örtüşen bir kavramsal çerçeve oluşturur.

Topçu'ya Göre Sağlık Politikası, Beyin Göçü ve Sosyal Adalet

Topçu, sağlık hizmetinin devlet eliyle ve eşitlikçi bir şekilde verilmesini savunur. Öyle ki Topçu, İngiltere gibi hekimliği sosyalleştiren örnekleri işaret ederek, parası olana itina gösterip yoksula yüz çeviren bir hekimlik anlayışını 'zulümlerin en büyüğü' olarak niteler. Ona göre hastalık bir lüks veya irade meselesi değildir; bu nedenle tedaviye erişim, servet sahiplerinin imtiyazından çıkarılıp kamusal bir teminat altına alınmalıdır. "Hastalık, insan için ne bir lüks, ne de bir irade meselesidir. O hâlde, neden bir millet her çeşit şekilde tedavi edilmek hakkına sahip olmasın?".

Topçu, sağlık, toprak ve iş davasının 'devlet eliyle ıslaha muhtaç' olduğunu açıkça belirtir. Topçu'nun tam gün (Full-time Davası) ve benzeri metinlerde, Türkiye'den Almanya'ya işçi, Amerika'ya doktor gönderilmesini 'milletinden kaçış' ve millî devlet için bir facia olarak nitelemesi, hekim emeğinin sadece ekonomik değil, aynı zamanda ahlaki ve millî bir emanet olarak görülmesi gerektiğine işaret eder. Üniversite profesörünün makamını şahsi kazanca basamak yapması, tıp fakültesinde nepotizm ve kadro suiistimalleri, yalnızca bireysel ahlaki zaaflar olarak değil, kurumsal bir yozlaşma tablosu olarak ele alınır (Topçu, 2025b; Topçu, 2025c). Topçu, toplumda adil olmayan gelir dağılımına sağlık açısından da eleştiri getirir: "Hastahanelerde genç nesiller, ıztırapla yokluk, çaresizlik, vasıtasızlık ve yoksulluk yüzünden can verirlerken, sayfiye yerlerinde binlerle servet sahibi gururla lüks içinde yaşarlar." (Topçu, 2025b, s. 328). Bu perspektif, günümüzde beyin göçü, akademik dürüstlük ve sağlık kurumlarında etik yönetim tartışmalarıyla birlikte okunduğunda, hekimliğin hem bireysel hem kurumsal düzeyde 'emanete sadakat' sınavı verdiğini düşündürmektedir.

Şehirleşme, Yabancılaşma Hastalıklarının Sosyal Reçetesi

Topçu; şehri, insanı toprağından, tabiatından ve nihayetinde ruhundan uzaklaştıran yapay bir mekân olarak görür. Doğaya ve toprağa derin bir anlam atfeden Topçu, modern şehirleri "Ev ve dükkân yığınlarından, biçimsiz sokaklardan ibaret, ışıktan ve estetikten yoksun bir iskelet" olarak nitelendirir. Topçu, şehirler inşa edilirken tabiatın estetik ve manevi dengesinin bilinçsizce değil bilerek bozulduğu tespitini yapar. Böyle bir ortamın, insanı kendi varoluş köklerinden kopartacağını ifade eder. Bu bakımdan şehir, sadece fiziksel bir yerleşim alanı ile sınırlı olmayıp bir yabancılaşma mekânıdır (Şafak, 2017; Topçu, 2024a).

Topçu'nun bu eleştirisi, âdeta günümüzde artan stres, anksiyete ve depresyon gibi 'şehir hastalıkları' için yazılmış sosyolojik bir reçete gibidir. Bu anlayış, sadece biyolojik verilerle yetinmemeyi, hastaların yaşadığı çevrenin ruhsal etkilerini ve modern yaşamın dayattığı zihinsel yüklerini dikkate almaları ufkunu sunar hekimlere. Hekimlerin farmakolojik çözümler dışındaki hususları da dikkate almasına işaret edilir: doğayla yeniden temas, stres yönetimi ve yaşam tarzı değişiklikleri gibi sosyal, çevresel yaklaşımlar vb. tıp pratiği, daha insani ve varoluşsal bir derinlikle buluşturabilir bu anlayışla. Sonuçta, tıbbın özündeki "şifa" kavramı ihya edilir. Bireysel ve toplumsal sağlık bütüncül bir anlam kazanmış olur.

Sonuç: Nurettin Topçu'dan Günümüzün ve Geleceğin Hekimine Mesaj

Nurettin Topçu fikir yazılarına 1934'te başlamış ve ölümüne yakın bir döneme kadar, yaklaşık 40 yıl devam ettirmiştir (1974) (Topçu, 2025b; Topçu, 2025c). Ahlak ağırlıklı bir yaklaşım benimseyerek, hayatın farklı alanlarına dair görüşlerini okuyucularla paylaşmıştır. Ölümünün üzerinden yarım asır geçmesine rağmen, özellikle eğitim alanında sunduğu analiz ve çözüm önerileri hâlâ başvuru kaynağı olarak kullanılmaktadır. Tıp ve sağlık konularına doğrudan değinmemiş olsa da, metinlerinde satır aralarında serpiştirdiği düşünceler büyük ilgi uyandırmaktadır. Hekimlikte ve diğer sağlık mesleklerinde sıkça rastlanan anlam kaybı, ahlaka dayalı bir yaklaşımın ele alınmasını zorunlu kılan bir dizi düşünce ve ilkeyi ortaya koyuyor. Topçu'nun felsefesindeki temel sorun, "maddenin temsil ettiği değerlerin ruhsal kıymetler üzerindeki hâkimiyeti" olarak tanımlanırken; çözüm ise "ruhun maddeye yeniden rehberlik ettiği bir nizamın kurulması" arayışıyla şekilleniyor (Karaman, 2009 ve Topluk, 2019; Yerlikaya, 2016).

Günümüzde tıp alanındaki aşırı uzmanlaşma, performans ve kâr baskısı, 'madde tahakkümü'nün güncel yansımaları olarak sıkça gündemde. Bu bağlamda Topçu'nun 'sorumluluk', 'yaşatma aşkı' ve 'hizmet ahlakı' kavramları, tıpta ruhu yeniden ön plana çıkaran bir denge fırsatı sunuyor. Teknoloji çılgın bir hızla ilerlerken, insani dokunuş geride kalıyor; bu ortamda Topçu'nun düşünceleri, hekimliğe vicdani bir nefes aldırabilir. 'İsyan ahlakı' olarak nitelendirdiği tutum, mesleki onuru korumak ve insani değerlere sadık kalmak için bir cesaret

kaynağı işlevi görür. ‘Maarif davası’ ise ahlak ve vicdan temelli bir tıp eğitiminin ne kadar vazgeçilmez olduğunu hatırlatır. ‘Hareket felsefesi’, tedaviyi yalnızca bir teknik prosedür olmaktan kurtarıp insan varoluşuna dokunan bir anlam arayışını mümkün kılar. ‘Anadolu ruhu’ ise, insanın doğa, toprak ve anlamla kurduğu bağın bütüncül bir sağlık anlayışına nasıl katkı sağlayabileceğini gösterir. Bu perspektif, ‘iyi hekimlik’ değerlerini kalıplaşmış davranışların ötesine taşıyarak vicdani bir sorumluluk ve metafizik derinliğin eksenine oturtur. Topçu’nun ‘isyan’ kavrayışı, kaotik bir ayaklanmadan ziyade, süreklilik taşıyan ahlaki bir direnişin ifadesidir.

Nihayetinde Topçu’nun entelektüel mirası, çağdaş tıbbın bürokratik ve yapısal krizlerine pragmatik çözümler vadetmez; bilakis tıp pratiğini sarsıcı bir ontolojik yüzleşmeye davet eder. Metalaşan ve mekanikleşen modern sağlık aygıtı karşısında asıl mesele; hekimin, vicdani otonomisini koruyarak nasıl ‘şifa veren insan’ kalabileceğidir. Topçu’nun isyan ahlakı, salt kuramsal bir rehber olmanın ötesinde, tam da bu varoluşsal direnişin sarsılmaz fikrî zeminini tesis eder. “Zafer değil sefer” ilkesi de, hekimlikte nihai ve kusursuz bir sonuca ulaşma iddiasından çok, her koşulda ahlaki tutarlılığı koruyarak yola devam etmenin erdemine işaret eder. Elbette Nurettin Topçu, bugünkü anlamıyla “değer-temelli sağlık sistemi” tartışmalarının tarihsel öncüsü değildir ancak insanı, hizmeti ve adaleti merkeze alan ahlak tasavvuru, günümüzün değer-temelli sağlık ve hümanistik tıp yaklaşımlarıyla uyum içinde, onlarla paralel okunabilecek bir etik iklim sunarak modern tıbbın ruhunu canlı tutmaya ve bu alan için eleştirel bir ilham kaynağı olmaya katkıda bulunabilir.

Topçu tıp üzerine değil, insanın ahlaki varoluşu üzerine yazmış büyük bir düşünürdür; sağlık ve hekimlikle ilgili satırları, geniş külliyatının içinde dağınık ve dolaylıdır. Onu bir nostalji figürüne indirgemek kadar, doğrudan bir tıp etiği kuramcısı gibi sunmak da yanıltıcı olur. Asıl verimli yol, Topçu’nun insanı merkeze alan genel ahlak çağrısını, tıp pratiğinin kendi diliyle yeniden düşünmektir: hastanın hikâyesine kulak vermek, her muayenede vicdanı ve hizmet bilincini yoklamak, tükenmişliğin en koyu anlarında bile ‘yaşatma aşkı’nı diri tutmak. Bunlar büyük jestler değil, küçük ama kararlı tercihlerdir.

Kaynaklar

Aghakhani, N., Ewalds-Kvist, B. M., Aghakhani, S., & Abolfathpour, P. (2025). Navigating ethical challenges: The role of moral distress, sensitivity, and resilience in the nursing profession. SAGE Open Nursing, 11, 23779608251348833.

Basat, O. (2022). Nurettin Topçu’nun “İsyan Ahlâkı” eserine özel atıfla: Öğretmen ve şahsiyet mimarisi. Millî Eğitim, 51(233), 791–816.

Bergen, L. (2016). Nurettin Topçu’nun Yarınki Türkiye’si. C. Gündoğdu, Z. İşcan & M. Cengiz (Ed.), Nurettin Topçu Sempozyumu (15–16 Nisan 2016) içinde (s. 229–307). Atatürk Üniversitesi.

Cihan, M. (2016). Nurettin Topçu ve ahlak eğitimi. Atatürk Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi, 56, 1387–1398.

Çelik, F. (2016). Tıp eğitiminde eksikliğin adı: Tıpta insan bilimleri. Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi, 28, 90–91.

Çetin, E. (2017). Nurettin Topçu’nun ahlâkî sorunlarımıza ilişkin görüşlerinin günümüze yansımaları. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi, 15(30), 453–464.

Engelhardt, H. T. Jr., & Jotterand, F. (Ed.). (2008). The philosophy of medicine reborn: A Pellegrino reader. University of Notre Dame Press.

Fins, J. J. (2015). Edmund D. Pellegrino, MD 1920–2013. Transactions of the American Clinical and Climatological Association, 126, cii-cix.

Gündoğan, A. O. (2016). Topçu ve hareket felsefesi. Temaşa Erciyes Üniversitesi Felsefe Bölümü Dergisi, 4, 24–37.

Güneş, G. (2016). Türkiye’nin maarif davası üzerine. Türkiye Eğitim Dergisi, 1, 98–102.

Hartog, P. (2008). Blondel remembered: His philosophical analysis of the “quest for the historical Jesus”. Themelios, 33(1), 29–44.

İrğat, M. (2016). Nurettin Topçu düşüncesinde varoluşsal bir argüman olarak iradenin tarihsel hareketi. Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4(36), 311–323.

Kara, İ. (2012). Topçu, Nurettin. TDV İslâm Ansiklopedisi içinde (Cilt 41, s. 250–252).

Kara, İ. (2025a). Nurettin Topçu biyografisi ile yazıları, fikriyatı ve mücadelesi arasında birkaç irtibat notu. M. F. Birgül & İ. Durmaz (Haz.), “Yıldırım’ın Huzurunda”: Bir Mütefekkir – 50. Vefat Yıl Dönümü Anısına – Nurettin Topçu içinde (s. 14–42). Bursa Yıldırım Belediyesi.

Kara, İ. (2025b). Prof. Dr. İsmail Kara ile Nurettin Topçu düşüncesi, tıp ve sağlık ahlakı üzerine röportaj. Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi, 2025;67:6–13.

Karaman, H. (2009). Nurettin Topçu’nun felsefesinde “İsyan Ahlâkı”. Muhafazakâr Düşünce Dergisi, 5(19–20), 79–90.

Koç, Y. & Topluk, G. (2019). Topçu külliyatının ana kavramlarını birbirine bağlayan düğüm noktası: Madde-ruh düalitesi. Muhafazakâr Düşünce Dergisi, 16(57), 81–103.

Kösedağ, S. (2015). Nurettin Topçu’da insan ve şahsiyet kavramı. FLSF (Felsefe ve Sosyal Bilimler Dergisi), 20, 143–158.

Kuvancı, C. (2020). Nurettin Topçu’ya göre “var olmak” ne demektir? Bilimname, 41, 579–602.

Locke, A., Rodgers, T. L. & Dobson, M. L. (2025). Moral distress as a critical driver of burnout in medicine. Global Advances in Integrative Medicine and Health, 14.

Maunder, R. G., Heeney, N. D., Greenberg, R. A., vd. (2023). The relationship between moral distress, burnout, and considering leaving a hospital job during the COVID-19 pandemic: A longitudinal survey. BMC Nursing, 22(1), 243.

Öner, E. (2016). Nurettin Topçu ve Albert Camus’de ahlâk: İsyan/başkaldırı ahlâkı. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2(3), 49–62.

Özbay, H. (2021). Otorite ile özgürlük arasındaki diyalektiği aşmak: Hürriyetin imkânı açısından Nurettin Topçu’da birey-devlet ilişkisi. Marife Dini Araştırmalar Dergisi, 21(2), 871–890.

Öztürk, R. (2016). Medeniyetimizde “iyi hekimlik” değerleri. Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi, 41, 28–31.

Parsa-Parsi, R. W., Gillon, R. & Wiesing, U. (2024). The revised International Code of Medical Ethics: An exercise in international professional ethical self-regulation. Journal of Medical Ethics, 50(3), 163–168.

Schattner, A. (2020). The essence of humanistic medicine. QJM: An International Journal of Medicine, 113(1), 3–4.

Şafak, G. N. (2017). Nurettin Topçu’nun düşüncesinde kâinat ve şehir meseleleri. II. Türk İslam Siyasi Düşüncesi Kongresi Bildiriler Kitabı içinde (26–28 Ekim 2017, Kütahya).

Şimşek, İ. (2017). Nurettin Topçu felsefesinde özgürlük düşüncesi. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 10(52), 1376–1384.

Topçu, N. (2012). İradenin Davası, Devlet ve Demokrasi. Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1968).

Topçu, N. (2022a). İsyan Ahlâkı (26. Baskı). Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1934).

Topçu, N. (2022b). Ahlâk Nizamı (14. Baskı). Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1960).

Topçu, N. (2024a). Var Olmak (37. Baskı). Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1965).

Topçu, N. (2024b). Yarınki Türkiye (24. Baskı). Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1960).

Topçu, N. (2025a). Türkiye’nin Maarif Davası (45. Baskı). Dergâh Yayınları. (Orijinal eser basım tarihi 1960).

Topçu, N. (2025b). Tarih Sırasına Göre Bütün Yazıları, Cilt 1 (Haz. E. Erverdi & İ. Kara). Dergâh Yayınları.

Topçu, N. (2025c). Tarih Sırasına Göre Bütün Yazıları, Cilt 2 (Haz. E. Erverdi & İ. Kara). Dergâh Yayınları.

Turan, S. (2016). Nurettin Topçu ve Modern Okulun Açmazları. C. Gündoğdu, M. Z. İşcan & M. Cengiz (Ed.), Nurettin Topçu içinde (s. 375–381). Atatürk Üniversitesi.

Varkey, B. (2021). Principles of Clinical Ethics and Their Application to Practice. Medical Principles and Practice, 30(1), 17–28.

World Health Organization (WHO). (2023). The One Health approach and Key Recommendations of the Quadripartite.

World Medical Association (WMA). (2022). WMA International Code of Medical Ethics.

Yerlikaya, T. (2016). Teknolojik modernlik eleştirisi: Nurettin Topçu örneği ve mukayeseli bir inceleme. Temaşa Erciyes Üniversitesi Felsefe Bölümü Dergisi, 4, 61–91.

Yükseköğretim Kurulu (YÖK). (2020). Mezuniyet Öncesi Tıp Eğitimi Ulusal Çekirdek Eğitim Programı (UÇEP 2020).

Tıp eğitiminde dijitalleşme ve yapay zekâ

Doç. Dr. Ahmet Murt

2010 yılında Cerrahpaşa Tıp Fakültesinden mezun olduktan sonra yine aynı fakültede İç Hastalıkları uzmanlık ve Nefroloji yan dal uzmanlık eğitimlerini tamamladı. Dr. Murt, hâlen Cerrahpaşa Tıp Fakültesinde Nefroloji öğretim üyesi olarak, böbrek nakli, transplantasyon immünoloji ve böbrek hastalıklarının immünolojik temeli üzerine ileri çalışmalarına devam etmektedir. Tıp Eğitimi alanındaki yüksek lisansını 2014 yılında Edinburgh Üniversitesinde tamamlamış olan Dr. Murt, mezuniyet öncesi tıp eğitimi, asistanlık eğitimi ve sürekli tıp eğitimi ile ilgili araştırmalar yapmakta ve gözlemsel yazılar kaleme almaktadır.

21. yüzyılın başından itibaren giderek gelişen bilişim teknolojileri senkron ve asenkron çevrim içi (online) öğrenme olanaklarının arttırarak öğrenenlerin zaman ve mekândan bağımsız bilgiye erişimini kolaylaştırmış; interaktif öğrenme yönetim sistemleri, video temelli içerikler ve çevrim içi tartışma platformları da eğitimde etkinliğinin arttırılması amacıyla kullanılır olmuştur.

Tıp Eğitiminde Dijital Öğrenme Ekosistemi

Eğitim teknolojileri odaklı yapılan araştırmalar dijital öğrenme ortamlarının öğrencilerin, konuları, kendi öğrenme eğrilerine uygun olarak kavramalarına olanak sağlayarak öz-yönetimli öğrenme (self-directed learning) becerilerini güçlendirdiğini göstermektedir. Günümüzün artan rekabet ortamında, çevrim içi eğitimler zaman ve mekân esnekliği sağlayabilmektedir. Öğrenciler nasıl öğrenebildiklerini (görsel, işitsel veya yazılı not alarak) daha kolay keşfedebilmektedirler. Ayrıca, dijital öğrenme ortamları öğrencileri eleştirel düşünmeye de yöneltebilir. Belirli bir öğrenme motivasyonunu süreğen kılması, öğrencileri takip ettikleri ders konusunda ileri araştırmalar yapmaya yönelterek yaşam boyu öğrenme kavramı ile tanıştırmaktadır.

Senkron Çevrim İçi (Online) Öğrenme

Aslında belki de tıp eğitiminde dijitalizasyondan en çok anlaşılan kavram derslerin uzaktan, web tabanlı bir platform kullanılarak çevrim içi yapılıyor olmasıdır. Çevrim içi dersler, özellikle COVID-19 pandemisi ile beraber bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış, önceleri geçici bir uygulama olduğu düşünülmüş, sonrasında ise iyice yaygınlaşarak kalıcı bir eğitim/öğretim seçeneği hâline gelmiştir. Akademisyen ve öğrencilerin gerçek zamanlı olarak bir araya getirilmesi ile çoğu kez büyük amfi derslerine benzer bir katılımla gerçekleştirilebilmekte ve dinleyiciler dersi veren akademisyene eş zamanlı sorular yöneltebilmektedir. Her ne kadar etkileşim konusunda yetersiz kalabileceği yönünde eleştiriler olsa da, birçok çevrim içi sunum platformu belirli aralıklarla küçük gruplara bölünmeye, o küçük gruplarda tartışmaya ve sonra tekrar büyük grupla bir araya gelmeye fırsat oluşturarak bu alanda amfi derslerine üstünlük dahi kurabilir.

Bu öğrenme metodunun açmazları arasında uygun saatlerin seçilmesindeki karmaşa gösterilebilir. Ayrıca tüm öğrencilerin benzer bağlantı imkânlarına sahip olmaması bazı kesintilere neden olabilmektedir. Öğrencilerimizin genel olarak bilgisayarı veya yazılımları kullanmalarında yeterince becerikli olduklarını gözlemlesek de birkaç noktayı vurgulamak yerinde olur: Mesaj kısmına çok gerekli olmadıkça büyük harfle yazmamak ve yine mesajlaşma kısmını sadece gerektiği kadar kullanmak gibi. Ayrıca resmî olarak ilan edilmiş derslerde, dersin sessiz ve izole yerde dinlenmesi de hem derse hem de diğer arkadaşlarına gösterilecek saygının gereği olur.

Asenkron Çevrim İçi Öğrenme

Günümüzde her kademeden öğrenenlerin (öğrenci, asistan, uzman, akademisyen) en sık başvurdukları dijital öğrenme metodudur. Bu öğrenme yönteminde; önceden kayda alınan dersler, kurslar veya bazı özellikli tıbbi uygulamalar sonradan takip edilmek suretiyle anlaşılmaya çalışılır. Birçok dijital kitap ve klinik uygulama rehberi de bu yöntem çerçevesinde takip edilebilmektedir.

Bu yöntemin önemli bir avantajı sunduğu esnekliktir. Öğretici materyal en uygun zaman ve mekânda takip edilebilir. Ayrıca kayıtlar birden fazla defa tekrar izlenebildiği gibi tercih edilen hıza göre (daha yavaş veya daha hızlı) de ayarlanabilir.

Bazı dezavantajları etkileşime izin vermemesi (örneğin sunumu yapan kişiye eş zamanlı bir soru yöneltilemez) ve derslerin ne kadar takip edildiğinin tam olarak bilinememesidir. Bu amaç çerçevesinde öğrenme takip ve yönetim sistemleri

(learning management systems – LMS) geliştirilmektedir. Kişisel şifrelerle kaydolunan bu kurumsal platformlar ayrıca tartışma forumları da içerebilmektedir. Bu sistemler sayesinde hangi derslerin takip edildiği, hangilerinin sona kadar izlendiği, hangileri ile ilgili tartışma forumlarına sorular veya yorumlar iletildiği ile ilgili veriler toplanabilmektedir. Yine öğrenci geri bildirimleri ve ölçme ve değerlendirme de bu sistemler aracılığı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Bazı durumlarda öğretim üyeleri, öğrencileri farklı veri tabanlarındaki kayıtlara yöneltebilmekte veya öğrenciler bunlara kendileri ulaşabilmektedir. Bu asenkron çevrim içi öğrenme araçları öğrenme hedefleri çerçevesinde yapılandırılmamış olduğunda, belirli bir yapısı olmayan pasif ve rastlantısal öğrenmeye neden olabilirler. Bu nedenle ders materyallerinin belirli bir öğrenme hedefine uygun olduğundan emin olunarak takip edilmesi önerilmektedir.

Senkron veya asenkron çevrim içi öğrenmede öğrencileri bekleyen bir tehdit de ekran karşısında geçirilen uzun sürelerdir. Bu risk göz önüne alınarak, programlardaki çevrim içi dersler üst üste çok uzun süreler almayacak şekilde tasarlanmalıdır. Ekran karşısında, her 20 dakikada bir 20 saniye boyunca en az 6-8 m uzağa bakmak gözleri dinlendiren bir yöntem olarak düşünülebilir. Yine dersler ve seminerler 60 dakikayı geçmemeli ve sonrasında bir ders daha varsa en az 10 dakika ekrandan uzak durulmalıdır. Ekran başında gözlerde ağrı, yanma veya kaşıntı gibi semptomların ekran yorgunluğuna işaret edebileceği akılda tutulmalıdır. Derslere evden bağlanılıyorsa diğer online platformlar ve sosyal medya uygulamaları öğrencinin dikkatini negatif etkileyebilecek bileşenlerdir. Bu nedenle öğrenme takip ve yönetim sistemlerinin ders dışı başka bir uygulamaya geçilmesine izin vermeyecek şekilde programlanması önerilmektedir.

Harmanlanmış (Hibrit) ve Ters Yüz Öğrenme

Hibrit eğitim, yüz yüze ve dijital öğretim yöntemlerinin bir arada kullanıldığı, öğrenme sürecini daha esnek ve etkileşimli hâle getiren bir modeldir.

Özellikle ters-yüz (flipped) sınıf veya öğrenme metodu; bu hibrit metotlar içerisinde öğrenci katılımını ve aktif katılımı sağlayacak bir metot olarak geliştirilmiştir. Bu metotta, öğrencilere önce evde kendi kendilerine takip edip çalışacakları çevrim için bir materyal sunulur. Öğrenciler bunlar üzerine çalışıp hazırlandıktan sonra derste bir araya gelerek bu konuyu hocalarıyla tartışıp ayrıntılandırırlar. Bir araya gelinen oturum fiziksel olarak amfide olabileceği gibi çevrimi içi bir platformda da olabilmektedir. Bu modelde teorik bilgi aktarımı esas ders öncesinde çevrim içi ortama taşınmaktadır. Sonrasında yapılan yüz yüze ders süresi klinik karar verme, tartışma ve uygulamalar için değerlendirilebilmektedir. Bu sayede öğrencilerin derslere aktif katılımı arttırılmaktadır. Hibrit modeller, öğrenci memnuniyeti, akademik başarı ve klinik yeterlilik puanları üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır.

Yine gerek olgu-temelli öğrenme (case-based learning) gerekse probleme dayalı öğrenme (PDÖ) oturumlarının çevrim içi araçlarla desteklenmesi hibrit modeller için diğer örnekledir.

Simülasyon Tabanlı Tıp Eğitimi

Simülasyon teknolojileri—yüksek doğruluklu mankenler, sanal gerçeklik (Virtual Reality), artırılmış gerçeklik (Augmented Reality), bilgisayar tabanlı senaryolar—tıp eğitiminde özellikle de uygulamalı tıp eğitiminde yeni dönemin en önemli simge uygulamalarındandır. Simülasyon, öğrencinin gerçek hasta riski olmaksızın;

- klinik karar verme becerileri geliştirmesini,
- karmaşık acil durumları deneyimlemesini,
- ekip içi iletişim ve rol paylaşımı becerilerini güçlendirmesini,
- tekrarlanabilir senaryolar yoluyla standardize değerlendirmeye tabi tutulmasını mümkün kılmaktadır.

Yüksek gerçeklikli simülasyonlar, özellikle anesteziyoloji, acil tıp, cerrahi ve yoğun bakım eğitiminde önemli kazanımlar sunmaktadır. Bu sayede hem karmaşık klinik durumlarda öğrencilerin direkt görev almasının oluşturabileceği hasta güvenliği baskısı hem de nispeten az görülen klinik durumları hiç görmemiş olma ihtimali ortadan kaldırılmış olur. Bununla birlikte simülasyonun maliyeti ve öğretim üyesi eğitimi gereksinimi, bu yöntemin geniş ölçekli kullanımında sınırlayıcı faktörler olarak değerlendirilmektedir. Hazır VR uygulamaları satın alınabileceği gibi, üniversitelerimizin Ar-Ge faaliyeti olarak bunları geliştirmeleri de mümkün olmaktadır. Daha ideal olan, ülkemiz ihtiyaçlarına uygun yazılımların üniversitelerimiz tarafından geliştirilmesidir.

Online Sınavlar ve Geri Bildirim

Günümüzde artık neredeyse tüm tıp fakülteleri web tabanlı sistemlerde soru havuzları oluşturmakta ve yaptıkları sınavlarda buradaki soruları kullanmaktadırlar. Bu sistemler aracılığıyla; soruların zorluk derecesi, çeldiricilerin ne kadar doğru tasarlandığı ve soruların öğrenim çıktılarıyla olan uyumu ortaya konabilmektedir.

Ayrıca, soru havuzları online sınavlar için de kullanılabilmekte ve öğrencilere anlık geri bildirimler verilebilmektedir. Öğrencilerin karneleri web tabanlı olarak oluşturularak değerlendirme sistemleri ile entegrasyon sağlanabilir. Bu kapsamda, öğrencilerin becerileri, uygulamaları, belki dâhil oldukları araştırma ve sosyal sorumluluk projelerinin de yer aldığı birer e-portfolyosu da oluşmuş olur.

Yine OSCE'ler (Nesnel Yapılandırılmış Klinik Sınavlar) geliştirilen uygulamalarla sanal ortamlarda yapılabilir.

Takıma Dayalı Öğrenme Uygulamaları

Oluşturulan online forumlar ve tartışma platformları öğrencilerin konuları kendi aralarında da tartışmalarına olanak sağlayarak akran öğrenmesine aracılık edebilir. Yine bu forumlarda öğrenciler, birçok eğitici doküman, ders notu, demonstrasyon veya video paylaşılarak birbirlerinin öğrenmelerini kolaylaştırabilirler. Bu platformlardaki paylaşımlar, çok disiplinli ve disiplinler arası yaklaşımın bir mini-simülasyonu olarak tıp mesleğinin konsültasyona dayalı temelini öğrencilere aktarmış olur.

Mobil ve Mikro-Öğrenme

Mobil uygulamalar günümüz gündelik hayatının ayrılmaz birer parçası olmuştur. Tıp fakülteleri kurumsal olarak uygulamalar geliştirebilecekleri gibi gerek akademisyenler gerekse öğrencilerimiz kendi inisiyatifleriyle tıp eğitimi eksenli

mobil uygulamalar geliştirebilirler. Bu uygulamalar, bilgi kartları (flash cards) (bazı kavramların hızlı hatırlanarak pekiştirilmesini sağlayan soru veya şekillerden oluşan bilgilendirme kutuları) mantığı ile oluşturulabileceği gibi, öğretici ses kayıtları (podcast) veya kısa videolar da eklenebilir.

Yapay Zekâ Destekli Tıp Eğitimi

Yapay zekâ (YZ), eğitimde veri temelli karar verme süreçlerini güçlendirerek eğitim ve öğretimi geliştirmeye adaydır. YZ, kısa süreler içerisinde daha fazla bilgiye ulaşılabilmesini sağlayarak ciddi bir zaman tasarrufu sağlayabilmektedir. Bununla beraber büyük verilerin analiz edilmesi ve makine öğrenmesi kavramlarıyla da bir arada düşünülmelidir. Mezuniyet öncesi, asistanlık eğitimi ve sürekli tıp eğitimi süreçlerinde kullanılabilen YZ'nin tıp eğitimi ortamlarına sundukları şu alt başlıklarda toplanabilir:

Kişiselleştirilmiş Öğrenme Analitiği

YZ algoritmaları öğrenenlerin performans verilerini işleyerek eksiklerini saptayabilir, zorluk düzeyine göre uyarlanmış içerikler sunabilir ve öğretim üyelerine öğrencileri ile ilgili ayrıntılı öğrenme analitiği raporları sağlayabilir. Böylece eğitim süreci bireyselleştirilmiş bir yapıya kavuşturulabilmektedir.

YZ destekli öğrenme analitiği, klasik ölçme-değerlendirme yöntemlerinden farklı olarak yalnızca sonuç odaklı olmayan, öğrenme sürecinin tamamını kapsayan süreç temelli bir değerlendirme anlayışı sunar. Öğrencilerin; ders materyallerine erişim sıklığı, video izleme davranışları, sınavlardaki yanıt süreleri, klinik vaka çözümlerindeki karar örüntüleri, forum ve tartışma katılımları gibi çok boyutlu verileri eş zamanlı olarak analiz edilebilmekte ve bu verilerden öğrenme profilleri oluşturulabilmektedir.

Kişiselleştirilmiş Öğrenme Yollarının Oluşturulması

Makine öğrenmesi modelleri, öğrencilerin güçlü ve zayıf yönlerini erken dönemde saptayarak her birey için özelleştirilmiş öğrenme yolları (personalized learning pathways) önerebilmektedir. Örneğin farmakoloji derslerinde farmakokinetik hesaplamalarda zorlanan bir öğrenci için ek mikro-öğrenme modülleri, görsel anlatımlar veya simülasyon destekli vaka çalışmaları otomatik olarak önerilebilir. Bu yaklaşım, klasik "tek tip müfredat" anlayışının ötesine geçerek yeterlik temelli ve bireysel hızda ilerleyen bir öğrenme modeli ortaya koymaktadır.

Erken Uyarı Sistemleri ve Akademik Risk Tahmini

YZ tabanlı erken uyarı sistemleri, belirli davranış örüntülerini (derslere erişimin azalması, sınav performansında ani düşüş, LMS'de etkileşimlerinin zayıfladığının görülmesi vb.) analiz ederek akademik başarısızlık riski taşıyan öğrencileri önceden tespit edebilmektedir. Bu sayede öğretim üyeleri ve danışmanlar, sorun ortaya çıktıktan sonra değil, henüz klinik veya akademik yetersizlik belirginleşmeden müdahale edebilmekte; bireysel rehberlik, danışmanlık veya destek programları planlanabilmektedir.

Klinik Akıl Yürütme Süreçlerinin Analizi

YZ destekli öğrenme analitiğinin en yenilikçi kullanım alanlarından biri, öğrencilerin klinik akıl yürütme süreçlerinin modellenmesidir. Sanal hasta platformları veya simülasyon ortamlarında yapılan her tanısal tercih, sistem tarafından analiz edilerek; hangi aşamalarda hatalı çıkarımlar yapıldığı, hangi bilgi boşluklarının karar süreçlerini etkilediği, hangi klinik ipuçlarının gözden kaçırıldığı gibi veriler ayrıntılı olarak raporlanabilmektedir. Bu tür analizler, öğretim üyelerine yalnızca "doğru-yanlış" bilgisi sunmak yerine, öğrencinin düşünme biçimini görünür kılarak derinlemesine geri bildirim verilmesini olanaklı hâle getirmektedir.

Öğretim Tasarımının Kanıta Dayalı Olarak İyileştirilmesi

Toplanan büyük ölçekli öğrenme verileri, eğitim programlarının sürekli iyileştirilmesi için stratejik bir kaynak oluşturmaktadır. Hangi modüllerin öğrenme çıktılarıyla daha yüksek düzeyde ilişkili olduğu, hangi öğretim yöntemlerinin öğrenci etkileşimini artırdığı veya hangi sınav sorularının ayırt edicilik gücünün düşük olduğu, YZ destekli raporlama sistemleriyle ortaya konabilen göstergelere örnek olarak verilebilir. Böylece müfredat geliştirme süreçleri kanıta dayalı bir zemine taşınabilmektedir.

Akıllı Simülasyon Sistemleri ve Sanal Hastalar

Akıllı simülasyon sistemleri ve sanal hasta (virtual patient) uygulamaları, tıp eğitiminde klinik yeterliklerin güvenli, standartlaştırılabilir ve tekrarlanabilir ortamlarda kazandırılmasına olanak sağlayan en yenilikçi öğrenme araçları arasında yer almaktadır. Bu sistemler, yalnızca beceri kazandırmayı değil; aynı zamanda klinik akıl yürütme, karar verme ve profesyonel tutumların yapılandırılmasını hedefleyen çok katmanlı öğrenme ortamları sunmaktadır.

Güncel YZ destekli sanal hasta platformları öğrencinin her klinik tercihini analiz ederek dinamik biçimde senaryoyu yeniden yapılandırabilmektedir. Öğrencinin; öykü alma sırasında sorduğu sorular, seçtiği fizik muayene adımları, istediği tetkikler, koyduğu ön tanılar ve başlattığı tedavi yaklaşımları gibi bileşenler algoritmalar tarafından değerlendirilmekte ve hasta senaryosu bu tercihlere göre farklı klinik sonuçlar verecek şekilde yapılandırılmaktadır. Bu yaklaşım, gerçek klinik pratiğin belirsizlik ve çok seçeneklilik içeren doğasını simüle ederek öğrenmenin özgünlüğünü artırmaktadır.

Otomatize Değerlendirme ve Geri Bildirim

Günümüz tıp eğitiminde ölçme ve değerlendirme süreçleri yalnızca öğrencinin bilgi düzeyini belirlemekle kalmamalı, aynı zamanda klinik yeterlik, iletişim becerileri ve profesyonel tutum gibi çok boyutlu yetkinlik alanlarını da kapsayan bir yapıya sahip olmalıdır. YZ destekli otomatik değerlendirme sistemleri, bu karmaşık süreçleri daha nesnel, standartlaştırılabilir ve zaman etkin bir biçimde yürütme potansiyeli sunmaktadır.

Klasik sınav sistemleri çoğunlukla öğrencinin yalnızca sonuca ulaşıp ulaşmadığını değerlendirmektedir. Buna karşın YZ tabanlı otomatik değerlendirme sistemleri, öğrencinin performans sürecini de analiz ederek; yanıt süreleri, karar basamaklarının sıralaması, hata örüntüleri ve geri dönüş (backtracking) davranışları gibi değişkenleri dikkate alan çok boyutlu performans profilleri oluşturmaktadır. Bu sayede, öğrencinin yalnızca "ne bildiği" değil, "nasıl düşündüğü" de görünür hâle gelmektedir.

Otomatize değerlendirme verileri, öğrencinin eğitim süreci boyunca biriken performans kayıtlarıyla entegre edilerek dijital e-portfolyolar oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu portfolyolar, yalnızca dönem sonu değerlendirmeleri için değil; yeterlik temelli tıp eğitimi

anlayışı doğrultusunda öğrencinin gelişim seyrinin uzunlamasına izlenmesi açısından da değerli bir veri kaynağı sunmaktadır.

Eğitim İçeriği Üretimi

Geleneksel içerik üretimi büyük ölçüde öğretim üyesinin bireysel emeğine ve zamana bağlıyken, YZ destekli sistemler kısa sürede büyük hacimli, güncel ve pedagojik olarak yapılandırılmış öğrenme materyallerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Üretken YZ modelleri, belirlenen öğrenme hedeflerine uygun olarak; klinik vaka senaryoları, yapılandırılmış problem listeleri, tanı ve tedavi algoritmaları ve özet ders notları gibi içerikleri farklı zorluk düzeylerinde üretebilmektedir. Bu sayede aynı konunun, temel, orta ve ileri düzey varyasyonları hazırlanarak dikey entegrasyon desteklenmekte ve öğrencilerin bilişsel düzeylerine göre uyarlanmış öğrenme materyalleri sağlanabilmektedir.

YZ tabanlı görsel üretim ve işleme araçları, anatomi, histoloji ve radyoloji gibi alanlarda yüksek kaliteli diyagramlar, etkileşimli şemalar ve animasyonlar oluşturulmasına olanak vermektedir. Karmaşık fizyopatolojik süreçlerin üç boyutlu modellerle veya kısa animasyonlarla sunulması, soyut bilgilerin somutlaştırılmasını sağlayarak özellikle görsel öğrenme tarzı baskın olan öğrenciler için öğrenmeyi kolaylaştırabilmektedir.

Sınırlılıklar ve Etik Boyut

Teknolojik yeniliklerin sunduğu avantajlara karşın çeşitli sınırlılıklar ve etik sorunlar da bulunmaktadır. Birçoğu aşağıda paylaşılan bu bileşenlere çözüm önerilerini geliştirmek de tıp eğitiminin güncel konuları arasında yer almaktadır:

- Erişim problemleri farklı bölgelerde fırsat eşitsizliği nedeni olabilmektedir.
- Öğretim üyelerinin teknolojik adaptasyon gereksinimi, dijital platformlarının birçok özelliğinin ideal kullanılmamasına neden olmaktadır.
- Dijital araçların aşırı kullanımının öğrencilerde bilişsel yükü artırma riski mevcuttur. Doğal olarak öğrenilebilecek miktardan çok daha fazlasına maruziyet, tükenmişliğe yol açabilir.
- Teknoloji, klinik deneyimin yerini tamamen alamayacağından, özellikle klinik branşlarda "yaparak öğrenme" fırsatları oluşturulmaya devam edilmelidir.
- Bazı durumlarda öğrenim hedefleriyle uygun eşleşmemiş yöntemlerin kullanılması, birçok dijital platforma gereksiz yatırım yapılması nedeni olabilmektedir.
- YZ destekli içerik üretimi ciddi kolaylıklar sunsa da, kaynak gösterimi, intihal riski ve bilimsel doğruluk konularında dikkatli olunmalıdır. Üretilen materyallerin mutlaka alan uzmanı tarafından gözden geçirilmesi ve akademik bütünlük ilkeleri çerçevesinde kullanılması gerekmektedir.

Öğrenme analitiği uygulamalarında en önemli tartışma alanlarından biri kişisel verilerin korunması ve algoritmik şeffaflıktır. Öğrencilerin performans verilerinin nasıl saklandığı, kimlerin bu verilere erişebildiği ve YZ sistemlerinin hangi kriterlere göre karar ürettiği açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca algoritmik yanlılık (algorithmic bias) riski göz önünde bulundurularak, modellerin farklı bilişsel düzeye sahip öğrenciler üzerinde tutarlı sonuçlar üretip üretmediği düzenli olarak kontrol edilmelidir.

YZ destekli öğrenme analitiği, tıp eğitiminde pedagojik dönüşüm için güçlü bir araç olmakla birlikte; ancak etik ilkeler, veri güvenliği ve kurumsal yönetişim çerçevesi içerisinde kullanıldığında sürdürülebilir ve güvenilir bir değer üretme potansiyeline sahiptir. Bu faktörler, yeni nesil tıp öğretiminin tasarım ve uygulama süreçlerinde bütüncül bir fayda analizi yapılmasının ve etik çerçevenin çizilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç

Literatür, yeni nesil eğitim yaklaşımlarının tıp eğitiminde bütüncül bir dönüşümü tetiklediğini göstermektedir. Çevrim içi ve hibrit modeller, öğrenme esnekliği ve erişilebilirlik açısından önemli avantajlar sunarken, simülasyon ve YZ tabanlı yaklaşımlar klinik beceri ile karar verme süreçlerini desteklemektedir. Bu yöntemlerin etkili olabilmesi, pedagojik tasarım kalitesine, altyapı yeterliliğine ve öğretim üyelerinin yetkinliğine bağlıdır. Bu nedenle eğitim kurumlarının teknolojiyi yalnızca araç olarak değil, öğrenme ekosisteminin bir bileşeni olarak konumlandırmaları önemlidir.

Yeni nesil tıp eğitimi, dijital teknolojilerle güçlendirilmiş çok katmanlı bir öğrenme modeline evrilmiştir. Bu yeni yöntemler, tıp öğrencilerinin bilgi, beceri ve profesyonel yetkinliklerini artırmada önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte bu yeniliklerin sürdürülebilirliği, etik ilkeler, altyapı yatırımları ve öğretim üyelerinin bu başlıklarda eğitimi ile doğrudan ilişkilidir. Geleceğin tıp eğitimi, teknolojik olanakların dâhil olmasıyla, öğrenen merkezli öğrenme anlayışının daha da güçlendiği bileşenlerden oluşacaktır.

Dijitalleşme ve yapay zekâ uygulamalarının tıp eğitimine entegrasyonu, münferit kurumsal girişimler yerine, ulusal düzeyde belirlenmiş bir politika çerçevesi ve stratejik plan doğrultusunda yürütülmelidir.

Bu kapsamda önerilebilecek planlama bileşenleri şunlardır:

- Ulusal "Dijital Tıp Eğitimi Yol Haritası"
- Tıp fakülteleri için asgari dijital altyapı standartları
- Simülasyon merkezleri için akreditasyon kriterleri
- YZ destekli eğitim uygulamalarına yönelik etik ve hukuki rehberler

Kaynaklar

Feigerlova E, Hani H & Hothersall-Davies E. A systematic review of the impact of artificial intelligence on educational outcomes in health professions education. BMC Med Educ. 2025;25:129.

García-Torres D, Vicente Ripoll MA, Fernández Peris C, Mira Solves JJ. Enhancing Clinical Reasoning with Virtual Patients: A Hybrid Systematic Review Combining Human Reviewers and ChatGPT. Healthcare (Basel). 2024;12(22):2241.

Gordon M, Daniel M, Ajiboye A et al. A scoping review of artificial intelligence in medical education: BEME Guide No. 84. Med Teach. 2024;46(4):446-470.

Kononowicz AA, Woodham LA, Edelbring S, ve ark. Virtual Patient Simulations in Health Professions Education: Systematic Review and Meta-Analysis by the Digital Health Education Collaboration. J Med Internet Res. 2019: 2;21(7):e14676.

Michalczak M, Zgoda W, Michalczak J, Żadło A, Nasser A, Tokarek T. Artificial Intelligence in Medical Education: A Narrative Review. AI 2025; 6:322.

Mir MM, Mir GM, Raina NT, ve ark. Application of Artificial Intelligence in Medical Education: Current Scenario and Future Perspectives. J Adv Med Educ Prof. 2023;11(3):133-140.

Richa RP, Aarushi AA, Regalla SR, Sameer SS, Anupam AT. Systematic Review: The Importance of Artificial Intelligence in Medical Education. Journal of Contemporary Clinical Practice. 2025;11(7):523-532.

Tyrrell EG, Sandhu SK, Berry K, et al. Web-based AI-driven virtual patient simulator versus actor-based simulation for teaching consultation skills: multicenter randomized crossover study. JMIR Form Res. 2025;9:e71667.

"ERAS"ın bilimsel kanıtları: Nedir, ne değildir, kişiselleştirme gerekli mi?

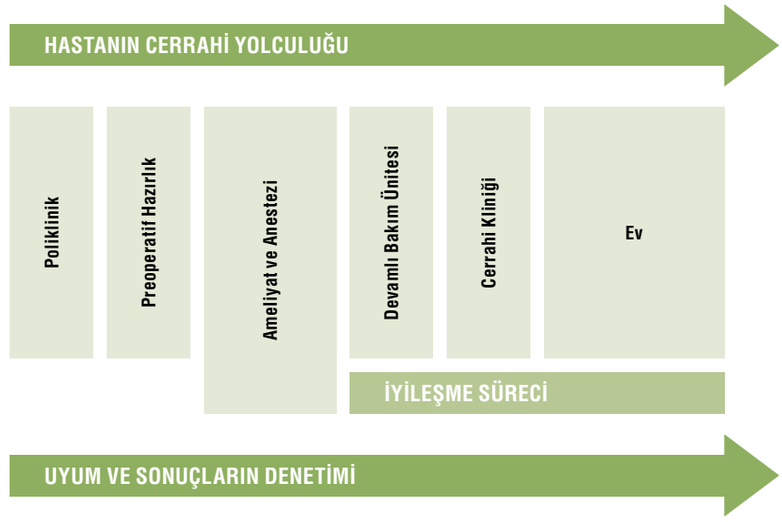
Prof. Dr. Serdar Epözdemir

Epözdemir, 1966 yılında Diyarbakır'da doğdu. Cumhuriyet Üniversitesi Tıp Fakültesinden 1991'de mezun oldu. 2005 yılında Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Anesteziyoloji ve Reanimasyon Ana Bilim Dalı'nda uzmanlık eğitimini tamamladı. 2019 yılından beri Medipol Üniversitesi Tıp Fakültesi Pendik ve Çamlıca SUAM hastanelerinde çalışan, Türk Yoğun Bakım Derneği Salgın Hastalıklar Afetler Çalışma Grubu başkanı olan Epözdemir edebiyat, müzik, felsefe ve doğaseverdir.

ERAS (Enhanced Recovery after Surgery: Ameliyat Sonrası Geliştirilmiş İyileşme) postoperatif organ disfonksiyonunu minimalize etmek ve hastayı mümkün olduğu kadar erken normale döndürmek amacıyla oluşturulmuş multidisipliner, multimodal bir programdır. Bu protokol birçok farklı ögeden oluşup, hastanın perioperatif sürecini yönetirken, klasik ve dogmalara dayanan tedavilerden uzaklaşarak modern konseptlere değişimi öngörür. Temel felsefesi cerrahi travmadan kaynaklanan metabolik stresi azaltmak ve komplikasyona yol açmadan mobilizasyonu ve gastrointestinal fonksiyonları desteklemektir. ERAS ögeleri hastanın poliklinikte başlayan ve evde sonlanan perioperatif sürecinin tamamını etkileyerek erken derlenmeyi sağlamayı amaçlar. Protokollerin uygulanması ameliyat öncesi organ fonksiyonunu koruyarak ve ameliyat sonrası derin stres yanıtını azaltarak cerrahi prosedürlerden sonra erken iyileşme sağlamak için tasarlanmış multimodal perioperatif bakım yollarıdır. Cerrahi müdahaleler sonrası hastaların daha hızlı ve güvenli bir şekilde iyileşmelerini desteklemek amacıyla geliştirilen bir tedavi yaklaşımıdır. ERAS protokollerinin temel unsurları arasında ameliyat öncesi danışmanlık, beslenmenin optimizasyonu, standardize anestezik, analjezik rejimler ve erken mobilizasyon yer alır. ERAS protokolleri kanıta dayalı uygulamalarla şekillendirilmiş bir dizi öneri sunar. Büyük ameliyatlardan sonra konvansiyonel bakım ile ERAS programlarının etkinliğini karşılaştıran pek çok çalışmada erken derlenme ve taburculuk lehine sonuçlar elde edilmiştir.

Tarihçe

Postoperatif iyileşmenin hızlandırılması ilk olarak 1994 yılında Engelman ve ark. tarafından yeni bir kavram olarak tanımlandı ve kısa süre sonra usta bir cerrah olduğu kadar cerrahi fizyopatoloji uzmanı olan Henrik Kehlet ve ekibinin yaptığı çeşitli araştırmaların sonuçları yayımlandı. Kehlet'in bu çalışmaları, daha sonra ameliyat sonrası iyileşmenin geliştirilmesi (Enhanced Recovery After Surgery=ERAS) adını alacak modern konseptin oluşmasında temel taşları oluşturdu. ERAS çalışma grubu, 2010 yılında merkezi Stockholm'de olan uluslararası medikal bir derneğe dönüştü ve ERAS Derneği (Enhanced Recovery After Surgery Society for Perioperative Care) adını aldı (www.erassociety.org). İlk uluslararası kongresini 2012 yılında Cannes'de yapan ERAS Society ilk rehberlerini de aynı yıl yayımladı. Elektif kolon cerrahisi, rektal cerrahi ve pankreatikoduodenektomi için yayımlanan rehberleri ilerleyen yıllarda diğer alanlara ait olanlar izledi (1-4).



Şekil 1. Cerrahi hastanın yaşadığı süreç

Nedir?

ERAS Felsefesi

ERAS yeni bir çalışma şeklidir ve bir hastanın ameliyat öncesinde poliklinikte ilk muayenesi ile başlayan ve taburcu olmasıyla birlikte evinde sonuçlanan yolculuğun tamamı ile ilgili değişiklikler önerir (Şekil 1).

ERAS ile tanımlanan modern cerrahi, anestezi, analjezi ve bazı destek uygulamalar sayesinde travmaya karşı oluşacak endokrin, metabolik ve immünolojik yanıtın azaltılması hedeflenir. Böylece az hasar çabuk iyileşme ile sonuçlanacaktır. ERAS uygulamalarının bazı köşe taşları vardır (Tablo 1).

ERAS Protokolleri

ERAS protokolleri tıbbi literatürde bulunan kanıta dayalı verilerle geliştirilmiştir. Postoperatif komplikasyonları ve sonuçta mortaliteyi azaltmak ve maliyeti de hesaba katarak, hastanın normal fonksiyonuna ve iyilik hâline geri dönüşünü desteklemektir. Bu alandaki uzman akademisyenler, tıbbi literatürdeki bilgileri sistematik şekilde gözden geçirip derecelendirir ve perioperatif bakım için kanıta dayalı rehberleri oluştururlar. Bir rehber operasyon cinsine bağlı olarak genellikle 25-40 farklı bakım öğesinden oluşur. Yeterli kanıt bulunan bazı ögelerle ilgili öneriler bütün rehberlerde ortaktır (Tablo 2).

Tablo 1. ERAS (Hızlandırılmış iyileşme) protokolünün temel bileşenleri

Kanıta dayalı perioperatif bakım
Multidisipliner yaklaşım
Ekip çalışması
Veri toplama ve düzenli iç denetim toplantıları
Sonraki değişimlere hazır olmak

Protokol hasta ile ilk görüşmeden itibaren başlar ve tüm yolculuğu kapsar, cerrahiden en geç bir ay sonra takip ve denetim ile sona erer. Hastanın ilk görüşmede bilgilendirilmesi çok önemlidir. Başına gelecekleri bilmeyen hasta mutlaka endişe yaşayacaktır. Bu nedenle hasta ilk karşılaşmada yazılı ve sözlü olarak bilgilendirilmelidir. Bu görüşme hastanın hastanede kalış süresi boyunca yaşayacakları hakkında detayları içermelidir ve mümkün olduğu kadar multidisipliner ERAS ekibinin tüm elemanlarının bulunduğu bir ortamda ve geniş bir zamanda yapılmalıdır. Ameliyat öncesi hazırlık, ağrı, oral gıda alımı ve erken mobilizasyon gibi kavramlar hastaya anlatılmalıdır. Burada önemli nokta hastanın sadece pasif olarak bilgilendirilmesi değil, tüm süreçte yükleneceği rolün anlatılmasıdır. Böylece hasta aktif rol alacak ve iyilik hâlinin önemli bir belirleyicisi olan anksiyeteyi daha az oranda yaşayacaktır. Net olarak anlaşılabileceği gibi, bu görüşme, aslında son yıllarda cerrahi kliniklerinde rutin bir hâle gelen bilgilendirilmiş onam alınması işleminden çok farklıdır (5-7).

Unutulmaması gereken önemli nokta ERAS'ın sadece bir cerrahın yenilikçi uygulamaları değil, eğitilmiş bir ekibin birlikte performansı olduğudur. Hastaneye başvurudan, evde tamamen

iyileşme hâline kadar yaşanacak süreçte bir ekibin farklı üyelerinin katkıları söz konusu olsa da başrol oyuncuları olarak cerrah, anestezist ve hemşire ön plana çıkmaktadır. Her cerrahi klinik için çekirdek ERAS ekibi oluşturulur ve süreçte görev alacak tüm sağlık çalışanları ile iş birliği içinde çalışılır. Ekip, her hastanın verilerini toplar ve düzenli olarak (haftalık veya iki haftada bir) toplanır. Bu toplantılarda sonuçlar değerlendirmeli ve eğitim çalışmaları yapmalıdır. Hastanenin/ünitenin büyüklüğüne, çalışma şartlarına ve hasta potansiyeline göre çekirdek ekibe fizyoterapist, eczacı, gastroenterolog, radyolog, onkolog, sosyal hizmet uzmanı vb. bilim alanlarından üyeler de katılır (Şekil 2). Ama başarıyı getirecek en önemli konulardan biri hastane yönetiminin desteğidir.

Uyum

ERAS protokollerinde yer alan ögelerden birini ya da birkaçını kullanarak iyi sonuçlar elde etmek mümkün değildir. Önerilerin tamamı eğitimli bir ekip tarafından uygulandığında postoperatif iyileşme sürecine olan katkıları ortaya çıkar (8).

Ameliyat geçiren bir hastanın perioperatif bakımı sırasında her bir ögenin diğerine sinerjik etkisi olmaktadır. Ağrının uygun yönetimi, erken mobilizasyon ve gastrointestinal motilitenin doğru yönetilerek erken oral beslenmenin sağlanması gibi anahtar konular, diğer pek çok ögenin kullanılması ile desteklenmektedir. Birçok araştırmada, ERAS Derneği tarafından

Ameliyat süreçlerini baştan sona değiştiren ERAS, cerrahi stresi azaltmayı hedefleyen ortak bir hastane felsefesidir. Ancak bu protokol her hastaya uyan tek bir kalıp değildir. Gerçek klinik başarı; tıbbi kuralların, hastanın yaşına ve ek hastalıklarına göre esnetilip kişiye özel hâle getirildiği yerde başlar.

önerilen rehberlerdeki ögelerin kullanımındaki artışla sonuçların önemli ölçüde iyileştiği kanıtlandı. Farklı merkezlerden gelen sonuçlar, kolorektal protokollere uyumda yüzde 50'den yüzde 70'in üzerine artışla, komplikasyonlarda yüzde 25-30 ve hastanede kalış süresinde birkaç gün (%30-40) azalma olduğunu göstermektedir (9-11).

Ne Değildir?

I) **Her hasta için aynı sonuçları vermez:** ERAS'ın sunduğu kanıtlar, genel olarak daha iyi iyileşme ve daha az komplikasyon ile sonuçlansa da her hastada aynı sonuçları garanti etmez. Özellikle yaşlı hastalar, karmaşık tıbbi geçmişi olanlar veya cerrahiye ek olarak başka tedavi gereksinimleri olan hastalar, bu protokollere tam olarak uymayabilir.

II) **Tek bir yöntemle uygulanabilir değildir:** ERAS, genellikle belirli cerrahi türler için önerilen bir yaklaşım olsa da tüm cerrahilerde aynı başarıyı sağlayamayabilir. Örneğin bazı acil durum cerrahilerinde veya çok ileri evre kanser hastalarında ERAS uygulamaları kısıtlanabilir veya özelleştirilmiş yaklaşımlar gerekebilir.

III) **Her Zaman Erişilebilir Değildir:** ERAS protokollerinin etkili olabilmesi için, hastanelerin ve sağlık sistemlerinin belirli kaynakları ve altyapıyı sunması gerekmektedir. Ancak bazı hastanelerde veya bölgelerde bu tür müdahaleler için yeterli altyapı olmayabilir.

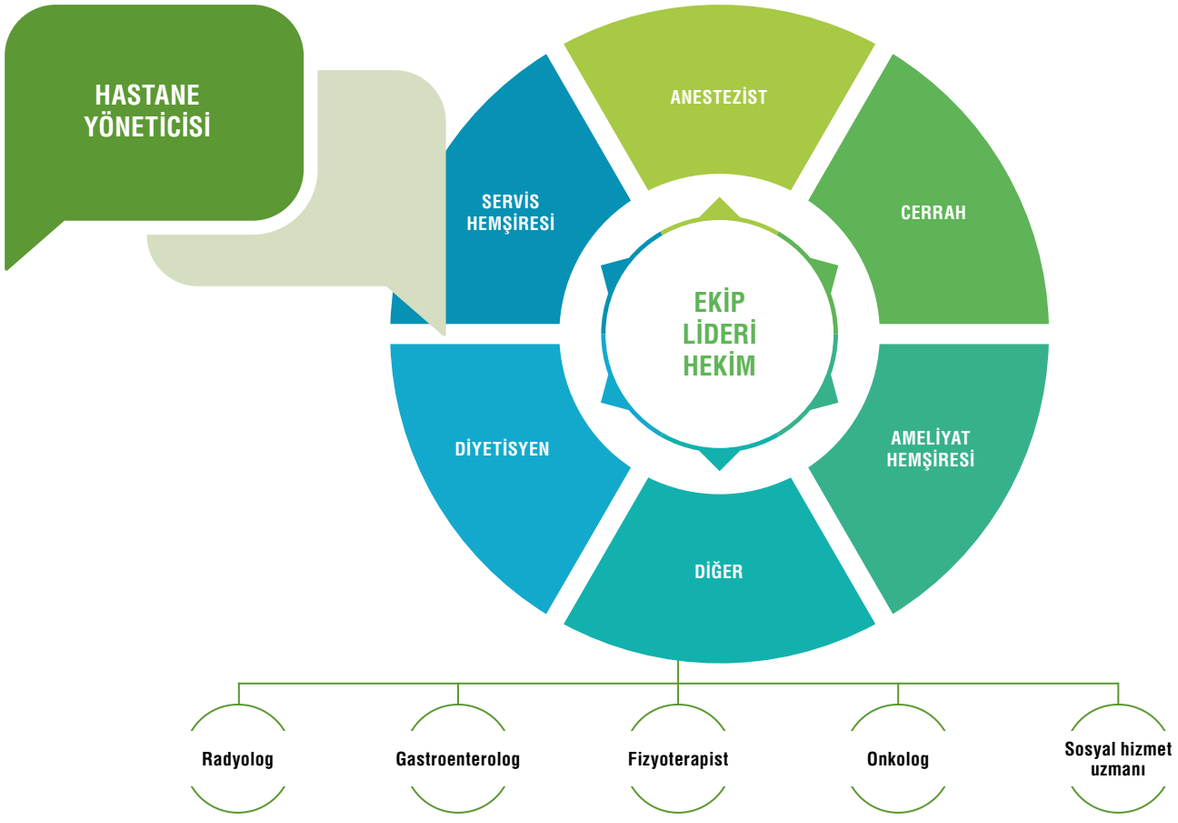
IV) **Tüm durumlar için standartlaşmış:** ERAS, genellikle klinik pratiği iyileştirmeye yönelik geniş çaplı bir yaklaşım sunar ancak her cerrahi müdahalede aynı şekilde uygulanamayabilir. Özellikle bazı hastaların özel gereksinimleri olabilir, bu yüzden tek bir protokol tüm hasta grupları için yeterli olmayabilir.

Kişiselleştirme Gerekli mi?

Evet, kişiselleştirme gerekli ve önemlidir. ERAS protokollerinin etkinliği, hastanın özel durumu ve cerrahi sürecin özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle kişiselleştirme, başarılı bir iyileşme süreci için önemlidir.

Tablo 2. ERAS protokollerinin temel ögeleri

İlk Başvuru	Preoperatif	Intraoperatif	Postoperatif
Hastanın bilgilendirilmesi	Preoperatif açıklıkla igilli güncel protokol	Cerrahi kesilerin seçimi	İdrar kateteri
Optimizasyon	Oral karbonhidrat yüklemesi	Intraoperatif hipoterminin önlenmesi	Postoperatif multimodal analjezi
Beslenme taraması ve gerekliyse nutrisyon desteği	Ameliyata özel barsak temizliği	Kısa etkili anestezi protokolü	Kan şekeri yönetimi
Sigara ve alkolün kesilmesi	Antimikrobiyal profilaksi	Midtorokal epidural kateterler	Gastrointestinal motilitenin uyarılması
Preoperatif anemi tarama ve tedavisi	Tromboemboli profilaksisi	Postoperatif bulantı ve kusmanın multimodal yönetimi	Erken oral besleme, gerekirse erken enteral nutrisyon
Prehabilitasyon	Premedikasyon yapılmaması	Perioperatif sıvı yönetimi Abdominal drenlerin uygun kullanımı Minimal invaziv cerrahi Nazogastrik sondanın kullanımı	Erken mobilizasyon Erken taburculuk kriterleri Takip ve sonuçların denetimi



Şekil 2. ERAS ekibinin yapısı

I) **Hastaların bireysel özellikleri:** Her hastanın sağlık durumu farklıdır. Örneğin yaş, ek hastalıklar (diyabet, hipertansiyon gibi), cerrahinin türü ve hastanın genel fiziksel durumu, ERAS protokollerinin nasıl uygulanacağı üzerinde belirleyici olabilir. Yüksek riskli hastalarda daha dikkatli bir yaklaşım gerekebilir, örneğin daha fazla izleme ve geciktirilmiş mobilizasyon gibi.

II) **Cerrahinin türü:** ERAS protokolleri genellikle büyük cerrahiler (kolorektal cerrahi, ortopedik cerrahi, karın içi cerrahiler vb.) için daha fazla kanıt sunar. Ancak her cerrahi türü için aynı protokoller geçerli olmayabilir. Örneğin bir hastanın acil cerrahi gereksinimi varsa, protokoller farklı şekilde uyarlanabilir.

III) **Mobilizasyon ve beslenme:** ERAS'ta erken mobilizasyon ve beslenme önemlidir. Ancak bazı hastalar mobilize olamayabilir veya erken beslenme konusunda zorluk yaşayabilir. Bu gibi durumlar kişiye özel yaklaşımlarla ele alınmalıdır.

IV) **Ağrı yönetimi ve anestezi:** ERAS, anestezi yönetimini optimize etmek için öneriler sunar ancak her hastanın ağrı eşiği ve yanıtları farklıdır. Bazı hastalar daha yoğun ağrı yönetimi gerektirebilir, bu da protokolün kişiye özel düzenlenmesini gerektirir.

Sonuç

ERAS protokolleri, kanıta dayalı, multidisipliner bir yaklaşım sunarak cerrahiden sonra hastaların iyileşme sürecini hızlandırır. Ancak her hastanın durumu farklı olduğundan, ERAS uygulamalarının kişiselleştirilmesi gereklidir. Özellikle hastanın yaşı, genel sağlık durumu ve cerrahinin türü gibi faktörler, protokolün nasıl uygulanacağı üzerinde belirleyici rol oynar. Bu nedenle, ERAS protokollerinin başarıyla uygulanabilmesi için, sağlık profesyonelleri her hastayı bireysel olarak değerlendirmelidir.

Kaynaklar

1) Engelman RM, Rousou JA, Flack JE, et al. Fast-track recovery of the coronary bypass patient. Ann Thorac Surg. 1994;58:1742-6.

2) Bardram l, Funch-Jensen P, Jensen P, et al. Recovery after laparoscopic colonic surgery with epidural analgesia, and early oral nutrition and mobilisation. lancet. 1995;345:763-4.

3) Kehlet H. Acute pain control and accelerated postoperative surgical recovery. Surg Clin North Am. 1999;79:431-43.

4) Kehlet H, Mogensen T. Hospital stay of 2 days after open sigmoidectomy with a multimodal rehabilitation programme. Br J Surg. 1999;86:227-30.

5) Ersoy E, Gündoğdu H. Enhanced recovery after surgery. Turkish J Surg. 2007;23:35-40.

6) Scott MJ, Baldini G, Fearon KCH, et al. Enhanced Recovery after Surgery (ERAS) for gastrointestinal surgery, part 1: Pathophysiological considerations. Acta Anaesthesiol Scand. 2015;59:1212-31.

7) Feldheiser A, Aziz O, Baldini G, et al. Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) for gastrointestinal surgery, part 2: Consensus statement for anaesthesia practice. Acta Anaesthesiol Scand. 2016;60:289-334.

8. Ljungqvist O, Scott M, Fearon KC. Enhanced recovery after surgery a review. JAMA Surgery. 2017;152:292-8.

9) Gustafsson UO, Hausel J, Thorell A, et al. Adherence to the enhanced recovery after surgery protocol and outcomes after colorectal cancer surgery. Arch Surg. 2011;146:571-7.

10) Currie A, Burch J, Jenkins JT, et al. The impact of enhanced recovery protocol compliance on elective colorectal cancer resection: Results from an international registry. Ann Surg. 2015;261:1153-9.

11) Nelson G, Kiyang lN, Crumley ET, et al. Implementation of Enhanced Recovery after Surgery (ERAS) Across a Provincial Healthcare System: The ERAS Alberta Colorectal Surgery Experience. World J Surg. 2016;40:1092-103.

Kimyasal ve biyolojik afetlerde yönetim: yoğun bakım perspektifi

Prof. Dr. Serdar Epözdemir

Epözdemir, 1966 yılında Diyarbakır'da doğdu. Cumhuriyet Üniversitesi Tıp Fakültesinden 1991'de mezun oldu. 2005 yılında Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Anesteziyoloji ve Reanimasyon Ana Bilim Dalı'nda uzmanlık eğitimini tamamladı. 2019 yılından beri Medipol Üniversitesi Tıp Fakültesi Pendik ve Çamlıca SUAM hastanelerinde çalışan, Türk Yoğun Bakım Derneği Salgın Hastalıklar Afetler Çalışma Grubu başkanı olan Epözdemir edebiyat, müzik, felsefe ve doğaseverdir.

Kimyasal ve biyolojik afetler, insan sağlığını, çevreyi ve sağlık sistemlerini ciddi biçimde tehdit eden, yüksek mortalite ve morbidite oranlarına yol açabilen olağanüstü durumlardır (1). Tarihsel süreçte kimyasal ajanların savaş alanlarında kullanımı ve büyük ölçekli endüstriyel kazalar bu riskin boyutunu açıkça ortaya koymuştur (2). 1925 tarihli Cenevre Protokolü kimyasal ve biyolojik silahların kullanımını yasaklamış olsa da bu tehdit tamamen ortadan kalkmamıştır (3).

Yoğun Bakım Üniteleri (YBÜ), bu tür olaylarda ileri organ desteği sağlayabilen merkezler olarak kritik rol üstlenmektedir (4). Özellikle ani gelişen solunum yetmezliği, şok ve çoklu organ yetmezliği tablolarında YBÜ kapasitesi belirleyicidir.

Kimyasal Ajanlar

Kimyasal ajanlara maruziyet sonrası semptomlar genellikle dakikalar içinde ortaya çıkar. Tanı çoğunlukla kliniktir ve tedavi gecikmeden başlatılmalıdır (5).

Sinir Ajanları (Sarin, Tabun, Soman, VX)

Sinir ajanları asetilkolinesteraz enzimini inhibe ederek kolinerjik kriz tablosuna yol açar (5). Muskarinik ve nikotinik reseptör aşırı uyarımı sonucu miyozis, bronkospazm, bronkore, salivasyon ve nöbetler görülür (6). Solunum yetmezliği mortalitenin temel nedenidir. Tedavide atropin, pralidoksim ve benzodiazepinler kullanılmalıdır (6). Erken dekontaminasyon ve kişisel koruyucu ekipman kullanımı hayati öneme sahiptir (5).

Yakıcı Ajanlar (Hardal Gazı)

Vezikanlar cilt ve mukozalarda gecikmeli bül oluşumuna neden olur (7). Semptomlar 24 saate kadar gecikebilir (8). Spesifik antidotu bulunmamaktadır ve tedavi destekleyicidir (8, 9). Göz ve cilt irrigasyonu erken dönemde yapılmalıdır.

Siyanidler (Kan Ajanları)

Siyanidler hücresel düzeyde sitokrom oksidazı inhibe ederek doku hipoksisine yol açar (10). Klinik tablo baş ağrısı, nöbet ve hızlı kardiyovasküler kollaps ile ilerleyebilir (10). Tedavide yüksek akımlı oksijen ve intravenöz hidroksikobalamin önerilmektedir (10).

Boğucu Ajanlar (Fosgen ve Klor)

Fosgen ve klor inhalasyon sonrası nonkardiyojenik pulmoner ödem gelişimine neden olabilir (11). Spesifik antidot yoktur; tedavi destekleyicidir (12). Gecikmiş solunum yetmezliği açısından yakın izlem gereklidir.

Biyolojik Ajanlar

Biyolojik ajanlar aerosol yoluyla yayılabilmeleri nedeniyle geniş kitleleri etkileyebilir. Klinik olarak başlangıçta nonspesifik bulgularla seyredebilirler.

Şarbon (Bacillus anthracis)

İnhalasyonel şarbon en ölümcül formdur ve mediastinit, sepsis ve şok ile sonuçlanabilir (13). Güncel tedavi yaklaşımlarında florokinolonlar ve doksisiklin önerilmektedir (14).

Veba (Yersinia pestis)

Pnömonik veba insandan insana bulaşabilir ve tedavi edilmediğinde mortalite oranı yüksektir (15). Erken antibiyotik tedavisi ve izolasyon gereklidir (16).

Çiçek (Variola)

Çiçek hastalığı eradike edilmiş olsa da biyoterörizm açısından önemini korumaktadır (17). CDC tarafından geliştirilen klinik algoritma tanıda yardımcıdır (18). Spesifik antiviral tedavi sınırlıdır; aşılama en etkili korunma yöntemidir (17).

Tularemi (Francisella tularensis)

Pnömonik tularemi toplum kökenli pnömoni ile karışabilir (19). Tedavide aminoglikozidler önerilmektedir (20). İnsanlar arasında bulaş gösterilmemiştir (20).

Kimyasal ve biyolojik afetler, yüksek mortalite riskleriyle modern sağlık sistemlerinin dayanıklılığını test eden en kompleks krizlerdir. Bu olağanüstü senaryolarda kitlesel can kayıplarını önlemenin yolu yalnızca ileri organ desteği sağlamaktan değil; hastane öncesi dekontaminasyon alanlarından negatif basınçlı izole yoğun bakım ünitelerine, dakikalar içinde erişilebilen sistematik antidot stok yönetiminden kesintisiz lojistik ağlara uzanan bütüncül ve stratejik bir altyapı hazırlığından geçmektedir.

Botulizm (Clostridium botulinum)
Botulinum toksini nöromüsküler kavşakta asetilkolin salınımını inhibe ederek simetrik, aşağı doğru inen paraliziye yol açar (21). Erken dönemde heptavalent antitoksin uygulanmalıdır (22). Solunum desteği sıklıkla gereklidir.

Yoğun Bakımın Rolü

Yoğun bakım üniteleri şu alanlarda kritik rol oynar:

- İleri hava yolu yönetimi
- Mekanik ventilasyon
- Hemodinamik monitörizasyon
- Vazopressör tedavisi
- İzolasyon ve enfeksiyon kontrolü

Afet hazırlık planları, antidot stokları, kişisel koruyucu ekipman temini ve düzenli simülasyon eğitimleri mortaliteyi azaltmada etkilidir (4).

Dekontaminasyon ve İzole Yoğun Bakım Altyapısı

Kimyasal ve biyolojik afetlerde sekonder kontaminasyonun önlenmesi hem sağlık personelinin korunması hem de hastane içi yayılımın engellenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle dekontaminasyon süreçleri mümkün olduğunca hastane öncesi alanda gerçekleştirilmelidir. Ancak bu her zaman mümkün olmadığından, hastane bünyesinde iyi planlanmış dekontaminasyon ünitelerinin bulunması gereklidir.

Dekontaminasyon alanlarının planlanmasında aşağıdaki unsurlar önem taşır:

Sinir ajanlarından biyoterörizm tehditlerine kadar uzanan geniş bir spektrumda, maruziyet sonrası ilk dakikalar hayatta kalma sınırını belirler. Akut kriz anlarında hızlı diferansiyel tanı, doğru antidot titrasyonu ve etkin kaynak kullanımı için tıbbi/klinik toksikoloji uzmanlığının yoğun bakım süreçlerine entegrasyonu bir tercih değil, zorunluluktur. Sağlık sistemini geleceğe hazırlamak; bu alandaki yan dal programlarını yaygınlaştıran stratejik insan gücü planlamasıyla mümkündür.

Fiziksel ayrım: Temiz ve kontamine alanların kesin olarak ayrılması

Tek yönlü hasta akışı: Kontaminasyonun geri yayılımını önleyecek şekilde giriş-çıkış planlaması

Açık alan veya negatif basınçlı sistemler: Aerosolize ajanların kontrolü

Atık ve sıvı yönetimi: Kontamine sıvıların güvenli uzaklaştırılması

Yoğun bakım düzeyinde ise, bu hastaların takibi için özel olarak yapılandırılmış izolasyon alanları gereklidir. Bu kapsamda:

- Negatif basınçlı yoğun bakım odaları
- Bağımsız havalandırma (HVAC) sistemleri
- HEPA filtreleme
- Ayrı giriş-çıkış ve giyinme/soyunma alanları (donning/doffing alanları)
- Sınırlı ve eğitimli personel erişimi

Bu tür altyapılar, özellikle biyolojik ajanlara bağlı salgınlarda ve aerosolize kimyasal maruziyetlerde hastane içi yayılımı önlemede belirleyici rol oynar.

Antidot ve Stok Yönetimi

Kimyasal ajan maruziyetlerinde antidotların erken dönemde uygulanması mortaliteyi doğrudan etkileyen en önemli

faktörlerden biridir. Bu nedenle ileri merkezlerde antidot stok yönetiminin sistematik bir şekilde planlanması gereklidir.

Antidot yönetiminde temel ilkeler şunlardır:

Kritik antidot listesi oluşturulması:

- Atropin
- Pralidoksim
- Hidroksikobalamin
- Sodyum tiyosülfat
- Benzodiazepinler
- Botulinum antitoksini

Minimum stok düzeylerinin belirlenmesi: Olası hasta sayısına göre (worst-case senaryolar dahil) hesaplanmalıdır.

Erişilebilirlik süresi: Antidotlara dakikalar içinde ulaşılabilir olması hedeflenmelidir.

Merkezi ve bölgesel stok sistemleri: Ulusal düzeyde antidot bankaları oluşturulması ve lojistik ağların planlanması önerilmektedir.

Son kullanma tarihi ve rotasyon yönetimi: İsrafı önlemek için düzenli stok kontrolü yapılmalıdır.

Bu sistemlerin eksikliği, özellikle kitlesel maruziyetlerde tedavi gecikmesine ve mortalite artışına yol açabilir.

Tıbbi/Klinik Toksikoloji Uzmanlığının Rolü

Kimyasal afetler ve toksik maruziyetlerin yönetimi, yüksek düzeyde spesifik bilgi ve deneyim gerektirir. Bu bağlamda tıbbi/klinik toksikoloji alanında eğitim almış uzmanların yoğun bakım süreçlerine entegrasyonu, hasta yönetiminde standardizasyonu ve bakım kalitesini artırabilir.

Toksikoloji uzmanlarının katkıları:

- Hızlı tanı ve diferansiyel tanı süreçlerinin yönetimi
- Uygun antidot seçimi ve doz titrasyonu
- Zehirlenme şiddetinin değerlendirilmesi
- Laboratuvar ve toksikolojik analizlerin yorumlanması
- Ulusal zehir danışma merkezleri ile koordinasyon

Literatürde, toksikoloji uzmanlarının sürece dâhil olduğu merkezlerde:

- Hastanede kalış süresinin azaldığı
- Komplikasyon oranlarının düştüğü
- Kaynak kullanımının daha etkin olduğu gösterilmiştir.

Ülkemizde tıbbi toksikoloji alanının henüz sınırlı düzeyde yapılandırılmış olması ve uzman sayısının yetersizliği dikkate alındığında, bu alanda stratejik insan gücü planlaması yapılması gereklidir.

Bu kapsamda:

- Yan dal uzmanlık programlarının yaygınlaştırılması
- Yoğun bakım ve acil tıp ile bütünleşmiş eğitim modellerinin geliştirilmesi
- Ulusal zehir danışma sistemlerinin güçlendirilmesi öncelikli hedefler arasında yer almalıdır.

Sonuç

Kimyasal ve biyolojik afetler, modern sağlık sistemleri için çok boyutlu ve kompleks tehditler oluşturmaktadır. Etkin bir yönetim; yalnızca klinik tedaviyle sınırlı olmayıp, altyapı hazırlığı, antidot yönetimi, uzman insan gücü planlaması ve enfeksiyon kontrol stratejilerini de kapsamalıdır.

Özellikle dekontaminasyon altyapısının güçlendirilmesi, antidotlara hızlı erişimin sağlanması ve klinik toksikoloji uzmanlığının sağlık sistemine entegrasyonu, mortalite ve morbiditenin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır (1, 4).

Bu doğrultuda, ulusal düzeyde koordineli hazırlık planlarının oluşturulması, eğitim ve simülasyon programlarının yaygınlaştırılması ve yoğun bakım kapasitesinin sürdürülebilir şekilde artırılması sağlık sistemlerinin dayanıklılığını belirleyen temel unsurlar olacaktır.

Kaynaklar

1) Schultz CH, Koenig KL. Weapons of mass destruction. In: Marx JA, Hockberger RS, Walls RM, editors. Rosen's Emergency Medicine: Concepts and Clinical Practice. 10th ed. Philadelphia: Elsevier; 2023.

2) T.C. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). KBRN olaylarının tarihçesi. https://www.afad.gov.tr/kbrn (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

3) Türkiye Büyük Millet Meclisi. Kimyasal Silahlar Sözleşmesi Kanunu. https://www.tbmm.gov.tr (Erişim Tarihi: 07.04.2026).

4) Okumura T, Takasu N, Ishimatsu S, et al. Report on 640 victims of the Tokyo subway sarin attack. Ann Emerg Med. 1996;28(2):129–135.

5) US Army Medical Research Institute of Chemical Defense. Medical Management of Chemical Casualties Handbook. 4th ed. 2023.

6) Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Nerve Agents (GA, GB, GD, VX). https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=523 (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

7) Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Blister agents (vesicants). https://emergency.cdc.gov/agent/vesicants (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

8) CDC. Sulfur Mustard (Mustard Gas) Facts. https://emergency.cdc.gov/agent/sulfurmustard (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

9) ATSDR. Sulfur Mustard Medical Management Guidelines. https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

10) Nelson LS, Lewin NA, Howland MA, et al. Goldfrank's Toxicologic Emergencies. 11th ed. New York: McGraw-Hill; 2019.

11) CDC. Phosgene (CG) Facts. https://emergency.cdc.gov/agent/phosgene (Erişim tarihi: 05.04.2026).

12) CDC. Chlorine Gas Exposure Guidelines. https://emergency.cdc.gov/agent/chlorine (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

13) Abramova FA, Grinberg LM, Yampolskaya OV, Walker DH. Pathology of inhalational anthrax. PNAS. 1993; 90:2291–2294.

14) CDC. Anthrax Clinical Guidelines (Updated). https://www.cdc.gov/anthrax/medical-care/index.html (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

15) CDC. Plague (Yersinia pestis). https://www.cdc.gov/plague (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

16) CDC. Plague Clinical Resources. https://www.cdc.gov/plague/healthcare (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

17) CDC. Smallpox Clinical Disease. https://www.cdc.gov/smallpox/clinicians (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

18) CDC. Smallpox Diagnostic Algorithm. https://www.cdc.gov/smallpox (Erişim Tarihi: 05.04.2026).

19) Weber IB, et al. Tularemia clinical review. Clin Infect Dis. 2012;55(10):1283–1290.

20) Bennett JE, Dolin R, Blaser MJ. Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases. 10th ed. Elsevier; 2020.

21) Bennett JE, Dolin R, Blaser MJ. Botulism. In: Mandell… 10th ed. Elsevier; 2020.

22) Adalja AA. Biothreat agents. Emerg Med Clin North Am. 2018;36(4):835–849.

Mikrobiyota çağı ve fonksiyonel tıbbın yükselişi: sağlık sisteminin sessiz devrimi

Prof. Dr. Mustafa Altındiş

1966 yılında Konya'da doğdu. Selçuk Üniversitesi (SÜ) Tıp Fakültesinden 1989'da mezun oldu. Aynı fakültenin Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalında doktora eğitimini tamamladı. 1999 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) Tıp Fakültesi Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalına kurucu öğretim üyesi olarak atandı. 2002 yılında Viroloji Bilim Doktoru, 2005 yılında Klinik Mikrobiyoloji doçenti oldu. Erasmus kapsamında Macaristan ve Avusturya'da misafir öğretim üyesi olarak bulundu. Bir yıl kadar görevli bulunduğu İngiltere NHS Leeds Teaching Hospitals'de laboratuvar kalite sistemlerini inceledi, moleküler viroloji referans laboratuvarında çalıştı. Mayıs 2011'de AKÜ Tıp Fakültesinde profesörlük kadrosu alan Dr. Altındiş, Haziran 2013 tarihinden itibaren Sakarya Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji AD atanmış olup, 2016-2018 yıllarında Sakarya Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Kurucu Dekanlığı görevini de üstlenmiştir. Tıbbi Mikrobiyoloji öğretim üyeliği yanı sıra Tıbbi Viroloji doçenti olan Dr. Altındiş, şu anda Tıbbi Viroloji Bilim Dalı Başkanlığı görevini sürdürmekte ve TUSEB, TÜBİTAK, COST, AB projeleri yürütmektedir.

Bir Paradigmanın Sonu, Yenisinin Başlangıcı

20. yüzyıl tıbbı enfeksiyon hastalıklarıyla mücadelede insanlık tarihinin en büyük başarılarından bazılarını elde etti. Antibiyotikler, aşılar ve yoğun bakım uygulamaları sayesinde ortalama yaşam süresi belirgin biçimde arttı. Ancak 21. yüzyılda sağlık sistemlerinin karşı karşıya olduğu yük farklı bir karakter taşımaktadır. Günümüzde obezite, tip 2 diyabet, otoimmün hastalıklar, inflamatuvar bağırsak hastalıkları, depresyon, nörodejeneratif hastalıklar ve metabolik sendrom gibi kronik durumlar klinik pratiğin merkezinde yer almaktadır.

Bu hastalıkların çoğu tek bir patojene ya da tek bir genetik mutasyona indirgenememektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, kronik düşük dereceli inflamasyonun ve mikrobiyal dengesizliğin (disbiyozis) bu süreçlerde rol oynayabileceğini düşündürmektedir (1).

Human Microbiome Project sonuçları, insan mikrobiyotasının genomik kapasitesinin insan genomundan daha geniş olduğunu ortaya koymuştur (2). Ayrıca mikrobiyal hücre sayısının insan hücrelerine yaklaşık eşlik ettiği bildirilmiştir (3). Bu veriler, insan organizmasının yalnızca konak hücrelerinden ibaret olmadığını; konak ve mikrobiyal bileşenlerin birlikte işlediği dinamik bir biyolojik sistem olduğunu göstermektedir.

Bu çerçevede mikrobiyota, yalnızca sindirime yardımcı bir flora değil; metabolik ve immün süreçlerle ilişkili aktif bir düzenleyici sistem olarak değerlendirilmektedir (4).

Kronik Hastalıkların Ortak Zemini: İnflamasyon ve Disbiyozis

Son 20 yılda bağırsaklarımızda yaşayan mikroorganizmaların sağlığımız üzerindeki etkisine dair bakış açısı önemli ölçüde değişti. Mikrobiyota artık yalnızca sindirime yardımcı bir "flora" olarak değil; metabolizma, bağışıklık sistemi ve hatta beyin fonksiyonlarıyla ilişkili bir ekosistem olarak değerlendiriliyor (1). İnsan vücudundaki mikrobiyal hücre sayısının insan hücrelerine oldukça yakın olduğu ve genetik çeşitlilik açısından insan genomundan çok daha geniş bir kapasiteye sahip olduğu bildirilmektedir (3). Bu durum, insanın biyolojik olarak tek başına değil, mikroorganizmalarla birlikte işleyen bir sistem olduğunu düşündürmektedir.

Bağırsak mikrobiyotası birçok temel biyolojik süreçle bağlantılıdır. Örneğin kısa zincirli yağ asitleri üretir; bu moleküller hem bağırsak epitel hücreleri için enerji kaynağıdır hem de bağışıklık sisteminin dengelenmesinde rol oynayabilir (4). Ayrıca Treg hücre gelişimi ile ilişkili olduğu ve bağırsak bariyer bütünlüğünü destekleyebileceği gösterilmiştir (4). Bariyer fonksiyonunun korunması, bakteriyel bileşenlerin dolaşıma geçişini sınırlayarak inflamatuvar yanıtın dengelenmesine katkı sağlayabilir.

Mikrobiyal kompozisyondaki değişiklikler, yani disbiyozis, obezite (5), tip 2 diyabet (6), inflamatuvar bağırsak hastalığı (7), romatoid artrit (8), ve depresyon (10, 11) gibi birçok kronik durumla ilişkilendirilmiştir. Bu ilişkiler, mikrobiyotanın metabolik ve immün süreçlerle bağlantılı olabileceğini

düşündürmektedir. Ancak söz konusu hastalıkların çok faktörlü yapıya sahip olduğu ve mikrobiyotanın bu karmaşık ağın yalnızca bir parçası olabileceği unutulmamalıdır.

Kronik inflamasyonun metabolik sendromla bağlantısı uzun süredir bilinmektedir (1). Güncel veriler, inflamasyonun yalnızca hastalığın bir sonucu değil; bağırsak bariyerindeki değişiklikler ve mikrobiyal dengenin bozulmasıyla ilişkili olabilecek dinamik bir süreç olabileceğini göstermektedir. Bu bakış açısı, kronik hastalıkların değerlendirilmesinde mikrobiyotanın neden giderek daha fazla gündeme geldiğini açıklamaktadır.

Bu arada; birçok kronik hastalıkta bağırsak mikrobiyotasındaki değişimlerin (disbiyozis) hastalığın ortaya çıkışında doğrudan bir neden mi olduğu, yoksa hastalığın kendisi, inflamasyon süreci, beslenme alışkanlıkları veya kullanılan ilaçların bir sonucu olarak mı geliştiği henüz kesin olarak netleşmemiştir. Bu nedenle mikrobiyota temelli bulguların yorumlanmasında nedensellik-sonuç ilişkisi dikkatle ele alınmalı, mevcut verilerin büyük ölçüde ilişki (korelasyon) temelli olduğu ve klinik çıkarımların kontrollü çalışmalarla desteklenmesi gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Fonksiyonel Tıp: Sistem Düşüncesinin Klinik Yansıması

Fonksiyonel tıp yaklaşımı, hastalığı tek bir organın sorunu olarak değil; birbiriyle bağlantılı sistemlerin dengesindeki değişim olarak ele alır. Bu bakış açısı sistem biyolojisi yaklaşımından beslenir (9). Ağ tıbbı perspektifine göre ise hastalıklar, izole organ bozukluklarından çok biyolojik ağların işleyişindeki düzensizliklerle ilişkili olabilir.

Modern tıpta hastalık artık tek bir organın sorunu değil; mikrobiyota aracılığıyla birbirine bağlı biyolojik eksenlerin bozulmasıdır. Bu çerçevede klinikte giderek daha sık söz edilen bazı "eksenler" öne çıkmaktadır.

Mikrobiyomda Organ Sistem Eksenleri

"Mikrobiyomda Organ Sistem Eksenleri" kavramı, bağırsak mikrobiyotasının yalnızca gastrointestinal sistemle sınırlı olmadığını; metabolit üretimi, immün yanıtın düzenlenmesi, nöroendokrin sinyalleşme ve inflamatuvar yolaklar aracılığıyla uzak organlarla çift yönlü iletişim kurabildiğini ifade eder. Bu eksenler içinde en iyi tanımlanan örnekler; bağırsak–beyin ekseni (nörotransmitter

Son 20 yılda bağırsaklarımızda yaşayan mikroorganizmaların sağlığımız üzerindeki etkisine dair bakış açısı önemli ölçüde değişti. Mikrobiyota artık yalnızca sindirime yardımcı bir "flora" olarak değil; metabolizma, bağışıklık sistemi ve hatta beyin fonksiyonlarıyla ilişkili bir ekosistem olarak değerlendiriliyor. İnsan vücudundaki mikrobiyal hücre sayısının insan hücrelerine oldukça yakın olduğu ve genetik çeşitlilik açısından insan genomundan çok daha geniş bir kapasiteye sahip olduğu bildirilmektedir. Bu durum, insanın biyolojik olarak tek başına değil, mikroorganizmalarla birlikte işleyen bir sistem olduğunu düşündürmektedir.

prekürsörleri, vagal sinyaller ve HPA aksı aracılığıyla), bağırsak–karaciğer ekseni (portal dolaşım üzerinden mikrobiyal ürünlerin karaciğer metabolizması ve inflamasyonunu etkilemesi), bağırsak–akciğer ekseni (sistemik bağışıklık yanıtı ve mukozal immünite üzerinden solunum yolu enfeksiyonları ve inflamasyonla ilişki) ve bağırsak–deri ekseni (immün modülasyon ve metabolitler aracılığıyla dermatolojik hastalıklarla bağlantı) olarak öne çıkmaktadır. Kısa zincirli yağ asitleri (asetat, propiyonat, bütirat), safra asidi metabolitleri, triptofan türevleri ve mikrobiyal endotoksinler (LPS) gibi ürünler bu sistemik iletişim ağının temel biyolojik aracılarıdır. Bu nedenle söz konusu görsel, mikrobiyotanın "lokal bir flora" değil birçok organ sistemini etkileyebilen dinamik bir biyolojik düzenleyici olarak ele alınması gerektiğini vurgulayan bütüncül bir çerçeve sunmaktadır (12). Şimdi bu eksenleri kısaca isimlendirelim.

Bağırsak–Beyin Ekseni: Sindirim sistemi ile merkezi sinir sistemi arasında vagus siniri, immün mediatörler ve mikrobiyal metabolitler aracılığıyla gerçekleşen çift yönlü iletişimi ifade eder.

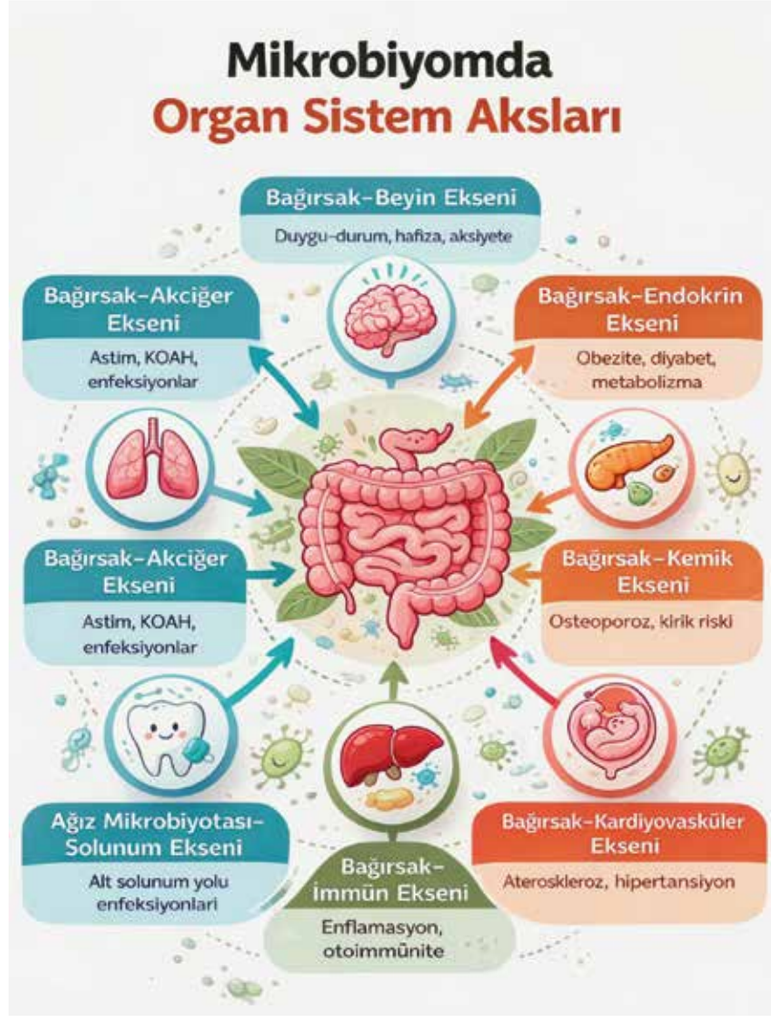
Bağırsak–Karaciğer Ekseni: Portal dolaşım yoluyla bağırsak kaynaklı mikrobiyal ürünlerin karaciğer metabolizmasını ve inflamatuvar yanıtı etkilemesini tanımlar.

Bağırsak–İmmün Ekseni: Mikrobiyotanın bağışıklık hücrelerinin gelişimi, tolerans mekanizmaları ve inflamasyon kontrolü üzerindeki düzenleyici rolünü ifade eder.

Bağırsak–Akciğer Ekseni: Bağırsak mikrobiyotasının immün modülasyon ve mikrobiyal metabolitler yoluyla solunum yolu enfeksiyonları ve inflamatuvar akciğer hastalıklarını etkilemesini tanımlar.

Bağırsak–Deri Ekseni: Bağırsak disbiyozisinin sistemik inflamasyon ve immün yanıt üzerinden akne, atopik dermatit ve psoriazis gibi dermatolojik hastalıklarla ilişkisini açıklar.

Bağırsak–Kardiyovasküler Ekseni: Mikrobiyotanın TMAO gibi metabolitler aracılığıyla endotelyal fonksiyon, ateroskleroz ve kardiyometabolik risk üzerindeki etkisini ifade eder.



Şekil 1. Mikrobiyomda organ sistem aksları

Bağırsak–Endokrin Ekseni: Bağırsak mikrobiyotasının insülin duyarlılığı, obezite ve metabolik sendrom gibi hormonal düzenleyici süreçlerle olan ilişkisini tanımlar.

Bağırsak–Kemik Ekseni: Mikrobiyotanın kalsiyum emilimi, osteoklast aktivitesi ve kemik mineral yoğunluğu üzerindeki etkisini açıklar.

Bağırsak–Plasenta (Anne–Fetal) Ekseni: Maternal mikrobiyotanın gebelik boyunca immün tolerans, inflamasyon ve fetal gelişim üzerinde belirleyici rol oynayabileceğini ifade eder.

Ağız Mikrobiyotası–Solunum Ekseni: Oral mikrobiyotanın aspirasyon veya inflamatuvar yolaklar üzerinden alt solunum yolu enfeksiyonlarını ve Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH) riskini etkileyebileceğini tanımlar.

Ağız Mikrobiyotası–Plasenta Ekseni: Periodontal patojenlerin sistemik dolaşım yoluyla plasental inflamasyona ve preterm doğum riskine katkıda bulunabileceğini ifade eder.

Bağırsak–Böbrek Ekseni: Üremik toksin üretimi ve inflamatuvar mediatörler aracılığıyla kronik böbrek hastalığı progresyonunu etkileyen çift yönlü ilişkiyi tanımlar.

Özellikle bağırsak–beyin ekseni dikkat çekicidir. Bağırsak mikrobiyotası tarafından üretilen bazı metabolitlerin vagus siniri aracılığıyla merkezi sinir sistemi fonksiyonlarını etkileyebildiği gösterilmiştir. Bu bulgular, mikrobiyota temelli ruh sağlığı araştırmalarının artmasına ve "psikobiyotik" kavramının ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (10).

Bununla birlikte, bu alanın hâlâ gelişmekte olduğu ve klinik uygulamalara yansımasının kontrollü çalışmalarla netleşeceği unutulmamalıdır.

"Normal Laboratuvar ama Hasta Hasta Hissediyor"

Modern klinik pratiğin sık karşılaşılan cümlelerinden biridir: "Testleriniz normal." Buna rağmen bazı hastalar kendilerini iyi hissetmediklerini ifade eder. Bu

durum çoğu zaman referans aralıklarının geniş popülasyon verilerine dayanması ve erken evre biyolojik değişimleri her zaman yansıtmaması ile ilişkilidir.

Subklinik inflamasyon ya da mikrobiyal dengenin bozulması gibi süreçler, klasik biyokimyasal testlerde belirgin olmayabilir. Bu noktada yüksek duyarlılıklı CRP gibi inflamasyon belirteçleri, lipopolisakkarit (LPS) ilişkili endotoksemi kavramı ve bağırsak geçirgenliği ile ilişkili parametreler daha erken ipuçları sunabilir (13). Bu göstergeler, metabolik ve inflamatuvar süreçlerin henüz klinik hastalık tablosu oluşmadan önce değişebileceğini düşündürmektedir.

Fonksiyonel tıp yaklaşımı, tam da bu "gri alanı" anlamaya çalışır. Amaç, hastalık ortaya çıktıktan sonra müdahale etmekten ziyade; biyolojik ağlardaki küçük sapmaları erken dönemde fark edebilmek ve sistemi bütüncül olarak değerlendirmektir.

Mikrobiyoterapi: Geleceğin Biyolojik Müdahale Aracı

Mikrobiyoterapi, bağırsak mikrobiyotasını yalnızca sindirime yardımcı bir "destekleyici flora" olarak değil, biyolojik olarak etkilenebilir ve düzenlenebilir bir sistem olarak ele alır. Bu yaklaşım, klasik enfeksiyon tedavisinde olduğu gibi zararlı mikroorganizmayı ortadan kaldırmaya odaklanmak yerine, mikrobiyal ekosistemin dengesini yeniden kurmayı hedefler.

Buradaki temel fikir, mikrobiyotanın tamamen "iyi" ya da "kötü" bakterilerden oluşmadığı; önemli olanın çeşitlilik ve denge olduğu anlayışıdır. Mikrobiyoterapi bu dengeyi beslenme, hedefli probiyotikler, prebiyotikler, postbiyotikler veya fekal mikrobiyota transplantasyonu gibi yöntemlerle desteklemeyi amaçlar. Ancak her yaklaşımın kanıt düzeyinin farklı olduğu ve klinik uygulamaların dikkatle değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Bu perspektif, mikrobiyotayı pasif bir arka plan oyuncusu olmaktan çıkarıp, metabolik ve immün süreçlerle ilişkili aktif bir biyolojik alan olarak konumlandırmaktadır.

1. Yeni Nesil Probiyotikler (Next-Generation Probiotics)

Geleneksel probiyotik ürünler çoğunlukla Lactobacillus ve Bifidobacterium türlerini içerir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, sağlıklı bireylerin mikrobiyotasında yüksek oranda bulunan fakat klasik probiyotik formülasyonlarda yer almayan bazı bakterileri gündeme taşımıştır. Örneğin:

- Akkermansia muciniphila, bağırsak mukus tabakasını metabolize eder ve bariyer bütünlüğü ile ilişkilidir (14).
- Klinik çalışmalar, pastörize A. muciniphila uygulamasının metabolik parametreler ve insülin duyarlılığı üzerinde olumlu etkiler gösterebileceğini bildirmiştir (14).
- Faecalibacterium prausnitzii, butirat üretimi ve anti-inflamatuvar özellikleri ile ilişkilendirilmektedir (15).

Bu bakteriler yalnızca "iyi bakteri" olarak tanımlanabilecek pasif organizmalar değildir. Bağışıklık yanıtının dengelenmesi, inflamatuvar süreçlerin modülasyonu ve metabolik sinyalleşme ile bağlantılı olabilecek aktif biyolojik oyuncular olarak değerlendirilmektedir.

Giderek daha fazla çalışma, probiyotiklerin: I) Tür düzeyinde değil, suş düzeyinde değerlendirilmesi gerektiğini, II) metabolik özelliklerine göre seçilebileceğini, III) belirli klinik durumlara göre kişiselleştirilebileceğini öne sürmektedir.

Bu arada "tür düzeyinde değil, suş düzeyinde" değerlendirmesi de farklı izahlara muhtaçtır. Örneğin probiyotik ve "faydalı mikrobiyota" kavramlarının değerlendirilmesinde tür düzeyindeki genellemeler çoğu zaman yetersiz kalmakta, klinik anlamlılık büyük ölçüde suş (strain) düzeyindeki genetik farklılıklar ve konağın fizyopatolojik bağlamı tarafından belirlenmektedir. Aynı tür içinde yer alan farklı suşlar; metabolik kapasite, immünomodülatör etki, mukus kullanım profili, epitel bariyeri ile etkileşim ve hatta potansiyel virülans faktörleri açısından belirgin biçimde ayrışabilmektedir. Bu nedenle bir mikroorganizmanın "iyi" veya "kötü" olarak etiketlenmesi, yalnızca laboratuvar düzeyinde gösterilen probiyotik özelliklere değil, aynı zamanda konağın bağışıklık durumu, inflamatuvar yükü, hastalığın evresi ve eşlik eden komorbiditeler gibi klinik parametrelerle birlikte yorumlanmalıdır. Örneğin Akkermansia muciniphila birçok çalışmada metabolik sağlık açısından olumlu bir aday olarak öne çıksa da bazı nörodejeneratif hastalıklarda, özellikle Parkinson hastalığında belirli alt gruplarda artmış Akkermansia düzeyleri rapor edilmiş; bu durumun mukus tabakasının aşırı metabolizasyonu ve bariyer bütünlüğü üzerinde olası etkilerle ilişkili olabileceği ileri sürülmüştür. Bu çerçevede, probiyotik yaklaşımların geleceği "tür bazlı" genellemelerden ziyade, suş düzeyinde fonksiyonel karakterizasyon, güvenlik profili ve hastalık-kontekstine özgü kişiselleştirilmiş değerlendirme gerektiren bir paradigmaya doğru evrilmektedir.

Tablo 1. Yeni nesil probiyotiklerin klinikte potansiyel kullanımı

Mikroorganizma	Ana Mekanizma	Klinik Potansiyel	Hedef Alan
Akkermansia muciniphila	Mukus tabakası güçlendirme, metabolik düzenleme	Obezite, insülin direnci	Metabolik sağlık
Faecalibacterium prausnitzii	Butirat üretimi, antiinflamatuvar etki	IBD, inflamasyon	Bağırsak bariyeri
Bacteroides fragilis (PSA+)	Treg indüksiyonu, immün modülasyon	Otoimmünite	İmmün denge
Clostridium butyricum	Kısa zincirli yağ asidi üretimi	Disbiyozis	Bağırsak restorasyonu
Christensenella minuta	Enerji metabolizması regülasyonu	Obezite	Mikrobiyota stabilitesi

Bu yaklaşım, “herkese aynı probiyotik” anlayışından daha hedefli ve fonksiyon temelli bir değerlendirmeye doğru bir geçişe işaret etmektedir. Ancak bu alandaki klinik uygulamaların kanıt düzeyine göre dikkatle yorumlanması gerektiği unutulmamalıdır.

2. Hedefli Prebiyotik ve Lif Stratejileri

Prebiyotikler çoğu zaman yalnızca “lif” olarak düşünülür. Oysa prebiyotik kavramı, belirli bakteri gruplarını seçici biçimde besleyebilen substratları ifade eder. Bu nedenle her lif aynı biyolojik etkiye sahip değildir.

Yüksek lifli diyetlerin mikrobiyal çeşitliliği artırabildiği ve inflamatuvar süreçlerle ilişkili parametreleri olumlu yönde etkileyebildiği gösterilmiştir (16). Ancak burada önemli olan yalnızca lif miktarı değil, lif türlerinin çeşitliliğidir. Örneğin İnülin türü lifler, Bifidobacterium artışı ile ilişkilendirilmektedir. Dirençli nişasta, butirat üretimini artırabilir. Arabinoksilan gibi kompleks lifler, farklı mikrobiyal metabolik yolları aktive edebilir.

Bu farklılıklar, prebiyotiklerin “tek tip” değil, fonksiyonel olarak hedeflenebilir bileşenler olduğunu göstermektedir. Fonksiyonel yaklaşımda prebiyotik strateji genellikle: I) Mikrobiyal analiz sonuçlarına göre planlanır, II) Tolerans düzeyine göre kademeli artırılır, III) Bağırsak bariyer bütünlüğü ve klinik tabloya göre uyarlanır.

Bu bakış açısı, beslenmenin yalnızca kalori dengesi üzerinden değil; mikrobiyal ekosistemi şekillendiren bir düzenleyici unsur olarak ele alınabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, bireysel yanıtların değişken olabileceği ve uygulamaların kişiye özgü değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

3. Fekal Mikrobiyota Transplantasyonu (FMT)

Fekal Mikrobiyota Transplantasyonu (FMT), sağlıklı bir donörden alınan mikrobiyal topluluğun alıcıya transfer edilmesini ifade eder. Temel amaç, bozulmuş mikrobiyal dengeyi yeniden düzenlemektir.

Clostridioides difficile enfeksiyonunda FMT’nin yüzde 80–90 oranında başarı sağladığı bildirilmiştir (17). Bu sonuçlar,

> 20. yüzyılda enfeksiyon hastalıklarıyla mücadelede büyük başarılar elde eden tıp bilimi, bugün obezite, diyabet, otoimmün hastalıklar ve depresyon gibi kronik sağlık sorunlarıyla karşı karşıya. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bağırsak mikrobiyotasının yalnızca sindirim sistemiyle değil; bağışıklık, metabolizma, beyin ve diğer organ sistemleriyle de yakından ilişkili olduğunu ortaya koyuyor. Fonksiyonel tıp ve mikrobiyoterapi yaklaşımları, kronik hastalıkların değerlendirilmesinde yeni bakış açıları sunarken; probiyotikler, prebiyotikler, postbiyotikler ve mikrobiyota temelli uygulamalar geleceğin sağlık stratejileri arasında öne çıkıyor.

mikrobiyal ekosistemin bütüncül olarak yeniden yapılandırılmasının klinik açıdan etkili olabileceğini göstermiştir. Son yıllarda araştırmaların metabolik sendrom, ülseratif kolit ve nöropsikiyatrik alanlara doğru genişlediği görülmektedir; ancak bu alanlarda kanıt düzeyi henüz enfeksiyon tedavisindeki kadar güçlü değildir. FMT’nin dikkat çekici yönü, tek bir bakteri türünü değil, kompleks bir mikrobiyal topluluğu birlikte aktarmasıdır. Bu yaklaşım; I) Bir mikroorganizmayı değil, bir ekosistemi transfer eder, II) Fonksiyonel gen yollarının yeniden dengelenmesine katkı sağlayabilir, III) Mikrobiyal çeşitliliğin hızlı biçimde artmasına olanak tanıyabilir.

Bununla birlikte FMT uygulamalarında; donör seçimi, tarama protokolleri, uzun dönem güvenlik verileri konusunda standartlaşmaya ihtiyacı vardır.

Gelecekte, tam dışkı transferi yerine içeriği tanımlanmış ve güvenlik profili belirlenmiş “sentetik mikrobiyal konsorsiyumların” geliştirilmesi gündeme gelebilir. Bu yaklaşım, FMT’nin potansiyelini daha kontrollü ve hedefli biçimde kullanma imkânı sağlayabilir.

4. Postbiyotikler ve Mikrobiyal Metabolitler

Son yıllarda araştırmalar, yalnızca canlı bakterilere değil, onların ürettiği biyolojik olarak aktif moleküllere de odaklanmaya başlamıştır. Bu yaklaşım “postbiyotik” kavramı ile tanımlanmaktadır.

Postbiyotikler; I) Kısa zincirli yağ asitleri (özellikle butirat), II) Bakteriyel hücre duvarı bileşenleri, III) Mikrobiyal peptitler, IV) Ekzopolisakkaritler gibi biyolojik olarak aktif ürünleri kapsar (18).

Bu stratejinin dikkat çeken yönü, canlı mikroorganizma kullanımına ihtiyaç duymamasıdır. Bu durum:

- Stabilite açısından avantaj sağlayabilir,
- Enfeksiyon riski gibi güvenlik kaygılarını azaltabilir,
- Hedefe yönelik doz ayarlamasını kolaylaştırabilir.

Özellikle bağırsak bariyer bütünlüğü, inflamasyonun dengelenmesi ve immün tolerans mekanizmaları açısından postbiyotiklerin potansiyel etkileri araştırılmaktadır. Bu alan, mikrobiyoloji ile farmakolojinin kesişim noktasında gelişen yeni bir araştırma sahası olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, klinik uygulamaya yönelik kanıtların henüz gelişme aşamasında olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Türkiye Perspektifi: Neden Bu Dönüşüm Kritik?

Türkiye’de kronik hastalık yükü son yıllarda belirgin biçimde artmaktadır. Obezite prevalansının yüksek seyretmesi, tip 2 diyabet sıklığındaki artış ve antibiyotik tüketiminin Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD) ortalamasının üzerinde olması dikkat çekici göstergelerdir.

Özellikle antibiyotik kullanımı, erken yaşam döneminde mikrobiyota kompozisyonunu değiştirebilir ve uzun va-

deli metabolik sonuçlarla ilişkili olabilir (19). Bu durum, mikrobiyal dengenin korunmasının yalnızca enfeksiyon yönetimi değil, uzun dönem sağlık açısından da önem taşıyabileceğini düşündürmektedir.

Bunun yanı sıra; I) Batı tipi beslenme modeline geçiş, II) Lif tüketiminin azalması, III) İşlenmiş gıda tüketiminin artması, IV) Kentsel yaşam tarzı ve kronik stres mikrobiyal çeşitliliği etkileyebilecek faktörler arasında sayılmaktadır.

Türkiye açısından mikrobiyota temelli yaklaşımların önemi birkaç başlık altında özetlenebilir: I) Artan kronik hastalık yükünün azaltılmasına katkı sağlama potansiyeli II) Sağlık harcamalarının sürdürülebilirliği açısından koruyucu stratejilerin güçlendirilmesi III) Antibiyotik direnci ile mücadelede daha dengeli kullanım yaklaşımlarının geliştirilmesi IV) Yerli biyoteknoloji ve mikrobiyom araştırma altyapısının desteklenmesi.

Ülkemizde moleküler tanı kapasitesi ve metagenomik analiz altyapıları giderek gelişmektedir. Bu gelişme, mikrobiyom temelli kişiselleştirilmiş yaklaşımlar için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ancak bu süreçte dikkatli olunması gerekmektedir. Özellikle; regülasyon eksikliği, standart dışı mikrobiyota testlerinin yaygınlaşması ve bilimsel validasyon tamamlanmadan klinik uygulamaya geçilmesi gibi riskler göz ardı edilmemelidir.

Mikrobiyota alanı, yalnızca güncel bir eğilim olarak değil; kanıta dayalı, disiplinler arası bir bilimsel alan olarak yapılandırıldığında sürdürülebilir ve güvenilir sonuçlar doğuracaktır.

Sonuç: Türkiye Mikrobiyota Çağına Hazır mı?

Fonksiyonel tıp ve mikrobiyoterapi yaklaşımları, yalnızca geçici bir eğilim olarak değil; kronik hastalıkların arttığı bir dönemde gelişen sistem temelli arayışların bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

Gelecekte sağlık sistemlerinin bireysel mikrobiyal farklılıkları daha fazla dikkate alması, inflamatuvar süreçleri daha erken dönemde tanımlamaya çalışması, beslenmeyi yalnızca kalori dengesi değil, biyolojik bir müdahale aracı olarak ele alması, multidisipliner yaklaşımları güçlendirmesi beklenmektedir.

Türkiye açısından bu dönüşüm yalnızca bilimsel bir merak alanı değildir. Artan kronik hastalık yükü, sağlık harcamalarının sürdürülebilirliği ve antibiyotik kullanım oranları göz önüne alındığında, mikrobiyota temelli yaklaşımlar stratejik önem taşıyabilir. Ancak bu alanın sağlam bir bilimsel zeminde, düzenleyici çerçevelerle ve kanıta dayalı uygulamalarla ilerlemesi kritik önemdedir.

Mikrobiyota araştırmaları hızla gelişmektedir. Türkiye'nin bu gelişimi yalnızca izleyen bir konumda mı kalacağı, yoksa bilimsel üretim ve biyoteknolojik kapasite ile katkı sağlayan ülkeler arasında mı yer alacağı, önümüzdeki yılların önemli sorularından biri olacaktır.

Sonuçta; Türkiye'de mikrobiyota temelli tanı testleri, kişiselleştirilmiş mikrobiyom analizleri ve buna bağlı geliştirilen probiyotik/postbiyotik müdahalelerin klinik uygulamaya entegrasyonunda en somut engellerden biri, bu ürün ve hizmetlerin hangi yasal statü altında değerlendirileceğine dair süregelen belirsizliktir. Özellikle probiyotiklerin ve mikrobiyom odaklı preparatların "ilaç" mı yoksa "takviye edici gıda" mı olarak sınıflandırılacağı konusu; ruhsatlandırma süreçlerinden kalite standartlarına, klinik endikasyon tanımından güvenlik izlemlerine kadar birçok kritik alanı doğrudan etkilemektedir. Buna ek olarak, mikrobiyota analizlerinin ve ilişkili tedavi yaklaşımlarının SGK ve özel sigorta geri ödeme sistemleri kapsamındaki net olmayan konumu, bu teknolojilerin erişilebilirliğini kısıtlamakta ve sağlık sisteminde sürdürülebilir bir uygulama modelinin oluşmasını zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla mikrobiyota çağının klinik karşılığının güçlenebilmesi için bilimsel gelişmeler kadar, düzenleyici çerçevenin netleştirilmesi ve geri ödeme mekanizmalarının tanımlanması da stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Teşekkür: Bu çalışmanın düzenlenmesine sunduğu katkılarından dolayı yüksek lisans öğrencisi Zeynep Özsözen'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

1) Hotamisligil GS. Inflammation and metabolic disorders. Nature. 2006;444:860–867.

2) Turnbaugh PJ, et al. The human microbiome project. Nature. 2007;449:804–810.

3) Sender R, et al. Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. PLoS Biol. 2016;14:e1002533.

4) Hand TW, Vujkovic-Cvijin I, Ridaura VK, Belkaid Y. Linking the microbiota, chronic disease, and the immune system. Trends Endocrinol Metab. 2016;27(12):831–843.

5) Turnbaugh PJ, et al. An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. Nature. 2006;444:1027–1031.

6) Qin J, et al. A metagenome-wide association study of gut microbiota in type 2 diabetes. Nature. 2012;490:55–60.

7) Frank DN, St Amand AL, Feldman RA, Boedeker EC, Harpaz N, Pace NR. Molecular-phylogenetic characterization of microbial community imbalances in human inflammatory bowel diseases. Proc Natl Acad Sci U S A. 2007;104(34):13780–13785.

8) Scher JU, et al. Expansion of intestinal Prevotella copri correlates with enhanced susceptibility to arthritis. eLife. 2013;2:e01202.

9) Barabási AL, et al. Network medicine: a network-based approach to human disease. Nat Rev Genet. 2011;12:56–68.

10) Cryan JF, Dinan TG. Mind-altering microorganisms: the impact of the gut microbiota on brain and behaviour. Nat Rev Neurosci. 2012;13:701–712.

11) Sarkar A, et al. The microbiome in psychology and cognitive neuroscience. Trends Neurosci. 2016;39:763–781.

12) Fan Y, Pedersen O. Gut microbiota in human metabolic health and disease. Nat Rev Microbiol. 2021;19(1):55–71.

13) Cani PD, et al. Metabolic endotoxemia initiates obesity and insulin resistance. Diabetes. 2007;56:1761–1772.

14) Depommier C, et al. Supplementation with Akkermansia muciniphila in overweight and obese human volunteers. Nat Med. 2019;25:1096–1103.

15) Sokol H, et al. Faecalibacterium prausnitzii is an anti-inflammatory commensal bacterium identified by gut microbiota analysis of Crohn disease patients. Proc Natl Acad Sci U S A. 2008;105(43):16731–16736.

16) Sonnenburg ED, Sonnenburg JL. Starving our microbial self: the deleterious consequences of a diet deficient in microbiota-accessible carbohydrates. Cell Metab. 2014;20:779–786.

17) Van Nood E, Vrieze A, Nieuwdorp M, Fuentes S, Zoetendal EG, de Vos WM, et al. Duodenal infusion of donor feces for recurrent Clostridium difficile. N Engl J Med. 2013;368(5):407–415.

18) Aguilar-Toalá JE, et al. Postbiotics: an evolving term within the functional foods field. Trends Food Sci Technol. 2018;75:105–114.

19) Konstantinidis T, Tsigalou C, Karvelas A, Stavropoulou E, Voidarou C, Bezirtzoglou E. Effects of antibiotics upon the gut microbiome: a review of the literature. Biomedicines. 2020;8(11):502.

Sağlıklı yaşam anksiyetesi

Prof. Dr. Mustafa Altındiş

1966 yılında Konya'da doğdu. Selçuk Üniversitesi (SÜ) Tıp Fakültesinden 1989'da mezun oldu. Aynı fakültenin Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalında doktora eğitimini tamamladı. 1999 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) Tıp Fakültesi Mikrobiyoloji Ana Bilim Dalına kurucu öğretim üyesi olarak atandı. 2002 yılında Viroloji Bilim Doktoru, 2005 yılında Klinik Mikrobiyoloji doçenti oldu. Erasmus kapsamında Macaristan ve Avusturya'da misafir öğretim üyesi olarak bulundu. Bir yıl kadar görevli bulunduğu İngiltere NHS Leeds Teaching Hospitals'de laboratuvar kalite sistemlerini inceledi, moleküler viroloji referans laboratuvarında çalıştı. Mayıs 2011'de AKÜ Tıp Fakültesinde profesörlük kadrosu alan Dr. Altındiş, Haziran 2013 tarihinden itibaren Sakarya Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji AD atanmış olup, 2016-2018 yıllarında Sakarya Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Kurucu Dekanlığı görevini de üstlenmiştir. Tıbbi Mikrobiyoloji öğretim üyeliği yanı sıra Tıbbi Viroloji doçenti olan Dr. Altındiş, şu anda Tıbbi Viroloji Bilim Dalı Başkanlığı görevini sürdürmekte ve TUSEB, TÜBİTAK, COST, AB projeleri yürütmektedir.

Psikiyatrik literatürde "anksiyete", bireyin geleceğe yönelik belirsizlik, tehdit algısı ve kontrol kaybı beklentisi ile ortaya çıkan endişe, gerginlik ve kaçınma davranışlarını içeren geniş bir duygu durum bozukluğu olarak tanımlanır. "Sağlıklı yaşam anksiyetesi" kavramı ise, benzer psikodinamik temelleri paylaşmakla birlikte, risk davranışları yerine "sürdürülebilir sağlıklı yaşam" ve "optimum sağlık standartlarını kaçırma korkusu" gibi modern yaşam tarzı faktörlerine odaklanmaktadır. Böylece sağlıklı yaşam anksiyetesi, psikiyatrik anksiyete spektrumunun spesifik bir alt formu olarak anlaşılabilir ve bireyin günlük sağlık davranışlarını biçimlendiren normatif kaygı süreçleriyle ilişkilendirilebilir.

Bu çerçevede, anksiyete bozukluklarının küresel yükü önemlidir: Dünya Sağlık Örgütünün en güncel verilerine göre, dünya genelinde yaklaşık yüzde 4.4 oranında birey bir anksiyete bozukluğu yaşamaktadır; 2021 itibarıyla yaklaşık 359 milyon kişi anksiyete bozukluğu ile yaşamını sürdürmekte ve bu bozukluklar tüm mental rahatsızlıklar arasında en yaygın olanlardan biridir. Bu yüksek yaygınlık, anksiyozite ile ilişkili davranışsal risklerin ve klinik dışı kaygı biçimlerinin (ör. sağlıklı yaşam anksiyetesi) toplum sağlığı üzerindeki etkisinin göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Sağlıklı Yaşam Anksiyetesi: Detokstan Diyete Sosyal Medyanın Yarattığı Mükemmel Yaşam Baskısı

Sosyal medyada saniyeler içinde karşımıza çıkan sayısız beslenme önerisi, uzun yaşam sırları ve mucize alışkanlıklar çoğu zaman bilimsel temelden uzak, çelişkili ve abartılı mesajlar içeriyor. Bu bilgi bombardımanı özellikle sağlık konusunda hassas kişileri "doğruyu bulma" arayışında daha da kaygılı hâle getiriyor. "Sağlıklı yaşam anksiyetesi" olarak adlandırılabilecek bu durum, bireylerin iyi hissetmek için çıktıkları yolda daha fazla stres, belirsizlik ve suçluluk duygusu yaşamalarına neden oluyor. Bu yazı, sosyal medya çağında artan bu yeni kaygı tipini, nedenlerini, sonuçlarını ve başa çıkma yollarını ele alıyor.

Sağlıklı Yaşam Anksiyetesi Nedir?

Mükemmel beslenme ve yaşam tarzı baskısı: Günümüzde bireyler, sosyal medyada sürekli karşılarına çıkan "ideal yaşam" örnekleri nedeniyle kendilerini kusursuz beslenme ve yaşam tarzı uygulamalarını takip etmek zorunda hissediyor. Ancak gerçek yaşam ile dijital ortam arasındaki bu kopukluk, kişide "yeterince iyi değilim" duygusunu tetikleyerek kaygıyı artırıyor. Bu baskı zamanla, kişinin günlük rutinlerini gereğinden fazla kontrol etmeye çalışmasına ve küçük hataları bile ciddi sağlık riski olarak algılamasına yol açabiliyor.

"Yanlış bir şey yaparsam sağlığım bozulur" düşüncesi: Sağlıklı yaşam anksiyetesi yaşayan bireylerde en belirgin bilişsel süreç, sürekli tetikte olma ve en ufak bir beslenme ya da alışkanlık hatasını dramatize etme eğilimidir. Bu düşünce kalıbı, vücudun çok esnek ve adaptif bir sistem olduğunu unutturarak, sağlığa dair esneklik kapasitesini yok saymaya iter. Böylece kişi yaptığı seçimlerin sonuçlarını abartılı biçimde yorumlar ve günlük yaşam kalitesi ciddi şekilde azalabilir.

Wellness kültürünün psikolojik yükü: Modern wellness kültürü, iyi yaşamı desteklemek yerine zaman zaman birey üzerinde performans baskısı kuran bir yapıya dönüşebiliyor. Meditasyondan detoksa, egzersizden diyet protokollerine kadar birçok uygulama "yapılması gerekenler listesi" hâline gelince, iyi yaşam bir hedef değil, stres kaynağı hâline gelmektedir. Bu da sağlıklı yaşam çabasını kişinin omuzunda ağır bir yük hâline getiriyor.

Sosyal Medyanın Rolü: Herkes Uzman, Her Bilgi Doğru mu?

Influencer kültürü ve doğruluğu tartışmalı öneriler: Sağlık içeriklerinin önemli bir kısmı, herhangi bir akademik ya da bilimsel altyapısı olmayan influencer'lar tarafından üretilebilmektedir. Görsel çekiciliği yüksek ama bilimsel temeli zayıf olan bu tür öneriler, milyonlarca kişiye kısa sürede ulaşabilmekte ve kullanıcıların çoğu tarafından bu içerikler profesyonel sağlık tavsiyesi gibi algılayarak uygulamaya konulabilmektedir.

Bu tür içerik üreticileri çoğu zaman karmaşık bilimsel verileri yüzeysel bir şekilde yorumlamakta ve bilimsel bağlamdan kopuk, kişisel deneyimlere dayalı genellemeler yapmaktadır. Takipçi sayısı yüksek olan bu kişilerin önerileri, özellikle sağlık konusunda hassas bireylerde otorite etkisi yaratır ve "onlar yaptıysa doğrudur" şeklinde bilişsel bir yanlılığa neden olabilmektedir. Bu durum, kişilerin kendi beden sinyallerini göz ardı ederek, bilimsel zemini olmayan uygulamalara yönelme riskini artırabilir.

Tiktok, Instagram ve Youtube'da hızla yayılan diyet/uzun yaşam trendleri: Kısa sürede popülerleşen diyetler, uzun yaşam ritüelleri, biohacking (bireyin biyolojisini bilinçli müdahalelerle optimize etme) pratikleri ve "mucize" sonuç vadeden alışkanlıklar, algoritmaların etkisiyle sürekli olarak kullanıcıya pompalanmaktadır. Video formatının hızlı ve etkileyici doğası, karmaşık sağlık konularını aşırı basitleştirerek sunmakta ve izleyicinin algısında yanlış bir netlik/doğruluk hissi oluşturmaktadır.

Bu platformlarda içeriklerin yayılma hızının çok yüksek olması, yanlış ya da eksik bilgilerin de aynı hızla dolaşıma girmesine yol açmaktadır. Algoritmalar, kullanıcıların en çok durakladığı içerikleri tekrar tekrar göstererek sağlıkla ilgili tek bir görüşü baskın hâle getirmektedir. Böylece bireyler, bilimsel çeşitliliği yansıtan geniş bir perspektif yerine, "tek doğru budur" algısıyla karşı karşıya kalabilir. Bu da kişinin kendi sağlık kararlarında aşırı bir kesinlik arayışına ve artan kaygıya yol açabilmektedir.

Çelişkili bilgiler: "Kahve faydalı mı zararlı mı?", "Yağ tüketmeli miyiz?": Sağlık alanında karşılaşılan çelişkiler, bireylerin karar verme süreçlerini zorlaştırmakta, bugün faydalı denilen bir gıda yarın zararlı olarak sunulabilmektedir. Bu dalgalanmalar/çelişkiler sadece kaygıya yatkın kişiler için değil, herkes için kafa karıştırıcı bir ortam oluşturmaktadır.

> Günümüzde bireyler, sosyal medyada sürekli karşılarına çıkan "ideal yaşam" örnekleri nedeniyle kendilerini kusursuz beslenme ve yaşam tarzı uygulamalarını takip etmek zorunda hissediyor. Ancak gerçek yaşam ile dijital ortam arasındaki bu kopukluk, kişide "yeterince iyi değilim" duygusunu tetikleyerek kaygıyı artırıyor. Bu baskı zamanla, kişinin günlük rutinlerini gereğinden fazla kontrol etmeye çalışmasına ve küçük hataları bile ciddi sağlık riski olarak algılamasına yol açabiliyor.

Çelişkili sağlık bilgilerinin temelinde çoğu zaman bilimsel araştırmaların farklı bağlamlarda yapılması ve medyanın bu nüansları aktarmamasından kaynaklanan bir yaklaşım hatası vardır. Kullanıcı, sürekli değişen bu bilgiler içinde bir doktrin bulmaya çalışırken karar verme süreçleri giderek zorlaşır. Sonuç olarak birey, "yanlış bir seçim yapacağım" korkusuyla sürekli yeni bilgi arayışına girer, bu da kaygıyı besleyen döngüsel bir yapıya dönüşür.

Bilgi kirliliği ve karar yorgunluğu: Sosyal medya, doğru bilgi ile yanlış bilgiyi aynı hızla yaydığı için kullanıcı artık, sürekli bir doğrulama çabasına girmekte, bu da "mental yorgunluk", karar verememe, günlük yaşamda tereddüt artışı gibi sorunlara yol açabilmektedir.

Bilgi kirliliğinin yoğunluğu, bireyin sürekli karşılaştırma ve doğrulama yapma ihtiyacı hissetmesine neden olmakta, bu durum zamanla zihinsel yükü artırmakta ve kişinin sağlıkla ilgili basit kararları bile büyük bir çaba gerektiren karmaşık süreçlere dönüştürmesine yol açmaktadır. Karar verme zorluğu arttıkça kişi ya tamamen kontrolü bırakmakta ya da tam tersi her ayrıntıyı takıntılı biçimde yönetmeye çalışır; her iki durumda da sağlıklı yaşam hedefi zarar görmektedir.

Bilimsel Bilginin Doğası: Neden Sürekli Çelişki Görüyoruz?

Bilimsel sonuçlar, araştırmanın yapıldığı topluma, örneklem büyüklüğüne, yaş aralığına ve ölçüm yöntemlerine ve daha pek çok parametreye göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle bazen bir çalışmanın bulguları başka bir grupta geçerli olmayabilir. Sosyal medyada ise bu nüanslar neredeyse hiç anlatılmadığı için sonuçların çelişkili olduğu sanılır. Gözlemsel çalışmalar bazen nedensellik kuramaz; sadece ilişki gösterir. Fakat medya, bu ayrımı çoğu zaman aktarmadığı için "X hastalığının nedeni bulundu!" gibi abartılı başlıklar ortaya çıkabilmektedir. Oysa kapsamlı klinik deneyler olmadan kesin konuşmak mümkün değildir. Birçok haber kaynağı, daha fazla etkileşim almak için araştırma bulgularını dramatize eder. "Mucize besin", "Ömür uzatan yöntem", "Kesin zararlı bulundu" gibi başlıklar bilimsel gerçekliğin çok ötesindedir.

Mükemmel Sağlık Uğruna Kontrol Kaybı

Kendini sürekli izleme; adım sayısı, kalori sayımı, mikrobiyota takıntısı: Sağlığı izleyen dijital araçların yararlı yanı kadar, ölçümlere bağımlılık riski de vardır. Sürekli adım, kalori, uyku ve bağırsak sağlığına dair parametreleri takip etmek, kişinin bedenle olan ilişkisini mekanik hâle getirir ve kaygıyı artırır. Bir öğünde "ideal" olmayan bir besin tüketildiğinde kişi kendini suçlu hissedebilir. Bu duygusal yük, sağlıklı yaşam hedefinden çok uzak, obsesif bir ilişki biçimine dönüşebilmektedir.

Strese bağlı paradoks; sağlıklı yaşam uğruna sağlığın bozulması: Aşırı kontrol; kortizol artışı, uyku bozukluğu, iştah dalgalanmaları ve genel ruh hâlinde düşüş yaratabilir. Böylece kişi "daha sağlıklı olmak için" çabalarken tam tersine sağlığını kaybedebilmektedir.

Aşırı kontrol çabası, bireyin hayatındaki spontane davranışları azaltarak sosyal ilişkilerini de sekteye uğratabilir. Uyku saatlerini, öğünlerini veya egzersiz rutinlerini kusursuzlaştırmaya çalışan kişi, küçük sapmaları bile tehdit gibi algılar ve bu da sürekli bir tetikte olma hâli yaratır. Bu tetiklenmişlik durumu, kortizol seviyelerinin kronik olarak yüksek kalmasına ve uzun vadede bağışıklık fonksiyonlarında zayıflamaya neden olabilir. Sonuç olarak kişi, daha iyi hissetmek için katı uygulamalar yaparken hem psikolojik hem fizyolojik açıdan daha kırılgan hâle gelebilir.

Tüketim Kültürü ve Wellness Endüstrisi

Sürekli yeni ürünler, takviyeler ve "biohacking" araçları: Piyasa, her yıl yüzlerce yeni takviye, cihaz ve yaşam tarzı ürünü sunuyor. Bunların bir kısmı bilimsel olarak gerekli olmadığı hâlde, pazarlama dili ve etkinlikleri tüketiciyi ikna edecek şekilde tasarlanabilmektedir.

Bu ürünlerin büyük kısmı, bilimsel araştırmaların henüz erken aşamalarında elde edilen bulgulara dayanarak pazara sürülebilmekte, ruhsat konuları da farklılık arz etmektedir. Reklamlarda "uzun yaşam", "detoks", "bağışıklık güçlendirme" gibi iddialar ön plana çıkarılmakta; ancak ürününlerin bir kısmının etkisi plasebo seviyesini aşamamaktadır. Tüketici ise bilimsel karmaşıklığı değerlendiremediği için bu ürünleri "gereklilik" olarak görmeye yönlendirilmektedir.

"Almazsam eksik kalırım" hissi: FOMO (Fear of missing out-kaçırma korkusu / fırsatı kaçırma kaygısı) burada da devreye girmektedir. Kişi bir ürün kullanmadığında kendini geri kalmış, daha az sağlıklı veya uzak bir tehdit altında hissedebilmektedir. Bu eksiklik algısı, sosyal karşılaştırma mekanizmasının tetiklenmesiyle daha da güçlenir. Kişi, çevresindeki insanların yeni çıkan bir takviyeyi veya yaşam tarzı rutinini benimsediğini gördükçe kendisini geride kalmış hisseder. Böylece sağlık, bireyin ihtiyaçlarından ziyade sosyal rekabetin bir parçasına dönüşür. Bu da satın alma davranışını rasyonel değil, duygusal bir temele oturtarak finansal yük oluşturmaya başlayabilir.

Sağlık yerine performans odaklı yaşam: Wellness kültürü zamanla bireyin kendini "optimize edilmesi gereken bir makine" gibi görmesine yol açabilmektedir. Bu da sağlık kavramını doğal hâlden çıkarıp performans yarışına dönüştürmektedir. Performans odaklı sağlık anlayışı, kişiyi sürekli daha "verimli", daha "fit" veya daha "dengeli" olmak zorundaymış gibi hissettirmekte, sağlık, kişinin kendisiyle olan ilişkisinden çıkarak dışarıdan onay beklediği bir başarı ölçütüne dönüşmektedir. Bu durum uzun vadede hem öz-şefkatin azalmasına hem de yaşamın doğal ritmine yabancılaşmaya neden olmaktadır.

Sağlıklı Yaşam Anksiyetesinin Klinik ve Psikolojik Yansımaları

Ortoreksiyaya yaklaşan davranışlar: Ortoreksiya, sağlıklı beslenmeye aşırı takıntı hâlidir. Sağlıklı yaşam anksiyetesi bu davranış kalıbının ön evresi olabilir. Kişi gıdaları "iyi-kötü", "temiz-kirli" şeklinde sınıflayarak obsesif kısıtlamalara yönelir. Bu süreçte birey, yalnızca besinleri değil, tüm sağlık davranışlarını "mükemmel-kusurlu" ikilemi üzerinden değerlendirmeye başlar. Bu katılık, esneklik kapasitesinin azalmasına, sosyal ortamlardan kaçınmaya ve yaşam doyumunun düşmesine yol açabilir. Erken müdahale edilmezse bu davranış biçimi klinik düzeyde yeme bozukluklarına zemin hazırlayabilmektedir.

Kaygı, obsesif davranışlar, benlik yetersizliği: Sürekli "doğru seçim yapma" zorunluluğu kişinin özdeğer algısını zedeler. Hata yapma korkusu günlük yaşamı zorlaştırır. Kişi zamanla kendi bedeniyle çatışan bir ilişki kurar; vücudunu sürekli kontrol edilmesi gereken bir sorun kaynağı gibi görmeye başlar. Bu algı, benlik saygısının zayıflamasına ve "ne yaparsam yapayım yeterli değilim" hissinin pekişmesine neden olur. Bu durum günlük yaşamda dikkat dağınıklığı, uyku bozuklukları ve sosyal geri çekilme gibi belirtilerle kendini gösterebilmektedir.

Sosyal izolasyon, yaşamdan keyif alamama: Sağlık hedeflerinin aşırı katılaştırılması, bireyin spontane sosyal etkinliklere katılmasını zorlaştırır. Arkadaş ortamlarında sunulan yiyecekleri reddet-

me, hazırlıksız bir aktiviteye katılamama gibi engeller, zamanla kişinin sosyal çevresiyle arasına mesafe koymasına yol açar. Bu izolasyon, ruh sağlığını olumsuz etkileyerek anhedoni (zevk alamama) belirtilerini tetikleyebilir.

Bilimsel Olarak Sağlıklı Yaşamın Gerçek Temelleri

Temel ve değişmeyen bilimsel prensipler: Bilim zamanla değişse de ana ilkeler sabittir; dengeli beslenme, yeterli hareket, düzenli uyku ve stresin yönetilmesi. Bu prensiplerin gücü, farklı kültürlerde, yaş gruplarında ve zamanlarda tutarlı şekilde etkili olmalarından gelir. Ayrıca bu temel davranışlar, ileri düzey biyoteknolojik müdahalelerden çok daha güçlü ve kalıcı etkilere sahiptir. Kişinin bu basit ama etkili alışkanlıklara odaklanması, bilgi kirliliğinin yarattığı karmaşayı da azaltabilir.

Uyku, hareket, dengeli beslenme, stres yönetimi: Bu dört unsur birçok kronik hastalığın riskini azaltır, zihinsel performansı artırır ve genel iyilik hâlini destekler. Bu unsurlar birbirleriyle güçlü biçimde bağlantılıdır; örneğin yetersiz uyku iştah kontrolünü bozar, düşük fiziksel aktivite stresi artırır, stres ise beslenme tercihlerini olumsuz etkiler. Bu nedenle sağlığı desteklemek, tek bir alanda mükemmel olmak değil, bu dört temel alan arasında bir denge kurmakla mümkündür.

Mikrobiyota dostu yaşam: çeşitlilik, fiber, doğal gıdalar: Bağırsak sağlığı vücudun birçok fonksiyonuyla bağlantılıdır; bu nedenle çeşitlilikten zengin bir beslenme önemlidir. Bağırsak mikrobiyotasını destekleyen beslenme modelinin en önemli özelliği çeşitliliktir. Lif açısından zengin ve işlenmemiş gıdalar, bağırsak bakterilerinin ürettiği kısa zincirli yağ asitlerini artırarak bağışıklık ve metabolizma üzerinde olumlu etkiler oluşturur. Bu nedenle modası geçici diyet trendleri yerine uzun vadeli beslenme alışkanlıklarına odaklanmak daha etkilidir.

"Az ama sürekli" yaklaşımı: Radikal değişiklikler kısa vadeli, sürdürülebilir olmayan sonuçlar üretir. En etkili yöntem küçük ama sürekli adımlardır. Bu yaklaşım, davranış değişikliğinin psikolojik temelleriyle de uyumludur. İnsan beyni, ani ve büyük değişimlere direnç gösterir; oysa küçük adımlar alışkanlığa dönüşme potansiyeli taşır. Böylece kişi hem sürdürülebilir hem de psikolojik olarak yük oluşturmayan bir sağlıklı yaşam modeli geliştirebilir.

Bilgi Kirliliğiyle Başa Çıkma: Pratik Stratejiler

Bilgi filtresi oluşturmak: Kişi, her gördüğü bilgiyi uygulamak zorunda değildir ve kaynağın güvenilirliğini sorgulamak, temel bilim prensiplerini hatırlamak ve vurgulamak önemlidir. Bilgi filtresi geliştirmek, aynı zamanda kişinin kendi değerlerini ve yaşam önceliklerini netleştirmesine yardımcı olur. Böylece birey her yeni sağlık trendini kendi bağlamına göre değerlendirir ve "Benim için gerekli mi?" sorusunu sormayı öğrenir. Bu süreç bilişsel yükü azaltır.

Uzman görüşü alma: Diyetisyen, hekim veya alan uzmanı yönlendirmesi, sosyal medya bilgilerine kıyasla çok daha güvenilir ve kişiye özeldir. Uzmanlar yalnızca bilgi veren kişiler değil, aynı zamanda bireyin sağlık hedeflerini gerçekçi bir çerçevede yeniden yapılandırmasına yardımcı olan rehberlerdir. Böylece kişi, sosyal medyadaki genellemeler yerine kişisel tıbbi geçmişine ve ihtiyaçlarına uygun bir yol haritası edinir.

Algoritmaların yönlendirmesine karşı bilinçli ekran kullanımı: İzlenen içerikler kısa sürede algoritmayı şekillendirir. Gerektiğinde sağlık içeriklerini azaltmak bile kaygı seviyesini düşürebilir. Dijital detoks uygulamaları, bildirim kısıtlama, takip edilen hesapların filtrelenmesi gibi küçük değişiklikler bile zihinsel rahatlama yaratabilir. Algoritmaların yönlendirme gücü azaldığında kişi kendi gündemini belirleme konusunda daha özgür hisseder.

Kendine uygun hedef belirleme: Genelleştirilmiş trendler yerine bireysel ihtiyaçlara göre hedef belirlemek sürdürülebilirliği artırır. Sağlık davranışlarının kişiye özel olması, sürdürülebilirliğin en önemli koşuludur. Gerçekçi ve bireyin yaşam ritmine uyum sağlayan hedefler, başarı hissini güçlendirerek motivasyonu artırır. Böylece sağlıklı yaşam, bir zorunluluk değil, doğal bir akış hâline gelir.

Sonuç: İyi Yaşam, Mükemmel Değil Sürdürülebilir Olandır

Bilimsel bilgi zaman içinde değişse de sağlıklı yaşamın temel taşları sabittir. Dolayısıyla mükemmellik arayışı yerine kişisel dengeyi korumak daha önemlidir. Sağlıklı yaşam bir yarış, performans gösterisi veya toplumsal bir vitrin değildir; kişinin kendi bedenini, ihtiyaçlarını ve sınırlarını tanıdığı bir yolculuktur. Kaygı yerine farkındalığı, katılık yerine esnekliği benimsemek ise bu yolculuğu çok daha keyifli kılar. Özetle;

- Bilim değişir ama temel prensipler sabittir.
- Sağlıklı yaşam bir yarış değil, kişisel bir denge arayışıdır.
- Kaygı yerine farkındalık ve esneklik vurgusu daha kıymetli olacaktır.

Kaynaklar

Cena, H., & Calder, P. C. (2020). Orthorexia nervosa: A review of the literature. Eating and Weight Disorders, 25(4), 1325-1334.

Chou, W.-Y. S., Oh, A., & Klein, W. M. P. (2018). Addressing health-related misinformation on social media. JAMA, 320(23), 2417-2418.

Fardouly, J., Diedrichs, P. C., Vartanian, L. R., & Halliwell, E. (2015). Social comparisons on social media: The impact of Facebook on young women's body image concerns and mood. Body Image, 13, 38-45.

Hendrickson, K. L., & Rasmussen, K. R. (2017). The social media diet: A scoping review of research on problematic social media use and wellness. Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking, 20(6), 311-318.

Ioannidis, J. P. A. (2005). Why most published research findings are false. PLoS Medicine, 2(8), e124.

Lupton, D. (2016). The quantified self: A sociology of self-tracking. Polity Press.

Pizzoli, S. F. M., Triberti, S., Monzani, D., Mazzocco, K., & Pravettoni, G. (2020). Health anxiety and the digital health era: Challenges and opportunities. Computers in Human Behavior, 110, 106389.

Rettie, H., & Daniels, J. (2021). Anxiety, health behaviors, and the role of social media during health crises: A review. Journal of Affective Disorders Reports, 4, 100140.

Schneider, T., & Lövgren, L. (2021). The wellness syndrome and the psychological burden of self-optimization. Journal of Health Psychology, 26(12), 2332-2343.

Turner, P. G., & Lefevre, C. E. (2017). Instagram use is linked to increased symptoms of orthorexia nervosa. Eating and Weight Disorders, 22(2), 277-284.

Vannucci, A., Flannery, K. M., & Ohannessian, C. M. (2017). Social media use and anxiety in emerging adults. Journal of Affective Disorders, 207, 163-166.

WHO (2018). https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/anxiety-disorders (Erişim Tarihi: 29.03.2026).

Isı dalgalarından vektör kaynaklı salgınlara: Türkiye'nin sağlık cephesinde durumu

Doç. Dr. Okan Derin

İstanbul Medipol Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Epidemiyoloji Ana Bilim Dalında doktora adayıdır ve aynı zamanda Şişli Hamidiye Etfal EAH Enfeksiyon Hastalıkları ve Klinik Mikrobiyoloji Kliniğinde eğitim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında HIV, antimikrobiyal direnç, enfeksiyon hastalıkları epidemiyolojisi, iklim değişikliğinin bulaşıcı hastalıklar üzerindeki etkileri yer almaktadır. Veri temelli yaklaşım, epidemiyolojik modelleme ve sürdürülebilir sağlık altyapısı üzerine odaklanmaktadır.

En büyük zafer, önlenmiş felakettir.

Zafer her zaman cephede kazanılmaz. Bazen bir salgın çıkmadığı için, bir çocuk hastalanmadığı için, bir yaşlı kavurucu sıcakta hayatta kalabildiği için kazanılır. Bu da bir zaferdir — hem de en büyüğü. Günümüzde milletlerin savaşı artık görünmeyen düşmanlarla veriliyor; kavurucu sıcaklık, virüs taşıyan sivrisinek, zehirlenen hava, kirlenmiş su ve geciken eylem… Önleyebildiğimiz her felaket, bilimle kazanılmış bir cephedir. Türkiye bu savaşta nerede duruyor?

İklim değişikliği yalnızca çevresel bir sorun değil aynı zamanda halk sağlığına yönelik karmaşık, çok boyutlu ve hızla derinleşen bir krizdir. Atmosferdeki sera gazlarının artışı, ortalama sıcaklıkların yükselmesi ve aşırı hava olaylarının daha sık ve şiddetli hâle gelmesi, insan sağlığını doğrudan ya da dolaylı biçimde tehdit etmektedir. Bu etkiler; bulaşıcı hastalıkların yayılımı, solunum yolu hastalıklarının alevlenmesi, gıda ve su güvenliğinin bozulması gibi geniş bir yelpazede hissedilmektedir.

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), 2030-2050 yılları arasında iklim değişikliğine bağlı nedenlerle her yıl yaklaşık 250 bin ek ölüm gerçekleşeceğini tahmin etmektedir (1). Bu ölümlerin büyük kısmı, ısıya bağlı kardiyovasküler hastalıklar, ishal, sıtma ve çocukluk çağı yetersiz beslenmesi gibi önlenebilir nedenlerden kaynaklanacaktır. Ancak ülkelerin etkilenme düzeyi, coğrafi konumları, altyapı kapasiteleri, sağlık sistemlerinin dayanıklılığı ve sosyoekonomik koşullarıyla büyük ölçüde şekillenmektedir.

Türkiye, Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle iklim değişikliğine karşı en kırılgan bölgelerden birinde bulunmaktadır (2). Artan sıcak hava dalgaları, kuraklık riski, değişen yağış rejimleri ve ekosistem bozulmaları, özellikle yaz aylarında halk sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Bu yazıda, iklim değişikliğinin sağlık üzerindeki başlıca etkileri ayrıntılı olarak ele alınacak; Türkiye'nin bu kapsamda yürüttüğü hazırlıklar, politika yanıtları ve uyum stratejileri değerlendirilecektir. Son olarak, mevcut hazırlık düzeyinin güçlü ve zayıf yönleri analiz edilerek, sağlık sisteminin iklim kaynaklı risklere karşı daha dirençli hâle gelmesi için somut öneriler sunulacaktır.

İklim Değişikliğinin Sağlık Üzerindeki Etkileri

İklim değişikliğinin sağlık üzerindeki etkileri, hem doğrudan (örneğin ısı dalgaları, sel gibi fiziksel olaylar) hem de dolaylı yollarla (örneğin vektörlerin yayılımı, gıda güvenliği, hava kirliliği) ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler, bulaşıcı ve bulaşıcı olmayan hastalıkları, ruh sağlığını ve sağlık sistemlerinin işleyişini yakından ilgilendirir (3).

Aşırı Sıcaklıklar ve Isı Dalgaları

Küresel sıcaklık artışına paralel olarak, aşırı sıcaklık olayları daha sık ve şiddetli hâle gelmektedir. Isı dalgaları, özellikle yaşlılar, çocuklar, kronik hastalığı olanlar ve açık havada çalışanlar için ciddi sağlık riski taşır. İnme, kalp-damar ve solunum sistemi hastalıklarına bağlı hastalık ve ölüm oranlarında artış gözlenmektedir (3).

Türkiye'de 2021 yazında yaşanan uzun süreli sıcak hava dalgaları sadece orman yangınlarını değil, hastane başvurularında artışı da beraberinde getirmiştir. İstanbul, İzmir ve Adana gibi büyükşehirlerde, yaz aylarında acil servise başvuran kalp ve solunum hastalıkları olgularının sıcaklıkla uyumlu olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (4).

Vektör Kaynaklı Hastalıklar

İklim değişikliği, vektör canlıların (sivrisinek, kene vb.) yaşam döngüsü, üreme alanları ve biyocoğrafik dağılımı üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Özellikle Aedes aegypti (sarı humma

sivrisineği) ve Aedes albopictus (Asya kaplan sivrisineği) gibi sivrisinek türlerinin sıcaklık ve nem değişimlerine son derece duyarlı olduğu bilinmektedir (5). Son yıllarda bu türlerin Türkiye'deki yayılımı artmış; bu durum, dang ateşi gibi tropikal hastalıkların gelecekte Türkiye için yerel (otokton) salgın riski oluşturabileceğine işaret etmektedir (6, 7). Nitekim Avrupa'da 2011 yılından bu yana Hırvatistan, İtalya, Fransa, İspanya gibi ülkelerde yerli dang olgularının raporlanmaya başlaması, bu riskin sadece teorik olmadığını, iklim değişikliğinin bulaşıcı hastalıkların coğrafyasını somut olarak dönüştürdüğünü göstermektedir (8).

Bununla birlikte, Türkiye'nin mevcut iklim ve ekolojik özellikleri nedeniyle hâlihazırda karşı karşıya olduğu en ciddi vektör kaynaklı hastalıklardan biri Kırım Kongo Kanamalı Ateşi (KKKA)'dir. Bu hastalığın vektörü olan Hyalomma marginatum türü keneler, sıcaklık ve nem artışından etkilenerek daha yüksek rakımlara ve kuzeye doğru yayılmaktadır (9). Türkiye'de son yıllarda özellikle Doğu ve Orta Anadolu Bölgeleri'nde vaka sayılarında gözlenen artış, bu ekolojik değişimin bir yansımasıdır. İran'da yapılan epidemiyolojik çalışmalar da bu durumu destekler niteliktedir. Mostafavi ve ark. (2019) tarafından yürütülen bir mekânsal analiz çalışmasında, toprak nemi ve sıcaklık artışlarının Hyalomma türü kenelerin popülasyonunu desteklediği ve KKKA'nın mekânsal yayılımını genişlettiği gösterilmiştir (10). Telmadarraiy ve ark. (2015) ise İran'ın farklı iklim bölgelerinde kene yoğunluğunu karşılaştırmış, sıcaklık-nem indeksleri ile kene aktivitesi arasında güçlü bir ilişki bulmuştur (11). Chinikar ve ark. (2010) çalışmasında ise pastoral göçler, nemli mevsimler ve sıcak geçen kışların kenelerin aktif kalma sürelerini uzattığı ve hastalık riskini artırdığı belirtilmiştir (12). Bu bulgular, Türkiye için de doğrudan çıkarımlar sunmaktadır. Coğrafi, iklimsel ve ekolojik açıdan benzerlik gösteren bu iki ülkenin verileri, KKKA gibi zoonotik enfeksiyonların iklim değişikliği bağlamında nasıl yeniden şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Su ve Gıda Kaynaklı Hastalıklar

İklim değişikliği yalnızca su kaynaklarının miktar ve kalitesini değil, aynı zamanda tarım ürünlerinin güvenliğini de tehdit ederek su ve gıda kaynaklı hastalıkların insidansını artırmaktadır. Artan sıcaklık ve nem, patojenlerin çoğalmasını hızlandırırken; seller ve taşkınlar, özellikle altyapısı yetersiz bölgelerde içme suyu sistemlerinin fekal kontaminasyona maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, kırsal bölgelerde suyla taşınan hastalıkların yayılma riskini önemli ölçüde artırmaktadır (13-15).

2004 yılında Bangladeş'te yaşanan büyük çaplı seller sonrası içme suyu kaynaklarının kanalizasyonla kontamine olması, yaklaşık 47.000 kolera vakasına yol açmıştır. Bu vaka, ekstrem hava olaylarının su kaynaklı salgınlara nasıl zemin hazırlayabileceğini açık biçimde göstermektedir (16).

Sırbistan ve Hırvatistan'da yürütülen 15 yıllık kapsamlı bir analiz, iklim değişikliğinin gıda güvenliği üzerindeki etkilerini somut verilerle ortaya koymuştur. 2009-2023 yılları arasında artan sıcaklıklar ve düzensiz yağış rejimleri, özellikle mısır gibi temel ürünlerde aflatoksin B1 (AFB1) ve fumonisinler (FB1, FB2) gibi mikotoksinlerin görülme sıklığını artırmıştır (17-19). Bu bulgular, özellikle Türkiye'nin Trakya ve Karadeniz Bölgeleri gibi benzer iklim koşullarına sahip alanlarında da benzer mikotoksin risklerinin mevcut olabileceğini düşündürmektedir.

2024'te yayımlanan bir çalışmada, artan nemlilik ve bitki stresinin Salmonella Enterica'nın marul gibi yeşil yapraklı sebzeler üzerinde yüzeyden iç dokulara geçişini kolaylaştırdığı; yüksek nem koşullarının patojenlerin bitki içinde daha uzun süre canlı kalmasına yol açarak hasat sonrası yıkama işlemlerini etkisiz hâle getirdiği gösterilmiştir (20).

Hava Kalitesi ve Solunum Yolu Hastalıkları

İklim değişikliği, hava kalitesini doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyerek solunum sistemi sağlığını tehdit etmektedir. Artan sıcaklık, kuraklık ve orman yangınları, atmosferdeki kirletici maddelerin yoğunluğunu artırmakta; bu durum hem akut hem de kronik solunum yolu hastalıklarının sıklığında artışa neden olmaktadır. Özellikle partikül madde (PM2.5 ve PM10), yüzey ozonu (O_3) ve polen yükü gibi parametreler, iklimsel değişimlerle doğrudan ilişkilidir (21).

Yüzeydeki ozon oluşumu, güneş ışığı altında azot oksitler (NO_x) ve uçucu organik bileşiklerin (VOC) fotokimyasal reaksiyonu ile artar. Sıcak günlerde bu süreç hızlandığı için özellikle yaz aylarında kent merkezlerinde yer seviyesinde ozon konsantrasyonları artmakta ve astım atakları, hava yolu inflamasyonu gibi durumlar daha sık görülmektedir (22).

Kuraklık ve artan sıcaklıklar aynı zamanda orman yangınlarını daha sık ve şiddetli hâle getirmekte, bu yangınlar büyük miktarda ince partikül madde (PM2.5) oluşturarak geniş alanlarda hava kalitesini bozmaktadır. 2021 yılında Türkiye'nin güney kıyılarında meydana gelen büyük orman yangınları sırasında Muğla ve Antalya illerinde PM2.5 seviyeleri kısa sürede Dünya Sağlık Örgütünün önerdiği sınırların üzerine çıkmış ve solunumsal yakınmalarla acil başvuruların arttığı bildirilmiştir (23).

Türkiye'de bu etkilere ilişkin bölgesel farklar dikkat çekmektedir. Örneğin İç Anadolu'da kış aylarında artan katı yakıt kullanımı ve termik santrallerin yaydığı emisyonlar; Marmara Bölgesi'nde ise trafik kaynaklı hava kirliliği, iklim faktörleriyle birleşerek kümülatif sağlık risklerini artırmaktadır.

Ruh Sağlığı Üzerindeki Etkiler

İklim değişikliğinin neden olduğu afetler yalnızca fiziksel değil, ruh sağlığı üzerinde de ciddi etkiler yaratmaktadır. Sel, orman yangını ve fırtına gibi ani olaylar sonrası travma, anksiyete ve depresyon sık görülürken; çevresel belirsizlik ve ekosistem kayıpları da uzun vadeli psikolojik stres yaratmaktadır. Bu etkiler özellikle çocuklar, yaşlılar ve kronik hastalığı olan bireyler için daha belirgindir.

Türkiye'de afetler sonrası yapılan saha gözlemleri, psikososyal destek hizmetlerinin genellikle geri planda kaldığını ve uzman eksikliği ile sürdürülebilirliğin sağlanamadığını göstermektedir (24). AFAD'ın 2022 verilerine göre 16 bin 880 kişiye psikososyal destek eğitimi verilmiş olsa da bu hizmetlerin sahaya etkili biçimde yansıyıp yansımadığı belirsizdir. İklim değişikliğinin ruh sağlığı üzerindeki etkileri sadece ani afetlerle sınırlı değildir. Kuraklık ve çevresel bozulma gibi süreçler bireylerde "iklim anksiyetesi" ve "ekolojik yas" gibi psikolojik tepkilere yol açmaktadır (25). Bu nedenle iklim politikalarının, ruh sağlığını da içeren bütüncül bir yaklaşımla planlanması gereklidir.

Türkiye'nin Hazırlık Düzeyi ve Politika Yanıtları

Isı dalgalarına karşı eylem planları: Türkiye, ısı dalgalarına bağlı sağlık risklerine karşı özellikle İstanbul ve İzmir gibi büyükşehirlerde yerel düzeyde öncü adımlar atmıştır. Bu kentlerde geliştirilen yönetim planlarında sıcaklık eşikleri belirlenmiş, yaşlılar, çocuklar ve kronik hastalar gibi kırılgan gruplar için hedefli müdahale stratejileri oluşturulmuştur (26).

> Dünya Sağlık Örgütü, 2030-2050 yılları arasında iklim değişikliğine bağlı nedenlerle her yıl yaklaşık 250 bin ek ölüm gerçekleşeceğini tahmin etmektedir. Bu ölümlerin büyük kısmı, ısıya bağlı kardiyovasküler hastalıklar, ishal, sıtma ve çocukluk çağı yetersiz beslenmesi gibi önlenebilir nedenlerden kaynaklanacaktır. Ancak ülkelerin etkilenme düzeyi, coğrafi konumları, altyapı kapasiteleri, sağlık sistemlerinin dayanıklılığı ve sosyoekonomik koşullarıyla büyük ölçüde şekillenmektedir.

Bu yerel uygulamaların ulusal düzeye yaygınlaştırılması amacıyla, 2024 tarihli İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı'nda sağlık sisteminin uyum kapasitesinin güçlendirilmesi ve ısı olaylarına özel erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi stratejik hedef olarak tanımlanmıştır (27).

Yeşil sağlık tesisleri ve sürdürülebilirlik girişimleri: Sağlık hizmetlerinin iklim değişikliğine uyum sağlamasında sürdürülebilir altyapılar kritik rol oynar. Türkiye'de bu alandaki önemli bir adım, 2012 yılında yayımlanan bir genelge ile 200 yatak ve üzeri tüm yeni hastanelerde LEED sertifikası zorunluluğu getirilmesi olmuştur. Ayrıca kamu binalarına yönelik 2020 tarihli enerji verimliliği rehberinde sağlık tesislerinde gri su kullanımı, yenilenebilir enerji sistemleri ve atık yönetimi gibi uygulamalar teşvik edilmiştir. Akademik çalışmalar, Türkiye'de yeşil hastane kavramının özel hastaneler dâhil olmak üzere yayılmaya başladığını göstermektedir. 2024-2030 İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi'nde ise sağlık tesislerinin karbon ayak izinin azaltılması ve yeşil bina kriterlerinin yaygınlaştırılması ulusal hedef olarak belirlenmiştir. Ancak uygulamalar hâlen sınırlı kapsamda olup, sürdürülebilir sağlık sistemine geçiş için bütüncül bir 'yeşil sağlık sistemi' yaklaşımına ihtiyaç vardır.

Erken uyarı sistemleri ve iklim-sağlık izleme altyapıları: İklim değişikliğine bağlı sağlık risklerinin zamanında tespiti için iklim verileri ile sağlık verilerinin entegre biçimde izlenmesi kritik önem taşımaktadır. Birçok ülkede sıcaklık, nem, hava kalitesi ve vektör yoğunluğu gibi göstergelerle hastalık verileri eşgüdüm içinde değerlendirilmektedir. Türkiye'de ise bu entegrasyon henüz kurumsallaşmamıştır. Sağlık Bakanlığının dijital sistemleri (HSYS, SİNA vd.) bulunsa da iklim değişkenleriyle entegre çalışan bir izleme altyapısı mevcut değildir.

2024-2030 İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı, bu eksikliği gidermeye yönelik olarak sağlık bilgi sistemlerinin iklim verileriyle bütünleştirilmesini ve erken uyarı kapasitesinin geliştirilmesini ulusal hedefler arasında tanımlamıştır (27). Ayrıca DSÖ'nün Sağlık için İklim Hizmetleri ("Climate Services for Health") yaklaşımı doğrultusunda sentinel istasyonlar, coğrafi bilgi

sistemleri (GIS) ve yapay zekâ destekli tahmin modelleri gibi teknolojilerin entegre edilmesi önerilmektedir.

Mevzuat, WHO iş birlikleri ve ulusal stratejiler: Türkiye, iklim değişikliğinin sağlık üzerindeki etkilerine karşı ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli stratejik belgeler geliştirmiştir. İklim Değişikliği Eylem Planı (2011-2023) ve İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) belgelerinde sağlık sisteminin dayanıklılığının artırılması, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve iklimle entegre sağlık bilgi altyapılarının kurulması hedeflenmektedir (27).

Ancak sağlıkla iklim arasındaki ilişkiyi doğrudan düzenleyen özel bir mevzuat henüz bulunmamaktadır. Mevcut yasal çerçeve daha çok çevre sağlığı, afet yönetimi ve hava kalitesi üzerinden dolaylı biçimde konuyu ele almaktadır. Bu da, sıcak hava dalgaları, vektör kaynaklı salgınlar ve hava kirliliği gibi risklere karşı sağlık sisteminin yasal yükümlülüklerinin netleştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Uluslararası düzeyde Türkiye, Paris Anlaşması'na taraf olmuş; ayrıca DSÖ'nün "Climate Change and Health Country Profile for Turkey" raporuna katkı sunmuştur. Bunun yanı sıra WHO/Europe koordinasyonunda yürütülen Vector Surveillance Roadmap projesi kapsamında vektör gözetimi ve erken uyarı altyapısı geliştirilmektedir.

Bu gelişmelere rağmen, kurumsal eş güdüm eksikliği önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, Çevre, Sağlık, Tarım ve yerel yönetim temsilcilerinden oluşan çok paydaşlı bir "İklim ve Sağlık Yüksek Kurulu" oluşturularak, strateji belgelerinin uygulamaya dönüşmesi sağlanmalı; disiplinler arası koordinasyon yasal zemine oturtulmalıdır.

Değerlendirme ve Öneriler

Türkiye, iklim değişikliğinin sağlık üzerindeki etkilerine yönelik sınırlı da olsa bazı politika adımları atmıştır. İstanbul ve İzmir gibi büyükşehirlerde ısı dalgalarına karşı uygulanan yerel önlemler, vektör izleme çalışmaları ve bazı sağlık tesislerinde sürdürülebilirlik uygulamaları olumlu örneklerdir. Ancak bu girişimler çoğunlukla yerel ölçekte kalmakta; ulusal düzeyde standartlaşmış, yasal çerçeveye oturmuş bir iklim-sağlık politikası hâlâ bulunmamaktadır. Veri entegrasyonu, kurumsal koordinasyon ve sağlık çalışanlarının iklim duyarlılığı gibi konularda sistemik eksiklikler sürmektedir. Mevcut dijital sağlık bilgi sistemleri (HSYS, SİNA vd.) iklim verileriyle bütünleşmiş değildir; ayrıca Sağlık Bakanlığı bünyesinde iklim ve sağlık ilişkisini bütüncül ele alan daimî bir yapı da mevcut değildir.

İklim değişikliği yalnızca çevresel değil, çok disiplinli müdahale gerektiren bir halk sağlığı sorunudur. Bu nedenle tıp, çevre mühendisliği, iklim bilimleri, şehir planlama ve sosyal bilimler gibi alanların iş birliği içinde çalışması şarttır. Sağlık sisteminin iklim risklerine karşı dirençli hâle gelmesi için sadece sağlık sektörü değil; altyapı, ulaşım, enerji ve eğitim sistemleri de bu dönüşüme entegre edilmelidir. Ayrıca tüm stratejiler, sosyal eşitsizlikleri dikkate alarak, kırılgan grupların (yaşlılar, kronik hastalar, göçmenler, kırsalda yaşayanlar) korunmasını önceliklendirmelidir.

Sonuç

İklim değişikliği, halk sağlığını doğrudan ve dolaylı biçimde tehdit eden derinleşen bir krizdir. Türkiye'de bu etkiler giderek belirginleşmekte; sağlık sistemi sıcaklık artışları, salgın riskleri ve çevresel belirsizlik karşısında sınanmaktadır. Ancak mevcut uygulamalar sınırlı ve parçalı kalmakta, bütüncül bir iklim-sağlık politikası eksikliği sürmektedir. Oysa en büyük zafer, felaket yaşanmadan kazanılır. Türkiye'nin sağlık sistemini iklim değişikliğine karşı dayanıklı hâle getirmesi, sadece çevre değil, gelecek için de bir güvencedir.

Kaynaklar

1) World Health Organization. Climate change and health. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health (Erişim Tarihi: 22.06.2025).

2) Türkeş M. Ege Coğrafya Dergisi. 2017:47–70.

3) Climate Change 2023 Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023.

4) Türk Tabipleri Birliği. TTB Merkez Konseyi 2022-2023 Çalışma Raporu. 2022.

5) Reinhold JM, Lazzari CR, Lahondère C. Effects of the environmental temperature on Aedes aegypti and Aedes albopictus mosquitoes: A review. Insects. 2018;9.

6) Brady OJ, Johansson MA, Guerra CA, et al. Modelling adult Aedes aegypti and Aedes albopictus survival at different temperatures in laboratory and field settings. Parasit Vectors. 2013;6.

7) European Centre for Disease Prevention and Control. Dengue. 2023.

8) Cochet A, Calba C, Jourdain F, et al. Autochthonous dengue in mainland France, 2022: geographical extension and incidence increase. Euro Surveill. 2022;27.

9) Hekimoglu O, Elverici C, Kuyucu AC. Predicting climate-driven distribution shifts in Hyalomma marginatum (Ixodidae). Parasitology. 2023;150(7):883–893.

10) Mostafavi E, Haghdoost AA, Khakifirouz S, Chinikar S. Spatial analysis of Crimean Congo hemorrhagic fever in Iran. Am J Trop Med Hyg. 2013;89(6):1135.

11) Telmadarraiy Z, Chinikar S, Vatandoost H, Faghihi F, Hosseini-Chegeni A. Vectors of Crimean Congo hemorrhagic fever virus in Iran. J Arthropod Borne Dis. 2015:137–147. http://jad.tums.ac.ir (Erişim Tarihi: 23.06.2025).

12) Chinikar S, Ghiasi SM, Hewson R, Moradi M, Haeri A. Crimean-Congo hemorrhagic fever in Iran and neighboring countries. J Clin Virol. 2010;47:110–14.

13) Lake IR, Barker GC. Climate change, foodborne pathogens and illness in higher-income countries. Curr Environ Health Rep. 2018;5:187–196.

14) Patz JA, Vavrus SJ, Uejio CK, McLellan SL. Climate change and waterborne disease risk in the Great Lakes region of the US. Am J Prev Med. 2008;35:451–458.

15) Anas M, Sami MA, Siddiqui Z, et al. Impact of climate change on the incidence and transfer of food- and water-borne diseases. In: Microbiomes and the Global Climate Change. 2021:123–144.

16) Akanda AS, Jutla AS, Gute DM, et al. Population vulnerability to biannual cholera outbreaks and associated macro-scale drivers in the Bengal Delta. Am J Trop Med Hyg. 2013;89:950–959.

17) Kos J, Radić B, Lešić T, et al. Climate change and mycotoxins trends in Serbia and Croatia: A 15-year review. Foods. 2024;13(7):1391.

18) Bilandžić N, Varenina I, Kolanović BS, et al. Monitoring of aflatoxin M1 in raw cow milk in Croatia during winter 2015. Mljekarstvo. 2016;66:81–85.

19) Jajić I, Glamočić D, Krstović S, Polovinski Horvatović M. Aflatoxin M1 occurrence in Serbian milk and its impact on legislative. J Hellenic Vet Med Soc. 2019;69:1283–1290.

20) Dixon MH, Nellore D, Zaacks SC, Barak JD. Time of arrival during plant disease progression and humidity additively influence Salmonella enterica colonization of lettuce. Appl Environ Microbiol. 2024;90.

21) Ebi KL, McGregor G. Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. Environ Health Perspect. 2008;116:1449–1455.

22) World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health (Erişim Tarihi: 23.06.2025).

23) European Environment Agency. Environmental statement report 2022. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-statement-report-2022 (Erişim Tarihi: 23.06.2025).

24) El Barazi AS. Psychological support for earthquake survivors in Turkey and Syria. J Emerg Trauma Shock. 2023;16:171–176.

25) Cunsolo A, Ellis NR. Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. Nat Clim Chang. 2018;8(4):275–281.

26) İstanbul Büyükşehir Belediyesi. İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı.

27) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030).

Molière'den Ahmet Vefik Paşa'ya Zoraki Tabip

Züleyha Abdülbakioğlu

1983 yılında doğdu. İşletme lisans eğitiminin ardından sağlık yönetimi yüksek lisansını tamamladı. Özel hastanelerde işletme, kurumsal iletişim ve pazarlama yöneticiliği görevlerinde bulundu. Sağlık Bakanlığına bağlı Uluslararası Sağlık Hizmetleri Anonim Şirketi'nde (USHAŞ) Tanıtım ve Pazarlama Müdürü olarak çalıştı. Hâlen aktif sağlık yöneticiliğini devam ettirerek, özel hastanelere insan kaynakları, iletişim ve pazarlama danışmanlığı veriyor.

Molière ve Sağlık

17. yüzyıl Fransası'nın tüm dünyaya mal olan ve günümüzde hâlen konuşulan sanatçılarından Jean Baptiste Poquelin Molière (1622-1673), döneminin kusurlarını hicvettiği komedi türündeki tiyatro eserleriyle meşhurdur. Hukuk eğitimi görmesine rağmen hiçbir zaman avukatlık yapmaz çünkü gerçek tutkusu tiyatrodur. Hem yazmak, hem oynamak… Ölünceye dek bu tutkusunun peşinden giden Molière'in oyunları asırlar sonra bugün hâlâ güncelliğini korumakta; her ülkede, her kültürde onun eserlerini okuyanlar o eserlerde kendilerinden bir şeyler bulabilmektedir.

Toplumsal politikalar ve kişisel zaaflar noktasında oldukça çarpıcı taşlamaları olan Molière, bu eleştirilerinde hekimlere de önemli bir yer ayırmıştır. Ancak bunun sebebi elbette genel olarak hekimlik mesleği değil –ki çok sevdiği yakın dostlarından biri de hekimdir- dönemin yozlaşmış ortamında mesleği kötüye kullanan hekimlerdir. Halkın bilgisizliğini ve tıbbın otoritesini kişisel çıkarları için kullanan tıp doktorları onun hep hedefinde olmuştur.

Yaşadığı dönem Fransa Tıp Akademisinin eğitim anlayışı pek parlak değildir. Tıpta modern gelişmelere sırt çevrilen, deneylere kapalı, tutucu bir hiyerarşi söz konusudur. Latince, bilim üretmenin değil bilgi tekeli oluşturmanın yolu olarak kullanılır. Bir soğuk algınlığı sonrası bir türlü kurtulamadığı akciğer ve solunum problemleri yaşayan yazarın kişisel sağlık sorunlarının da dönem tıbbına öfkesini artırdığı kabul edilmektedir. Onun eserlerindeki tıp eleştirisini irdeleyen uluslararası makaleler bulunmaktadır. Zira Molière'in "Kibarlık Budalası" , "Uçan Doktor" gibi kimi eserleri dolaylı olarak tıp eleştirisi yapmışken, "Hastalık Hastası", "Hekim Aşkı" ve bu yazının konusu olan "Zoraki Tabip" gibi doğrudan tıp temalı sert taşlamaları mevcuttur.

Molière'in Zoraki Tabip'i

Zoraki Tabip, (Le Médecin malgré lui) üç perdelik bir komedi olarak 1666'da yazılır. Molière, doktorlara yönelik en açık eleştirilerinden biri olan bu oyunun hem yazarı hem de başrol oyuncusudur. Kavgacı kocasından intikam almak isteyen bir kadın, oduncu olan eşinin dövülürse hekimlik yapabildiği iddiasını ortaya atarak hastalığa çare arayan birilerinin gelip onu dövmesini sağlamaya çalışır ve bunu başarır. Dayaktan kurtulmak isteyen oduncunun sahte hekimliğe soyunarak "tesadüfen" de bir "iyileşme" yaşanması, adamı halkın gözünde büyük doktor yapar. Oduncunun hiçbir tıp bilgisi olmadan, uydurma Latince kelimeler kullanarak, kendinden emin hitabetiyle "doktorculuk oynaması" izleyiciyi güldürürken aslında düşündürme amacındadır. Molière'e göre "İşte doktor olmak bu kadar kolaysa, sorun meslekte değil sistemdedir." Sahte doktorun kullandığı saçma, anlaşılmaz ama "ikna edici" Latinceyle yazar, bilim dilinin kutsallaştırılmasını eleştirmektedir. Söylenenler doğru olduğu için değil, anlamadığın için inanıyorsun demektedir seyirciye; akla güvenmeyi, otoriteyi sorgulamayı, bilginin deneyle sınanmadan bir hiç olduğunu anlatmaya çalışmaktadır ki bu yönüyle eser erken bir Aydınlanma metni kabul edilebilir.

Ahmet Vefik Paşa'nın Zoraki Tabip'i

Dönüp bizim sanat tarihimize baktığımızda ise Ahmet Vefik Paşa'nın (1813-1891) 1869 yılında bu eseri seçerek uyarlaması tesadüf olmamalı. Osmanlı modernleşmesinde tıp kurumsallaşırken, halk nezdinde bilgi-otorite ayrımının hâlâ bulanık olduğu dönemde Paşa, bir sanatçı ve emekli devlet görevlisiydi. 1859'da Paris Büyükelçisi olarak atanmış, Molière'den toplam 16 çeviri yaparak Osmanlı Tiyatrosu'nun en büyük destekçilerinden olmuştur. Zoraki Tabip uyarlaması o yıllar için evrensel bir sorunun yerel bir sahnesi gibidir.

Paşa'nın uyarlamasında sahne oduncu ve karısının kavgasıyla başlar. İçkici, kumarbaz İvaz, karısı Selime'yi tehdit

ederek dövmekte, Selime ise gittikçe artan bir öfkeyle kocasından intikam alacak planlar kurmaktadır. Eserin orijinalinde olduğu gibi oyun, oduncu kocanın dayağından bıkan eşin, "Dövülünce hekim olduğunu kabul eden bir adamdır." diyerek kocasını hedef göstermesiyle devam eder. Hamza Ağa'nın dil tutulması yaşayan kızı için bir çare arayışındaki Korkut ve Himmet'i kandıran Selime amacına ulaşır. Dövüle dövüle "zorla" hekimliği kabul eden oduncu yeni rolüne kendini kaptırıp doktorculuk oynamaya başlar. Hamza Ağa'nın kızının dil tutulması aslında bir aşk acısıdır ve onun sevdiği adamla yolu kesişen sahte doktor hastayı sözde iyileştirir. Bu kurgu etrafında şekillenen oyunda "Zoraki Tabip"in söylemleri güldürürken düşündürür:

"İVAZ – İşte efendim, ol vahamet ve redaet zatürrie ile hicabü'l cevfin indihap ve ik'iraından tevellüt eden ahlatın humuzeti mülabesesiyle… mütehaddis olduğundan dolayı kabrü harbin bimekanü kafr ve leyse kurbün harbün kubrün… ve'lmuzafunileyh imma muzafün… işte tastamam bunun içindir ki kızın dili tutulmuştur!

HAMZA – Yaaa!

HİMMET – Ah, benim de ağzım böyle çelikli olaydı, dilim böyle zemberekle dönseydi.

HAMZA – Evet, vakıa bundan güzel mukayese ve muhakeme olmaz. Ama, bir yeri var; orasına zihnim ilişti. Ciğerle yüreğin yerlerine aklım yatmadı: Zannım, siz adetten başka türlü yerleştirdiniz; zira yürek soldadır, ciğer sağ yanda olur.

İVAZ – Evet, evvelden öyleydi ama biz şimdi bu şeyleri değiştirdik. Tababeti şimdi yeni üsluba ifrağ eyledik.

HAMZA – Öyle mi efendim? Bilmezdim, cehlimi af buyurunuz.

İVAZ – Bir ziyanı yoktur, siz de bizim gibi her şeyi bilecek değilsiniz ya!"

Bir Komedinin Yolculuğu: Zoraki Tabip'te Ne Yerelleşti?

Ahmet Vefik Paşa Molière'in Zoraki Tabip'ini sadece çevirmemiş, bilinçli bir uyarlama ve yeniden yazım yapmıştır. O, eseriyle aynı hikâyeyi anlatmış ama başka bir topluma ayna tutmuştur. Değişmeyen çekirdek cehaletin otoritesidir; sahte tabip, anlaşılmaz dil kullanımı ve körü körüne itaat eden çevre aynen aktarılmıştır. Bilgi sahibi olmayıp fikir sahibi olan cahilin öz güveni zamandan ve coğrafyadan bağımsızdır. Ancak orijinal eserde sahtekârlığın yolu Latince kullanmak iken, Paşa bunu tumturaklı bir Osmanlıca ile yaptırır. Arapça-Farsça terkiplerle ağırlaştırılmış, esasen anlamsız ve yersiz konuşmalarla süslü bir Osmanlıca "bilgili" görünmenin yolu olarak sahneye yansıtılmış. Büyüğün söyleyip küçüğün dinlediği, okumuş olanın sorgulanmadığı, mesleki ünvanın kutsal sayıldığı tam bir itaat kültürünü sergiletir Paşa. Molière'de tıp skolastik kalışı sebebiyle yerilirken, Paşa'nın uyarlamasında tıp modernleşmeyle birlikte saygınlığı artan ama halk nazarında hâlâ "bilim ile büyü arası" bir yerdedir.

Cehaletin evrensel olduğunu ama her toplumda başka bir dil konuştuğunu anlatan yerli Zoraki Tabibimiz, güldüğümüz şeylerin aslında tehlikeli olabileceğini gösterir.

Günümüzde de bu tehlikenin farklı şekillerde devam ettiğini söylemek mümkündür. Bugün bilgiye ulaşmak geçmişe nazaran çok daha kolay olsa da sağlık gibi doğrudan insan hayatına etki eden bir alanda bu bilginin kaynağını, doğruluğunu ve güvenilirliğini sorgulamak şart.

Kaynaklar

Ahmet Vefik Paşa. (2019). Zoraki tabip. Konya: Palet Yayınları.

Avcı, C., & Kartal, E. (2022). Türkiye'deki akademik çalışmalarda Molière: Bir meta-sentez çalışması. Kültür Araştırmaları Dergisi, (15), 240-270.

Özerengin, T. (1984). Molière ve hekimler. Toplum ve Hekim, 6(34), 42.

Uluğtekin, M. G. (2004). Ahmet Vefik Paşa'nın çevirilerinde Osmanlılaşan Molière (Yüksek lisans tezi). Bilkent Üniversitesi, Ekonomi ve Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Karikatür: Dr. Orhan Doğan

Medipol Eğitim ve Sağlık Grubu'nun yeni referans merkezi

Medipol Acıbadem Bölge Hastanesi

Gelişmiş tanı ve tedavi üniteleri, akıllı sistemlere sahip ameliyathaneleri, tam donanımlı yoğun bakım üniteleri ve multidisipliner bir yaklaşımla sunulan 24 saat kesintisiz sağlık hizmeti sizi bekliyor.

MEDİPOL ÇAĞRI MERKEZİ | 4447044

Kurulusumuz, Akademik Tıp Merkezi Hastanesi olarak JCI tarafından akredite edilmistir

MEDİPOL
Acıbadem Bölge Hastanesi

ŞAMPİYONLARIN TERCİHİ DEĞİŞMEDİ

ÜÇ BİRİNCİNİN 3'Ü DE MEDİPOL TIP'TA

Sayısalda ilk 5'ten 4, ilk 100'den 27 öğrenci İstanbul Medipol Üniversitesi'ni tercih etti. Tıp Fakültesi, Yapay Zekâ Mühendisliği, İşletme ve Yapay Zekâ, Felsefe ve Yapay Zekâ, Tarih ve Yapay Zekâ bölümleri ile, İstanbul Medipol Üniversitesi beş bölümde zirvede.

444 85 44 | medipol.edu.tr

MEDİPOL
UNV-İSTANBUL
İSTANBUL MEDİPOL ÜNİVERSİTESİ