

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 kirlenmelerin 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-vepolifloroalkil maddeler (PFAS), modern kimyanın karşı karşıya olduğu temel sorunlara çarpıcı bir örnek oluşturmaktadır. Yüksek dayanıklılık hede-

fiyle tasarlanan bu bileşikler, çevreye salındıklarında son derece kalıcı hâle gelmekte ve ortamdaki uzaklaştırılmaları çok büyük zorluklar arz etmektedir (1, 2). PFAS'lar, 20. yüzyılın ortalarından itibaren yapılmaz 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” kirlenmelerin 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 bileşikler 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 hiçbirisi tek başına PFAS maruziyetinin biyolojik etkileri ve olası sağlık tehlikelerine ilişkin bütüncül bir değerlendirme sağlamamaktadır.

Yaygın olarak kullanılan PFAS tespit yöntemlerinin teknik özellikleri karşı-

laştırılmalı 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 hücre

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 duyuşal 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 yanıtla dönüştürerek hücresele 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 hücresele 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 yolları 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 yolların aktivasyonunu raporlayan çeşitli biyosensör sistemleri oluşturmuştur. Bu araçlar, hücresele 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 hücresele alt bölgelere özgü hedefleme açısından geliştirmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bu sistemleri ölçeklenebilir test formatlarına ve standartlaştırılabilir analiz hatlarına entegre etmektir. Nihai amaç, biyosensör temelli fonksiyonel çıktılar özellikle PFAS ve diğer “sonsuz” kirleticiler gibi çağdaş çevresel zorluklar bağlamında, translaşyonel 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).

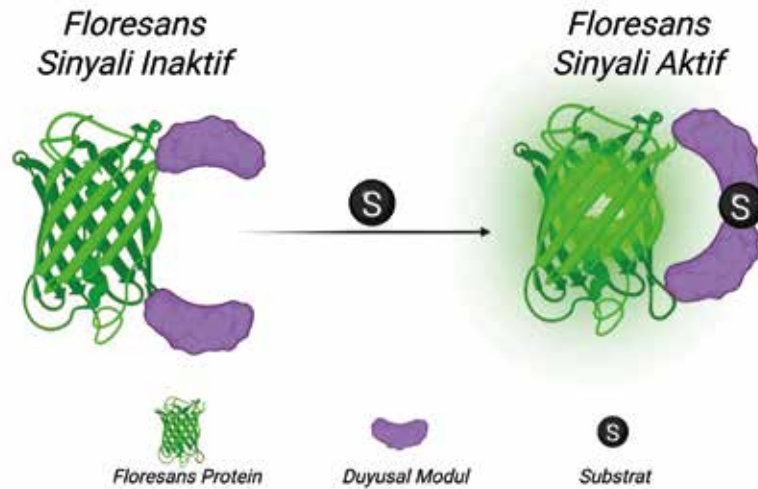
Buna paralel olarak, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki Wyss Enstitüsü, mühendislik ürünü protein sensörlerini taşınabilir bir elektrokimyasal okuma sistemiyle birleştiren ve uzun vadede

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, hücresele 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 & Anti-oxidant Capacity Tracker) geliştirilmiştir. R3ACT, (i) hücresel kompartmanlara özgü H₂O₂ 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 H₂O₂ artışı ile karakterize edilen maruziyetler ile, belirgin bir H₂O₂ yükselmesi olmaksızın esas olarak antioksidan savunma yollarının aktivasyonunu tetikleyen maruziyetler arasında ayırım 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 kullanılmaktadır.

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 kararlaştırılmasına 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 bütünsel 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 doğrularak, laboratuvarlar arası standardizasyon ve karşılaştırmalı (ring) çalışmalar kurarak ve analitik kimya, biyo-görüntüle-

me 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/>