

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. İlgili 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 yüz yıllarca 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 plaseenta 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



ayırımı' 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 izolasyonu değil, analitik cihazların gereksinimlerine uyumuyla ölçülür. Dolayısıyla, insan dokularındaki eser miktardaki nanop-

lastiklerin tespiti ve toksikolojik riskin doğru haritalanması, örneklemekten 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 kütesel 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 numune-deki toplam plastik yükünün kütesel 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 Mikroskopu (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 çökme riski, özellikle düşük konsantrasyonlu hassas analizlerde ciddi bir 'arka plan kirliliği' riski doğurmaktadır. Analiz edilen parçacığın numuneden mi yoksa ortamdaki kaynağından 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 kirlenici olmakla kalmamaktadır. Aynı zamanda üretimlerinde kullanılan katkı maddeleri (BPA, ftalatlar) ve çevreden adsorbe edilen kalıcı organik kirlenicileri ve ağır metallerin bünyemize girmesini ve kimyasal toksisite riski oluşturmalarını 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, hücresele 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 risk taşıyan kirlenici grubudur. Mikro/nanoplastik probleminin çözümü daha hassas ölçüm teknolojilerinin geliştirilmesi ile ortadan kaldırılamaz. Doğada yüzyılı aşkın süre kalıcılığını koruyan bu kirlenicilerin 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., Kärman, 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.