# Plastik Çağının Gözle Görülmeyen Tehdidi

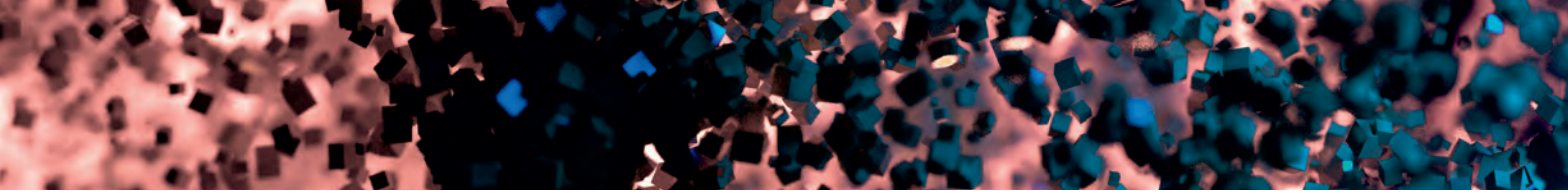
# MİKROPLASTİKLER

## Sınır Tanımıyor

Dr. Özlem Ak [ *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

123dartist / iStock

Dünyada yılda yaklaşık 450 milyon ton plastik üretiliyor. Ancak bu devasa miktarın sadece %9'u geri dönüştürülüyor, geri kalanı ise çevreye karışıyor ya da çöplüklere atılıyor. Uzmanlara göre üretim hızı böyle devam ederse 2060 yılına kadar yıllık plastik üretimi 1,2 milyar tona ulaşabilir. Üstelik plastik üretimi tamamen durdurulsa bile doğada biriken milyonlarca ton plastik zamanla parçalanarak mikroplastiklere dönüşmeye devam edecek. Bu da demek oluyor ki, doğadaki plastik tehdidi kendiliğinden ortadan kalkmıyor, aksine daha görünmez ama daha yaygın bir sorun hâlini alıyor. Tahminlere göre, her yıl 10 ila 40 milyon ton mikroplastik doğaya karışıyor. Bu parçacıklar yalnızca çevreye değil; deniz yaşamına, besin zincirine ve insan sağlığına da doğrudan zarar veriyor.



1907 yılında icat edilmesinden bu yana plastik, hayatımızın vazgeçilmez bir parçası hâline geldi. Gıda ambalajlarından tıbbi ekipmanlara kadar pek çok alanda sağladığı kolaylıklarla, modern toplumun temel malzemelerinden biri oldu. Bugün en yaygın kullanılan plastik türleri arasında polipropilen (PP), polietilen (PE), polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) yer alıyor. Ancak bu dayanıklı malzeme zamanla ezilerek, koparak ya da bozulup parçalanarak minik parçacıklara ayrılıyor. Bu plastik parçacıklarının boyutu birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebiliyor. İşte bu küçük parçacıklara mikroplastik adı veriliyor. Mikroplastikler, çapı 5 mm'den küçük plastik parçaları olarak tanımlanıyor. Daha da küçükleri, yani çapı 1 mikrometreden (µm) az olanlar ise nanoplastik olarak adlandırılıyor.

Her yıl 10 ila 40 milyon ton mikroplastiğin doğaya karıştığı tahmin ediliyor. Üstelik artış bu hızla sürerse miktarın 2040 yılına kadar iki katına çıkabileceği öngörülüyor. Mikroplastiklerin çoğu, doğada zamanla parçalanan büyük plastiklerden kaynaklanıyor. Ancak bir kısmı da boya, kozmetik, temizlik ürünleri ve diş macunları gibi günlük hayatta kullanılan ürünlere doğrudan bilinçli bir şekilde ekleniyor.

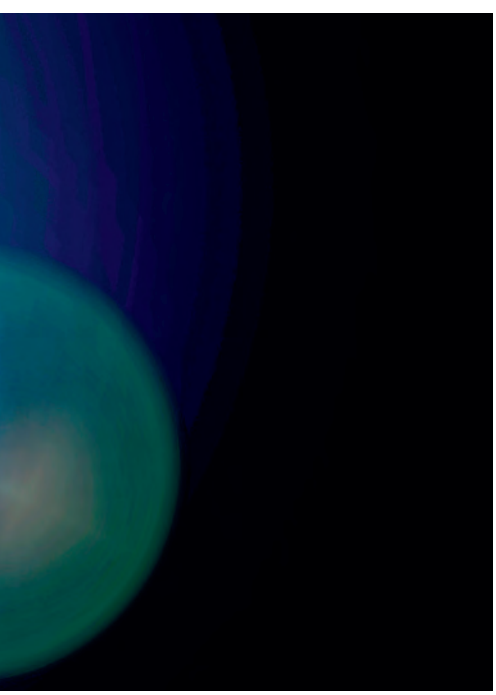
Asıl endişe verici olan ise mikroplastiklerin sadece doğada değil, artık insan vücudunda da bulunuyor olması. Yapılan araştırmalar, bu parçacıkların damarlarda, beyinde, karaciğerde, böbreklerde ve hatta plasentada bile tespit edildiğini gösteriyor. Üstelik mikroplastikler yalnızca şehirlerde değil: Antarktika'dan Arktik'e, Everest'in zirvesinden Mariana Çukuru'na kadar dünyanın ulaşılması zor en ücra köşelerinde bile bulunuyor. İçtiğimiz suya, yediğimiz yiyeceklere, giydiğimiz kıyafetlere ve soluduğumuz havaya karışmış durumdalar.

## Mikroplastiklerin Yolculuğu: Kısa Bir Tarihçe

Plastik çağının temelleri, 1907 yılında Belçikalı kimyager Leo Baekeland'in fenol ve formaldehit kullanarak ilk sentetik plastiği icat etmesiyle atıldı. Bu yeni maddeye kendi soyadından esinlenerek "Bakalit" adını verdi. Kısa sürede üreticiler, bu malzemenin hem ucuz hem de çok yönlü kullanım alanına sahip olduğunu fark etti. Çünkü plastik; dayanıklı, esnek, hafif, korozyona karşı dayanıklı ve elektriği iletmeyen bir malzemeydi. Bu özellikleri sayesinde iletişim cihazlarından ulaşım araçlarına kadar pek çok alanda kullanılmaya başlandı.1930'lar ve 1940'larda bilim insanları polistiren, poliester, naylon, teflon gibi

enzodebernardo / iStock

plastiğin yeni türlerini geliştirdi. 1950'lere gelindiğinde plastik âdeta hayatımızın vazgeçilmezi oldu. Tek kullanımlık ürünlerin yaygınlaşması özellikle evlerde büyük kolaylıklar sağlamaya başladı. Plastik artık yalnızca mutfakta değil, modern tıptan inşaata, tekstilden gıda ambalajlarına kadar hayatın her alanında yerini aldı. Ancak 1960'ların sonlarında plastiklerin olumsuz etkileri de fark edilmeye başlandı. Uzmanlar, denizlerde giderek biriken plastik kirliliğine dikkat çekti. 1970'lerde yapılan çalışmalarda, deniz planktonlarını incelemek için alınan örneklerde minik plastik parçacıkların bulunduğu gözlemlendi. Bu parçacıklar daha sonra mikroplastik olarak adlandırıldı ve bu terim ilk kez 2004 yılında bilimsel literatüre girdi.



**1907 Plastiğin Doğuşu**
Belçikalı kimyager Leo Baekeland, petrol türevleri olan fenol ve formaldehiti tepkimeye sokarak ilk sentetik plastiği üretti. Bu yeni maddeye kendi adından esinlenerek "Bakalit" adını verdi. Bakalit; sert, kalıba dökülerek şekillendirebilir ve dayanıklı yapısıyla üretim dünyasında devrim yarattı.

**1930'lar Plastik Yayılıyor**
Daha esnek, daha ucuz plastik türlerinin bulunmasıyla birlikte plastik, hayatın her alanında hızla kullanılmaya başlandı.

**1940 İz Bırakan İlk Mikroplastikler**
ABD'deki bir göl yatağında, bugün "mikroplastik" olarak tanımlanan parçacıklara rastlandı. Ancak bunların plastik kalıntıları olduğu yıllar sonra fark edildi.

**1950 Plastik Patlaması**
Dünya genelinde plastik üretimi yıllık 2 milyon tona ulaştı. Mikroplastik kavramı henüz bilimsel literatüre girmemişti.

**2004 Mikroplastik Tanımı Ortaya Çıkıyor**
İngiltere'de deniz biyoloğu Richard Thompson ve ekibi, "mikroplastik" terimini ilk kez kullandı. Bu, mikroplastiklerle ilgili bilimsel araştırmaların başlangıç noktası oldu.

**2009 Antarktika'da Mikroplastik İzleri**
Antarktika'da buzulların derinlerinden alınan örneklerde mikroplastiklere rastlandı. Ancak bu kalıntıların mikroplastik olduğu 2020'de yapılan araştırmalarla ortaya çıkarıldı.

**2011 Tatlı Sularda İlk Bulgular**
Kuzey Amerika kıtasında bulunan Huron Gölü'nden alınan örneklerde, metrekarede ortalama 37,8 mikroplastik parçası tespit edildi. Ayrıca okyanuslara karışan mikroplastiklerin %16–35'inin sentetik tekstil ürünlerinin yıkanması sonucu ortaya çıktığı belirlendi.

**2014 Havadaki Mikroplastikler**
ABD'de yapılan bir çalışmada otomobil lastiklerinin aşınmasıyla ortaya çıkan tonlarca mikroplastiğin havaya karıştığı tespit edildi.

**2016 Derin Deniz Canlılarında Mikroplastik**
Oxford Üniversitesinden bilim insanları, 1.800 metre derinlikteki deniz canlılarının bile mikroplastikleri vücutlarına aldığını keşfetti.

**2018 Dünyanın En Derin Noktasında Mikroplastik**
Dünyanın en derin noktası olan Mariana Çukuru'nda büyük miktarda mikroplastik bulundu.

**2019 Mikroplastikler Gökyüzünde**
Avrupa'da bulunan Pirene Dağları'nda yağmur ve kar sularında yüksek miktarda mikroplastik tespit edildi. Bu, parçacıkların rüzgârla çok uzaklara taşınabileceğinin ilk güçlü kanıtıydı.

**2020 Everest'in Zirvesinde Mikroplastik**
Dünyanın en yüksek noktası olan Everest Dağı'nın zirvesine yakın alanlarda mikroplastik parçacıkları bulundu.

**2023**
• Japonya'daki Fuji Dağı'nın çevresindeki bulutlarda mikroplastik tespit edildi.
• İngiltere'de yapılan bir çalışma, geri dönüşüm tesislerinin çevreye mikroplastik salınmasında önemli bir rol oynayabileceğini gösterdi. Bu çalışma *Journal of Hazardous Materials Advances*'da yayımlandı.

**2024 Plastik Üretiminde Rekor**
Dünya genelinde yıllık plastik üretimi 450 milyon tona ulaştı.

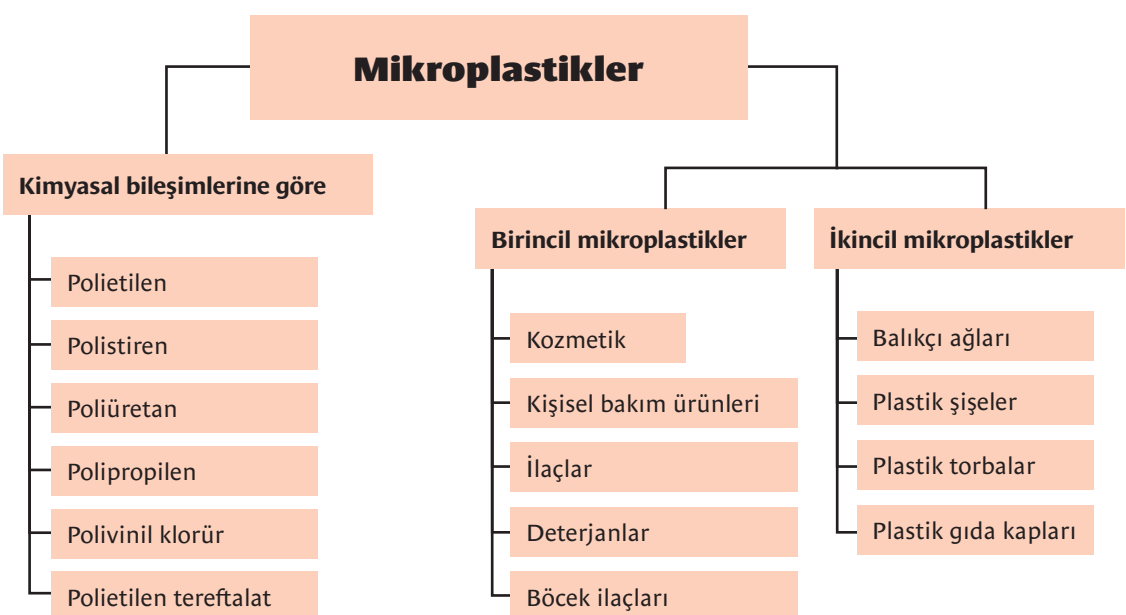
## Nereden Geliyor Bu Mikroplastikler?

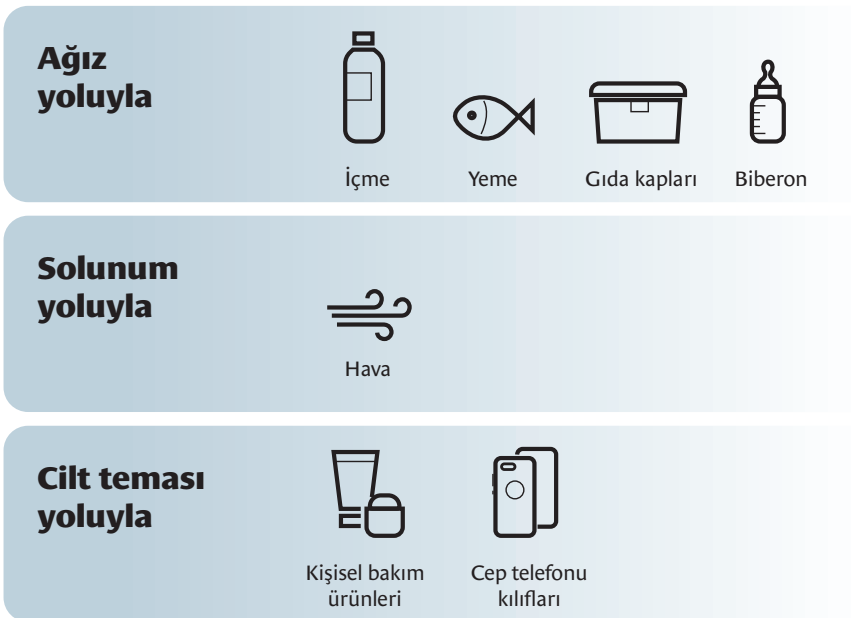
Mikroplastikler, genellikle daha büyük plastiklerin zamanla fiziksel, kimyasal ya da biyolojik etkilerle parçalanması sonucu ortaya çıkar ve bu tür mikroplastikler "ikincil mikroplastik" olarak adlandırılır. Öte yandan kozmetik ürünler, deterjanlar, boyalar, ilaçlar, bebek bezleri ve böcek ilaçları gibi günlük hayatta sıkça kullandığımız bazı ürünlere ise mikroplastikler doğrudan eklenir,

## Mutfaklardaki Tehlike

Bilim insanlarının; bulaşık süngerleri, karıştırıcılar ve diğer plastik mutfak eşyalarının gıdalara mikroplastik karışmasına neden olduğunun keşfetmesiyle mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerine dair endişeler de artıyor. Araştırmalar, eski ve kullanılmış plastik eşyaların daha fazla mikroplastik saldığını, özellikle ısıtma ve sürtünme işlemlerinin bu süreci hızlandırdığını ortaya koyuyor. Örneğin plastik kesme tahtaları veya karıştırıcılar kullanıldığında binlerce mikroplastik parçacığı gıdalara karışabiliyor. Bu nedenle araştırmacılar, mutfakta mikroplastiklere maruziyeti azaltmak için plastik yerine ahşap kesme tahtaları kullanmak, plastik su ısıtıcıların paslanmaz çelik olanlarla değiştirmek ve cam saklama kapları kullanmak gibi pratik önerilerde bulunuyor.

Evgeniya Moskova / iStock






bunlara da "birincil mikroplastik" denir. Mikroplastikler biçimsel olarak parçacık, lif, köpük, pelet ve film gibi farklı görünümlere sahip olabilirken kimyasal yapılarına göre polietilen, polistiren, polipropilen, poliüretan, polivinil klorür ve polietilen tereftalat gibi altı ana gruba ayrılır.

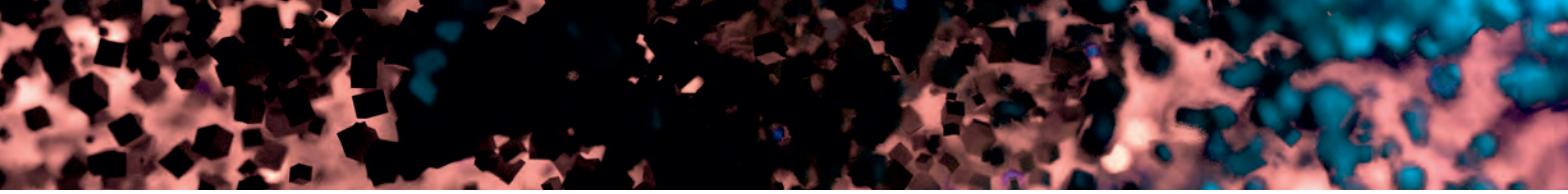
## Her Yudumda, Her Nefeste Vücudumuzdaki Mikroplastikler

Mikroplastikler, çevremizdeki her yerde bulunmaları ve taşıdıkları toksik maddeler nedeniyle insan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturuyor. Vücudumuza genellikle üç yolla giriyorlar: Solunum, ağız yolu ve cilt teması.

Ne yazık ki mikroplastikler içtiğimiz sudan yediğimiz deniz ürünlerine, tuzdan şekere, çay poşetlerinden süte kadar günlük hayatta tükettiğimiz pek çok ürünün içinde yer alıyor. Örneğin Avrupa'da kabuklu deniz ürünleri tüketen bir kişi yılda ortalama 11.000 mikroplastik parçacığına maruz kalıyor. Diğer gıda yolları da dâhil edildiğinde bu sayı kişi başına yılda 39.000 ile 52.000 arasında değişiyor. Paket servislerde kullanılan plastik kaplar aracılığıyla da mikroplastikler gıdalara karışabiliyor. Haftada birkaç kez dışarıdan yemek siparişi veren bir kişi, bu kaplar aracılığıyla yılda 12 ila 203 mikroplastik parçacığı yutabiliyor.

Bazı yaş grupları mikroplastiklere karşı daha savunmasız. Örneğin bebeklerin dışkılarında yetişkinlere göre 10 kat daha fazla mikroplastik bulunması, çok daha fazla mikroplastiğe maruz kaldıklarını gösteriyor. Sterilize edilen bebek emziklerinin ve plastik biberonların yüzeyinden de bu parçacıklar salınabiliyor. Bir bebeğin yalnızca beslenme sırasında kullanılan biberon yoluyla yılda yaklaşık 660.000 mikroplastik yuttuğu tahmin ediliyor.

Mikroplastikler sadece ağız yoluyla değil, solunum yoluyla da vücuda girebiliyor. Havadaki bu parçacıklar genellikle polietilen, polistiren ve polietilen tereftalat gibi plastiklerden oluşuyor. Şehirlerde, özellikle trafiğin yoğun olduğu yerlerde bu parçacıkların havadaki konsantrasyonu daha yüksek. Örneğin Paris'te yapılan ölçümlerde açık havada ortalama 5,4 parçacık/$m^3$, kapalı ortamlarda ise 0,9 parçacık/$m^3$ mikroplastik bulundu. Şanghay'da ise havadaki mikroplastik yoğunluğu 1,42 parçacık/$m^3$ olarak ölçüldü.



Tüm bu veriler ışığında bir kişinin yılda 74.000 ila 121.000 mikroplastik parçacığına maruz kaldığı tahmin ediliyor.

Genellikle mikroplastiklerin cilt yoluyla vücuda giremediği düşünülse de bazı durumlarda bu parçacıklar cilt yüzeyinde birikebiliyor. Özellikle mikroplastik içeren kozmetik ürünler, cep telefonu kılıfları gibi eşyalar ve katkı maddeleri (örneğin bisfenoller, ftalatlar, alev geciktiriciler) bu maruziyeti artırabiliyor. İngiltere'deki Birmingham Üniversitesinde yapılan bir araştırma, bu katkı maddelerinin cilt yoluyla emilebildiğini gösterdi. Hatta terle birlikte vücuda geçebildiği için nemli ciltlerde bu emilim oranı daha da artıyor.

En endişe verici bulgulardan biri de mikroplastiklerin fetüse kadar ulaşabildiği yönünde. ABD'deki Rutgers Üniversitesinde yapılan deneylerde mikroplastiklerin sıçanlarda plasentadan geçerek fetüse ulaştığı ve fetüsün tüm dokularına yayıldığı tespit edildi.

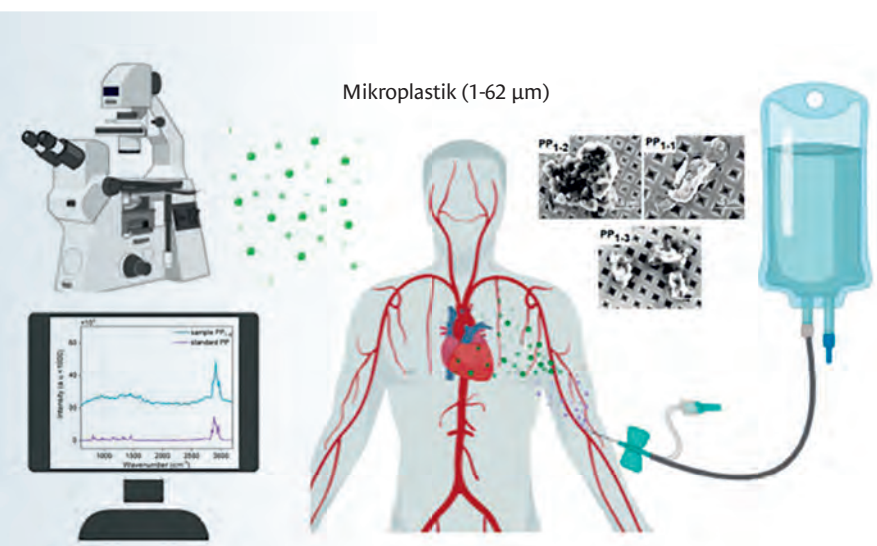
Mevcut verilere göre bilim insanları, mikroplastiklerin büyük oranda dışkı ve safra yoluyla vücuttan atıldığını düşünüyor. Ancak bazı araştırmalarda kan ve beyin dokularında da mikroplastiklere rastlandı. Bu da vücudumuza giren plastik parçacıkların düşündüğümüzden daha kalıcı ve yaygın etkiler yaratabileceğini gösteriyor.

## Mikroplastikler Sağlığımızı Sessizce Tehdit Ediyor

Bilimsel araştırmalar, mikroplastiklerin yalnızca çevreye değil, canlı hücrelere de zarar verebildiğini gösteriyor. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde bu küçük plastik parçacıkların hücrelerle temas ettiğinde pek çok olumsuz etkiye yol açabileceği gözlemlenmiş durumda. Mikroplastiklere maruz kalmak; metabolizma bozuklukları, bağışıklık sisteminde zayıflama, sinir sistemi hasarı, üreme sisteminde sorunlar ve gelişimsel bozukluklar gibi çeşitli sağlık risklerine neden olabiliyor. Ayrıca iltihaplanmayı (enflamasyon) ve oksidatif stresi (serbest radikal olarak adlandırılan tepkimeye gitme isteği yüksek kimyasal maddelerin vücutta birikmesi) artırarak hücrelerin düzgün çalışmasını engelleyebiliyor.

Bazı mikroplastiklerin, hormon sistemini etkileyen endokrin bozucu özellikteki katkı maddeleri içerdiği de biliniyor. Bu maddeler, vücudun hormonal dengesini bozarak uzun vadeli sağlık sorunlarına yol açabiliyor. Dahası bu parçacıklar vücutta birikerek zamanla daha kalıcı ve ciddi

*Environment & Health* dergisinde yayımlanan çalışmaya göre 1-62 µm boyutundaki plastik parçacıklar, hastalara damar yoluyla verilen serum sıvılarında tespit edildi. Araştırmacılar, tek bir 250 ml'lik serum torbasının yaklaşık 7.500 mikroplastik parçacığını doğrudan kan dolaşımına aktarabileceğini tahmin ediyor. Çalışmada iki farklı markaya ait serum torbaları analiz edildi ve her ikisinde de torbaların yapıldığı malzeme olan polipropilenden kaynaklanan mikroplastikler bulundu.



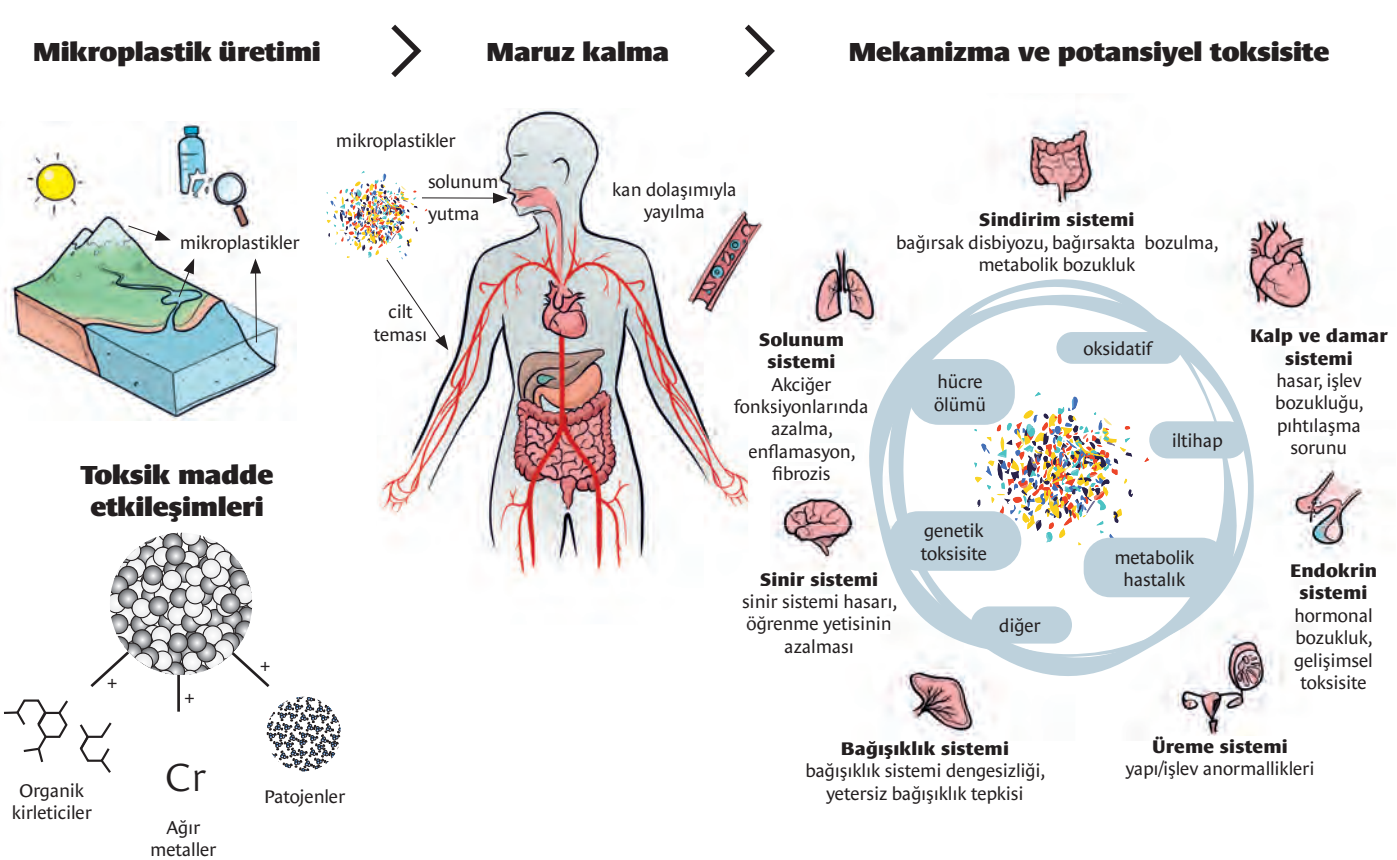

https://doi.org/10.1021/envhealth.4c00210

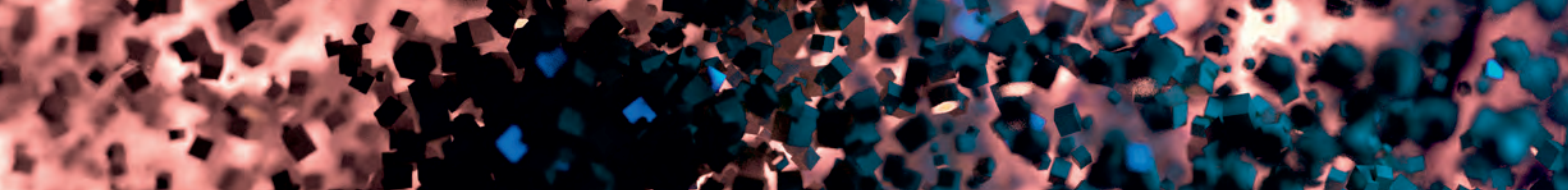
## Mikroplastik Araştırmalarında Ortak Bir Yöntem Yok

Mikroplastikleri tespit etmek ve incelemek için farklı araştırma ekipleri birbirinden çok farklı yöntemler kullanabiliyor. Ancak bu yöntemlerin ne kadar güvenilir veya geçerli olduğunu değerlendiren çalışmalar henüz yeterli değil. New Mexico Üniversitesinde bağışıklık sistemi üzerine çalışan bilim insanı Eliseo Castillo, bu durumun önemli bir sorun yarattığını söylüyor. Ona göre standart bir yöntemin olmaması, farklı araştırma gruplarının elde ettiği verileri doğrudan karşılaştırmayı neredeyse imkânsız hâle getiriyor. Bu da mikroplastiklerin sağlık üzerindeki etkilerini anlamamızı zorlaştırıyor.

etkiler yaratabiliyor. Hayvanlar üzerinde yapılan yüzlerce deney, özellikle suda yaşayan canlıların mikroplastiklerden ciddi şekilde etkilendiğini ortaya koyuyor. Bu parçacıklar canlıların bağırsaklarını tıkayabiliyor, üreme yetilerini azaltabiliyor ve genel sağlık durumlarını kötüleştirebiliyor.

Tüm bu bulgulara bakarak bilim insanları, mikroplastiklerin insanlar için de risk oluşturabileceğini düşünüyor. Kanser, kalp ve böbrek hastalıkları, Alzheimer ve üreme problemleri gibi hastalıklarla mikroplastikler arasında bağlantı olabileceğini gösteren güçlü bulgular var. Mikroplastiklerin boyutu, şekli, yüzey yapısı ve kullanım ömrünü dolduktan sonra çevresel etkilere ne kadar süre maruz kaldığı gibi özellikleri, insan sağlığı ve çevre üzerinde ne ölçüde zararlı olabileceklerini doğrudan etkiliyor. Plastikler doğada zamanla parçalanırken fiziksel ve kimyasal özellikleri değişiyor. Örneğin renkleri soluyor, yüzeyleri pürüzleniyor, hatta boyutları ve yapıları değişebiliyor. Bu da onların canlılarla nasıl etkileşime gireceğini belirliyor. Ayrıca mikroplastikler yalnızca saf plastikten oluşmuyor. İçlerinde farklı katkı maddeleri





ve kimyasal maddeler de bulunuyor. Küçük boyutları nedeniyle yüzey enerjileri oldukça yüksek olduğundan çevredeki zararlı maddeler (özellikle ağır metaller ve toksik özellikteki organik maddeler) yüzeylerine kolayca tutunabiliyor. Bu kirleticileri yüzeylerinde taşıyan mikroplastikler, vücuda girdiklerinde sadece kendileri zararlı etki göstermiyor, beraberlerinde taşıdıkları toksik özellikteki diğer maddeler de vücuda zarar verebiliyor. Yani mikroplastikler hem kendileri zararlı hem de başka zararlı maddeler için bir taşıyıcı gibi davranabiliyor.

Yeni araştırmalar nano ve mikro ölçekteki plastiklerin hem insanlarda hem de kuşlarda solunum sistemine kadar ulaşabildiğini ortaya koydu. Bilim insanları, bu çıplak gözle görünmeyen parçacıkların KOAH, astım, nefes darlığı ve akciğer fibrozisi gibi solunum yolu hastalıklarıyla ilişkili olabileceğinden endişe ediyor.

Avustralya'daki Sydney Teknoloji Üniversitesinden araştırmacılar, farklı boyut ve şekillerdeki plastik parçacıklarının solunum sisteminde nasıl hareket ettiğini bilgisayar destekli modellerle inceledi. Elde ettikleri sonuçlara göre hızlı nefes alındığında büyük plastik parçacıklar üst solunum yollarında, yavaş nefes alındığında ise nano ölçekteki plastikler akciğerin derinliklerinde birikiyor.

Bu bulgular, solunum yoluyla alınan mikroplastiklerin vücudumuza nasıl ve ne hızda zarar verebileceğini anlama açısından büyük önem taşıyor. Araştırmacılar, mikroplastiklerin neden olduğu sağlık risklerini değerlendirirken nefes alma hızı ve partikül boyutu gibi faktörlerin mutlaka dikkate alınması gerektiğini vurguluyor.

## Mikroplastikler Beyne Kadar Ulaşıyor!

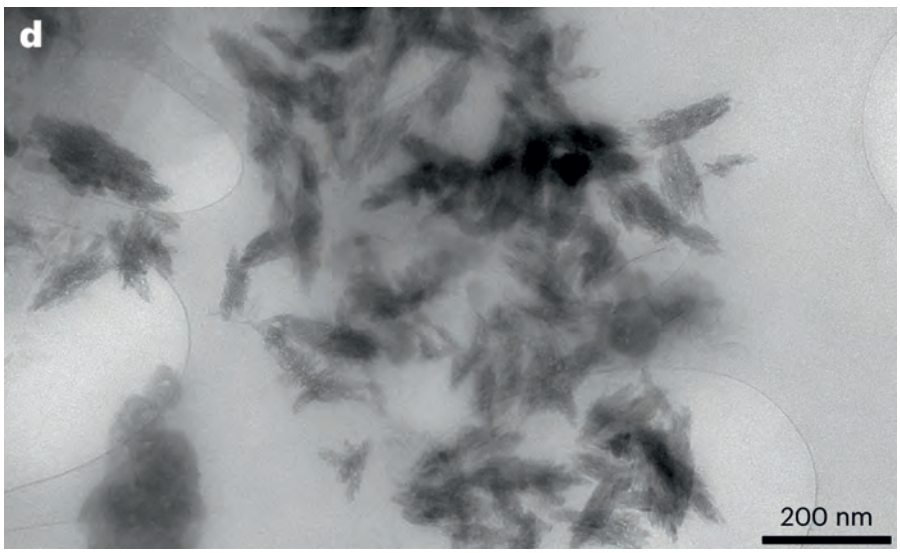
Yeni araştırmalar, mikroplastiklerin sadece vücudumuza girmekle kalmayıp beynimize kadar ulaşabildiğini ortaya koyuyor. Normalde beyni koruyan ve zararlı maddelerin geçişini engelleyen kan-beyin bariyeri, bu küçük plastik parçacıklarının geçişini engelleyemiyor. Bilim insanları, son 25 yılda toplanan 91 farklı beyin dokusu örneğini inceledikleri çalışmada beklenmedik bir bulguyla karşılaştılar: Beyin dokularında oldukça yüksek miktarda mikroplastik bulunuyordu. Üstelik daha yakın dönemde alınan örneklerdeki mikroplastik seviyesi, geçmişte alınanlara kıyasla ortalama olarak belirgin şekilde daha yüksekti. Araştırmanın sonuçları, 2024 yılının şubat ayında *Nature Medicine* dergisinde yayımlandı. 2016'da alınan beyin örneklerinde gram başına ortalama 3.345 mikrogram plastik bulunurken bu miktar 2024'te 4.917 mikrograma çıktı. Yani yalnızca sekiz yıl içinde yaklaşık %50'lik bir artış kaydedildi. Daha da dikkat çekici olan, 2024'e ait beyin dokusu örneklerinde karaciğer ve böbrek gibi diğer organlara kıyasla neredeyse 10 kat daha fazla plastik tespit edilmiş olması. Duke Üniversitesinden sinirbilimci Andrew West, beyinde bu kadar fazla mikroplastik

karetoria / GettyImages

bulunduğuna dair verileri gördüğünde doğruluğuna önce inanamadığını belirtiyor.

Rutgers Üniversitesinden toksikolog Phoebe Stapleton da çalışmanın önemli bir başka boyutuna dikkat çekiyor. Beyin dokularında bulunan plastik parçalarının şekli, laboratuvar deneylerinde karşılaştırma (referans) amaçlı kullanılan mikroplastiklerden çok farklıydı. Gerçek dokularda bulunan plastikler genellikle uzun, keskin kenarlı ve düzensiz kırıklar şeklindeydi. Bu da zararlı etki gösterme potansiyellerinin daha yüksek olabileceğini düşündürüyor. Ayrıca araştırmada beyin dokularında en sık rastlanan plastik türünün market poşetlerinde, şampuan şişelerinde ve oyuncaklarda yaygın olarak kullanılan polietilen olması dikkat çekti. Buna karşın laboratuvar çalışmalarında sıklıkla kullanılan polistirenin ise çok daha az miktarda bulunduğu görüldü. Tüm bu bulgular, mikroplastiklerin yalnızca çevreyi kirletmekle kalmadığını, kan-beyin bariyeri gibi doğal savunma mekanizmalarını aşıp insan vücudunun en korunaklı bölgelerine ulaşarak uzun vadeli sağlık sorunlarına yol açabileceğini gösteriyor.

Beyin dokusunda bulunan mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri henüz tam olarak bilinmiyor. Ancak bu



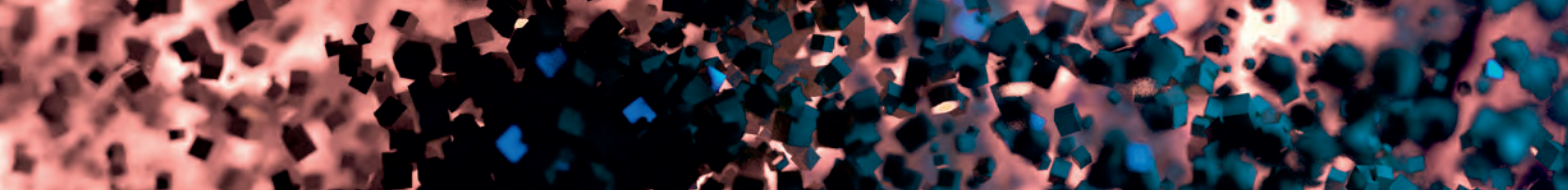

nature.com

İnsan beyin dokusunda uzunluğu 200 nanometreden ve genişliği 40 nanometreden küçük olan sivri plastik parçacıkları bulundu.

küçük parçacıkların olası zararlı etkilerine dair eldeki veriler, zihinsel ve nörolojik sağlıkla ilgili endişeleri giderek artırıyor. West, mikroplastiklerin beyinde bulunmasının insan sağlığı açısından tam olarak ne anlama geldiğini henüz bilmediklerini söylüyor. Buna karşın konuyla ilgili başka çalışmalar bu kaygıları destekler nitelikte.

Lahey Hastanesinden kardiyolog Dr. Sarju Ganatra'nın öncülüğünde yürütülen bir araştırmada, ABD'deki 218 kıyı ilçesinde yaşayan 6 milyondan fazla kişinin sinir sistemiyle ilgili bozukluklara sahip olup olmadıkları incelendi. Bu veriler, yaşadıkları bölgelerdeki deniz suyunda ölçülen mikroplastik seviyeleriyle karşılaştırıldı. Sonuç oldukça çarpıcıydı: Mikroplastik yoğunluğunun en fazla olduğu bölgelerde yaşayan bireylerde düşünme ve hafıza gibi bilişsel işlev bozuklukları %9 oranında daha yaygındı. Ayrıca bu kişiler giyinme, dışarı çıkma ve alışveriş yapma gibi günlük işlerini yerine getirmekte daha çok zorlanıyordu.

Hayvan deneyleri de bu sonuçları destekliyor. Fareler üzerinde yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin beyin dokusuna geçmeden önce kan-beyin bariyerini zayıflattığını ve daha geçirgen hâle getirdiğini gösteriyor. Beyne ulaştıklarında ise bu parçacıklar, bağışıklık sistemi hücreleri olan mikroglialar tarafından hücre içine alınarak parçalanıyor. Ancak bu süreç, hücrelerin şişerek beyindeki kan akışını engellemesine ve çevredeki nöronlarda iltihaplanmaya neden olabiliyor. Mikroplastiklerin sinir sistemi üzerindeki etkilerini anlamak için zebra balıklarıyla yapılan deneyler, nöronlardaki



iltihaplanmanın, zebra balıklarında yüzme davranışını zayıflattığını ve depresyona benzer belirtilerin ortaya çıkmasına neden olduğunu gösteriyor. Yeni doğan farelerde ise nöronlar arasındaki bağlantıların sağlıklı şekilde gelişmesini engelleyerek sosyal becerilerin zayıflamasına yol açıyor.

Ayrıca mikroplastikler, öğrenme ve hafızada önemli rol oynayan asetilkolin ile sosyal bağlar üzerinde etkili olduğu düşünülen oksitosin hormonunun seviyelerini düşürebiliyor. Bu da bağ kurma, iş birliği, iletişim gibi sosyal davranışlarda azalmaya ve bilişsel işlevlerde gerilemeye yol açabiliyor. Dahası bu parçacıklar beyne ulaşmadan da sinir sistemine zarar verebiliyor. Bağırsaklardaki faydalı bakterilerin dengesini bozarak bağırsak ve beyin arasındaki sinirsel iletişim ağı üzerinden zihinsel işleyişi dolaylı yoldan etkileyebiliyorlar. Farelerde yapılan deneylerde bu durum, kısa süreli hafıza sorunlarına ve asosyal davranışlara neden oldu.

Laboratuvar ortamında insan beyin hücreleriyle yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlendi. Yüksek miktarda mikroplastik maruziyeti, nöronların ölmesine yol açarken daha düşük dozlarda bu parçacıklar hücre içinde birikip şekil bozukluklarına neden oldu.

Elbette insanlar üzerinde hayvanlardaki gibi kontrollü deneyler yapmak mümkün değil. Bu nedenle mikroplastiklerin insanlarda bilişsel süreçler üzerindeki tam etkilerini anlamak zaman alabilir. Yine de Exeter Üniversitesinden çevre toksikoloğu Tamara Galloway, mikroplastiklerin insanlar üzerinde de ciddi sağlık sorunlarına neden olabileceği görüşünde. Bugüne kadar yapılan hayvan çalışmaları, mikroplastiklerin beyin sağlığı ve davranışlar üzerinde sanıldığından çok daha derin etkiler yaratabileceğini düşündürüyor. Hatta bazı bulgular, beyninde daha fazla mikroplastik bulunan bireylerde Alzheimer gibi nörolojik hastalık riskinin daha yüksek olabileceğine işaret ediyor.

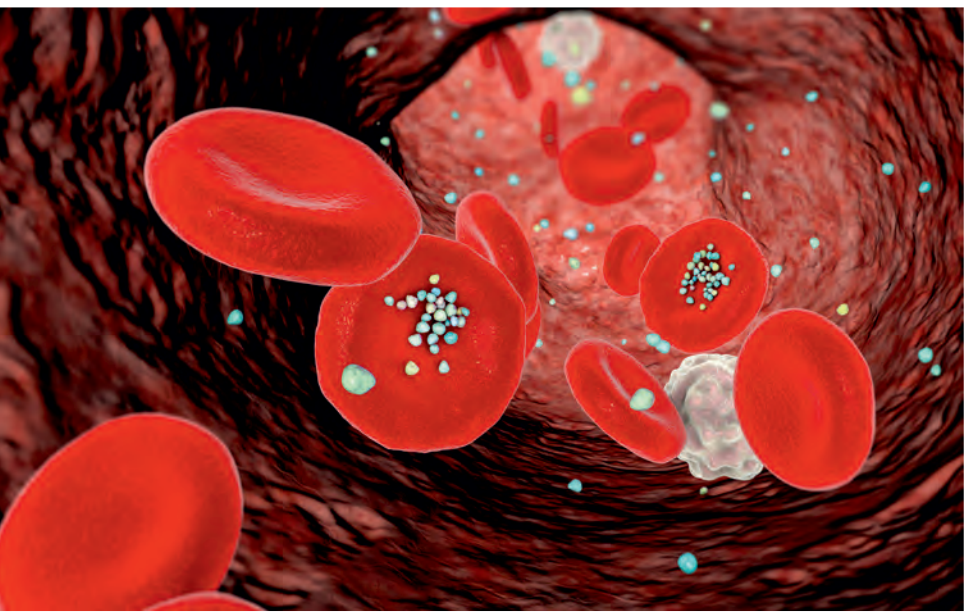
Svetlozar Hristov / iStock

## Mikroplastikler Atardamarlarımızı da İstila Ediyor!

Mikroplastiklerin sağlığımız üzerindeki etkileri her geçen gün daha fazla araştırılıyor. Yeni bir çalışma, bu küçük plastik parçacıkların özellikle çok daha küçük boyutlu olan nano ve mikroplastiklerin (NMP), boynumuzun her iki yanında yer alan ana atardamarlar olan karotis arterlerinde (şah damarı olarak da bilinir) birikerek felç riskini artırabileceğini gösteriyor.

Araştırmaya göre karotis arterlerinde plak birikimi olan bireylerin damarlarında, sağlıklı damarlara sahip kişilere göre 50 kat daha fazla mikroplastik bulundu. Bu plaklar, damarları daraltarak beyne giden kan akışını engelleyebiliyor ve bu durum felç ya da geçici görme kaybı gibi ciddi sorunlara yol açabiliyor.

Çalışma, 50'den az kişiyle yapılmış olsa da ortaya koyduğu sonuçlar dikkat çekici. Felç veya görme kaybı yaşayan kişilerin karotis arterlerindeki mikroplastik



yoğunluğunun semptom göstermeyenlere göre çok daha yüksek olduğu tespit edildi. Üstelik bu mikroplastiklerin yalnızca damar içinde birikmediği aynı zamanda iltihaplanma süreçlerini ve damarların yapısını korumada rolü olan genlerin aktivitesini de etkileyebileceği anlaşıldı. Araştırmada damarlarda mikroplastik miktarıyla iltihaplanma arasında doğrudan bir ilişki saptanmasa da damar sağlığını koruma da rolü olan genlerin bu bölgelerde farklı şekilde çalıştığı gözlemlendi. Bu da mikroplastiklerin damar sağlığını fark edilmesi zor süreçlerle bozabileceğine işaret ediyor.

Uzmanlar, bu çalışmanın mikroplastiklerin insan vücudundaki biyolojik etkilerini anlamaya yönelik ilk bulguları sunduğunu, sürecin daha iyi ortaya konması için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurguluyor.

Ancak şimdiden söyleyebiliriz ki, görünmeyen bu plastik parçacıkları yalnızca çevreyi değil, damarlarımızı ve sağlığımızı da etkileyebilecek kadar dokularımıza işlemiş durumda.

## Antibiyotik Direncinin Yeni Nedeni Mikroplastikler Olabilir

Yeni bir araştırma, mikroplastiklerin yalnızca çevreyi kirletmekle kalmadığını aynı zamanda insan sağlığı için ciddi bir risk oluşturduğunu ortaya koyuyor. Boston Üniversitesinden Neila Gross'un öncülüğünde yürütülen çalışmaya göre bu görünmeyen plastik parçacıkları, antibiyotiklere karşı dirençli bakterilerin yani "süper mikropların" çoğalmasını kolaylaştırıyor. Bu durum, enfeksiyonlarla mücadeleyi zorlaştıran önemli bir halk sağlığı sorununa neden olabileceği anlamına geliyor.

Mikroplastikler, yüzeylerinde bakteri kolonileri barındırabiliyor. Bu mikroskobik yaşam alanlarına "plastisfer" adı veriliyor. Araştırmacılar polistiren, polietilen ve polipropilen gibi farklı plastik türleri üzerindeki bakterileri 10 gün boyunca gözlemledi. Bu süreçte antibiyotiklerin etkisini ölçmek için her iki günde bir test yaptılar. Sonuçlar çarpıcıydı: Mikroplastiklerle temas eden bakteriler, antibiyotiklere karşı daha hızlı direnç geliştiriyordu.

Dahası mikroplastikler ortadan kaldırılsa bile bu direnç etkisi devam edebiliyordu. Özellikle polistiren türündeki mikroplastiklerin en yüksek direnç seviyelerine yol açtığı ve bu etkinin temelinde "biyofilm" adı verilen bu etkinin bakterilerin yüzeylere tutunarak salgıladıkları koruyucu maddelerle oluşturduğu, onları dış etkenlere karşı dirençli hale getiren "biyofilm" adı verilen yapının yer aldığı belirlendi.

Kısacası doğadaki ve vücudumuzdaki miktarı giderek artan mikroplastikler, antibiyotiklerin etkinliğini azaltarak bizi gelecekte bakterilere karşı daha savunmasız hâle getirebilir.

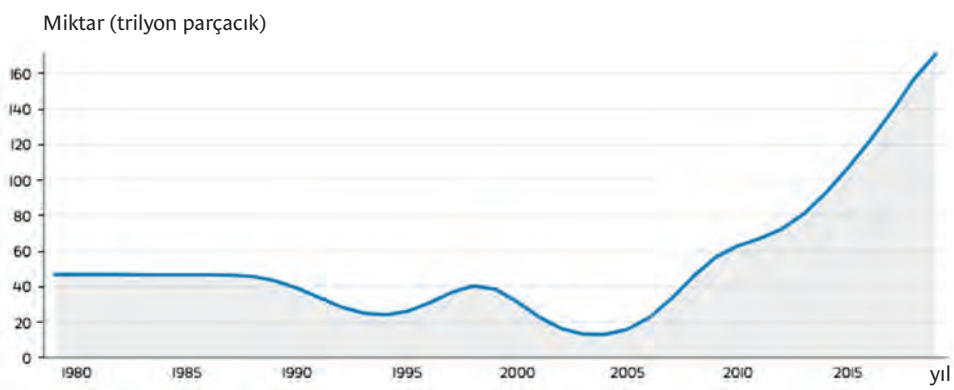
# Okyanuslardaki Mikroplastik Alarmı: Tehlike Büyüyor

Bilim insanları, okyanuslarda biriken mikroplastik miktarının artık "alarm verici" boyutlara ulaştığını söylüyor. Güncel verilere göre denizlerinin yüzeyinde yaklaşık 2,3 milyon ton mikroplastik bulunuyor. Üstelik bu miktar, 2005 yılından bu yana büyük bir hızla artıyor.

Mikroplastik kirliliği aslında yeni bir sorun değil. 1970'lerden bu yana okyanuslardaki plastik atıklar izleniyor. Ancak son yıllarda durum çok daha endişe verici bir hâl aldı. Gyres Enstitüsünden Marcus Eriksen ve Lisa Erdle'nin yaptığı bir araştırma, 1979 ile 2019 yılları arasında okyanusların yüzeyindeki 11 binden fazla ölçüm istasyonundan toplanan verileri inceledi. Bulgulara göre 2005-2019 yılları arasında okyanuslardaki plastik yoğunluğu yaklaşık 10 kat arttı.

Bu artışın nedenleri açık: 2005 sonrası dünya genelinde toplam plastik üretimi neredeyse ikiye katlandı ve plastik kirliliğini önlemeye yönelik güçlü, uluslararası bağlayıcılığı olan bir anlaşma hâlâ hayata geçirilemedi. Buna ek olarak

**1979'dan 2019'a denizlerdeki tahmini plastik miktarı değişimi**




Plos one doi: 10.1371/journal.pone.0281596

kullanım ömrü biten plastiklerin zamanla mikroplastiğe dönüşmesi de kirliliğin etkilerini daha da derinleştiriyor.

Araştırmacılardan Lisa Erdle, bu gidişatın durdurulabilmesi için plastik üretiminde radikal bir değişiklik gerektiğini vurguluyor. 2022 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Meclisi plastik kirliliğiyle mücadele için uluslararası bir anlaşma hazırlamak üzere müzakerelerin başlatılması kararı aldı. Ancak Erdle bu anlaşmanın bağlayıcı ve uygulanabilir olması gerektiğini söylüyor. Ayrıca anlaşmanın plastik üretimine doğrudan bir sınır getirmesi gerektiğini de ekliyor. Aksi takdirde 2040 yılına kadar okyanuslara karışan plastik miktarının 2016'ya kıyasla 2,6 kat artabileceği uyarısında bulunuyor.

Diğer birçok bilim insanı da plastik üretiminin kontrol altına alınması gerektiği görüşünde birleşiyor. Çünkü mikroplastikler, yalnızca çevreyi değil, deniz yaşamını ve nihayetinde insan sağlığını da tehdit ediyor.

# Mikroplastikler Toprağa ve Soframıza Nasıl Ulaşıyor?

Mikroplastikler artık yalnızca okyanusların değil, karasal ekosistemlerin de ciddi bir sorunu hâline geldi. Küçük olmalarına rağmen çok geniş bir alana yayılmaları, doğada uzun süre kalabilmeleri ve canlılar üzerindeki potansiyel zararları nedeniyle küresel ölçekte bir çevre tehdidi olarak görülüyorlar. Özellikle sularla ilgili çok sayıda araştırma yapılmış olsa da mikroplastiklerin tarım alanlarındaki etkileri ve besin zincirine dâhil olarak insan sağlığını nasıl etkilediği henüz yeterince araştırılmış değil. Yine de uzmanlar, bu parçacıkların gıda zincirine girerek insan sağlığı için risk oluşturabileceğine dikkat çekiyor.

Mikroplastikler tarım arazilerine farklı yollarla ulaşabiliyor. En yaygın kaynakları, kanalizasyon çamurları ve organik atıklarla yapılan gübreleme. Atık suların arıtılması sürecinde içindeki katı maddelerin çöktürülmesi sonucu elde edilen çamurlar, organik içerikli katı maddeler olan biyokatılar ve hayvansal gübreler, içerdikleri mikroplastikler nedeniyle toprağın kirlenmesine neden olabiliyor. Ayrıca zararlı otların büyümesini engellemek için tarımda sıklıkla kullanılan plastik örtüler (malçlar) zamanla parçalanarak mikroplastiklere dönüşüyor.
Sulama sistemleri de risk oluşturuyor: Özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde atık sularla yapılan sulama, bu parçacıkları doğrudan tarlalara taşıyabiliyor.

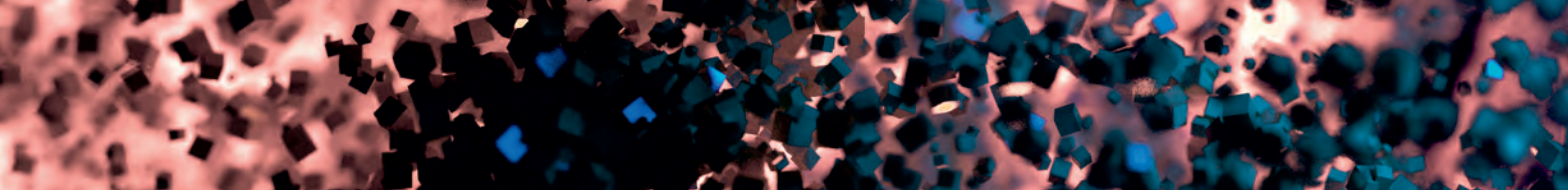
Toprağa karışan mikroplastikler yalnızca çevreyi değil aynı zamanda gıda güvenliğini ve tarımsal verimi de tehdit ediyor. Bitkilerin köklerinden başlayarak gövdelerine, yapraklarına ve meyvelerine kadar taşınabilen bu parçacıklar, doğrudan soframıza kadar ulaşabiliyor. Ayrıca toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek mikrobiyal dengeyi bozuyor, besin döngüsünü sekteye uğratıyor ve toprağın su tutma kapasitesini azaltıyor. Tüm bunlar bitki gelişimini olumsuz etkiliyor ve ürün veriminde düşüşe neden olabiliyor.

Kısacası, mikroplastikler artık yalnızca çevresel bir mesele değil; tarım, beslenme ve sağlıkla doğrudan bağlantılı, çok boyutlu bir sorun hâline gelmiş durumda.

Birleşik Krallık'taki Lancaster Üniversitesinden araştırmacılar, 1843'ten bu yana süregelen bir çalışmada gübrelerin tarımsal üretimde kullanılan topraklardaki mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynağı olduğunu ve son 50 yılda bu

gyro / iStock

Plastik malçlama



## Mikroplastik Lifler, Kuraklık Kadar Zararlı Olabilir

Berlin'deki Freie Üniversitesinde yürütülen bir araştırma, mikroplastik liflerin -özellikle de poliesterden yapılmış olanların- toprak sağlığı üzerindeki etkilerini inceledi. Ve ortaya çıkan sonuç oldukça dikkat çekici: Bu plastik lifler, verimli topraklarda kuraklık kadar zarar verici olabilir.

Araştırmada bilim insanları kum, mil ve kilden oluşan toprağa 1,28 mm uzunluğunda mikroplastik lifler ekledi ve bu ortamda çayır ekosistemlerinde bulunan yedi farklı bitki türü yetiştirdi. Bitkilerin yetiştirildiği saksıların bir bölümü düzenli olarak sulanırken diğer kısmı kuraklık koşullarına maruz bırakıldı. Amaç, sadece bitki gelişimini gözlemlemek değil aynı zamanda toprağın işlevlerini sağlıklı bir şekilde yerine getirip getirmediğini ölçmekti.

Bilim insanları, toprakta karbondioksit salımı (respirasyon), pH, topaklaşma kabiliyeti, besinleri tutma kapasitesi, organik atıkların parçalanma hızı gibi önemli faktörleri inceledi. Toprağın bu temel işlevlerini ne ölçüde yerine getirdiğini, "ekosistem çok işlevliliği" adlı bir genel değerlendirme ölçütü ile belirlediler.

Sonuçlar karmaşıktı: Mikroplastik lifler bazı açılardan olumlu etki yarattı. Örneğin toprağın su tutma ve bitki köklerini destekleme yeteneğini belirleyen fiziksel yapısının göstergesi olan topaklanma kabiliyeti %18, besin tutma kapasitesi %70 ve organik artıkların parçalanması %6 oranında artış gösterdi. Ancak bu olumlu etkiler uzun vadede sürdürülebilir görünmüyor. Çünkü özellikle iyi sulanan topraklarda mikroplastikler, toprak enzimlerinin verimliliğini ve toprak respirasyonunu yani karbondioksit salımını düşürerek ekosistem çok işlevliliğinde %34'e kadar azalmaya yol açtı.

Kurak koşullarda mikroplastiklerin etkisi daha az belirgin olsa da araştırmacılar, mikroplastik liflerin özellikle verimli tarım arazilerinde toprak sağlığını ve verimini tehdit ettiğini vurguluyor. Bu etki, kuraklık gibi doğal stres faktörleriyle kıyaslanabilecek ölçüde güçlü olabilir.

En dikkat çekici noktalardan biri ise şu: Bu deneyler günümüzde toprakta tespit edilen mikroplastik kirliliği seviyelerine göre yapıldı. Oysa uzmanlar, asıl sorunun mikroplastik kirliliğinin gelecekte daha da artmasıyla baş göstereceğine dikkat çekiyor. Yani mikroplastiklerin bugünkü etkisi bu kadar belirgense ileride karşılaşabileceğimiz tablo çok daha endişe verici olabilir.

kirliliğin önemli ölçüde arttığını keşfetti.
Rothamsted Research'te toplanan eski toprak örneklerinin incelendiği araştırma, toprak örnekleri üç gruba ayırarak gerçekleştirildi: Gübre verilmemiş toprak, organik kompost ya da organik gübre ile işlenmiş toprak ve geleneksel gübrelerle işlenmiş toprak.
1966'dan önce toplanan örneklerde mikroplastiklere çok az rastlanırken son 50 yılda her üç grupta da mikroplastik yoğunluğunda önemli bir artış gözlemlendi. Bu, gübre kullanılmayan topraklarda bile

Yeni bir araştırma, mikroplastiklerin bitkilerde fotosentezi %7–12 oranında azalttığını ortaya koydu. Bu durum mısır, buğday ve pirinç gibi temel tarım ürünlerinde verim kaybına, deniz yosunlarının zarar görmesiyle de deniz ürünlerinde %7'ye varan üretim düşüşüne yol açabilir. Fotosentezin azalması sadece gıda güvenliğini değil aynı zamanda atmosferden karbondioksit emilimini azaltacağı için iklim değişikliğiyle mücadeleyi de zorlaştırıyor. Uzmanlara göre çevreye karışan mikroplastiklerin yalnızca %13 azaltılması bile fotosentezdeki azalmadan kaynaklanan kayıpların üçte birini önleyebilir. Bu nedenle araştırmacılar, küresel ve bağlayıcı bir plastik kirliliği anlaşmasının acilen yapılması gerektiğini vurguluyor.

mikroplastik kirliliğinin ortaya çıktığını gösteriyor. Gübrelerin mikroplastik yoğunluğunu artırdığı, özellikle organik veya inorganik gübrelerle işlenmiş topraklarda bu artışın daha belirgin olduğu bulundu. İnorganik gübrelerin mikroplastikleri yayma riskinin olabileceği çünkü birçok gübrenin besin maddelerini toprağa yavaşça salmak için polimerlerle kaplandığı ifade ediliyor. 2022 yılında yapılan bir başka çalışmada ise tarımsal gübre olarak kullanılan atık su çamurunda büyük miktarda mikroplastik bulunduğu gözlemlendi. Avrupa'da her yıl 31.000 ila 42.000 ton arasında mikroplastik, tarımsal topraklara karışıyor.

Araştırmalar ayrıca marul ve buğday gibi bitkilerin köklerinin çevrelerindeki topraktan ve sudan mikroplastikleri emebileceğini, bu mikroplastiklerin bitkinin yenilebilir kısımlarına geçebileceğini ortaya koyuyor. Mikroplastiklerin toprağın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini değiştirdiği ve bu değişimlerin tarımsal verimliliği ve üretimi olumsuz yönde etkileyebileceği belirtiliyor.

## Mikroplastiklerden Kurtulmak Mümkün mü?

Mikroplastikler için arıtma stratejilerinin ana odağı, genellikle bulundukları su ekosistemlerinden uzaklaştırılmalarıdır. Sucul ortamlardan mikroplastikleri uzaklaştırmak için genel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılıyor. Bu yöntemler, atık su arıtma tesislerinde içme suyu eldesinde ve endüstriyel atık suların arıtılarak deşarj edilmesinde kullanılıyor. Fiziksel arıtma yöntemleri, mikroplastikleri sudan mekanik yollarla uzaklaştırmayı amaçlıyor ve genellikle kimyasal veya biyolojik işlemlerden önce uygulanıyor. Kimyasal arıtmada ise su çeşitli kimyasal maddeler kullanılarak bir dizi reaksiyon sonucu arıtılıyor. Fiziksel ve biyolojik yöntemlerle uzaklaştırılamayan mikroplastikler için kimyasal arıtma önem taşıyor. Koagülasyon, flokülasyon, elektrokimyasal oksidasyon, fotolitik bozunma, ozonlama

Çin'deki Jinan Üniversitesinde yapılan bir araştırma, çeşme suyunun 5 dakika kaynatılmasıyla içindeki nanoplastik ve mikroplastik (NMP) miktarının %80 oranında azaldığını ortaya koydu. Bu azalma, NMP'lerin suyun içindeki kalsiyum kristallerine tutunarak dibe çökmesi sayesinde gerçekleşiyor. Özellikle "sert" sularda bu etki daha fazla görülüyor. Suyu kaynatmak ayrıca mikroorganizmalar gibi diğer zararlı unsurları da azaltabiliyor. Uzmanlar, bu yöntemi NMP'leri azaltmak için pratik ve etkili bir çözüm olarak değerlendiriyor ve arıtma tesislerinde uygulanmasının halk sağlığı açısından önemli bir adım olabileceğini belirtiyor.

## Mikroplastik giderme yöntemleri

**Fiziksel Yöntemler**

- Adsorpsiyon
- Filtrasyon
- Flotasyon yöntemi
- Yağ filmi yöntemi
- Manyetik ayırma

**Kimyasal Yöntemler**

- Koagülasyon ve Flokülasyon
- Elektrokimyasal oksidasyon
- Fotokatalitik bozulma
- Ozonlama
- Sol-jel teknikleri

**Biyolojik Yöntemler**

- Biyoreaktör ve dinamik membran teknikleri
- Biyofiltre veya biyokömür filtre
- Biyobozulma

| Yöntem Türü | Tanım | Avantajları | Dezavantajları |
|---|---|---|---|
| **Fiziksel Yöntem** | Mikroplastikleri fiziksel yollarla ayırma (filtreleme, çökeltme vb.) | Uygulaması kolay, hızlı | Çok küçük parçacıklar için yetersiz kalabilir |
| **Kimyasal Yöntem** | Kimyasal maddeler kullanarak mikroplastikleri başka maddelere dönüştürme veya çöktürme | Etkili sonuç verebilir | Kimyasal kalıntılar çevre için risk oluşturabilir |
| **Biyolojik Yöntem** | Mikroorganizmalar veya enzimlerle mikroplastikleri parçalama | Doğaya uyumlu, sürdürülebilir | Henüz araştırma aşamasında, büyük ölçekli uygulamaları sınırlı |

ve sol-jel teknolojisinin yer aldığı kimyasal yöntemlerle zararlı mikroplastikler daha az zararlı kimyasal maddelere dönüştürülüyor. Biyolojik yöntemlerde, sucul ortamlarda ve atık sularda bulunan mikroplastik kirliliği çeşitli organizmalar kullanılarak gideriliyor. Bilim insanları, farklı biyolojik türleri kullanarak mikroplastiklerin biyolojik bozunma yoluyla uzaklaştırılması için olası arıtma yöntemlerini araştırmaya devam ediyor.

Mikroplastikleri sudan uzaklaştırmak için geliştirilen farklı tekniklerin her birinin kendine göre avantajları ve dezavantajları var. Bu yöntemlerin başarısı, mikroplastiklerin boyutu, suyun akış hızı, pH seviyesi ve parçacıkların yoğunluğu gibi birçok faktöre bağlı. Her ne kadar bilim insanları bu amaçla daha verimli ve yenilikçi yöntemler üzerinde çalışıyor olsa da uzmanlar en etkili çözümün mikroplastik oluşumunu en baştan önlemek olduğunu vurguluyor.

Oliver Helbig / GettyImages

Tüm bu veriler gösteriyor ki mikroplastikler yalnızca çevreyi değil, doğrudan sağlığımızı da tehdit ediyor. Gözle görülmeyen bu parçacıklar, vücudumuza girerek hücresel düzeyde hasarlara yol açabiliyor ve hatta beyin fonksiyonlarımızı bile etkileyebiliyor. Bu nedenle mikroplastik kirliliği yalnızca çevresel bir sorun değil aynı zamanda bir halk sağlığı sorunu.

Mikroplastik kirliliğiyle mücadele için bilimsel araştırmalar ve yasal düzenlemeler kadar bireysel önlemlerin de hız kazanması gerekiyor. Her birimizin atacağı küçük adımlar, daha sağlıklı bir gelecek için ortak bir etki yaratabilir. Daha temiz bir dünya için şimdi harekete geçme zamanı. ■

**Kaynaklar**


- https://www.sciencenews.org/article/microplastics-human-bodies-health-risks
- https://www.britishwaterfilter.com/forever-and-ever-a-timeline-of-how-microplastics-got-everywhere-hindustan-times/
- https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596
- https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052
- https://doi.org/10.1021/envhealth.4c00210
- https://www.scientificamerican.com/article/how-microplastics-get-into-our-food/
- https://www.newscientist.com/article/mg26635421-000-what-are-microplastics-doing-to-your-brain-were-starting-to-find-out/
- https://doi.org/10.1128/aem.02282-24
- https://doi.org/10.61373/bm025c.0020
- https://www.scientificamerican.com/article/microplastic-pollution-is-messing-with-photosynthesis-in-plants/
- https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2025/march/medical-infusion-bags-can-release-microplastics.html