

RAPOR

BİYOSFERDE NANOPLASTİK

MOLEKÜLER ETKİLERDEN
GEZEGENSEL KRİZE

MİKROPLASTİK
VE NANOPLASTİK

Bir
milyon
ton

1000

800

600

400

200

Yıllık üretim hacmi
reçine ve lifler

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

RAPOR

BİYOSFERDE NANOPLASTİK

MOLEKÜLER ETKİLERDEN
GEZEGENSEL KRİZE

YAZARLAR

ÖZGÜRLÜK  DEMOKRASİ

ALLATRA

ALLATRA Uluslararası Halk Hareketi

İşbirliği yapılanlar



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Bolivya Katolik Üniversitesi "San Pablo" - UCB
Çevre Mühendisliği ve Araştırma Fakültesi
Kurumsal İnceleme İşbirlikçisi



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Juan Misael Saracho Özerk Üniversitesi - UAJMS
Araştırma, Bilim ve Teknoloji Bölümü
Kurumsal İnceleme İşbirlikçisi



**CREATIVE
SOCIETY**

Yaratıcı Toplum Uluslararası Projesi
Bilimsel Katkıcı

İÇİNDEKİLER

Özet.....	5
Plastik Kirliliğinin Sonuçları: Gezegenel Krizin Yeni Etkeni Olarak Mikro ve Nanoplastikler (MNP'ler).....	7
Küresel Plastik Atık Üretiminde Nicel Tahminler ve Eğilimler.....	7
Büyük Pasifik Çöp Adası.....	12
Mikro ve Nanoplastik Parçacıklar Nasıl Oluşur?.....	12
MNP'lerin Çevrede Yayılması	18
Mikro ve Nanoplastik Kirliliğin Çevresel ve İklimsel Sonuçları.....	23
MNP'ler Ekosistemleri Moleküler Düzeyde Nasıl Bozuyor?.....	23
Mikro ve Nanoplastiklerin İklim Üzerindeki Etkisi.....	46
Mikro ve Nanoplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisi.....	71
21. Yüzyıl Salgınlarında Ortaya Çıkan Risk Faktörleri Olarak Mikro ve Nanoplastikler.....	71
MNP Toksisitesinin Moleküler Mekanizmaları: DNA, Mitokondri ve Hücre Zarlarının Tahribatı.....	72
Erken Yaşlanma ve Kanser Gelişiminde MNP'lerin Rolü.....	84
MNP'lerin Tetiklediği Hormon Sistemi Bozuklukları	87
Nanoplastiklerin İnsan Bedeni İçin Yüksek Toksisitesinin Ana Etkeni Olarak Elektrostatik Yük.....	93
MNP'lerin İnsan Organları ve Fonksiyonel Sistemler Üzerindeki Sistemik Etkileri	100
Solunan MP'lerden Kaynaklanan Solunum Sistemi Hasarı.....	101
MNP'lerin Nörotoksik Etkileri: Merkezi ve Periferik Sinir Sistemlerine Zarar.....	102
MNP'lerin Kardiyovasküler Hastalıkların Patogenezindeki Rolü	114
MNP Maruziyetine Bağlı Gastrointestinal Bozukluklar	116
MNP'lerin Bağışıklık Sistemi Üzerindeki Etkileri	117
MNP'lerin Kanserojen Özellikleri: Mutasyon Yolları ve Metastatik İlerleme.....	120
MNP'lerin Kalsiyum Metabolizması ve Kemik Yapısı Üzerindeki Etkileri	121
MNP Maruziyeti ile İlişkili Üreme Bozuklukları: Kısırlık ve Erektile Disfonksiyon.....	122
MNP'lerin Plasenta Bariyerinden Geçiş ve Gelişmekte Olan Beden Üzerindeki Etkileri.....	126
MNP Maruziyetinin Etkileri ve Doğuştan Anormalliklerle İlişkisi	130
Sonuçlar ve gelecek perspektifleri. MNP insan sağlığı üzerindeki etkisi azaltılabilir mi?	133
Plastik Kirliliğini Azaltmak İçin Modern Stratejilerin Analizi	134
Su Ekosistemlerinden Büyük Plastik Atıkları Temizleme Teknolojileri	134
Mikro ve Nanoplastiklerin Temizlenmesi için Mevcut Yöntemler.....	139
ALLATRA Bilim Topluluğunun Mikro ve Nanoplastik Salgınla Mücadele Yaklaşımı	142
Okyanusları MNP'lerden Temizlemek için Atmosferik Su Jeneratörü (AWG) Teknolojileri	142
Mikro ve Nanoplastiklerin Toksisitesini Azaltmaya Yönelik Yenilikçi Bilimsel Yaklaşım.....	148
X Faktörü: Doğal Afetlerin Dinamiklerindeki Mikro ve Nanoplastiklerin Rolü.....	151
Sonuçlar: Nanoplastikler Göz Ardı Edilmemesi Gereken Bir Sorundur.....	171
Referanslar.....	173

ÖZET

"Eğer Dünya bir günlük tutsaydı, geçen yüzyıl siyah mürekkeple yazılmış ve başlığı 'Plastik Çağı' olurdu." Canlı organizmaların hücrelerine sızan mikroskobik parçacıklardan okyanuslarda sürüklenen devasa çöp yığınlarına kadar, plastikler gezegenin jeolojik kayıtlarına kazınmış durumda. Peki bunun bedeli ne? Her yıl dünya 400 milyon tondan fazla plastik atık üretiyor ve bunun tahmini 11 milyon tonu dünya okyanuslarına giriyor. Bugüne kadar deniz ortamlarında 200 milyon tondan fazla plastik birikti. Yüzey suyu örnekleri, plastiklerin artık zooplanktonlardan altı kat daha ağır olduğunu ortaya koyuyor. Mevcut eğilim devam ederse, 2050 yılına kadar okyanuslardaki plastik kütlesi tüm balıkların kütlesini geçecek.

Plastiklerin parçalanması yüzlerce, hatta binlerce yıl sürse de, dalgalar, tuzlu su ve ultraviyole radyasyonun etkisiyle mikro ve nanoplastik olarak bilinen küçük parçacıklara ayrılır. Bu parçacıklar, deniz havası ve yağışlarla binlerce kilometre yol kat ederek sınırları, kıtalar ve okyanusları aşabilir. Ormanlarda birikir ve yiyeceklerimize ve içme suyumıza karışır. Mikroplastikler, Mariana Çukuru'ndan Everest Dağı'nın zirvesine kadar, Dünya'nın en ücra köşelerinde bile tespit edilmiştir. Bu rapor, plastik kirliliğinin çevre, insan sağlığı ve toplumun kritik sistemlerinin dayanıklılığı üzerindeki etkisinin kapsamlı bir analitik değerlendirmesini sunmaktadır. Statik yükler ve toksik kimyasal bileşikler taşıyan mikro ve nanoplastiklerin davranışını ve ekosistemler üzerindeki etkilerini incelemektedir. Okyanus asitlenmesi, besin zincirlerinin dengesizleşmesi ve biyolojik çeşitliliğe yönelik tehditler üzerindeki rolleri özellikle dikkat çekmektedir. Rapor, mikro ve nanoplastiklerin su özelliklerindeki değişikliklerle bağlantılı olduğu ve bu durumun okyanus ısınmasını hızlandırarak doğal afetleri şiddetlendirebileceği hipotezini ortaya koymaktadır.

Bu raporda tartışılan en acil ve endişe verici konulardan biri, mikro ve nanoplastiklerin (MNP'ler) insan sağlığı üzerindeki etkisidir. Bu parçacıklar, çok küçük boyutları nedeniyle biyolojik bariyerleri aşarak oksidatif stres, DNA hasarı, enflamatuar tepkiler ve hücresel işlev bozukluklarına neden olabilir. Raporda, MNP maruziyeti ile nörodejeneratif ve nöropsikiyatrik bozuklukların artan yaygınlığı arasında olası bir korelasyon olduğu vurgulanmaktadır. Rapor, doğum öncesi ve doğum sonrası gelişim sırasında MNP'lere maruz kalmanın çocuklarda bilişsel işlevleri ve ruh sağlığını bozabileceğini ve gelecek nesiller için ciddi bir tehdit oluşturabileceğini göstermektedir.

MNP ile ilişkili hastalıkların artan görülme sıklığı, özellikle plastik kirliliğinin yüksek olduğu bölgelerde yaşam kalitesini şimdiden düşürmektedir. Rapor, şu anda riskin yüksek olduğu bölgeleri ve şu ana kadar nispeten etkilenmemiş bölgeleri belirlemektedir. Durumun kötüleşmeye devam etmesi ve etkili koruyucu önlemlerin alınmaması halinde, nüfus daha güvenli yaşam koşulları arayışıyla göç etmek zorunda kalabilir. Bu durum, kontrolsüz göç dalgalarına yol açarak sosyal gerilimi artırabilir, kentsel altyapıyı zorlayabilir ve ekonomileri istikrarsızlaştırabilir.

Bu şekilde, plastik kirliliğinin çevreye verdiği zarar, giderek makroekonomik ve jeopolitik bir soruna dönüşecektir.

Raporda, MNP kirliliğinin acilen ele alınması gerektiği vurgulanmakta ve MNP'lerin dağılımı, etkisi ve sonuçları hakkında yeni bir bakış açısı sunulmaktadır. Rapor, plastik kirliliğine ilişkin fiziksel, kimyasal ve biyolojik verileri bir araya getiren disiplinler arası bir yaklaşıma dayandığı için benzersizdir. Bu da raporu, gezegenimiz ve insanlık için daha güvenli bir gelecek için sürdürülebilir çözümler geliştirmeye kendini adanmış çok çeşitli alanlardaki bilim insanları için önemli hale getirmektedir.

PLASTİK KİRLİLİĞİNİN SONUÇLARI: GEZEĞEN KRİZİNİN YENİ ETKENİ OLARAK MİKRO VE NANOPLASTİKLER (MNP'LER)

Plastikler günümüz yaşamının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ambalaj ve mutfak eşyaları, giyim ve ayakkabı, hijyen ürünleri ve ilaçlar, ulaşım ve iletişim — günlük hayatımızın çoğu plastiklerden yapılmıştır. Ancak plastikler sadece büyük ve görünür nesneler halinde mevcut değildir: mikroplastikler ve nanoplastikler olarak bilinen mikroskobik parçacıklara da ayrılırlar. Mikroplastikler, 5 mm'den küçük, genellikle çıplak gözle görülebilen parçacıklar olarak tanımlanır. Nanoplastikler ise bir mikrometreden (metrenin milyonda biri) daha küçüktür ve çoğu standart mikroskop altında bile görünmez.

Plastik malzemeler çeşitli türlerde bulunur, ama hepsi polimerlerden oluşur — uzun molekül zincirlerinden oluşan doğal veya sentetik maddeler. Polimerler, onları son derece dayanıklı ve çevresel bozulmaya karşı dirençli kılan benzersiz kimyasal özelliklere sahiptir.

Bu nedenle, dayanıklılıkları, çok yönlülükleri ve düşük üretim maliyetleri sayesinde, plastikler özellikle tek kullanımlık ürünler için kitlesel üretimin tercih edilen ana malzemesi haline gelmiştir.¹ Ancak, uygun olmayan atık yönetimi, plastikleri kütle olarak dünyanın en hacimli kirleticileri haline getirmiştir.

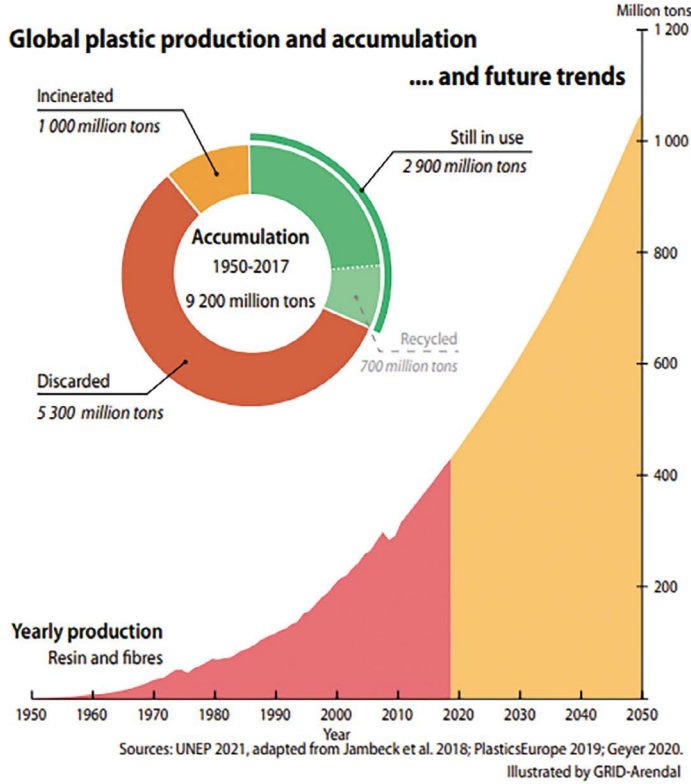
Küresel Plastik Atık Üretiminde Nicel Tahminler ve Eğilimler

1950'lerden bu yana, dünya yaklaşık 9.200 milyon metrik ton plastik üretmiştir. Bunun yaklaşık 2.900 milyon tonu, 2.700 milyon tonu işlenmemiş plastik ve yaklaşık 200 milyon tonu geri dönüştürülmüş malzeme olmak üzere, bugün hala kullanılmaktadır. Yaklaşık 5.300 milyon ton çöp sahalarına gitmiş, 1.000 milyon ton ise yakılmıştır. Ek olarak 1.750 ila 2.500 milyon ton “yanlış yönetilmiş” olarak sınıflandırılmıştır, yani kontrolsüz kanallardan çevreye girmiş olabilir (bkz. Şekil 1).

¹Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü. Plastik atıkların izlenmesindeki kör noktalar https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

Bugüne kadar, plastik ürünlere yaklaşık 640 milyon ton kimyasal katkı maddesi eklenmiştir².

Birleşmiş Milletler Çevre Programı'na (UNEP)³ göre, dünya şu anda yılda 400 milyon tondan fazla plastik atık üretmektedir.



Şekil 1: Küresel plastik üretimi, birikimi ve gelecekteki eğilimler
Kaynak: UNEP 2021, Jambeck ve ark. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020'den uyarlanmıştır. GRID-Arendal tarafından hazırlanmıştır.

https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Plastik atıkların sadece yaklaşık %9'u geri dönüştürülürken, %19'u yakılır ve geri kalanı çöp sahaları ve okyanuslar dahil olmak üzere çevrede kalır⁴ (bkz. Şekil 2).

Bertaraf Yöntemi Paylaşım	Küresel, 2023
Geri Dönüştürülmüş	9%
Yakılmış	19%
Yanlış Yönetilmiş	22%
Çöp Sahasına Atılmış	49%

Рисунок 2. Ежегодные пластиковые отходы по методу утилизации, 2000–2023 гг.
Источник данных: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Her yıl yaklaşık 11 milyon ton plastik dünya okyanuslarına giriyor⁵. Bu, her dakika bir çöp kamyonundan fazla plastik atığın okyanusa döküldüğü anlamına geliyor.

²Schmidt, C. et al. Üçlü gezegen krizinde plastik kirliliğinin rolüne çok disiplinli bir bakış. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³Birleşmiş Milletler Çevre Programı. Plastik kirliliğini yenmek (Plastik kirliliğini yenin) <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁴Dünyadaki plastik atıkların ne kadarı gerçekten geri dönüştürülüyor? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

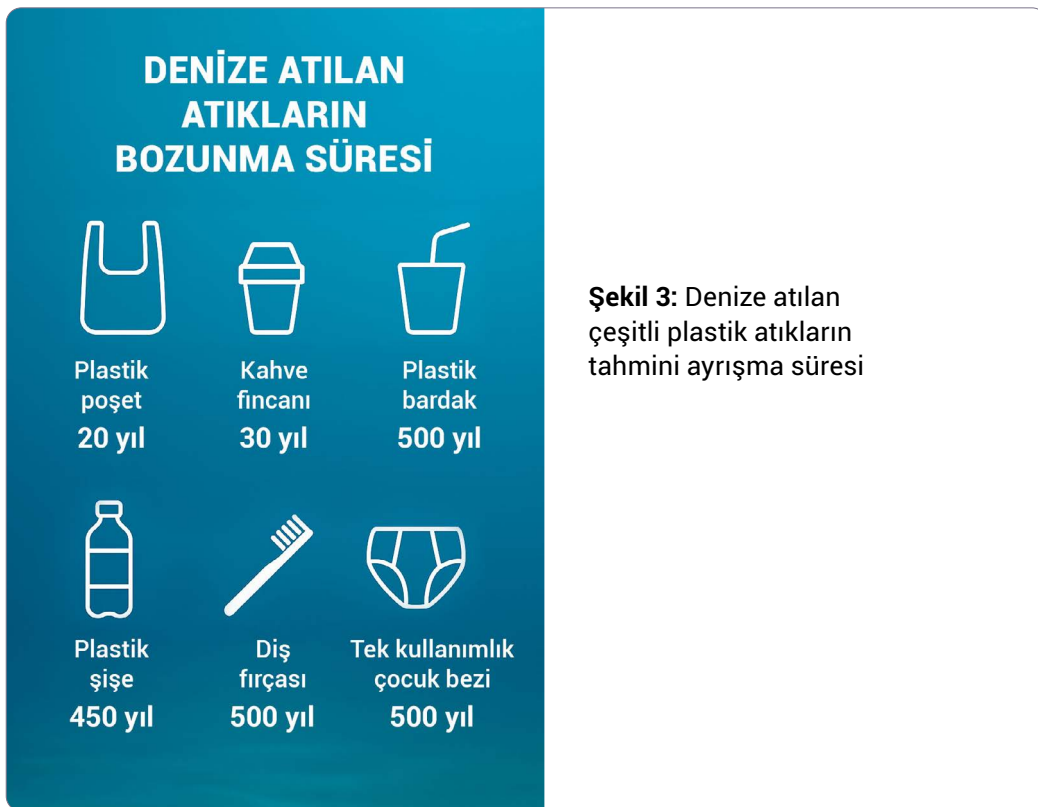
⁵Jenna R. Jambeck ve ark., Karadan okyanusa plastik atık girişi. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Şu anda, okyanuslarda 200 milyon tonun üzerinde büyük plastik atık (makroplastik) ve yaklaşık 35.540 ton mikroplastik birikmiştir⁶. Kara kaynaklarından su ekosistemlerine giren yıllık plastik atık tahminleri, analiz yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Müdahale edilmeyen bir "olağan durum" (BAU) senaryosunda, bu seviyeler neredeyse üç katına çıkabilir — 2016'da 9-14 milyon tondan 2040'ta 23-37 milyon tona.

Başka bir metodolojiye göre, okyanuslara ulaşan plastik atıkların neredeyse iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir — 2016'da 19-23 milyon tondan 2030'da 53 milyon tona⁷.

Araştırmalara göre, mevcut eğilimler devam ederse, 2050 yılına kadar okyanuslarda 12.000 milyon ton plastik⁸ bulunacak ve bu miktar, yaklaşık 10.000 milyon ton olarak tahmin edilen deniz balıklarının toplam biyokütlesine rakip olacak⁹.

Plastiklerin çürümesi, türüne bağlı olarak 100 ila 1.000 yıl arasında sürmektedir (bkz. Şekil 3). Deniz ortamlarında, özellikle okyanusun soğuk ve karanlık derinliklerinde, plastikler daha da yavaş çürümektedir¹⁰.



Şekil 3: Denize atılan çeşitli plastik atıkların tahmini ayrışma süresi

⁶Eriksen, M. ve diğerleri. Dünya Okyanuslarındaki Plastik Kirliliği: Denizlerde 250.000 Tonun Üzerinde 5 Trilyondan Fazla Plastik Parça. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷Birleşmiş Milletler Çevre Programı (2021). Kirlilikten Çözüme: Deniz çöplü ve plastik kirliliğine ilişkin küresel değerlendirme. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Şimdiye kadar üretilen tüm plastiklerin üretimi, kullanımı ve akıbeti. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoiien, X. et al. Açık okyanustaki büyük mezopelajik balıkların biyokütlesi ve trofik verimliliği. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Küresel ortamlarda plastik atıkların birikimi ve parçalanması. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Yakılan kısım hariç, çevreye atılan plastiklerin neredeyse tamamı bugün hala bozulmamış veya parçalanmış halde varlığını sürdürmektedir¹¹. Bu atıklar yok olmuyor ve birikmeye devam ediyor. Durum, sürekli doldurulan ama asla boşaltılmayan bir çöp kutusu gibi. Bir ay sonra bu çöp kutusunun ne hale geleceği, küresel plastik atık birikiminin boyutunu gösteriyor.

Büyük Pasifik Çöp Adası

Okyanus sularında biriken ve yüzeyinde yüzen plastik atıklar, okyanus akıntıları tarafından yakalanarak merkezi girdaplara taşınır ve "çöp adaları" olarak bilinen devasa kümeler oluşturur.

Büyük Pasifik Çöp Adası, gezegendeki en büyük plastik birikimidir ve sürekli büyüme göstermektedir (bkz. Şekil 4). Çöp adası, Kuzey Amerika ile Japonya arasında geniş bir alanı kaplamaktadır. Gözlemler, 2018 yılında yüzey alanının yaklaşık 618 bin mil kare¹² olduğunu göstermektedir, ancak bu rakam okyanus akıntıları ve mevsimsel değişiklikler nedeniyle dalgalanmalara tabidir.



Şekil 4. Pasifik Okyanusu'ndaki plastik birikiminin diyagramı

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Küresel ortamlarda plastik atıkların birikimi ve parçalanması. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. ve diğerleri. Büyük Pasifik Çöp Adası'nda plastik atıkların hızla biriktiğine dair kanıtlar. Sci Rep 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Araştırmalar, çöp yığınlarındaki maddelerin %80'ine¹³ kadarının plastikten¹⁴ oluştuğunu göstermektedir. Yığın, en az 80.000 metrik ton plastik atık¹⁵ içermektedir. Ancak bu, sorunun sadece görünen kısmıdır. Okyanuslardaki plastiğin tahmini %94'ü deniz tabanına batmaktadır¹⁶ ve burada büyük miktarda atık gizli kalarak birikmeye devam etmektedir.

Büyük Pasifik Çöp Adası'nın tam boyutu hala bilinmemektedir, bunun nedeni kısmen Kuzey Pasifik Subtropikal Girdap'ın çok geniş olması ve mevcut teknolojiyle kapsamlı bir şekilde haritalanmasının imkansız olmasıdır.

Okyanuslarda Plastik Birikiminin Dinamikleri

Aletlerle yapılan ölçümler, Büyük Pasifik Çöp Adası'nın boyutunda katlanarak artış olduğunu göstermektedir. 2015 ile 2022 yılları arasında, bu bölgedeki plastik atıkların ortalama kütlesi beş kat artmıştır¹⁷. Aynı dönemde küçük plastik parçacıkların on kat artması, büyük plastik atıkların hızla parçalandığını göstererek özellikle endişe vericidir.

Büyük Pasifik Çöp Adası, fiilen Dünya'nın yedinci "kıtası"nı oluşturmuştur. Ancak, bu fenomenin benzersiz olmadığını belirtmek önemlidir. Bugüne kadar, bilim adamları dünya okyanuslarında beş büyük çöp adası¹⁸ tespit etmiştir: ikisi Atlantik'te, ikisi Pasifik'te ve biri Hint Okyanusu'nda¹⁹ (Şekil 5).

¹³Derraik, J. G. B. Plastik atıkların deniz ortamını kirletmesi: bir inceleme. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. 1990–2006 yılları arasında Hawaii Adaları Deniz Ulusal Anıtı'nın kuzeybatısındaki French Frigate Shoals'ta deniz çöpi birikimini etkileyen faktörler. *Deniz Kirliliği Bülteni* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. ve diğerleri. Büyük Pasifik Çöp Adası'nda plastik birikiminin hızla arttığına dair kanıtlar. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Deniz Çevresinde Plastikler. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Kuzey Pasifik çöp adasında yedi yıl: büyük yüzen nesnelerden orantısız bir şekilde daha hızlı artan plastik parçaları. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Gözlemlenen yüzey sürüklenmelerinden okyanus çöp yığınlarının kökeni, dinamikleri ve evrimi. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Çöp Adacıkları. Deniz Çöpi Programı. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)



Şekil 5: Dünya okyanuslarındaki beş büyük çöp yığınının şematik gösterimi: ikisi Atlantik'te, ikisi Pasifik'te ve biri Hint Okyanusu'nda. Milyonlarca ton plastik ve diğer insan kaynaklı atık okyanuslarda dolaşmaktadır. Bu çöp yığınları endişe verici bir hızla büyüyor.

Mikro ve Nanoplastik Parçacıklar Nasıl Oluşur?

Plastik atıklar biyolojik bozunmaya karşı oldukça dirençlidir, ancak dalgaların, tuzlu suyun ve güneş ışığının etkisiyle yavaş yavaş daha küçük parçacıklara ayrılır — mikro ve nanoplastikler²⁰, bunlar genellikle çıplak gözle görülemez. Bu parçacıklar polimer yapısını korur²¹ ve bozunma süreci nano ölçeğe kadar devam eder (Şekil 6–7). Sonuç olarak, doğal bozunma mekanizmalarını atlatan plastik atıklar, gezegenin ekosistemlerinin kalıcı bir bileşeni haline gelir.

Dahası, mikro ve nanoplastikler, plastik üretimi sırasında eklenen tehlikeli kimyasallar içerir.



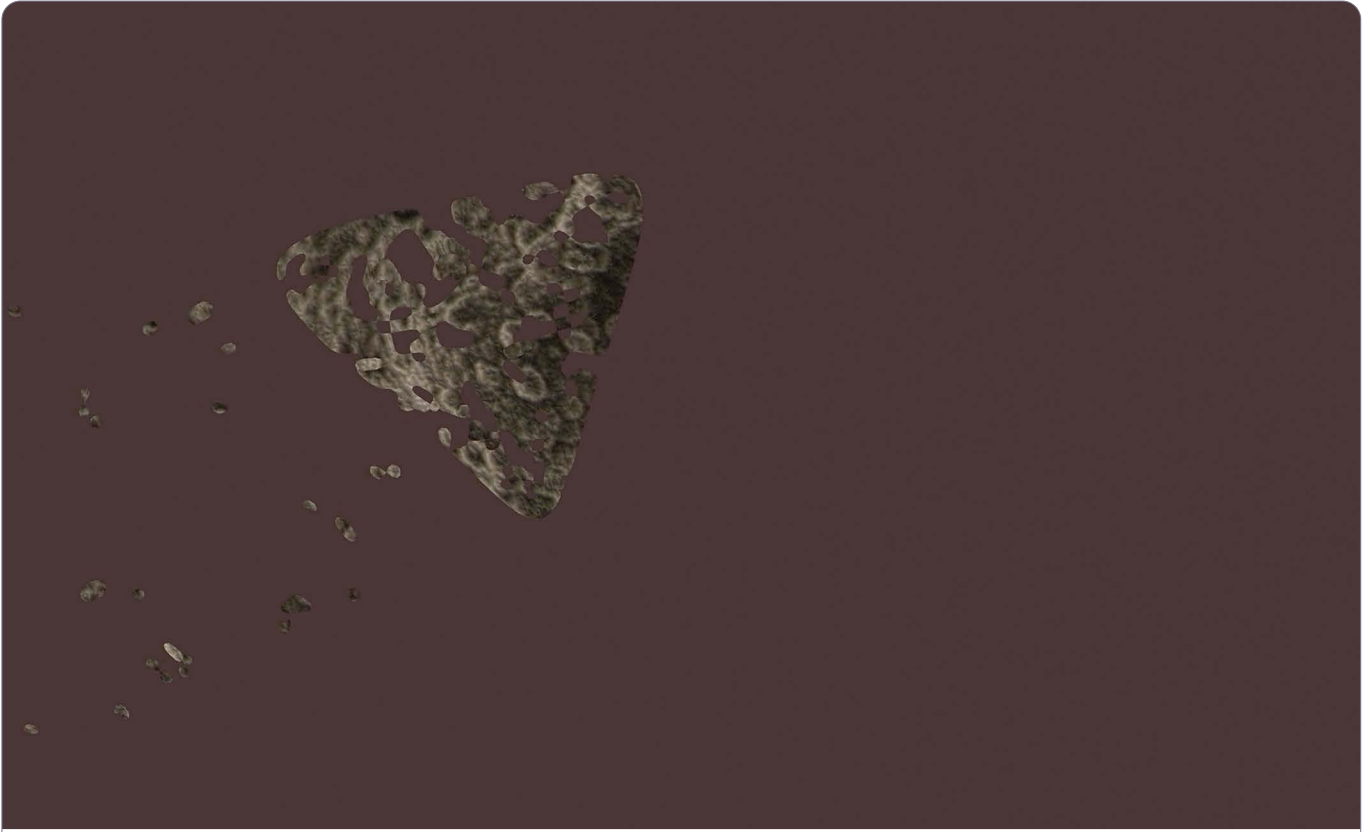
Helmholtz Çevre Araştırma Merkezi'nde yazar ve çevre kimyageri Annika Jahnke, "Artık plastiklerin yaklaşık 16.000 kimyasal içerdiğini biliyoruz. Bunların 4.200'den fazlasının çevrede kalıcı olduğu, canlı organizmalarda biriktiği, uzun mesafelerde taşındığı veya potansiyel tehlike oluşturduğu bilinmektedir," diyor²²

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Mikroplastik Kirliliği: Küresel Deniz Ekosistemleri Üzerindeki Tehditler ve Etkileri. Sürdürülebilirlik 15, 13252 (2023).

<https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Küresel ortamlarda plastik atıkların birikimi ve parçalanması. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

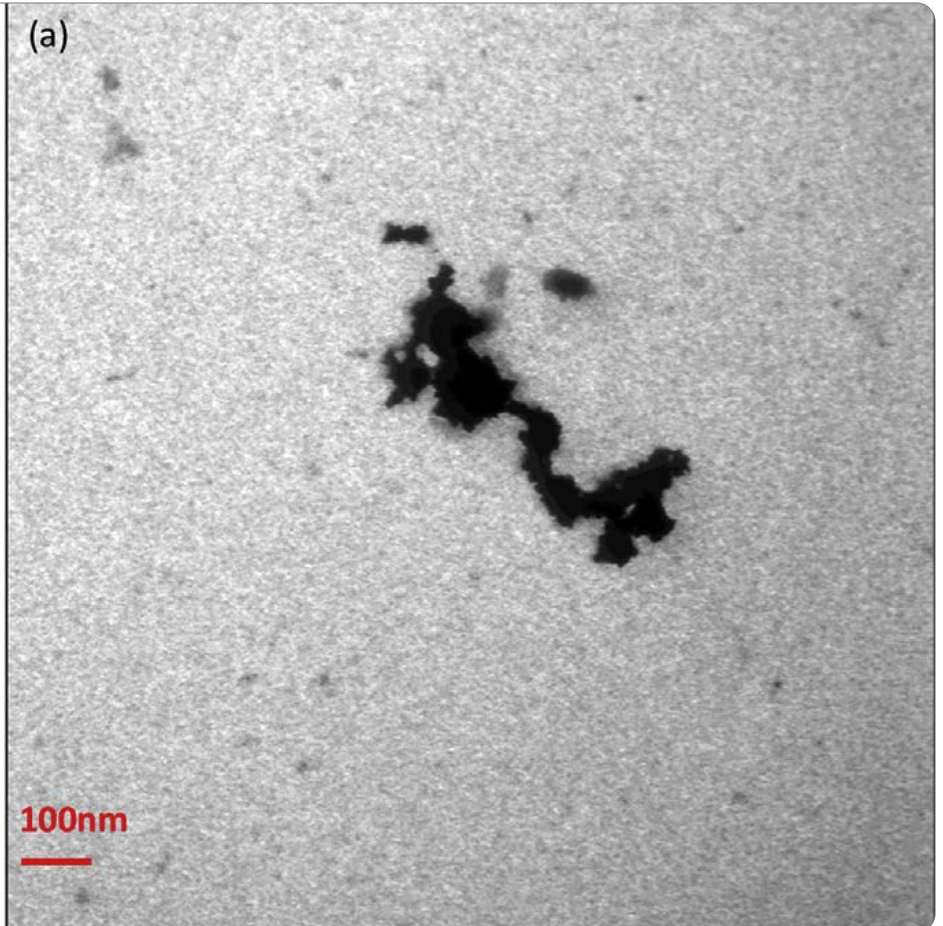
²²Helmholtz Çevre Araştırmaları Merkezi - UFZ. Plastiklerin Çevresel Etkileri: Atık perspektifinin ötesine geçmek. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



Şekil 6: Polimer yapısını koruyarak plastik parçacıkların nanoparçacıklara parçalanması

Şekil 7:

Kuzey Atlantik Okyanusu'ndan alınan yaşlı mikroplastiklerden UV ışınları ile parçalanmış, çevreye zararlı polietilen nanoplastiklerin transmisyon elektron mikroskobu görüntüsü
Kaynak: Gigault, J. et al. Güncel görüş: Nanoplastik nedir? Çevre Kirliliği 235, 1030–1034 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>



Okyanusta Mikro ve Nanoplastiklerin Yayılması

Plastiklerin en yüksek konsantrasyonları çöp yığınlarının bulunduğu bölgelerde bulunur. Bu okyanus çöplükleri, mikro ve nanoplastiklerin sürekli olarak üretildiği endüstriyel tesisler gibi işlev görür. Virüslerin kan dolaşımı yoluyla bedende yayılmasına benzer şekilde, mikroplastikler de okyanus akıntıları tarafından dünya okyanuslarına taşınır ve bu durum sorunun küresel boyutunu vurgular.

Mikroplastiklerin tespitinde teknik zorluklar, okyanuslardaki miktarlarının doğru bir şekilde ölçülmesini zorlaştırır da, teorik modeller sorunun büyüklüğünü tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır.

Mikroplastikler, okyanus suyunun neredeyse her örneğinde bulunurken, bazı bölgelerde konsantrasyonları küresel ortalamanın onlarca katıdır.

Okyanus girdapları, mikroplastiklerin yaygın dağılımına katkıda bulunarak, Kuzey Kutbu gibi uzak bölgelere bile ulaşmaktadır. Buz çekirdekleri üzerinde yapılan araştırmalar, Kuzey Kutbu Okyanusu'ndaki mikroplastik kirlilik seviyelerinin, İskoçya'nın kuzeyindeki sularda veya Kuzey Pasifik Subtropikal Girdap'ta bulunan seviyelerin 100 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir.²³ Bu bulgular, sorunun hem ciddiyetine hem de sınır ötesi niteliğine işaret etmektedir.

Deniz ortamlarındaki plastik kirliliğine ilişkin küresel çalışmaların çoğu, okyanusların yüzey tabakasına odaklanmaktadır. Tahminlere göre, 2019 yılında okyanusların yüzey tabakasında 82 ila 358 trilyon plastik parçacık bulunmaktaydı.²⁴

Ancak, derin deniz bölgelerinde ve dip sedimanlarında mikroplastik parçacık sayısının sayılamayacak kadar trilyonlara ulaşabileceğine dair kanıtlar artmaktadır.²⁵

Hafif plastikler yüzeye çıkma eğilimindeyken, daha yoğun plastikler veya deniz organizmaları tarafından kolonize edilen plastikler okyanus tabanına batar.²⁶ Tahminlere göre, kentsel plastik atıkların yaklaşık %50'si deniz suyundan daha yoğundur ve bu nedenle hızla çökler. Deniz tabanına ulaşan plastikler, derin deniz akıntıları tarafından taşınarak çukurlarda ve çöküntülerde birikir. Mikroplastikler, okyanusun bilinen en derin noktası olan Mariana Çukuru'nun dibinde bile bulunmuştur²⁷ (bkz. Şekil 8-9).

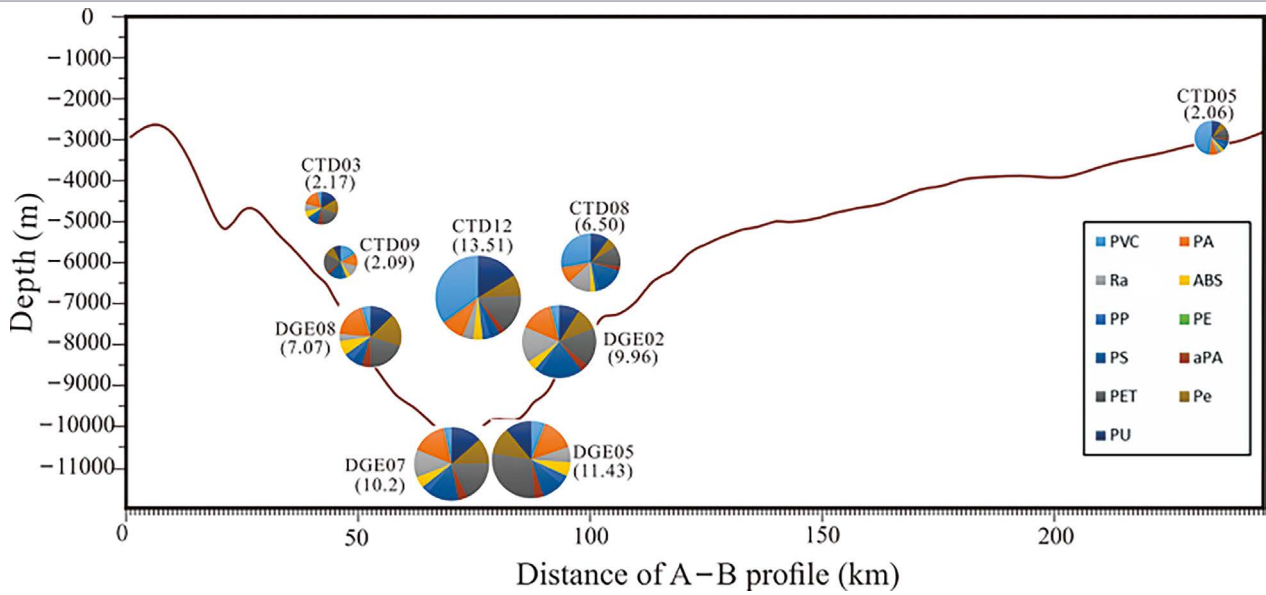
²³Obbard, R. W. et al. Küresel ısınma, Arktik Denizi buzlarında donmuş mikroplastik mirasını serbest bırakıyor. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eiksen, M. et al. Artan plastik kirliliği, şu anda dünya okyanuslarında 170 trilyondan fazla plastik parçacığın yüzdüğü tahmin ediliyor — Acil çözümler gerekli. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Deniz Çevresinde Plastikler. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

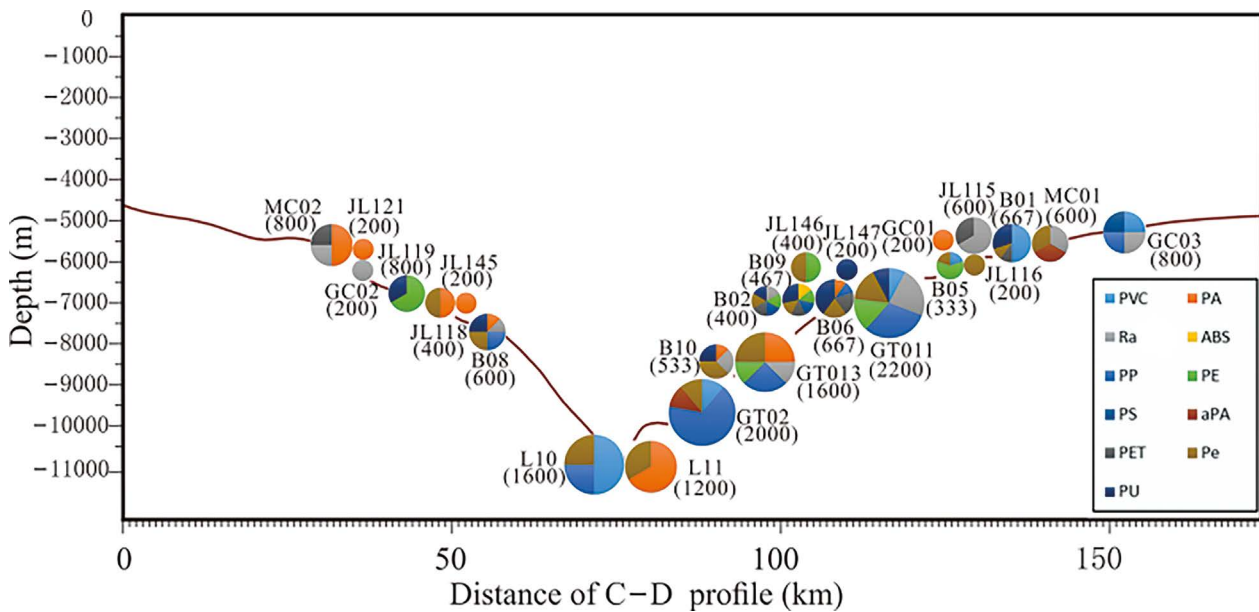
²⁶Lusher, A. (2015). Deniz Çevresinde Mikroplastikler: Dağılım, Etkileşimler ve Etkileri. Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Deniz Antropojenik Çöp*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Mikroplastikler dünya okyanuslarının en derin kısımlarını kirliliyor. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



Şekil 8: Mariana Çukuru'ndan alınan su örneklerinde mikroplastik bolluğu ve bileşimlerinin profili. Pasta grafikler mikroplastik bileşimlerini, parantez içindeki sayılar ise litre başına parça sayısını cinsinden mikroplastik bolluğunu göstermektedir. PVC-polivinil klorür, PA-poliamid, Ra-rayon, ABS-akrilonitril bütadien stiren, PP-polipropilen, PE-polietilen, PS-polistiren, aPA-aromatik poliamid, PET-polietilen tereftalat, Pe-polyester, PU-poliüretan. X eksen, A noktası (12 °N, 142,5 °E) ile B noktası (9,8 °N, 141,43 °E) arasındaki çapraz çizgiye karşılık

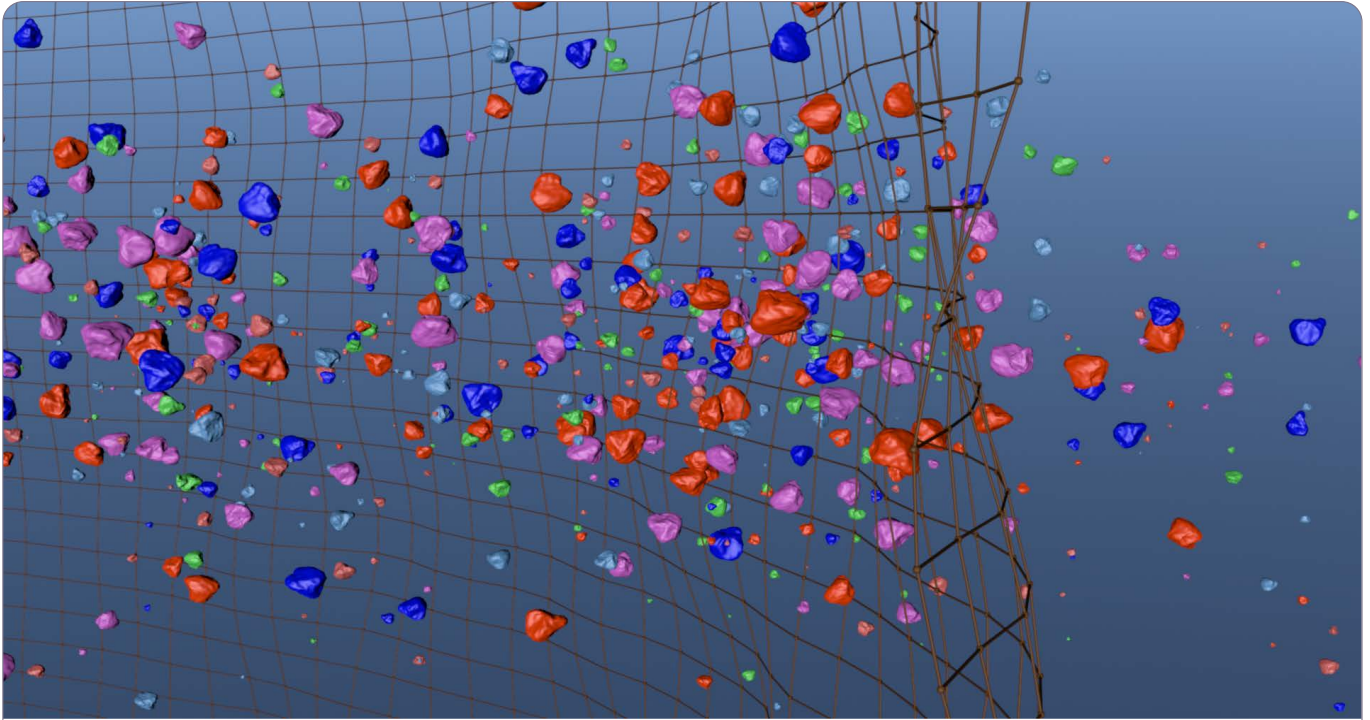
Kaynak: Peng, X. et al. Mikroplastikler dünya okyanuslarının en derin kısımlarını kirletiyor. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



Şekil 9: Mariana Çukuru'ndan alınan sediment örneklerinde mikroplastik bolluğu ve bileşimlerinin profili. Pasta grafikler mikroplastik bileşimlerini, parantez içindeki sayılar ise litre başına parça sayısını cinsinden mikroplastik bolluğunu göstermektedir. PVC-polivinil klorür, PA-poliamid, Ra-rayon, ABS-akrilonitril bütadien stiren, PP-polipropilen, PE-polietilen, PS-polistiren, aPA-aromatik poliamid, PET-polietilen tereftalat, Pe-polyester, PU-poliüretan. X eksen, C noktası (12 °N, 141,9 °E) ile D noktası (10,5 °N, 141,3 °E) arasındaki çapraz çizgiye karşılık gelir.

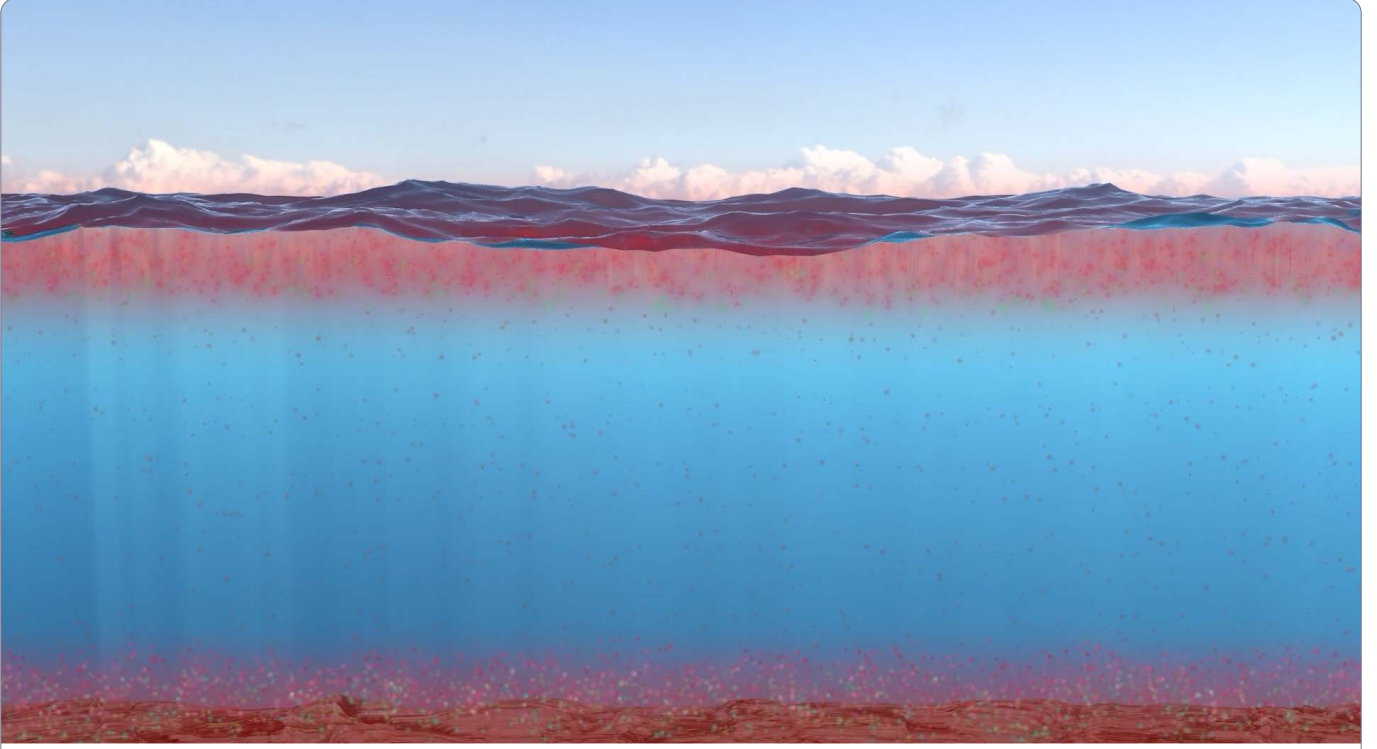
Kaynak: Peng, X. ve ark. Mikroplastikler dünya okyanuslarının en derin kısımlarını kirletiyor. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Aslında, mikroplastiklerin biriktiği başlıca yer okyanus yüzeyi değil, derin deniz tabanıdır. Yavaş yavaş, tüm okyanus tabanı bir plastik tabakasıyla kaplanmaktadır. Ancak, okyanuslardaki mikroplastik kirliliğine ilişkin veriler muhtemelen yetersizdir ve gerçek durum çok daha kötü olabilir. "Herkes çok sofistike ve pahalı aletlere ve örnekleme araçlarına erişemez" diyor Almanya'daki Alfred Wegener Enstitüsü'nde biyolog olan Melanie Bergmann. Bergmann, denizdeki mikroplastik parçacıkların %80-90'ının standart örnekleme teknikleriyle tespit edilemediğini, çünkü bunların çok küçük olduğunu belirtiyor (Şekil 10).²⁸

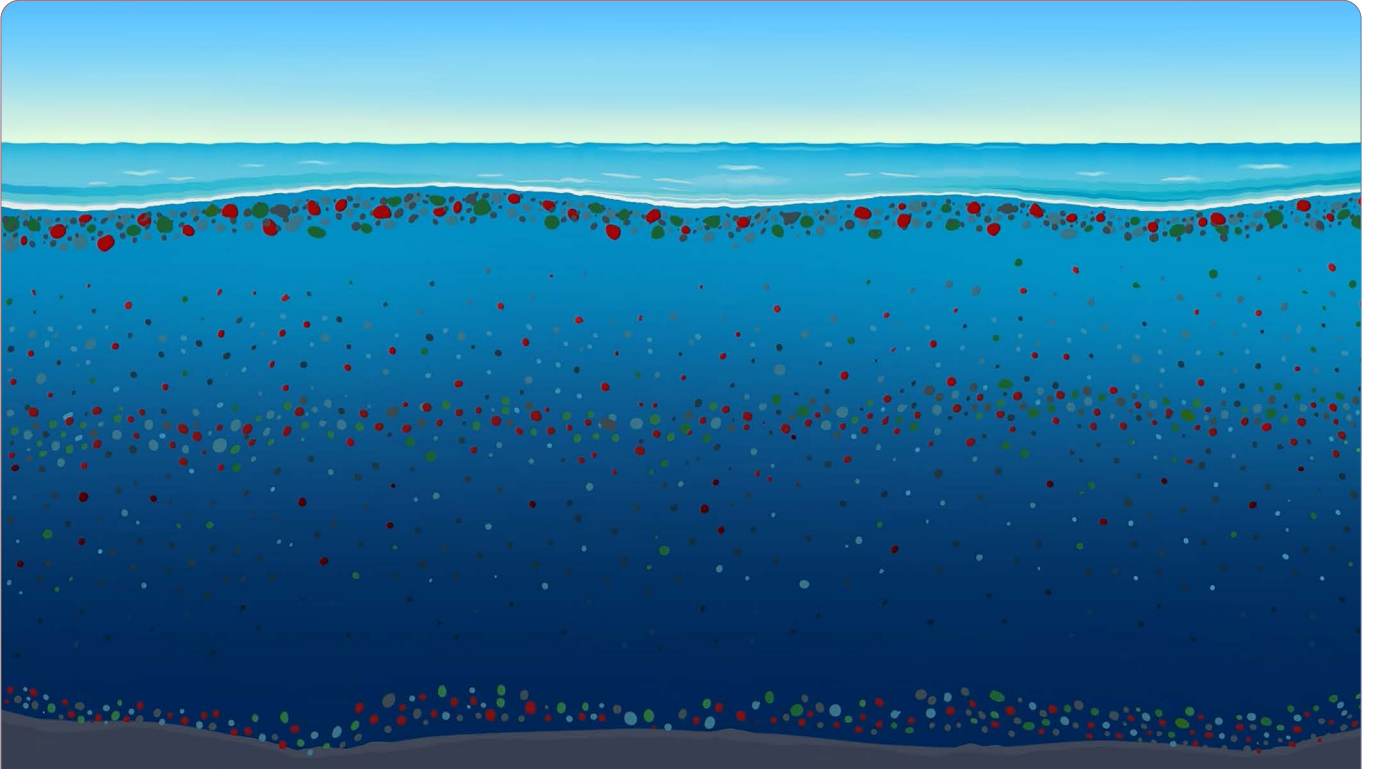


Şekil 10: Mikro ve nanoplastiklerin yakalanmasında hatalı analitik yöntemlerin şematik gösterimi

²⁸Mikroplastikler okyanus planktonlarına, iklime ve diğer önemli Dünya sistemlerine risk oluşturmaktadır. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)



Şekil 11: Mikro ve nanoplastik kirliliğin yüzey ve alt katmanlarının şematik gösterimi

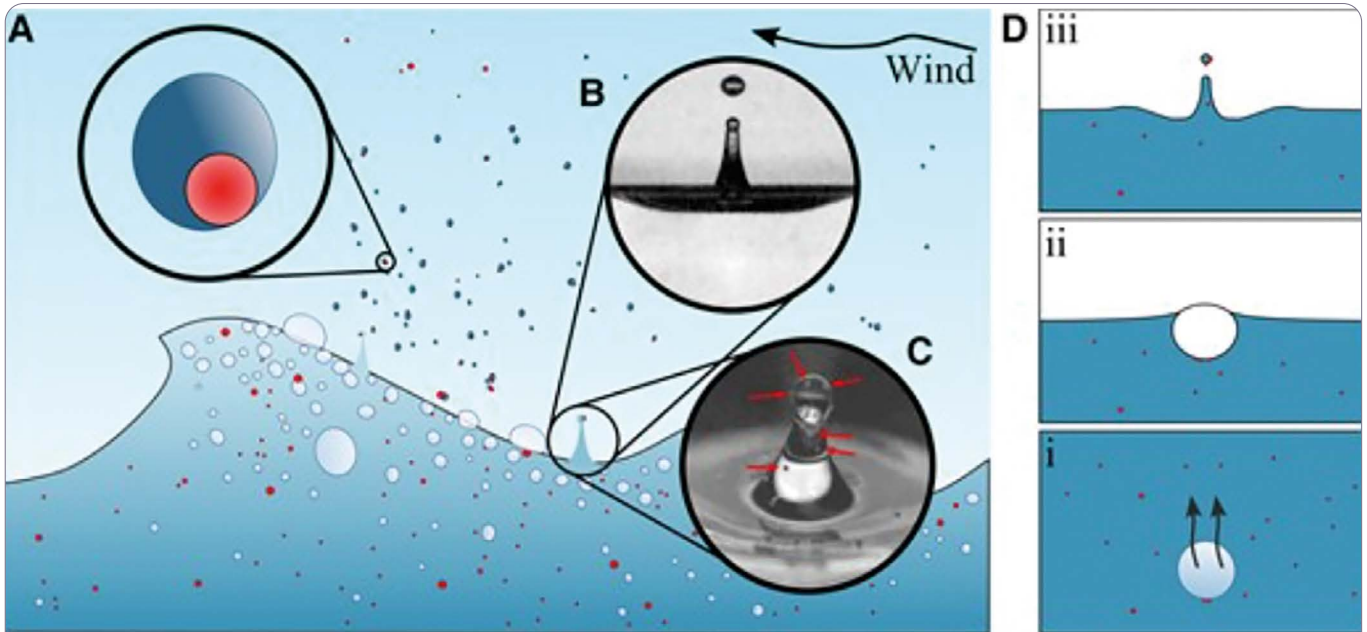


Şekil 12: Yüzey, dip ve termoklin tabakalarında mikro ve nanoplastiklerin konumlarının şematik gösterimi

Yüzey ve dip tabaka kirliliğine ek olarak (bkz. Şekil 11), mikro ve nanoplastiklerin konsantrasyonları, keskin bir sıcaklık değişimi ile karakterize edilen bir su tabakası olan termoklin bölgesinde²⁹ (Şekil 12) önemli ölçüde artmaktadır. Bu tabakadaki dik yoğunluk gradyanı, plastik parçacıkların uzun süre boyunca hapsolmesine neden olur. Okyanus, her tabakanın kendine özgü bir sıcaklık ve yoğunluğa sahip olduğu ve mikroplastiklerin bu tabakalar arasındaki sınırlarda biriktiği katmanlı bir pasta olarak görselleştirilebilir.

Ayrıca, mikroplastikler, onları yutan, sindiren ve dışarı atan canlı organizmalar aracılığıyla okyanusa yayılır.³⁰

MNP'lerin Çevreye Yayılması



Şekil 13: Okyanustan mikroplastığı dışarı atan ilgili süreçlerin taslağı. A) Okyanustaki mikroplastik (kırmızı/ daha koyu renk), deniz sıçraması damlacıklarıyla atmosfere taşınır. B) Patlayan kabarcıklar, jet damlacıkları gibi küçük damlacıklar veya aerosoller oluşturur. C) Sıvı içinde bulunan mikroplastikler, oluşan jet damlacıklarına taşınabilir. Oklar 100 µm mikroplastik parçalarını göstermektedir. Oluşan damlalar rüzgar tarafından yakalanarak mikroplastik maddeleri atmosfere taşıyabilir. Sıvı sonunda buharlaşarak mikroplastik parçaları geride bırakır. D)

Mikroplastığın kabarcık patlamasıyla dışarı atılmasıyla ilgili fiziksel süreçler, kabarcık yükselirken parçacıkların temizlenmesi ile başlar (Di). Yüzeye ulaştıktan sonra (Dii), kabarcık sonunda denge şekline yerleşir ve patladığında tabanında kılcal dalgaları odaklayarak mikroplastik malzemeyi taşıyan jet damlacıkları oluşturur (Diii).

Kaynak: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Okyanuslardan mikroplastik emisyonu. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. Ladoga Gölü Su Sütununda Mikroplastiklerin Dikey Dağılımı. Su Kaynakları 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

³⁰Dawson, A. L. et al. Antarktika krili tarafından sindirim yoluyla mikroplastiklerin nanoplastiklere dönüşümü. Nat Commun 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Su buharlaştığında³¹, mikroplastikler okyanus yüzeyinden atmosfere yükselir³². Ek olarak, deniz suyu sıçramaları, rüzgar ve dalgaların birleşimi, mikroplastik içeren hava kabarcıkları oluşturur. Kabarcıklar patladığında, parçacıklar atmosfere salınır (Şekil 13). Her yıl, sadece deniz esintileriyle yaklaşık 136.000 ton mikroplastik³³ kıyı bölgelerine taşınmaktadır. Deniz havası, sıçramalar, kar ve sisle birlikte, her yıl 25 milyon metrik tona kadar mikro ve nanoplastik, binlerce kilometre boyunca ülkeler, kıtalar ve okyanuslar arasında taşınmaktadır.

66

AWI'den ortak yazar Dr. Melanie Bergmann, "Hava, sudan çok daha dinamik bir ortamdır" diyor. "Sonuç olarak, mikro ve nanoplastikler, gezegenimizin en uzak ve hala büyük ölçüde el değmemiş bölgelerine çok daha hızlı nüfuz edebilir."

Bu bölgelere ulaşan parçacıklar, yüzey iklimini ve yerel ekosistemlerin sağlığını etkileyebilir³⁴.

Mikroplastikler, deniz yüzeyinden derin deniz tortularına, tarım arazilerinden en yüksek dağlarımıza, deniz buzuna, göllere ve nehirlerle kadar çeşitli yerlerde bulunmuştur. Besin zincirinin en altındaki omurgasızlardan en üstteki avcılara kadar 1.300 sucul ve karasal türde tespit edilmiş olup, hücresele seviyeden ekosistem seviyesine kadar tüm biyolojik organizasyon seviyelerinde etkilerinin kanıtları bulunmaktadır. Mikroplastikler, yediğimiz gıdalarda, içtiğimiz suda ve soluduğumuz havada yaygın olarak bulunmaktadır (Şekil 14). Birçok insan dokusu ve organında bulunmuştur ve potansiyel etkilerine dair kanıtlar ortaya çıkmaya başlamıştır³⁵.



Şekil 14: Gıda, su ve havada mikroplastiklerin yaygın varlığı

Kaynak

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Okyanuslardan mikroplastik emisyonu. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. Deniz Durumu ve Kabarcık Patlamasının Fiziğine Dayalı Mekanik Deniz Sıçrama Oluşumu Fonksiyonu. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Atmosferik mikroplastiklerin kaynağı olarak okyanusların incelenmesi. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred Wegener Enstitüsü, Helmholtz Kutup ve Deniz Araştırmaları Merkezi. Atmosferden gelen mikro ve nanoplastikler okyanusları kirletiyor.

<https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphäre-belastet-meere.html>

³⁵Thompson, R. C. ve ark. Mikroplastik kirliliği araştırmalarında yirmi yıl – ne öğrendik? Science 386, eadl2746 (2024).

<https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Bu nedenle, mikroplastiklerin uzak ve hatta kutup bölgelerine taşınması, atmosferik ve deniz yolları kombinasyonundan kaynaklanıyor olabilir. Dolayısıyla, hangi partikül boyutlarının ne miktarlarda taşındığını belirlemek için atmosfer ve okyanus arasındaki etkileşimleri anlamak önemlidir.

Örneğin, bir grup araştırmacı, Japonya'daki dağların tepesindeki bulutlarda hidrofilik (su çeken) yüzeylere sahip plastik granüller keşfetti³⁶. Ardından örnekleri analiz eden araştırmacılar, daha alçak ve yoğun bulutların daha fazla miktarda mikroplastik içerdiği sonucuna vardı. Yoğuşma çekirdeği görevi gören polimerlerin varlığı, **hızlı bulut oluşumunda önemli bir rol oynar** ve bu da nihayetinde genel iklimi etkileyebilir³⁶.

Bulutlardaki plastik parçacıkları daha fazla su tutmaya yardımcı olarak yağışları geciktirir. Yağmur sonunda yağdığında, bulutlarda daha fazla su birikmiş olduğu için yağış daha şiddetli olur. Ayrıca, ultraviyole ışığa maruz kalan ve bulutlardan süzülen mikroplastiklerin yüzeyi daha pürüzlüdür, bu da yüzeylerinde daha fazla kurşun, cıva ve oksijen içeren grupların birikmesini kolaylaştırır³⁷.

Atmosfer, öncelikle küçük mikroplastik parçacıkları taşır ve bu da onu çok daha hızlı bir taşıma yolu haline getirerek çok çeşitli ekosistemlerde önemli birikimlere yol açabilir. Araştırma verileri, ormanların rüzgarla taşınan mikroplastikler için bariyer görevi gördüğünü göstermektedir. Yapraklar, dallar ve gövdeler, yüzeylerine yerleşen mikroplastik parçacıkları tutar. Bu, rüzgar ve yağışla taşınan mikroplastik parçacıkların bitkiler üzerinde kalmasına veya yere yerleşmesine neden olur.

Yoğun orman örtüsünün altındaki sınırlı hava akımı, bu parçacıkların ormanlık alanlarda sürekli birikmesini teşvik eder. Orman örtüsünün yaprakları, havadaki mikroplastikler için uzun vadeli bir rezervuar görevi görür³⁸. Araştırmalar, 2017 sonbaharından 2019 yazına kadar, Amerika Birleşik Devletleri'nin batısındaki 11 ulusal park ve rezervde yağışla birlikte 1.000 tondan fazla plastik parçacığın düştüğünü göstermiştir. Bu miktar, 120 milyon plastik şişe üretmeye yeterlidir³⁹. Benzer bir durum dünyanın diğer bölgelerinde de gözlemlenmektedir. Örneğin, Japonya'da yaklaşık 32.500 km²'lik bir alanı kaplayan Quercus serrata ormanları, her yıl kanatlarında yaklaşık 420 trilyon havadaki mikroplastik parçacığı yakalamaktadır⁴⁰.

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. ve diğerleri. Yüksek irtifalarda bulut suyunda bulunan havadan kaynaklanan hidrofilik mikroplastikler ve bulut oluşumundaki rolleri. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Saf ve Yaşlı Mikroplastikler, Daldırma Dondurma Yoluyla Buz Çekirdeği Oluşturabilir. ACS EST Air 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. ve ark. Alkalın ekstraksiyon, orman kanopi yapraklarında daha fazla mikroplastik elde edilmesini sağlar: mikroplastik depolama için çıkarımlar. Environ Chem Lett 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Amerika Birleşik Devletleri'nin koruma alanlarında plastik yağmur. Science 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkalın ekstraksiyon, orman kanopi yapraklarında daha fazla mikroplastik elde edilmesini sağlar: mikroplastik depolama için çıkarımlar. Environ Chem Lett 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Ormanlardan farklı olarak, şehirlerde daha iyi havalandırma ve araç egzozlarından ve endüstriyel sistemlerden kaynaklanan daha ağır partiküllerin varlığı nedeniyle mikro ve nanoplastiklerin birikimi daha fazladır. Günümüzde, ormanlardaki hava megakentlere göre nanoplastiklerle daha fazla doygun durumdadır.

Dünya değişti! Artık insanlar okyanusta yüzerken, plajda güneşlenirken, sahil kenarında veya parkta koşarken ya da sağlık için ormanda yürüyüş yaparken, aslında bedenlerini ek mikroplastik kirliliğine maruz bırakıyorlar. Afrika ve Kuzey Amerika'dan gelen mikroplastikler, Fransız Pireneleri gibi uzak ve görünüşte el değmemiş yerlerde bile bulundu. Bu, hava akımları ve yağışlarla geniş mesafelere taşınan mikroplastiklerin küresel dağılımını gösteriyor.

Mikro ve nanoplastikler, yağmur suyu akıntıları, endüstriyel atıklar ve atmosferden partikülleri yakalayan yağmur suyu yoluyla kentsel su kütlelerine girer. Örneğin, sentetik kumaşların tek bir yıkaması, atık suya 1,5 milyon mikroplastik partikül⁴¹ salabilir. Kanalizasyona girdikten sonra, bu partiküller sonunda nehirlerle ve okyanuslara akarak balıklar ve diğer sucul organizmalar tarafından yutulur. Nehirlerde ve çevredeki arazilerde bulunan atıkları analiz eden araştırmacılar, sadece 10 nehir sisteminin nehirlerden okyanusa akan plastiklerin %88 ila %95'ini taşıdığını tahmin etmiştir⁴².

Başka bir çalışmada, araştırmacılar nehirlerde taşınan plastikler hakkında genel kabul gören varsayımları yeniden değerlendirmiş ve nehirlerdeki plastik atık miktarının daha önce düşünülenenden %90 daha fazla olabileceği sonucuna varmıştır⁴³.

Plastikler, dünyadaki büyük göllerin çoğunda da bulunmaktadır. Hatta göllerdeki plastik atık yoğunluğu, en büyük okyanus çöp adalarındakini bile aşabilir ve el değmemiş bölgelerdeki göllerde bile önemli miktarda plastik atık bulunmaktadır. Bu durum, Milano-Bicocca Üniversitesi'nden Barbara Leoni ve Veronica Nava tarafından yürütülen büyük bir uluslararası araştırma ile doğrulanmıştır⁴⁴.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) 2021 raporuna göre, nehirler, göller ve rezervuarlar dahil olmak üzere incelenen tüm tatlı su kütlelerinde mikroplastikler bulunmuştur⁴⁵. Örneğin, araştırmacılar her yıl ABD ve Kanada'dan Büyük Göller'e yaklaşık 10.000 metrik ton veya 22 milyon pound plastik atık girdiğini tespit etmiştir⁴⁶.

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. Sentetik giysilerin yıkama süreçlerinin mikroplastik kirliliğine katkısı. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Nehirlerden Denize Plastik Atıkların Taşınması. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. Nehirlerdeki plastik kirliliğin taşınması ve miktarının belirlenmesinde yüzey geriliminin kilit rolü. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. ve diğerleri. Göller ve rezervuarlardaki plastik atıklar. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵Birleşmiş Milletler Çevre Programı. Nehir ve Göllerde Plastiklerin İzlenmesi: Metodolojilerin Uyumlaştırılmasına İlişkin Kılavuz. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Laurentian Great Lakes'teki plastik atıkların envanteri ve taşınması. *Deniz Kirliliği Bülteni* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

En sonunda, mikroplastikler balık ve deniz ürünlerinin tüketimi yoluyla insanlara geri dönüyor.

İtalyan bilim adamları, meyve ve sebzelerin milyonlarca mikroplastik parçacık içerdiğini de keşfettiler. Yüksek konsantrasyonlar elma, armut, havuç, patates, marul ve brokoli'de bulundu. Özellikle meyveler, sebzelerden 2-3 kat daha fazla mikroplastik parçacık içerir; marulda gram başına 52.000 parçacık, elmada ise gram başına 223.000 parçacık⁴⁷.

Bir araştırma, dünya çapında alınan 159 musluk suyu örneğinin yüzde 81'inde mikroplastik bulunduğunu ortaya koymuştur⁴⁸. Diğer araştırmalar da bu bulguları desteklemekte ve şişelenmiş maden suyunda da mikroplastik parçacıkları tespit etmektedir. İlginçtir ki, parçacık sayısı cam ve polietilen tereftalat (PET) şişelerde yaklaşık olarak aynıydı ve konsantrasyonlar litre başına 6.292 parçacığa ulaşıyordu^{49 50 51}.

Avustralya'nın Newcastle Üniversitesi'nden araştırmacılar, ortalama bir insanın ne kadar plastik tükettiğini tahmin etmek için bir çalışma⁵² yaptı. Çalışma sonuçları, bir kişinin yılda yaklaşık 250 gram plastik tükettiğini, bunun da 50 plastik poşete⁵³ eşdeğer olduğunu gösterdi.

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Yenilebilir meyve ve sebzelerde mikro ve nano plastikler. Genel nüfus için ilk beslenme riski değerlendirmesi. Çevre Araştırmaları 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Musluk suyu, bira ve deniz tuzunda antropojenik kirlenme. PLoS ONE 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Mikro-Raman spektroskopisi ile sudaki mikroplastiklerin analizi: Farklı ambalajlardan mineral suya plastik parçacıkların salınımı. Water Research 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Şişelenmiş maden suyunda küçük boyutlu mikroplastikler ve pigmentli parçacıklar. Su Araştırmaları 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. Nano ve mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkisi: İnsan sağlığı risklerini anlamak. Çevre Araştırmaları 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²Newcastle Üniversitesi. İnsanların plastik tüketimi haftada bir kredi kartı kartına eşdeğer olabilir.

<https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁵³Senathirajah, K. et al. Yutulan mikroplastiklerin kütesinin tahmini – İnsan sağlığı risk değerlendirmesine doğru atılan önemli bir ilk adım. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

MİKRO VE NANOPLASTİK KİRLİLİĞİN ÇEVRESEL VE İKLİMSEL SONUÇLARI

MNP'ler Moleküler Seviyede Ekosistemleri Nasıl Bozar?

Plastik atıklar her yerde bulunur — okyanuslardan nehirlerden toprağa, havaya ve hatta buzullara kadar.⁵⁴

Uzun süreli gözlemler, organik bitki ve hayvan maddelerinin aksine, plastiğin aktif doğal ayrışma sürecine girmediklerini doğrulamaktadır. Plastik, doğal biyolojik bozunma döngülerine katılmadan çevrede kalır.⁵⁵ Parçalanmaya karşı dayanıklı olarak tasarlanan plastik, küresel ekosistemde kalıcı bir unsur haline gelmiştir. Bir zamanlar teknolojik bir zafer olarak selamlanan plastik, günümüzde önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir.

Plastik üretiminde 13.000'den fazla kimyasal madde kullanılmaktadır. Bunların arasında monomerler, katkı maddeleri ve işleme yardımcıları dahil olmak üzere 3.200'den fazlası, toksik özellikleri nedeniyle potansiyel olarak tehlikelidir.⁵⁶

MNP'lerin Toprak Özellikleri ve Ekosistem Bozulması Üzerindeki Etkisi

Çalışmalar, karasal ekosistemlerde, özellikle tarım topraklarında mikroplastik kirliliğinin okyanus ortamlarındaki seviyelerin 4 ila 23 katını aşabileceğini⁵⁷ ve bu durumun topraklarda önemli miktarda plastik birikimi olduğunu gösterdiğini ortaya koymaktadır. Plastikler, atık su arıtma tesisleri, malçlama uygulamaları, atmosferik birikim ve günlük tüketim ürünleri gibi çeşitli yollardan toprağa girer. Tek kullanımlık plastik ürünlerin yaygın kullanımı, toprakların mikroplastikler (MP'ler) ve nanoplastiklerle (NP'ler) ciddi şekilde kirlenmesiyle yakından ilgilidir. Hem doğal hem de insan kaynaklı faktörler,⁵⁸ bu küçük plastik parçacıkların toprak katmanlarına sızarak kritik çevresel süreçleri bozmasına neden olmaktadır.⁵⁹

Gözlemler, mikroplastiklerin ekosistemler üzerindeki zararlı etkilerini doğrulamakta ve mikroorganizmaların, bitkilerin ve toprakların yapısı ve işlevini etkilemektedir (Şekil 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. Mikroplastiklere Küresel Bir Bakış. Jeofizik Araştırmaları Dergisi: Okyanuslar 125, e2018JC014719 (2020) <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

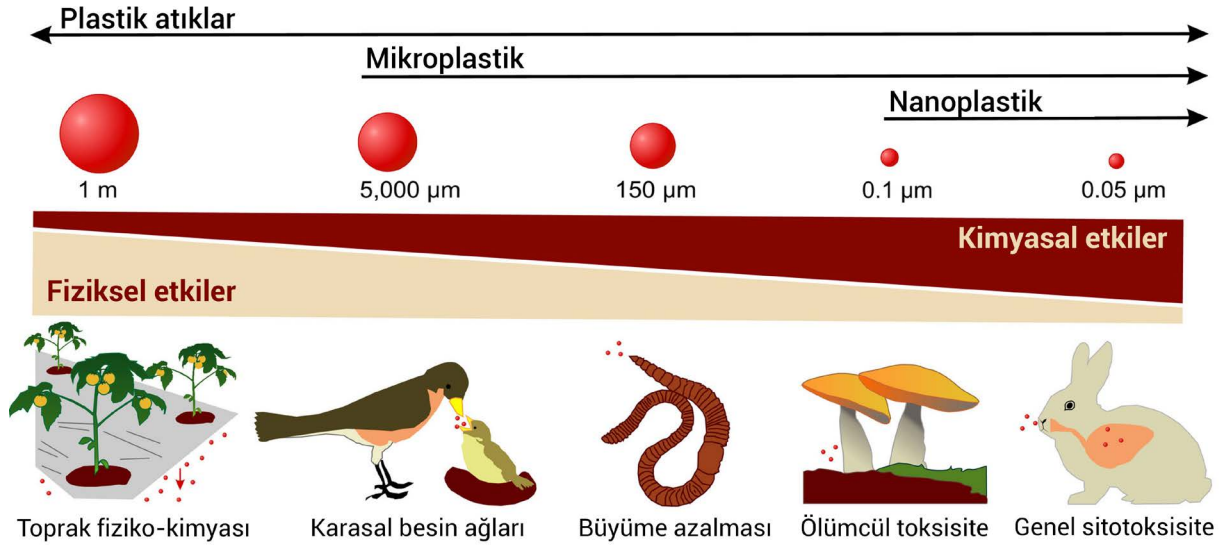
⁵⁵Huang, S. et al. Plastik Atık Yönetimi Stratejileri ve Çevresel Yönleri: Bilimsel Analiz ve Kapsamlı İnceleme. IJERPH 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶Birleşmiş Milletler Çevre Programı. Plastiklerdeki Kimyasallar - Teknik Rapor (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Tarımsal Topraklarda Ortaya Çıkan Yeni Bir Çevre Kirleticisi Olarak Mikroplastikler: Ekosistemler ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingrassia, R. & De Souza Machado, A. A. Mikroplastiklerin Tarım Ekosistemlerinde Toprağa Karışması. Front. Plant Sci. 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. ve ark. Tarımsal ekosistemlerde mikroplastikler: Toprak biyotası ve temel toprak işlevleri üzerindeki etkilerinin gözden geçirilmesi. J. Plant Nutr. Soil Sci. 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

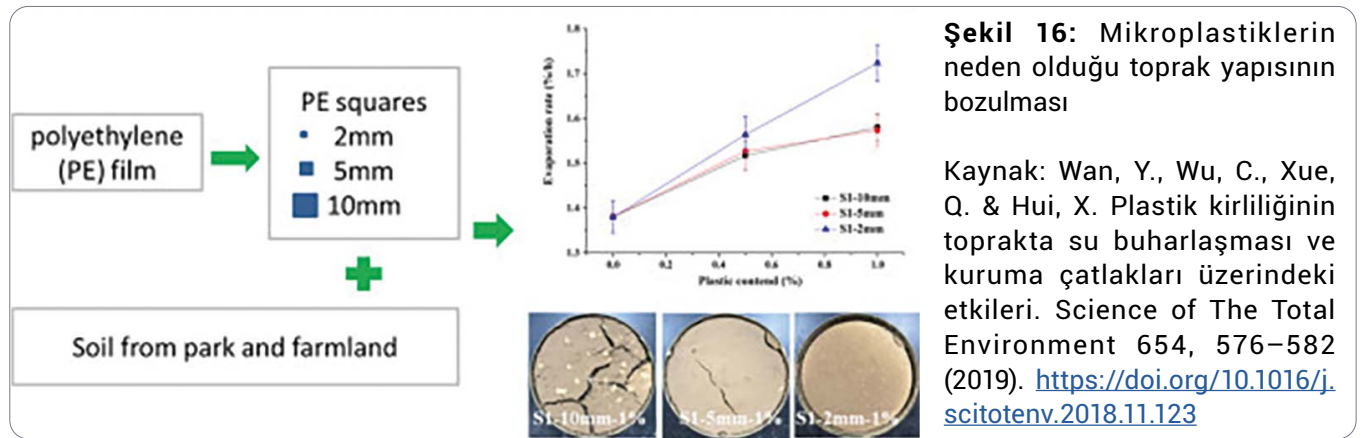


Şekil 15: Fiziksel ve kimyasal etkilerin birleşik tetikleyicisi olarak mikroplastikler

Tarımsal malçlama ile ilgili toprak biyojeokimyası (Steinmetz ve ark., 2016), karasal ve kıtasal kuşlar tarafından yutulması (Gil-Delgado ve ark., 2017; Holland ve ark., 2016; Zhao ve ark., 2016), solucanların büyümesinde azalma (Lwanga ve ark., 2016), mantarlara öldürücü toksisite (Miyazaki ve ark., 2014, 2015; Nomura ve ark., 2016), memeli akciğer iltihabı (Hamoir ve ark., 2003; Oberdorster, 2000; Schmid & Stoeger, 2016) ve nanoplastiklerin geniş sitotoksitesisi (Forte ve ark., 2016; Kato ve ark., 2003).

Yararlanılan kaynak: de Souza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig MC. Mikroplastikler, karasal ekosistemler için ortaya çıkan bir tehdit. Glob Change Biol. 2018; 24: 1405–1416. <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

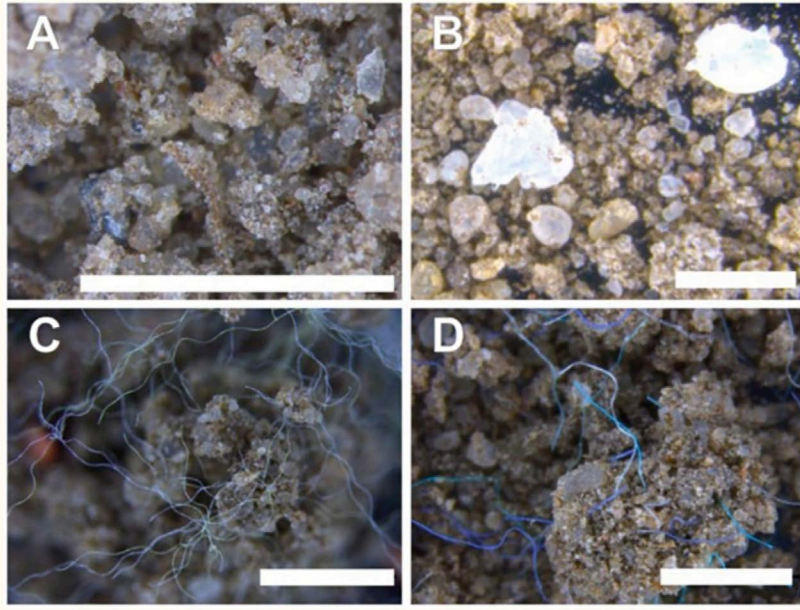
Çin Bilimler Akademisi tarafından yapılan araştırmalar, toprakta çeşitli boyutlarda plastik film parçacıklarının varlığının su buharlaşma oranını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bu etki, 2 milimetrelilik parçacıkların eklenmesiyle özellikle belirgin hale gelmektedir. Daha büyük plastik parçacıklar (5–10 mm) toprağın çatlamasına neden olarak yapısal bütünlüğünü bozmaktadır. Bu bulgular, plastik kirliliğinin topraktaki su döngüsünü bozduğunu ve bu durumun toprakta su kıtlığını şiddetlendirebileceğini ve kirleticilerin dikey taşınmasını etkileyebileceğini göstermektedir⁶⁰ (Şekil 16–17).



Şekil 16: Mikroplastiklerin neden olduğu toprak yapısının bozulması

Kaynak: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Plastik kirliliğinin toprakta su buharlaşması ve kuruma çatlakları üzerindeki etkileri. Science of The Total Environment 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Toprakta plastik kirliliğinin su buharlaşması ve kuruma çatlakları üzerindeki etkileri. Science of The Total Environment 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

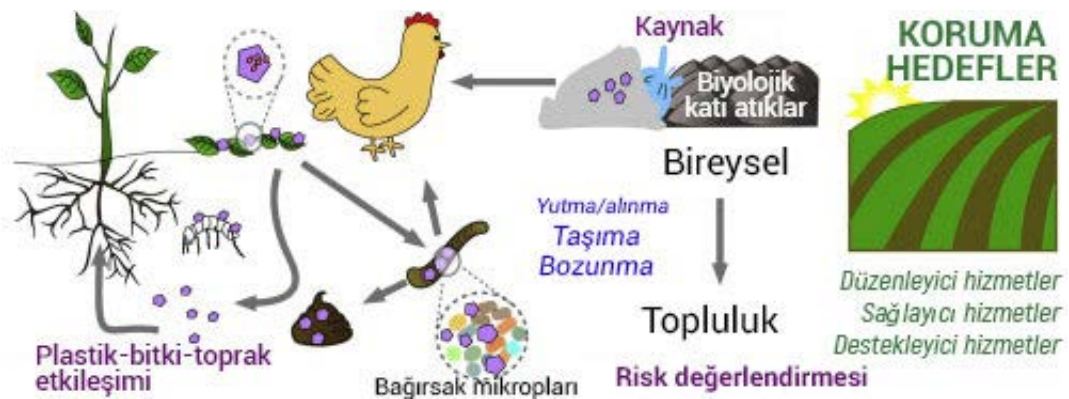


Şekil 17: Mikroplastik parçacıkların toprağın biyofiziksel ortamına entegrasyonu

Kontrol toprağının yapısı (A), stereomikroskop altında poliamid boncuklarla kirlenmiş topraktan (SI S1D) görsel olarak ayırt edilemedi. Polietilen parçacıkları (B) ve polyester (C) veya poliakrilik lifler (D) görsel olarak belirgin toprak özelliklerine neden oldu. Her paneldeki beyaz çubuk 1 mm'yi temsil etmektedir.

De Souza Machado, A. A. et al. Mikroplastiklerin Toprak Biyofiziksel Ortamına Etkileri. Çevre Bilimi ve Teknolojisi, 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Çalışmalar, plastiklerin toprak biyotası üzerindeki olumsuz etkilerini de doğrulamaktadır. Toprak biyotası, mikroorganizmalar (bakteriler ve mantarlar gibi) ve fauna (mikroskobik ve makroskobik hayvanlar) gibi çeşitli canlılardan oluşan bir topluluktur. Bu organizmalar birbirleriyle, bitki kökleriyle ve çevreleriyle etkileşime girerek, besin döngüsü ve bitki sağlığı için gerekli olan toprak besin zincirlerini oluşturur (Şekil 18).

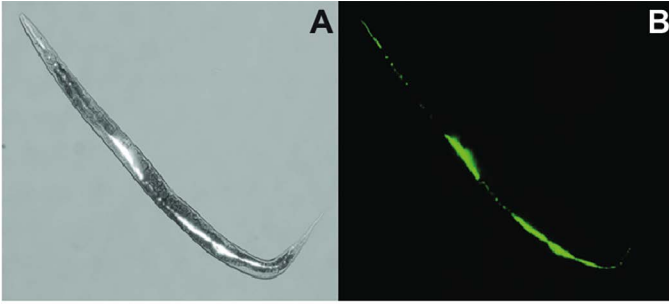


Şekil 18: Toprak besin zincirinin oluşumunun şematik gösterimi

Kaynak: Ng, E.-L. et al. Tarım ekosistemlerinde mikroplastik ve nanoplastik kirliliğine genel bakış. Science of The Total Environment, 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Çeşitli kara biyota türleri, mikroplastik kirliliğinin biyoindikatörleri olarak işlev görür. Analiz edilen tüm numunelerde, mikroplastik parçacıklar ve potansiyel olarak toksik elementler (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) farklı konsantrasyonlarda bulunmuştur, bu da mikroplastiklerin olası toksisitesine işaret etmektedir.^{61,62}

Araştırmalar, polistiren boncukların toprakta yaşayan nematod *Caenorhabditis elegans* tarafından yutulabileceğini göstermiştir (Şekil 19); bu da polistiren parçacıklarının toprak besin zincirinde birikebileceğini düşündürmektedir.⁶³



Şekil 19: 20°C'de 15 dakika boyunca 0,5 µm sarı-yeşil floresan mikro küreler biriktiren bir *Caenorhabditis elegans* yetişkin solucanın parlak alan (A) ve floresan (B) görüntüleri. Fotoğraflar $\times 100$ büyütme ile çekilmiştir.

Kaynak: Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Nematod *Caenorhabditis elegans*'ta yapay partiküllerin aktif alımı. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012).
<https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Toprak biyotası, "Dünya'nın biyolojik motoru" olmaktan öte, tüm karasal ekosistemlerin bağlı olduğu çok işlevli bir sistemdir. Toprak bilimi, ekoloji ve iklim araştırmalarında doğrulandığı üzere, gezegendeki yaşamı sürdürmedeki rolü okyanuslar ve atmosferinkine benzetilebilir. Bu nedenle, toksisitenin neden olduğu herhangi bir bozulma, toprak ve besin zinciri içindeki birçok kritik süreci etkileyerek ekolojik dengesizliği yol açabilir.⁶⁴

Bulgular, mikroplastiklerin küçük boyutları, yüksek spesifik yüzey alanları, güçlü hidrofobik özellikleri ve biyolojik bozunmaya karşı dirençleri nedeniyle toprak yüzeylerine hızla adsorbe olabildiğini göstermektedir.⁶⁵ Bu özellikler, mikroplastiklerin organizmalar tarafından kolayca alınmasını ve birikmesini kolaylaştırarak insan sağlığı için potansiyel bir tehdit oluşturmaktadır. Bu süreç toprak tabakasıyla sınırlı değildir: mikroplastiklerin zararlı etkilerini sürdürdüğü bitkilere de uzanmaktadır.

Gıda Ürünlerinde MNP'ler

Antropojenik kirleticiler, özellikle bitki sistemlerine girdiklerinde ekosistemleri önemli ölçüde etkileyebilir. Mikroplastiklerin bitkilerin çeşitli kısımlarına emildiği ve taşındığı doğrulanmıştır.

⁶¹Ng, E.-L. et al. Tarım ekosistemlerinde mikroplastik ve nanoplastik kirliliğine genel bakış. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Mikroplastikler ve Potansiyel Olarak Toksik Elementler için Biyoindikatörler Olarak Karasal Biyota. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Nematod *Caenorhabditis elegans*'ta yapay partiküllerin aktif alımı. *Deneyisel Biyoloji Dergisi* 215, 1178–1183 (2012).
<https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

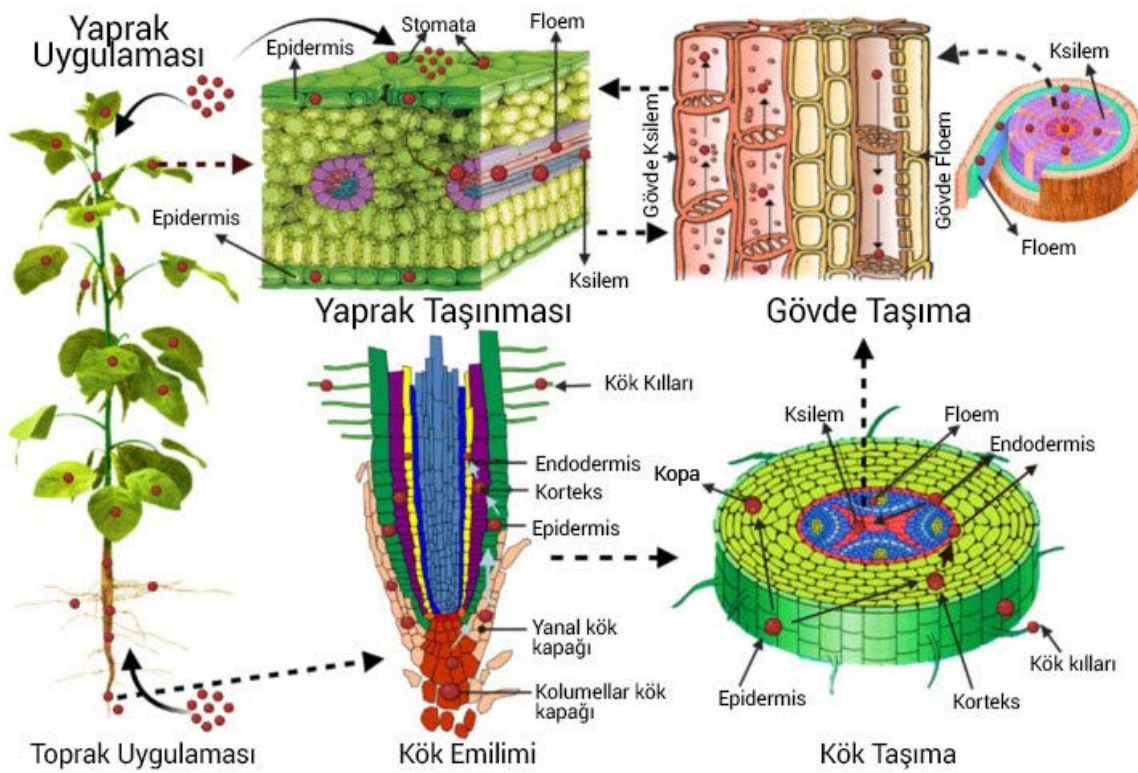
⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Mikroplastikler ve Potansiyel Olarak Toksik Elementler için Biyoindikatörler Olarak Karasal Biyota. *Kaplamalar* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Toprak ortamında mikroplastikler: Eleştirel bir inceleme. *Çevre Teknolojisi ve İnovasyon* 27, 102408 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Araştırmalar, mikroplastiklerin bitki sistemlerinde çeşitli yollarla biriktiğini ve bitki örtüsü, tarım ürünleri ve gıda ürünleri üzerinde zararlı etkiler yarattığını göstermektedir.

Nanoplastikler, son derece küçük boyutları nedeniyle bitki dokusuna doğrudan nüfuz edebilir.⁶⁶ Bitkiler, besin ortamından nanoplastikleri emer ve ardından bunları, köklerden gövdeye ve yapraklara su ve besin maddelerini taşıyan damar sistemi olan ksilem aracılığıyla yer üstü kısımlara taşır.

Yapraklara yerleşen mikroplastikler, stoma yoluyla içeri girip damar demetleri aracılığıyla köklerine doğru aşağıya doğru hareket edebilir. Hem mikroplastikler hem de nanoplastikler, tarım bitkilerinin fizyolojik süreçleri ve enzimatik aktivitesi üzerinde toksik etkiler gösterir (Şekil 20).⁶⁷



Şekil 20: Bitkilerde mikro ve nanoplastik alım mekanizmaları

Toprağa uygulama yoluyla kök emilimi ve kökten gövdeye taşıma yolları ile bitkilerde plastik alım mekanizması ve gövdeden yapraklara ve meyvelere taşıma. Yaprak uygulaması, plastiğin yaprak gözeneklerine girişini ve daha sonra bitkinin diğer kısımlarına geçişini göstermektedir. Kesik ok, bitkinin plastiğe erişebilirliğini, kesikli ok ise bitki içindeki taşınmayı göstermektedir.

Kaynak:

Azeem, I. et al. Bitkilerde Nano/Mikroplastiklerin Alınması ve Birikmesi: Eleştirel Bir İnceleme. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Mikroplastiklerin karasal ekosistemler üzerindeki etkisi: Bitki merkezli bir bakış açısı. *Çevre Kirliliği ve Yönetimi* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Bitkilerde Nano/Mikroplastiklerin Alınması ve Birikimi: Eleştirel Bir İnceleme. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Bitki su taşıma sistemi, nanoplastikleri hızla gövdelere, yapraklara ve muhtemelen meyvelere taşıyabilir. Tütün bitkileri (*Nicotiana tabacum*) üzerinde yapılan araştırmalar, 100 nanometrelik nanoplastiklerin bitki hücrelerine girmediklerini, ancak 20 ila 40 nanometre boyutundaki daha küçük parçacıkların başarıyla emildiğini göstermektedir.⁶⁸

Ek olarak, bazı plastik parçacıklar yüzey yükleri taşır ve bu yükler elektrostatik çekim yoluyla bitki köklerine adsorpsiyonunu artırabilir. Bu etkileşim, besin maddelerinin immobilizasyonunu etkileyebilir veya fotosentezi engelleyebilir.⁶⁹ Negatif yüklü mikroplastikler kök korteksine girme olasılığı daha yüksektir.⁷⁰

Bu parçacıklarla yoğun şekilde kirlenmiş tarımsal ekosistemlerde, bitki büyümesinin durduğu⁷¹ ve tohum çimlenmesi ve kök gelişimi üzerinde kısa süreli ve geçici etkiler olduğu bildirilmiştir.⁷²

Çalışmalar, endüstriyel ve yerel olarak üretilen ticari balda mikroplastiklerin varlığını doğrulamaktadır. Daha ileri analizler, çeşitli bitki türlerinin çiçek salkımlarında mikroplastiklerin yaygın olarak bulunduğunu ortaya koymuştur.^{73,74}

Son yıllarda, küresel arı popülasyonlarının durumu keskin bir düşüş göstermiştir. Araştırmalar, bu düşüşün nedenlerinden birinin mikroplastik ve nanoplastiklerden kaynaklanan çevre kirliliği olabileceğini göstermektedir. Çalışmalar, arıların havadan, sudan, bitkilerden ve topraktan mikroplastikleri "topladığını" ve bunları kovanlarına taşıdığını göstermektedir. Arılar çiçeklerden nektar ve polen toplar ve doğal kaynaklardan su alırlar — bunların hepsi zaten mikroplastik parçacıklar içerir. Arıların bedenlerini kaplayan ince tüyler, bu parçacıklar için doğal "tuzaklar" görevi görür. Plastik parçacıklar, bitki yüzeyleri, toprak, su ve hatta kovanın kendisiyle temas ettiklerinde, özellikle eklemlerde ve segmentler arasında bacaklarında da birikir.



"Bal arısı, her yerde bulunması, havadaki kirlitici maddeleri ve parçacıkları yakalayan tüylerle kaplı olması, kirleticilere duyarlı olması, hareket kabiliyetinin yüksek olması ve geniş uçuş menzili gibi özellikleri nedeniyle çevresel kirliliğin çok iyi bir biyolojik göstergesidir."⁷⁵

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. BY2 hücrelerine floresan nano boncukların alımı, klatrin bağımlı ve klatrin bağımsız endositozu içerir. FEBS Letters 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Polistiren nanoplastikler buğday (*Triticum aestivum* L.) üzerindeki kadmiyumun toksisitesini etkiler mi? Environmental Pollution 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Karboksil modifiye polistiren mikroplastiklerin pamuk bitkileri üzerindeki alımı ve etkisi. Journal of Hazardous Materials 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Bitkilerde Nano/Mikroplastiklerin Alınması ve Birikmesi: Eleştirel Bir İnceleme. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

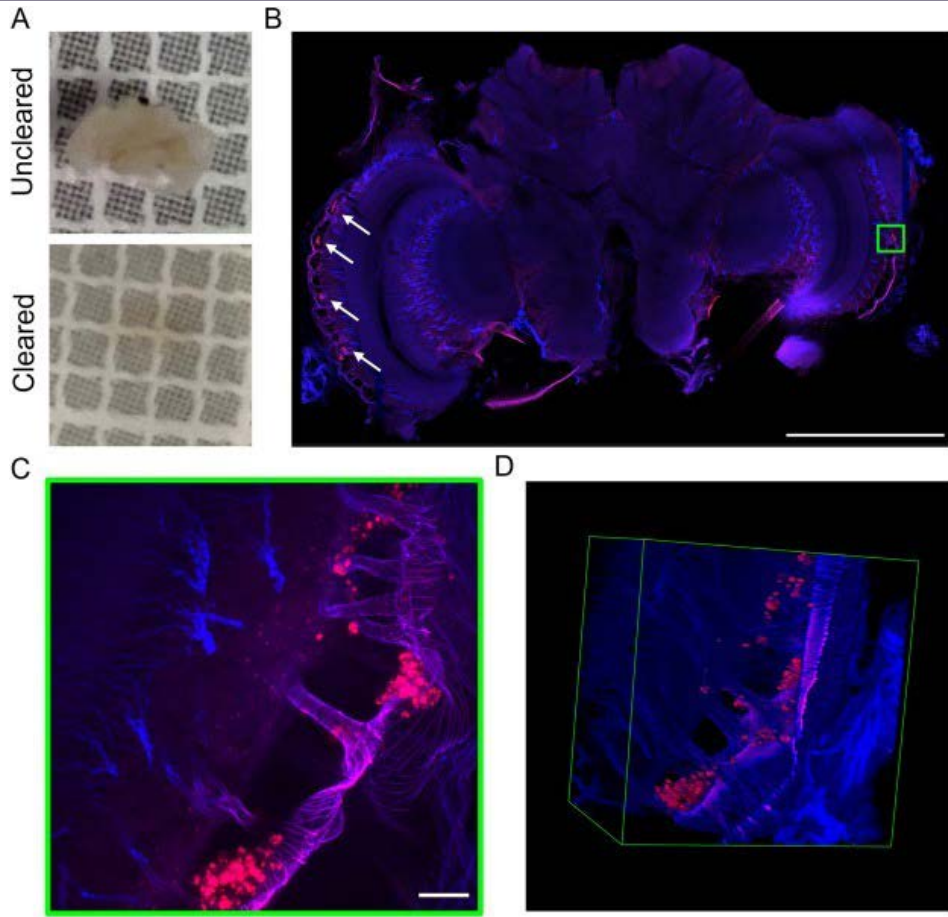
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Mikroplastikler tohum kapsülündeki gözeneklerde birikir ve karasal vasküler bitki *Lepidium sativum*'un çimlenmesini ve kök büyümesini geciktirir. Chemosphere 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & Liebezeit, E. Bal ve şekerdeki polen dışı partiküller. Gıda Katkı Maddeleri ve Kirleticiler: Bölüm A 30, 2136–2140. 2013 <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. ve diğerleri. Türkiye'den balda mikroplastikler: Oluşumu, özellikleri, insan maruziyeti ve risk değerlendirmesi. Journal of Food Composition and Analysis 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Bal arıları tarafından gıdalardan alınan mikroplastikler bal, balmumu ve larvalara aktarılır. Çevre Kirliliği 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Mikro ve nanoplastikler, arının dış iskeletinin dış tabakası olan kütikül aracılığıyla da arının bedenine girer. İçeri girdikten sonra plastik parçacıklar sadece üç gün içinde beyne ulaşır ve arıların besin arama ve yön bulma için hayati önem taşıyan hafıza, uzamsal yönelim ve bilişsel işlevlerinde bozulmalara neden olur⁷⁶. Mikroplastiklerin beyin üzerindeki etkisi, arıların hafızalarını geri kazanma yeteneğini de azaltır. Arılar, tanıdık çevresel işaretleri kullanarak yön buldukları için bu durum özellikle endişe vericidir. Arı beynindeki nanoplastikler, nektar kaynaklarını hatırlama yeteneklerini daha da bozar, çiçek kokularına tepki vermeyi azaltır ve kovanlarına geri dönme yeteneklerini bozar. Bu tür bilişsel işlev bozuklukları, tozlaşma verimliliğini doğrudan azaltır ve tüm koloninin dengesini bozabilir⁷⁶.



Şekil 21. Bal arısı beyninde önemli miktarda mikroplastik tespit edilmesi.

A) iDISCO temizleme işleminden önce ve sonra kesilmiş beyin fotoğrafları.

B) 10× objektif, $0,51 \times 0,51 \times 2 \mu\text{m}^3$ çözünürlük ile TPFM kullanılarak elde edilen tüm beyin 3D rekonstrüksiyonunun tek düzlemi (derinlik $\sim 200 \mu\text{m}$). Mavi = dokunun otofloresan sinyali; kırmızı = kırmızı floresan MP'ler (beyaz oklarla gösterilmiştir). Ölçek çubuğu = $1000 \mu\text{m}$.

C) B'deki yeşil ilgi alanının 63× objektifle elde edilen yüksek çözünürlüklü eki. Görüntü, $0,17 \times 0,17 \times 1 \mu\text{m}^3$ çözünürlükle elde edilen $150 \mu\text{m}$ derinlikteki yığının maksimum yoğunluk projeksiyonudur. Ölçek çubuğu = $20 \mu\text{m}$.

D) C'deki yığının 3D görüntüsü. Boyutlar = $170 \times 170 \times 150 \mu\text{m}^3$.

Kaynak: Pasquini, E. et al. Mikroplastikler beyne ulaşıyor ve bal arılarının bilişsel işlevlerini bozuyor. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

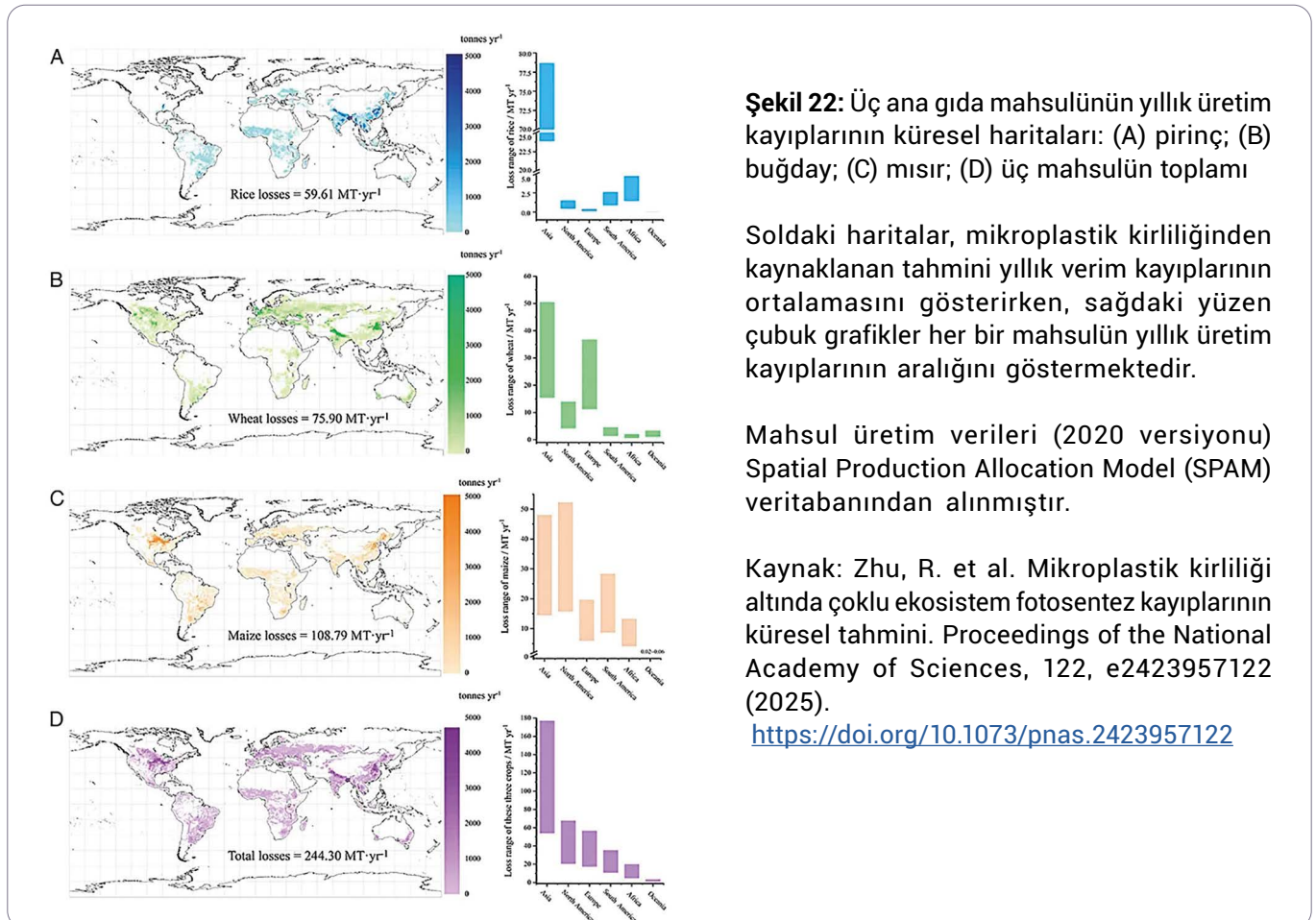
⁷⁶Pasquini, E. et al. Mikroplastikler beyne ulaşır ve bal arılarının bilişsel işlevlerini bozar. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024).. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Arının bedenine girdikten sonra nanoplastikler bağırsak hasarına neden olur, bağışıklık sistemini zayıflatır ve viral enfeksiyonlara karşı duyarlılığı artırır. Bu faktörler, akut plastik toksisitesi olmasa bile arı ölümlerine yol açabilir^{75,77}. Ayrıca plastik parçacıkları sadece arılarda değil, balda, balmumunda ve larvalarda da birikir ve kovan içinde kapalı bir plastik kirliliği döngüsü oluşturur⁷⁵.

Bu durum, sadece arı popülasyonları için değil, aynı zamanda küresel gıda güvenliği için de potansiyel olarak ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Arılar, önemli tozlayıcılar olup, sayılarının azalması tarımsal verimi doğrudan etkilemektedir.

Beyin hasarı, beden kütlelerinde azalma ve bağışıklık sisteminin baskılanması, tozlaşma faaliyetlerinde azalmaya yol açar ve araştırmacılar bunun küresel gıda üretimindeki krizi daha da kötüleştirebileceği konusunda uyarıyor⁷⁷. Arılar, çevre kirliliğinin aktif biyoindikatörleri olarak işlev görür ve menşe ülkesine bakılmaksızın balda önemli miktarlarda mikropplastik tespit edilmiştir⁷⁸.

Mikroplastığa maruz kalma, toplam klorofil içeriğini %5,63–17,42 oranında azaltarak pirinç, buğday ve mısır üretiminde küresel kayıplara yol açmaktadır. Bu kayıplar, bu temel mahsullerin toplam yıllık küresel veriminin %4,11–13,52'sini oluşturmaktadır ve gıda güvenliği açısından ciddi sonuçları olan bir etkiye sahiptir (Şekil 22).⁷⁹



⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Tarımsal arazilerde plastik kirliliği: tozlaşma, biyolojik mücadele ve gıda güvenliği için göz ardı edilen bir tehdit. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁸Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Polistiren mikropplastik parçacıklara kronik maruz kalmanın bal arılarının hayatta kalması üzerinde etkisi yoktur, ancak beslenme oranını ve vücut ağırlığını azaltır. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. Mikropplastik kirliliği altında çoklu ekosistem fotosentez kayıplarının küresel tahmini. *Ulusal Bilimler Akademisi Bildirileri* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

MNP'lerin birikim yeri olarak ormanlar

Analizler, incelenen tüm konsantrasyonlarda ve zaman aralıklarında köklerde, gövdelerde, yapraklarda ve iğnelerde nanoplastiklerin varlığını ortaya çıkarmıştır. Köklerdeki nanoplastik konsantrasyonları, yer üstü kısımlardakinden en az 10 kat daha yüksekti.

Plastik kirliliği, oksidatif stresi tetikleyerek ve fotosentetik verimliliği azaltarak hem yaprak dökmeyen iğne yapraklı hem de yaprak döken ağaç türlerinin işlevlerini olumsuz etkiler ve büyümenin engellenmesine, hatta bitkilerin ölümüne yol açabilir. Çalışmalar, fotosentetik aşamalarda meydana gelen bozulmaların aşırı ışık enerjisinin birikmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu enerji kimyasal enerjiye dönüştürülmediğinde, fotooksidatif strese ve doku hasarına yol açar. Bunu hafifletmek için bitkiler, karotenoidlerin aşırı enerjiyi ısı olarak dağıtmasıyla fotokoruyucu mekanizmaları harekete geçirir.⁸⁰

Fotosentezi bozarak, oksidatif stresi tetikleyerek ve bitkilerin fizyolojik aktivitesini azaltarak, plastik kirliliği ekosistemlerin iklim değişikliğine karşı savunmasızlığını artırır. Bu bulgular, plastik kirliliğinin bitki toplulukları üzerindeki geniş ölçekli etkisini vurgulamakta ve dolayısıyla bu ekosistemlere bağımlı olan karasal hayvanlar için sonuçları hakkında endişeleri artırmaktadır.

Nanoplastikler Faunayı Nasıl Yok Ediyor?

Çok sayıda çalışma, bitkiler de dahil olmak üzere çevrede mikro ve nanoplastiklerin birikmesinin, besin zincirlerini bozarak ve hayvan sağlığını etkileyerek hayvancılık üretimini etkilediğini göstermektedir⁸¹. İtalya'daki bir süt çiftliğinde yapılan gözlemler, tüm çim otu saman örneklerinde mikroplastik bulunduğunu göstermiştir⁸². Hindistan'da yapılan bir araştırmada, süt sığırlarının yem örneklerinin %100'ünde polietilen tereftalat mikroplastik kirliliği tespit edilmiş ve konsantrasyonlar 89 ila 326 g/kg arasında değişmiştir.⁸³

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Farklı su kullanım stratejilerine sahip ağaçlarda nanoplastiklerin alımı ve fizyolojik etkileri. Environ. Sci.: Nano 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Hayvansal Üretimde Plastikler. Tarımda Plastiklerin Üretimi, Performansı ve Potansiyeli Rehberi (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Yaygın olarak tüketilen geniş getiren hayvan yemlerinde mikroplastik kirliliğinin izlenmesi için yeni bir ekstraksiyon protokolünün geliştirilmesi ve uygulanması. Science of The Total Environment 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Hayvan yemlerinde mikroplastiklerin tespiti ve karakterizasyonu. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Analizler, sığırların foliküler sıvısında,⁸⁴ sütte,⁸⁵ koyun dışkısında,⁸⁶ sığır etinde ve kanda⁸⁷ mikroplastiklerin varlığını doğrulamış ve bu durumun geniş getiren hayvanlar üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Mevcut verilere göre, keçi ve koyun gibi küçük geniş getiren hayvanlar da dahil olmak üzere kesilen hayvanlardan çıkarılan yabancı cisimlerin %50-60'ı plastik malzemeden oluşmaktadır.⁸⁸ Ayrıca, mikroplastikler şehir köpek ve kedilerin iç dokularında,⁸⁹ evcil ördeklerin bağırsaklarında⁹⁰ ve domuzların akciğer dokularında tespit edilmiştir.⁹¹

Araştırma bulguları, mikroplastiklerin hayvanlara sadece doğrudan zarar vermekle kalmayıp, üretimlerinde kullanılan katkı maddeleri ve çevrelerinden emdikleri kirleticiler yoluyla da çeşitli derecelerde zarar verdiğini doğrulamaktadır.⁹² Gözlemler, mikroplastiklerin hayvanlarda oksidatif stres, bağırsak hasarı, immünotoksisite, üreme ve nörotoksisite gibi toksik etkiler tetiklediğini göstermektedir (Şekil 23).⁹³ Ayrıca, mikroplastikler ağır metaller, antibiyotikler, kalıcı organik bileşikler ve pestisitler gibi kirleticilerin taşıyıcısı olarak işlev görerek ekosistemler, hayvan sağlığı ve insan sağlığı için potansiyel riskleri daha da artırmaktadır.⁹⁴

⁸⁴Grechi, N. et al. Mikroplastikler kadınların ve ineklerin foliküler sıvısında bulunur ve polistiren mikroplastikler in vitro olarak sığır oosit fonksiyonunu bozar. eLife 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Süt ürünlerinde küçük boyutlu mikroplastiklerin ($\geq 5 \mu\text{m}$) tespiti ve karakterizasyonu. Sci Rep 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Koyun dışkısı ve toprakta tespit edilen düşük yoğunluklu mikroplastikler: İspanya'nın güneydoğusundaki yoğun sebze yetiştiriciliğinden bir vaka çalışması. Science of The Total Environment 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Hayvancılık yemlerinde, sütte, ette ve kanda plastik parçacıklar: Bir pilot çalışma. Rapor EH22-01, 29 Nisan 2022. <https://yakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSQUP.pdf> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

⁸⁸Galyon, H. ve ark. Holstein süt sığırlarında biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin uzun süreli in situ ruminal bozunması. JDS Communications 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. ve ark. Kentsel Ortamlarda Yaşayan Evcil Hayvanların İç Dokularında Mikroplastikler. Animals 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

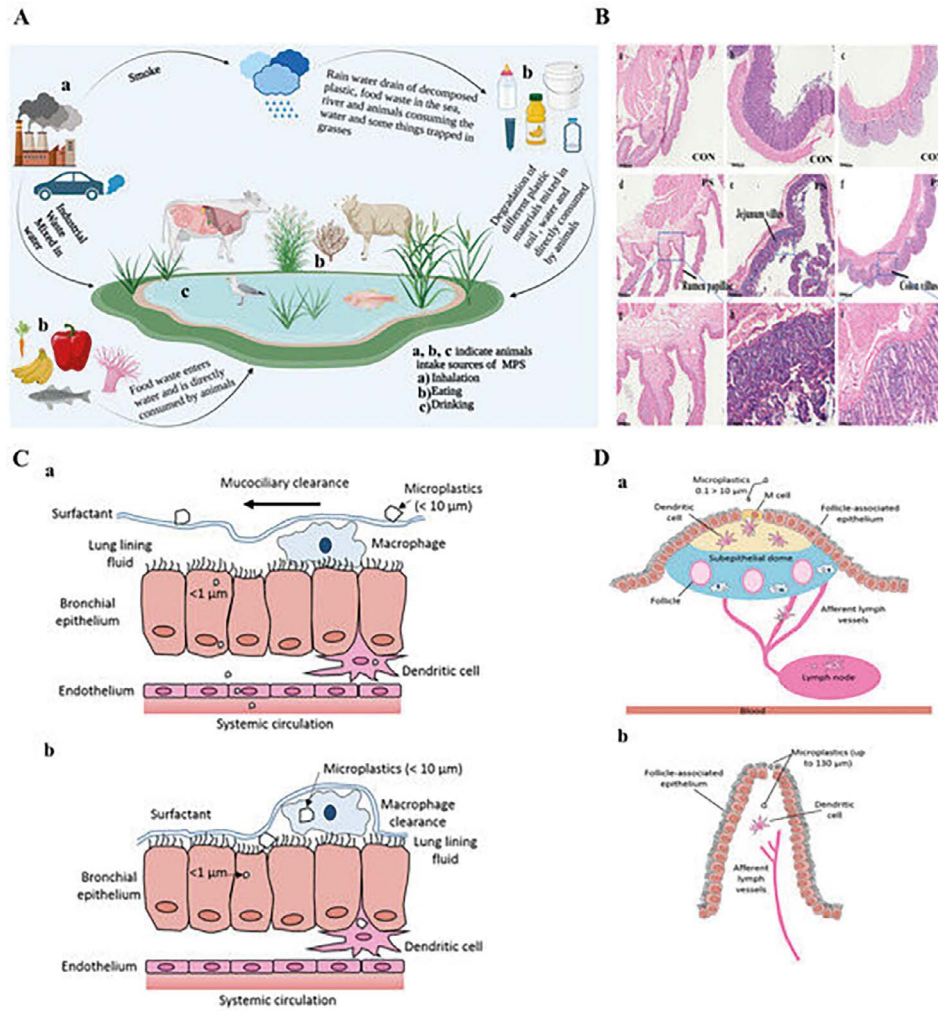
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibrina, F. Yoğun Hayvancılıktan Kaynaklanan Mikroplastik Kirliliğinin Orta Cava Yerel Ördeklerinde Kanıtı. Water Air Soil Pollut 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Doğal ortamda evcil ve fetal domuzların akciğer dokusunda mikroplastiklerin tespiti: Bir ön çalışma. Environmental Research 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Deniz ortamından ağır metal kirliliğinin vektörü olarak mikroplastikler. Estuarine, Coastal and Shelf Science 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Mikroplastiklerin Toksisite Mekanizmaları ve Ruminant Üretimine Etkileri: Bir Derleme. Biomolecules 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. Mikroplastiklerin ve Endişe Verici Katkı Maddelerinin İnsan Sağlığı Üzerindeki Potansiyel Etkileri Üzerine Ayrıntılı Bir İnceleme Çalışması. IJERPH 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>



Şekil 23.

Hayvanların MP'leri sindirim yoluyla alımının ve MP'lerin gastrointestinal sistem üzerindeki etkilerinin şematik diyagramı.

(A) Hayvanların MP alım yolları.

(B) Maruz kalma öncesi ve sonrası PS gastrointestinal kesiti:

CON grubunda rumen (a), jejunum (b) ve kolon (c) H&E görüntüleri;

(d) S-PS grubunun rumen H&E haritası;

(e) L-PS grubunun jejunum H&E haritası;

(f) L-PS grubunun kolon H&E haritası;

ve (g-i) sırasıyla (d-f) ile ilgili yerel olarak büyütülmüş görüntülerdir.

(C) Akciğerlerde MP'lerin (0,1 > 10 µm) potansiyel alım ve temizleme mekanizmaları:

(a) Akciğer zarının daha kalın olduğu üst solunum yolunda (merkezi akciğer) akciğer sıvılarının (süfaktanlar ve mukus) mikroplastığın yer değiştirmesine neden olma olasılığı azalmıştır. 1 µm'den büyük partiküller içeren siliyer mukoza temizlenmiştir. 1 µm'den küçük parçacıklar epitel yoluyla sindirilebilir.

(b) Mikroplastığın aerodinamik çapı akciğerin derinliklerine yerleşmesine izin verirse, daha ince akciğer sıvısına nüfuz edebilir ve epitel ile temas ederek difüzyon veya aktif hücre alımı yoluyla metastaz yapabilir.

(D) Gastrointestinal sistemden (GIT) MP'lerin alımı için öngörülen yollar:

(a) Pyle'in toplama lenf düğümlerinin M hücreleri tarafından endositoz yoluyla GIT lümeninden MP alımı (0,1 > 10 µm). M hücreleri, bağırsak lümeninden partikülleri örnekler ve mukozal lenfoid dokuya taşır.

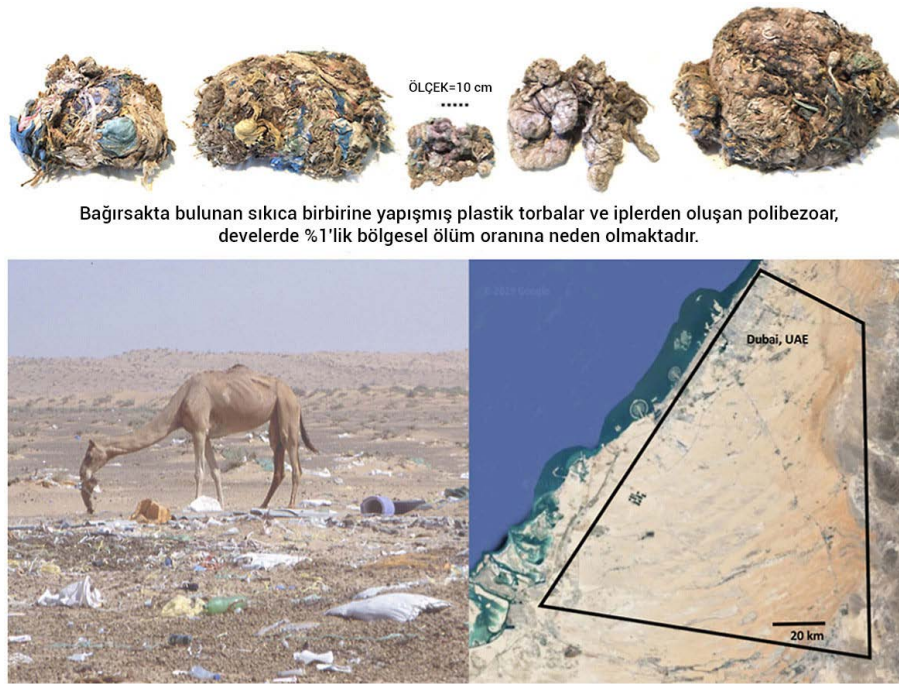
(b) MP'ler, para-hücresele emilim yoluyla GIT lümeninden emilir. MP'ler gibi bozunmayan parçacıklar, tek hücreli üst tabakadaki gevşek bağlantılar yoluyla mekanik olarak altta yatan dokuya sıkışabilir. Dendritik hücreler bu parçacıkları yiyerek aşağıdaki lenf damarlarına ve venlere taşıyabilir. Bu parçacıklar karaciğer, kaslar ve beyin gibi ikincil dokulara da dağılabilir.

Kaynak: Su, M. et al. Mikroplastığın Toksisite Mekanizmaları ve geniş getiren hayvanların üretimine etkileri: Bir derleme. Biomolecules 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Gözlem verileri, vahşi hayvanların plastik atıkları genellikle yiyecek sanarak yediklerini ve bunun sonucunda bağırsaklarında birikmesine neden olduğunu göstermektedir. Zimbabve⁹⁵ ve Sri Lanka⁹⁶'da, açık çöplüklerde beslenen filler, sindirilemeyen plastikleri yutarak öldü. Japonya'nın Nara Parkı'nda, vahşi geyikler turistlerin bıraktığı plastik atıkları yutarak ortaya çıkan komplikasyonlar nedeniyle öldü⁹⁷. Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai kentinde 30.000'den fazla deve üzerinde yapılan bir araştırmada, hayvanların yaklaşık %1'inin sindirim sistemlerinde biriken plastik nedeniyle öldüğü tespit edilmiştir.⁹⁸

Bilim adamları, mide veya sindirim sisteminde sıkışarak büyük taş benzeri bir kütle oluşturan, plastik, ip, diğer çöpler ve tuz birikintileri gibi sindirilemeyen maddelerin sıkıca bir araya gelmesiyle oluşan oluşumu tanımlamak için "polibezoar" terimini kullanmaya başlamıştır. "Poli" ön eki sentetik bir maddeyi, "bezoar" ise bazı hayvanların, özellikle geviş getiren hayvanların midelerinde oluşabilen küçük taşı birikintiyi ifade eder.

Gözlemler, polibezoarların gastrointestinal tıkanıklıklara, bağırsak bakterilerinin çoğalmasıyla sepsise, dehidrasyona ve yetersiz beslenmeye neden olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 24).



Bağırsakta bulunan sıkıca birbirine yapışmış plastik torbalar ve iplerden oluşan polibezoar, develerde %1'lik bölgesel ölüm oranına neden olmaktadır.

Şekil 24: Dubai yakınlarındaki çölde ölü develerin içinde bulunan polibezoarlar. Yeni çalışmada analiz edilen en büyüğü yaklaşık 64 kg (141 pound) ağırlığındaydı.

Kaynak: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. (2021). Plastik atıkları yiyen develerin durumu. *Journal of Arid Environments*, 185, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Afrika filleri (*Loxodonta africana*) tarafından Zimbabve'nin Victoria Şelalesi'ndeki bir çöp döküm alanına yapılan ziyaretlerin örüntüleri. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lanka'da çöp döküm alanlarında plastik yiyen filler öldü. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lanka-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

⁹⁷Agence France-Presse. Japonya'nın ünlü Nara geyikleri plastik poşetleri yedikleri için ölüyor. *The Guardian*.

<https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. Plastik atıkları yiyen develerin durumu. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Planktonlardan İnsanlara Gıda Zincirleri Yoluyla MNP'lerin Aktarımı

Okyanuslarda biriken plastikler, deniz ekosistemleri üzerinde önemli olumsuz etkilere sahiptir. Son kırk yılda yapılan bilimsel gözlemler, dünya çapında neredeyse tüm deniz habitatlarında mikroplastiklerin varlığını ortaya çıkarmıştır⁹⁹. Araştırmalar, plastik atıkların çok çeşitli habitatlardaki deniz biyolojik çeşitliliğini etkilediğini doğrulamaktadır. Küresel olarak en az 690 deniz türü, plastik kirliliğinden etkilenmiştir. Bu türler arasında balinalar, yüzgeçayaklılar, deniz kuşları, kaplumbağalar, balıklar ve kabuklular bulunmaktadır¹⁰⁰. Plastik atıkları yutmak, hayvanları ek bir toksin kaynağına maruz bırakabilir. Kimyasal bileşenler, yutulduktan sonra bedene sızabilir ve besin zincirinde avdan avcıya aktarılabilir. Dolanma veya yutma, ölümcül veya ölümcül olmayan etkiler yaratabilir ve beslenme kapasitesinin azalması ve sindirim sorunları gibi bir dizi soruna yol açarak yetersiz beslenme, hastalık, üreme kapasitesinin azalması, büyüme hızının düşmesi ve ömürün kısalmasına neden olabilir.¹⁰¹

Küçük boyutları nedeniyle mikroplastikler, deniz besin zincirlerinin önemli bir bileşeni olan planktonlar tarafından yutulur. Planktonlar birçok deniz türü tarafından tüketilir ve planktonlarla doğrudan beslenmeyen türler ise planktonları yutmuş organizmaları yerler. Bu şekilde mikroplastikler besin zincirlerine girer (Şekil 25-26).

1999 yılında, Kuzey Pasifik Subtropikal Girdap'ta yüzey suyu örneklerinin analizi, plastik kütlelerinin ekosistemin ana besin kaynağı olan zooplankton kütlelerinin altı katını aştığını ortaya koydu¹⁰² ve okyanustaki canlılar üzerinde plastiğin hakimiyetini vurguladı.

Gözlem verilerine dayanan tahminler, mikroplastiklerin konsantrasyonunun balıkların boyutuyla arttığını göstermektedir.

Veriler, en büyük hayvan olan balinaların günde 43,6 kg'a kadar plastik yuttuğunu ve bu miktarın %98,5'inin doğrudan sudan değil, yedikleri besinlerde zaten bulunan mikroplastiklerden geldiğini göstermektedir¹⁰³.

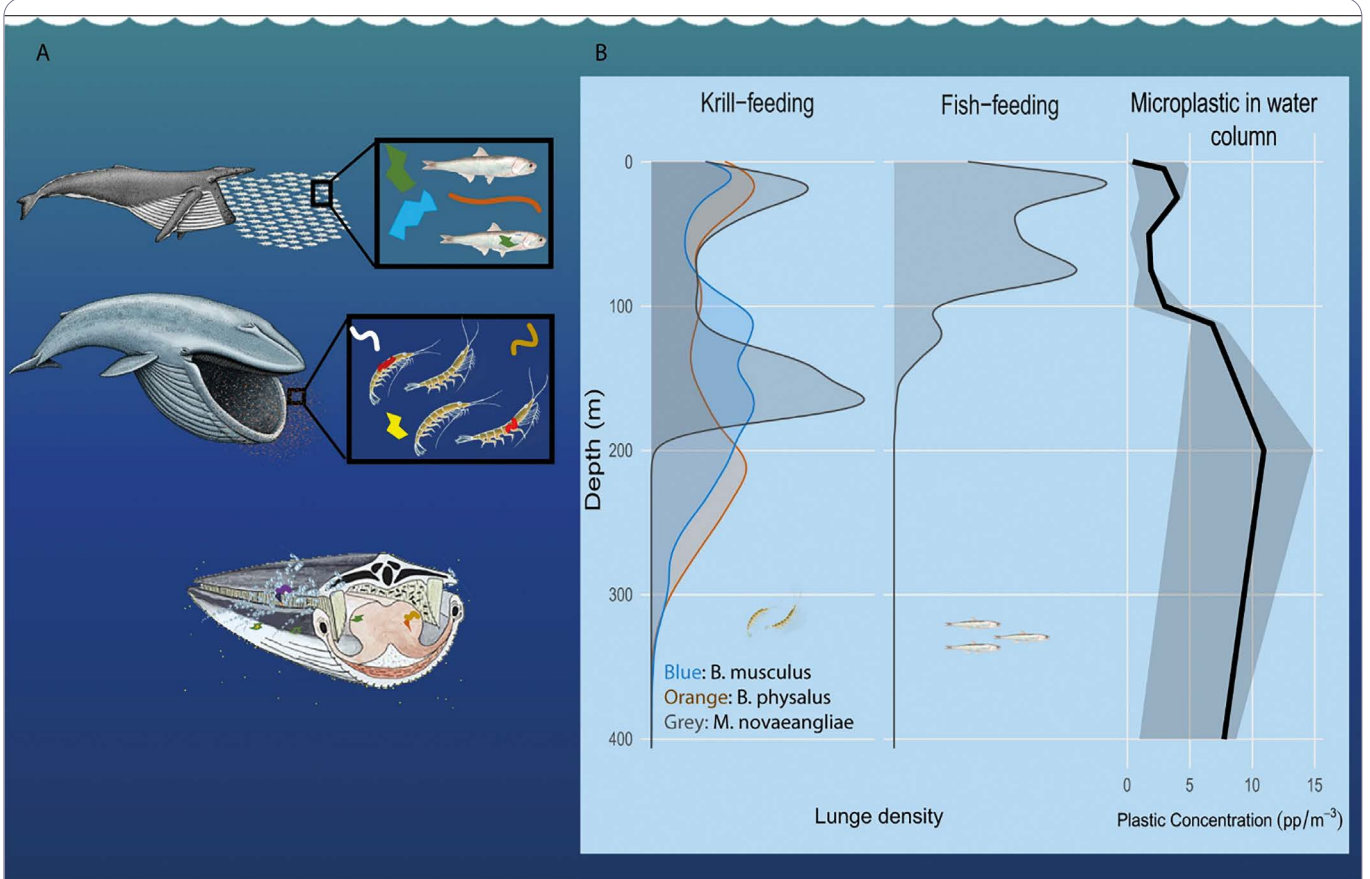
⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. Deniz ortamında mikroplastik kirliliğinin bugünü ve geleceği. Çevre Kirliliği 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Kuzeydoğu Atlantik'teki deniz kuşları ve deniz plastik atıkları: Bir sentez ve izleme ve araştırma için öneriler. Çevre Kirliliği 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Okyanuslardaki Plastik Kirliliği: Kirlilikten Kaç Hayvan Ölüyor? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. Kuzey Pasifik Merkez Girdabında Plastik ve Plankton Karşılaştırması. Deniz Kirliliği Bülteni 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. ve ark. Saha ölçümleri, filtreyle beslenen megafaunanın mikroplastik alımına maruz kalma riskini ortaya koyuyor. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



Şekil 25: Su sütunundaki mikroplastik konsantrasyonunun çizgili balinaların beslenme davranışlarının derinliğine etkisi.

a – Balinalar tarafından günde yutulan plastik miktarı, (i) bir günde sudan filtrelenen plastik miktarı ve (ii) bir günde avlarda tüketilen plastik miktarının toplamı olarak modellenmiştir. Plastik yutma riskinin olası aralığını yakalamak için üç senaryo oluşturduk: düşük, orta ve yüksek, çünkü bazı değişkenler için kapsamlı veriler bulunmamaktadır;

b – Monterey Körfezi'ndeki plastik konsantrasyonunun derinlik profiliyle uyumlu olarak Monterey Körfezi'nde yerleştirilen cihazların dalma derinlikleri. Balinalar ve av hayvanları Alex Boersma tarafından, kesit filtreleme diyagramı ise Center for Coastal Studies'den Scott Landry tarafından çizilmiştir. Kaynak veriler, kaynak veri dosyası olarak sağlanmıştır.

Kahane-Rapport, S. R. et al. Saha ölçümleri, filtreyle beslenen megafaunanın mikroplastik alımına maruz kalma riskini ortaya koyuyor. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

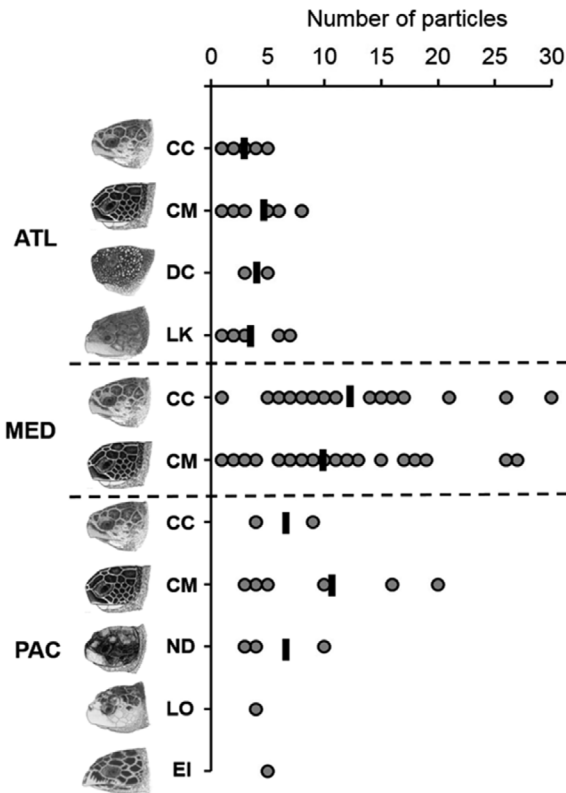


Şekil 26: Plastiklerin gıda zincirlerine girmesinin şematik gösterimi

Plastikler Deniz Organizmalarını Öldürüyor

Her yıl, yaklaşık 1 milyon deniz kuşu ve 100.000 deniz memelisi kirlilik nedeniyle ölüyor¹⁰⁴. Gözlemler, yutulan çöpler ile deniz kuşlarının ölümleri arasında bir bağlantı olduğunu doğruluyor. 51 türden 1.733 deniz kuşu üzerinde yapılan bir araştırmada, 557'sinin (%32,1) 1 ila 40 adet arasında, maksimum ağırlığı 3.440 mg ve hacmi 3.621 mm³ olan deniz çöpünü yuttuğu tespit edilmiştir.¹⁰⁵

Bazı veriler, belirli plastiklerin deniz kuşlarının yiyecekleri tanımlamak için kullandıkları koku sinyalinin taklit eden bir kimyasal bileşik olan dimetil sülfür salgıladığını da göstermektedir¹⁰⁶. Yeni araştırmalar, plastik yutmanın civcivlerde böbrek, karaciğer ve mide hasarına ve Alzheimer hastalığına benzer beyin lezyonlarına neden olduğunu da ortaya koymuştur. Bu, plastik kirliliğinin deniz faunası üzerindeki yıkıcı etkisini vurgulamaktadır¹⁰⁷. Üç okyanus havzasında yedi tür kaplumbağanın her birinde plastik parçacıkları bulunmuştur (Şekil 27).¹⁰⁸



Şekil 27:

Üç okyanus havzasındaki tüm deniz kaplumbağası türlerinde sentetik mikropplastik parçacıkların yutulması. Her okyanus havzasında, her tür için 100 ml'lik alt örneklerde tespit edilen toplam parçacık sayısı. Siyah çizgi = ortalama parçacık sayısı. Deniz kaplumbağası kafatası resimleri WIDECAST'ın izniyle kullanılmıştır; orijinal eser Tom McFarland

Duncan, E. M. et al. Deniz kaplumbağalarında yaygın olarak görülen mikropplastik yutulması. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019).

<https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Avustralya. Plastik kirliliğinden kaç kuş ölüyor? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Erişim tarihi: 01.05.2025)

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. Deniz kuşlarının ölümleri ile deniz çöplerinin yutulması arasındaki ilişkiyi ortaya koyan nicel bir analiz. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

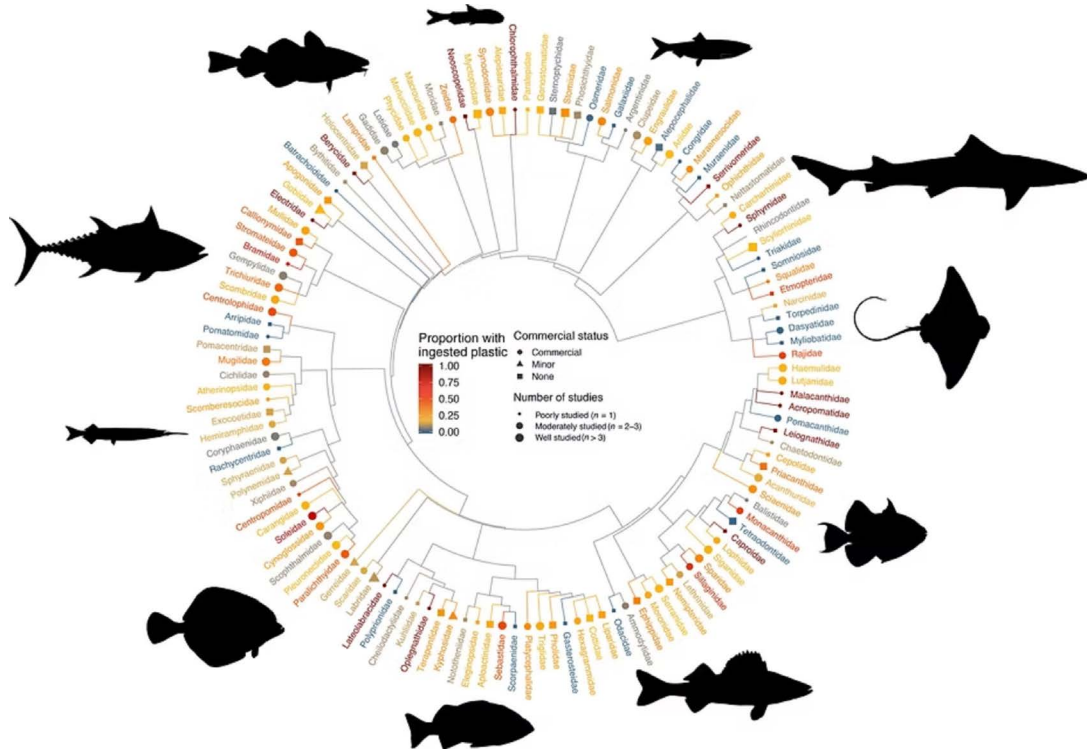
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Deniz plastik atıkları, koku ile beslenen deniz kuşları için temel bir infokimyasal yayar. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Krizdeki deniz kuşları: Plastik yutma, çoklu organ yetmezliği ve nörodejenerasyonun proteomik belirtilerini tetikliyor. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Deniz kaplumbağalarında yaygın olarak görülen mikropplastik yutma. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

555 deniz balığı türünden 171.774 birey üzerinde yapılan araştırmalar, ticari önemi olan 210 tür dahil olmak üzere 386 türün plastik atık tükettiğini göstermektedir¹⁰⁹. Balıklar tarafından yutulan plastiklerin görülme sıklığı %26 olup, son on yılda iki katına çıkmıştır (Şekil 28). Analizler, yüzey sularındaki plastik miktarı (Şekil 29) ile deniz organizmaları tarafından tüketilen plastik miktarı arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 30).

Laboratuvar çalışmaları, plastik bileşiklerinin balık dokularına emildiğinde aktiviteyi azalttığını, karaciğer fonksiyonlarını bozduğunu, beyine zarar verdiğini, büyümeyi geciktirdiğini ve üreme yeteneğini kötüleştirdiğini göstermektedir^{109, 110, 111}.



Şekil 28: Balık familyaları ve plastik yutma

Deniz balık familyalarının filogenetik ilişkileri (n = 131), plastik yutma sıklığına göre renklendirilmiştir. Her bir ucun şekli, veri setindeki familyadaki ticari olarak avlanan türlerin oranını gösterir (0 = ticari olarak avlanan tür yok; az = ticari olarak avlanan türlerin %0-25'i; ticari = ticari olarak avlanan türlerin %25'inden fazlası). Uçların boyutu, o familyadaki türler üzerinde yapılan çalışma sayısını gösterir. Bu, plastik alımı sıklığı yüksek (FO plastik > 0,25) ve iyi örneklemelenmiş (n > 10 birey, >2 tür) 15 familyayı vurgulamaktadır; plastik yutma kayıtları olan bu familyaların 67'si ticari olarak da avlanmaktadır.

Kaynak: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. "Deniz balıklarının plastik yutması yaygın ve artıyor." *Global Change Biology* 27, 2188-2199 (2021).

<https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Deniz balıklarının plastik yutması yaygın ve artmaktadır. *Global Change Biology* 27, 2188-2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

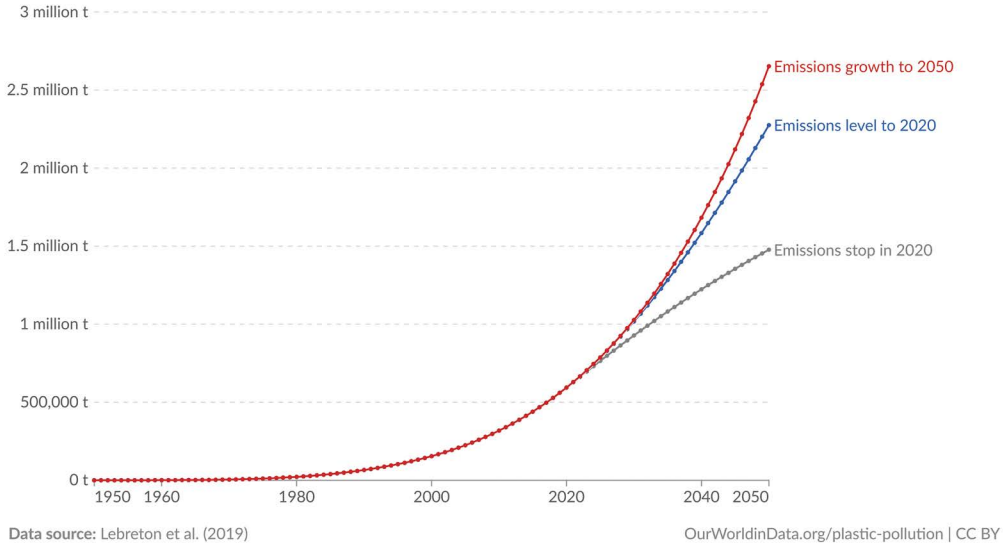
¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Mikroplastiklerin deniz organizmaları üzerindeki etkileri: Mevcut perspektifler ve ileriye dönük adımlar. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205-209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Balık dokularında mikroplastiklerin ekstraksiyonu ve karakterizasyonu için yeni bir protokolün deneysel geliştirilmesi: Adriyatik Denizi'ndeki ticari türlerde ilk gözlemler. *Deniz Çevre Araştırmaları* 111, 18-26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

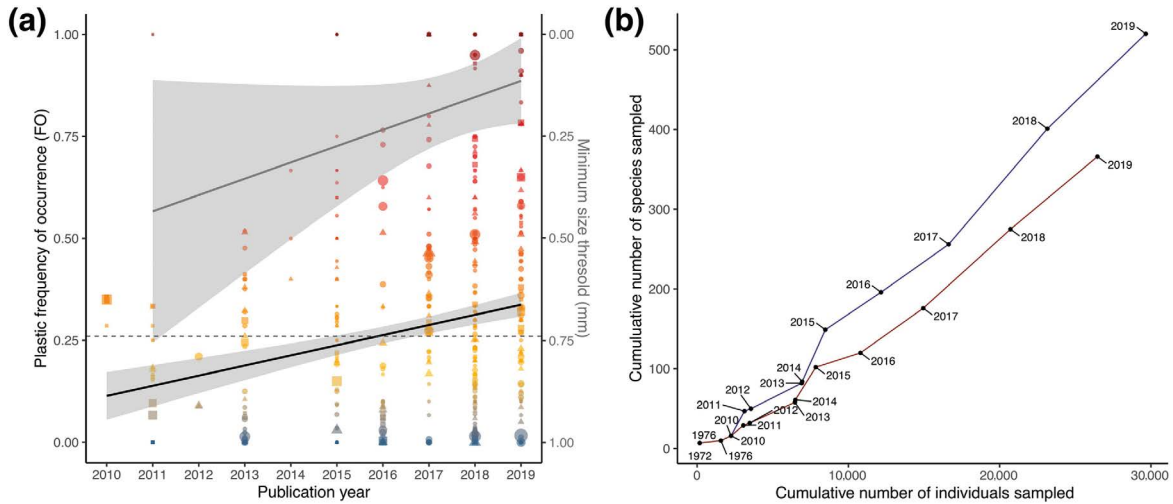
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.



Şekil 29: 1950-2050 yılları arasında okyanus yüzeyindeki mikroplastikler

Kaynak: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

Kaynak: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. "Okyanustaki pozitif yüzdürme özelliğine sahip makroplastik atıkların küresel kütle dengesi." Sci Rep 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>



Şekil 30: Balıklar tarafından plastik yutulmasının zamansal eğilimleri. (a) Üstteki gri çizgi, 2011'den bu yana giderek daha küçük parçacıkların tespit edildiğini göstermektedir. Altteki siyah çizgi, 2010'dan 2019'a kadar tüm balık türlerinde plastik oluşum sıklığının (FO) arttığını göstermektedir. Bu dönemde, plastik yutulma sıklığı yılda %2,4 oranında önemli ölçüde artmıştır. Yatay kesikli çizgi, küresel olarak balıkların plastik yutma sıklığının ortalaması olan 0,26'yı temsil etmektedir. (b) Tür birikim eğrisi; mavi çizgi, plastik yutmuş ve yutmamış türler dahil olmak üzere zaman içinde incelenen türlerin kümülatif sayısını, kırmızı çizgi ise sadece plastik yutmuş türleri göstermektedir. Kırmızı çizgide bir asimptot bulunmaması, önümüzdeki yıllarda plastik yutan türlerin sayısının artmaya devam edeceği olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir.

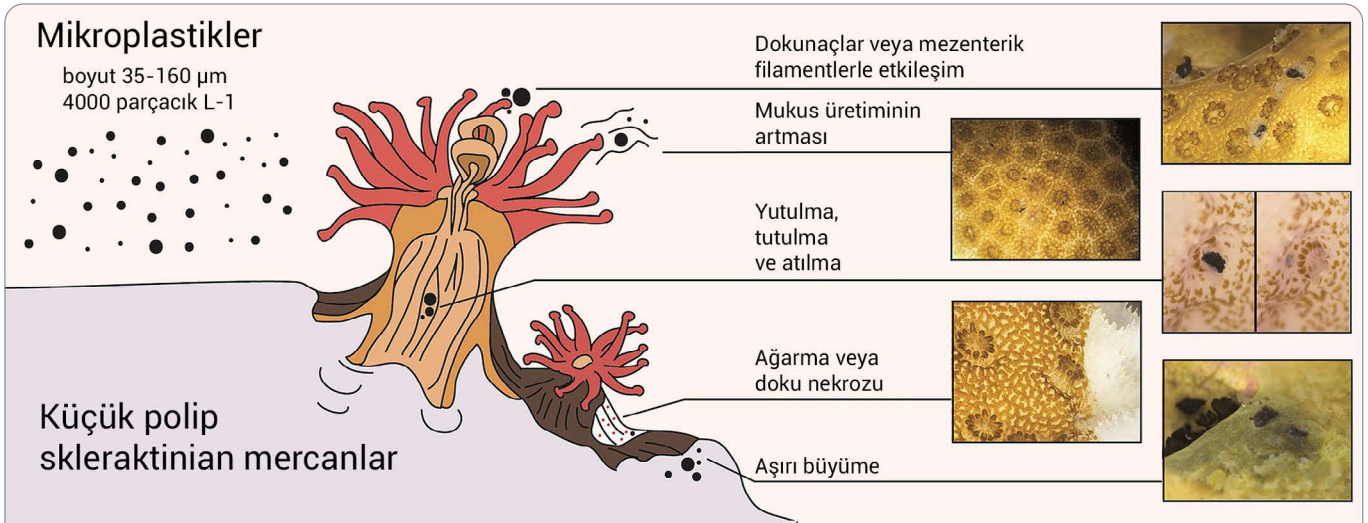
Kaynak: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Deniz balıklarının plastik alımı yaygın ve artmaktadır. Global Change Biology, 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Tehlike Altındaki Mercanlar: Küresel Ölçekte Bir Mikro Tehdit

Plastik kirliliği, besin zincirlerine girerek hastalıkların yayılmasını hızlandırmak ve resif topluluklarının bozulmasına katkıda bulunmak suretiyle mercan resifleri için giderek artan bir tehdit oluşturmaktadır. Analizler, orta Pasifik Okyanusu'ndaki izole atoller dahil olmak üzere, incelenen 84 resiften 77'sinde insan kaynaklı enkaz tespit etmiştir.¹¹² İncelenen altı türden beşinde¹¹³, beyazlaşma ve doku nekrozu gibi olumsuz sağlık etkileri kaydedilmiştir¹¹⁴ (Şekil 31).

Daha büyük plastik parçaları, hastalıkların bulaşmasını ve fiziksel hasarı kolaylaştırarak mercanların patojenlere karşı savunmasızlığını artırmaktadır.¹¹⁵ Bu etkiler, mercan kolonilerinin sağlığını korumada önemli bir rol oynayan iskelet mikrobiyomunu da etkilemektedir¹¹⁶ (Şekil 32). Araştırmalar, "plastispheres" olarak bilinen mikroplastikler üzerindeki biyofilmlerin¹¹⁴ mercanlarda mikrobiyom disbiyozuna neden olabileceğini ortaya koymaktadır.¹¹⁷

Plastiklerle temas halinde mercan hastalıkları riski %4'ten %89'a çıkar (Şekil 33). Mercan resifleri, deniz türlerinin dörtte birine habitat sağladığından, mercan resiflerinin ölümü biyolojik çeşitlilik kaybına önemli ölçüde etki eder.¹¹⁵



Şekil 31: Plastiklerin mercan resiflerinin sağlığı üzerindeki etkisi

Mercanlar, çeşitli temizleme mekanizmaları (örneğin, kirpik hareketi, mukus üretimi veya doku genişlemesi), aşırı büyüme yoluyla partiküllerin tutulması veya yanlışlıkla yutulan partiküllerin dışarı atılması ile tepki verebilir.

Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Resif oluşturan mercanların mikroplastik maruziyetine tepkileri. Çevre Kirliliği 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Dünya mercan resiflerinde plastik kirliliği. Nature 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

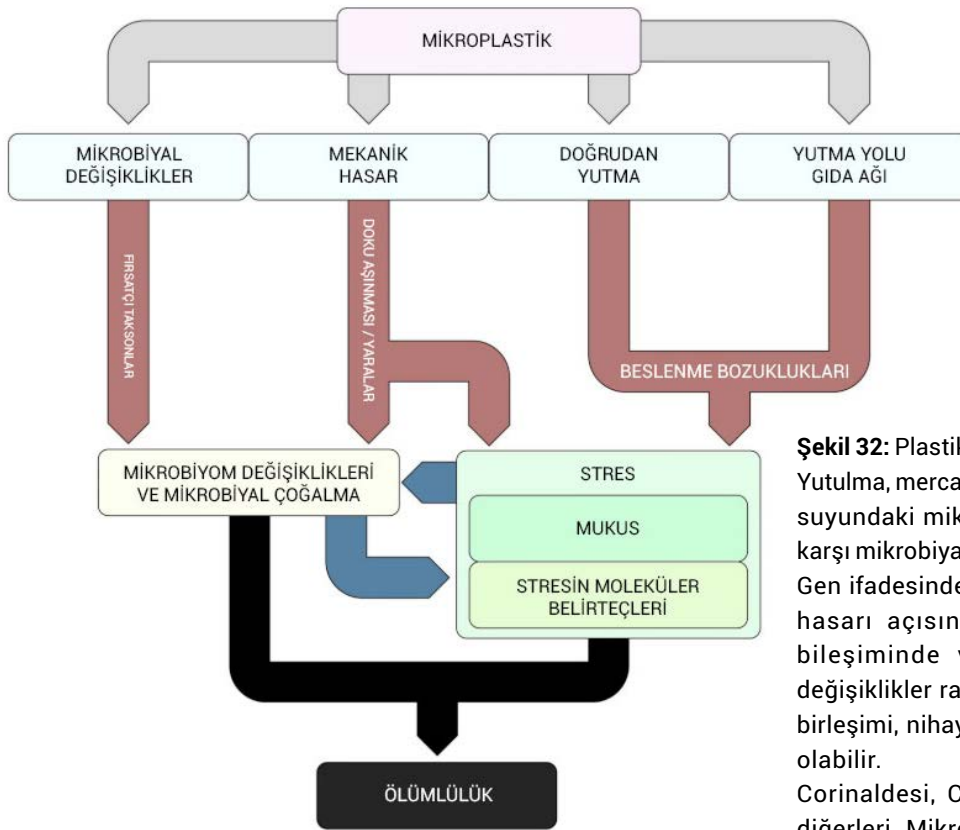
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Resif oluşturan mercanların mikroplastik maruziyetine tepkileri. Environmental Pollution 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Mikroplastikler: mercanlar ve diğer resif organizmaları üzerindeki etkileri. Yaşam Bilimlerinde Ortaya Çıkan Konular 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Mercan resiflerindeki hastalıklarla ilişkili plastik atıklar. Science 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. ve diğerleri. Mikroplastiklerin çoklu etkileri, deniz habitatlarını oluşturan türleri tehdit edebilir. Commun Biol 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

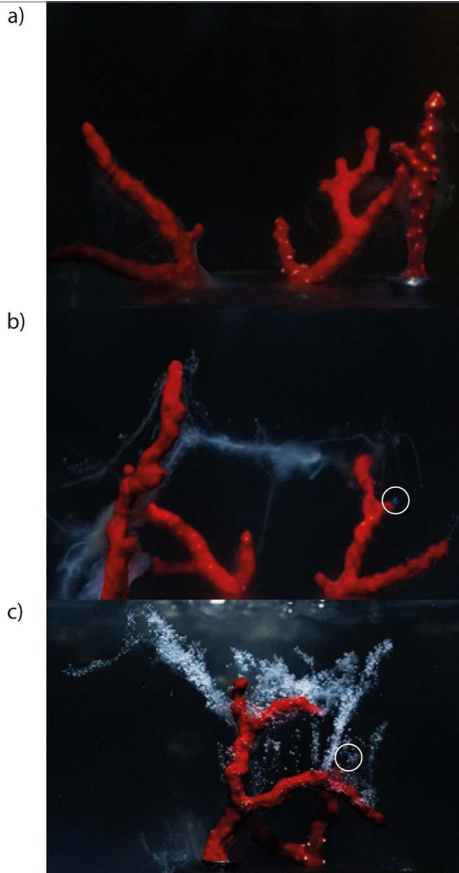
¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. ve diğerleri. Plastikler ve mikrobiyom: etkiler ve çözümler. Environmental Microbiome 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>



Şekil 32: Plastiklerle temasın neden olduğu etkiler. Yutulma, mercan dokusuyla fiziksel temas ve deniz suyundaki mikroplastik parçacıkların varlığına karşı mikrobiyal tepki sonucu ortaya çıkan etkiler. Gen ifadesindeki değişiklikler ve DNA oksidatif hasarı açısından mercan mikrobiyomunun bileşiminde ve stresinde meydana gelen değişiklikler rapor edilmiştir. Tüm bu süreçlerin birleşimi, nihayetinde mercan ölümlerine neden olabilir.

Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. ve diğerleri. Mikroplastiklerin çoklu etkileri, deniz habitatını oluşturan türleri tehdit edebilir. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

<https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>



Şekil 33: Mikroplastik parçacık konsantrasyonu arttıkça mukus salınımı artar

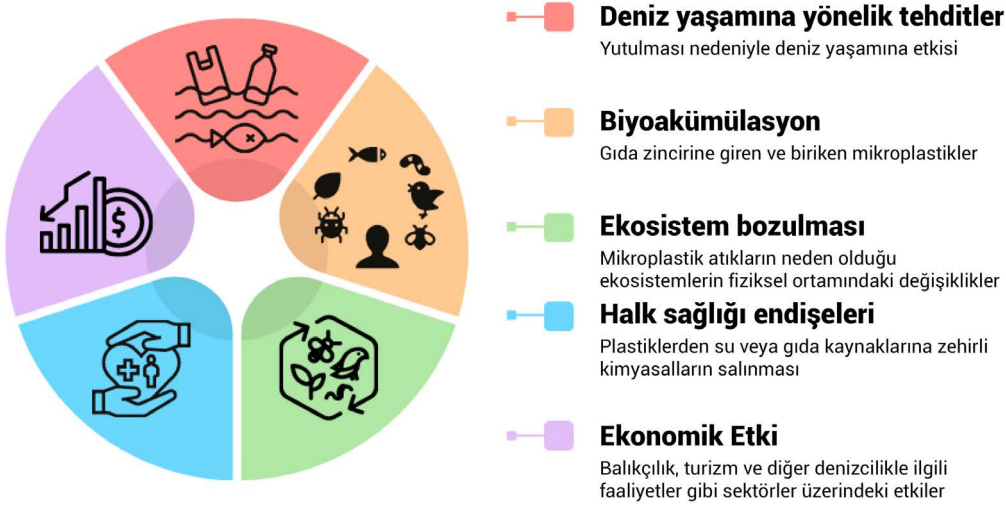
a – düşük, b – orta ve c – yüksek mikroplastik parçacık konsantrasyonları. Mikroplastik parçacık konsantrasyonu arttıkça mukus salınımı artar. Beyaz daireler mukus tarafından tutulan mikroplastik parçacıkları (polietilen parçacıkları) gösterir. Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. ve diğerleri. Mikroplastiklerin çoklu etkileri, deniz habitatını oluşturan türleri tehdit edebilir. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

<https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

MNP'lerin Ekosistemlerdeki Oksijen Dengesi Üzerindeki Etkisi

Gözlemler, çevrede bulunan plastiklerin öncelikle güneş ışınları nedeniyle bozunduğunu göstermektedir. Bu süreç, plastiklerin kimyasal bileşimini ve yapısını değiştirir. Araştırmalar, güneş ışığının tetiklediği reaksiyonların çözünmüş organik bileşiklerin sızmasını artırdığını, bunun da deniz suyunun biyojeokimyasını etkilediğini ve heterotrofik bakterilerin büyümesini teşvik ettiğini doğrulamaktadır¹¹⁸ (Şekil 34).

Deniz mikroplastiklerinin oluşturduğu tehditler



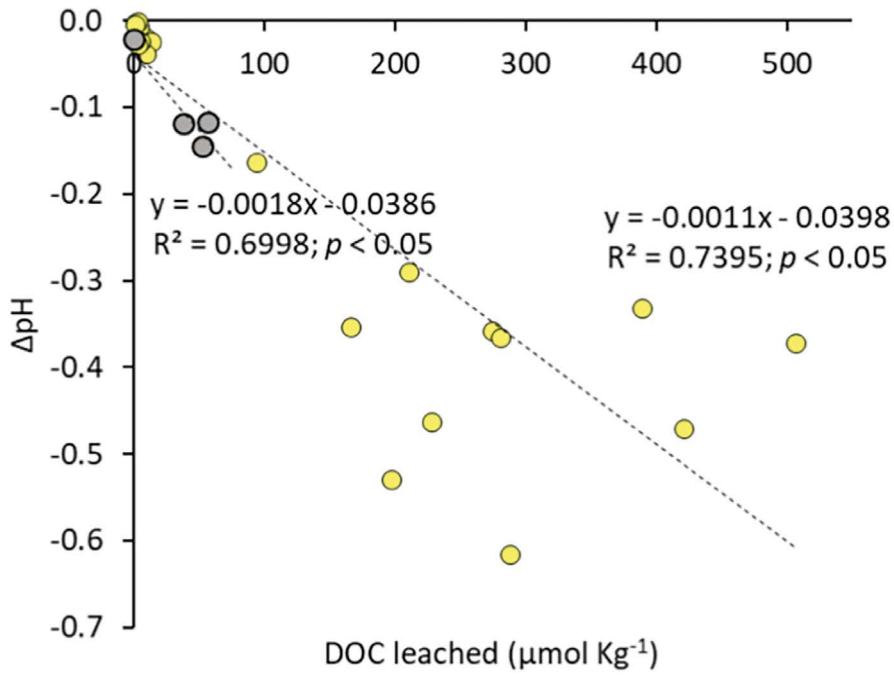
Şekil 34: Deniz mikroplastiklerinin oluşturduğu tehditler

Yu, R.-S. & Singh, S. Mikroplastik Kirliliği: Küresel Deniz Ekosistemleri Üzerindeki Tehditler ve Etkileri. Sürdürülebilirlik 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Uzun süreli çalışmalar, plastiklerin bozunma sırasında deniz suyuna salınan kimyasal bileşiklerin ya malzemenin kendisinden ya da polimere renk veya stabilite sağlamak için kullanılan katkı maddelerinden kaynaklandığını göstermektedir. Bu bileşiklerin bazıları organik asitlerdir, bu da pH'ı düşürmedeki rollerini açıklamaktadır. Bu nedenle, plastikler okyanus asitlenmesinin yoğunlaşmasına katkıda bulunur (Şekil 35) ve bu da Dünya'nın doğal sistemlerinin işleyişini önemli ölçüde bozabilir.¹¹⁹

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Mikroplastik Kirliliği: Küresel Deniz Ekosistemleri Üzerindeki Tehditler ve Etkileri. Sürdürülebilirlik 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiyotik plastik sızıntısı okyanus asitlenmesine katkıda bulunuyor. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

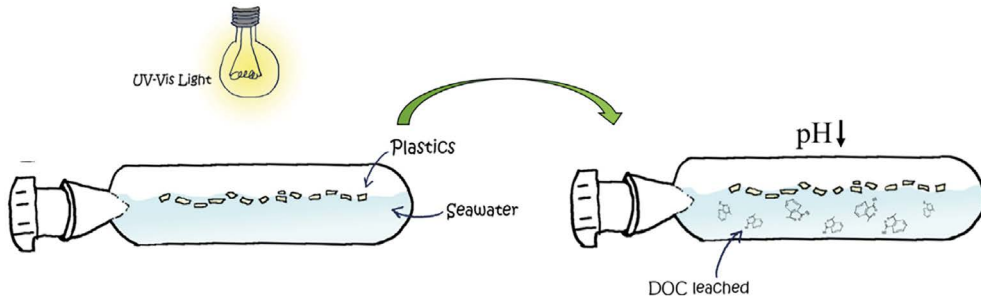


Şekil 35: Tüm deneylerin her bir tekrarlanan numunesi için plastiklerden sızan pH ve DOC arasındaki değişimin ilişkisi. Her deney için plastik kullanılmayan kontrol numuneleri de dahil edilmiştir. Sarı noktalar ışınlanmış işlemleri, gri noktalar ise karanlık işlemleri göstermektedir.

Kaynak: Romera-Castillo, C. et al. Abiyotik plastik sızıntısı okyanus asitlenmesine katkıda bulunur. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



"Bu çalışma sayesinde, plastik kirliliğinin yüksek olduğu okyanus yüzey alanlarında plastik bozunmasının pH değerinde 0,5 birime kadar düşüşe yol açacağını kanıtladık. Bu değer, 21. yüzyılın sonu için tahmin edilen en kötü insan kaynaklı emisyon senaryolarında öngörülen pH düşüşüyle karşılaştırılabilir," diyor ICM-CSIC araştırmacısı ve Science of The Total Environment dergisinde yayınlanan çalışmanın ilk yazarı Cristina Romera-Castillo (Şekil 36). ICM-CSIC araştırmacısı ve Science of the Total Environment dergisinde yayınlanan çalışmanın ilk yazarı Cristina Romera-Castillo (Şekil 36).¹²⁰



Şekil 36: Plastik sızıntısı, deniz suyunun pH değerinin 0,5 birime kadar düşmesine neden olabilir.

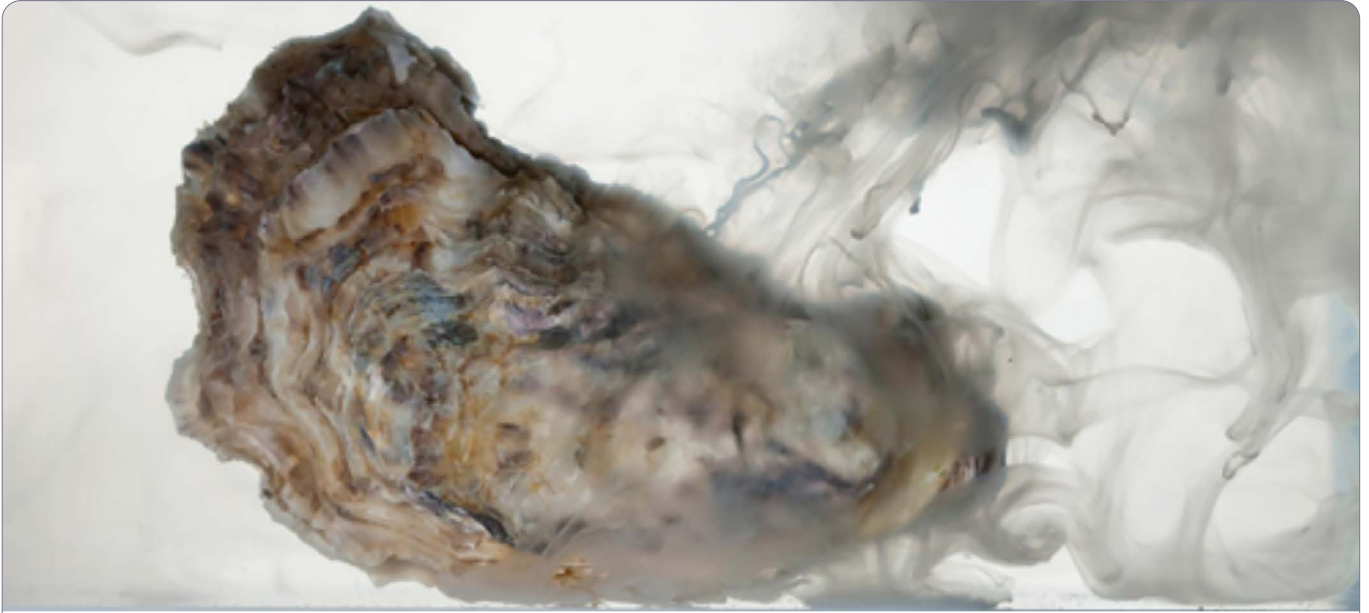
Kaynak: Romera-Castillo, C. et al. Abiyotik plastik sızıntısı okyanus asitlenmesine katkıda bulunur. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Deniz Bilimleri Enstitüsü (ICM-CSIC). Okyanuslardaki plastik bozunumu, okyanusların asitlenmesine katkıda bulunmaktadır. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

Okyanus asitlenmesi, deniz koşullarının bozulmasıdır ve kalıcı ve artan bir çevresel baskı yaratır.¹²¹ Ekosistemler üzerindeki etkileri on yıllar, yüzyıllar ve daha uzun süreler boyunca ortaya çıkar. Gözlemler, pH'nın düşmesi nedeniyle kıyı sistemlerinde biyolojik çeşitliliğin azaldığını doğrulamaktadır.^{122, 123} Bu durum, ekosistemlerin dayanıklılığını azaltır ve habitat sağlama, besin döngüsü ve karbon depolama gibi temel işlevleri tehdit eder.¹²³

Araştırmalar, okyanus asitlenmesi ile midyelerin (*Mytilus edulis*) daha yavaş büyüdüğünü ve hayatta kalma oranlarının azaldığını göstermektedir (Şekil 37). Bu, midye popülasyonunu azaltır ve dolayısıyla suyun filtrelenmesi ve kıyı ekosistemlerinin kalitesinin korunması yeteneğini azaltır.¹²⁴

Mevcut okyanus yüzey pH seviyeleri, en azından son 26.000 yıldır görülmemiş bir düzeydedir.¹²⁵ Bu süreç, benzersiz türlere bağımlı olan mercan resifleri, derin deniz ekosistemleri ve yüksek enlem ekosistemleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu türler, yeri doldurulamaz bir rol oynamaktadır ve yok olmaları, onları ikame edebilecek eşdeğer türlerin bulunmaması nedeniyle ekosistemlerin temel işlevlerini bozmaktadır.¹²⁶



Şekil 37: Mukus, zararlı maddelerin, mikroorganizmaların veya parazitlerin organizmaya girmesini önleyen bir bariyer görevi görür. Mikroplastikler dahil olmak üzere potansiyel olarak tehlikeli parçacıkları solungaçlardan ve sindirim sisteminden yakalayarak dışarı atabilir.

Kaynak: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

¹²¹Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley ve Kristy J. Kroeker. Okyanus Asitlenmesinin Deniz Ekosistemleri ve Bunlara Bağımlı İnsan Toplulukları Üzerindeki Etkileri. Çevre ve Kaynakların Yıllık İncelemesi 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Habitat bozulması nedeniyle okyanus asitlenmesinin kıyı ekosistem hizmetlerine etkileri. Yaşam Bilimlerinde Ortaya Çıkan Konular 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe ve Jason M. Hall-Spencer. Okyanus asitlenmesinin deniz biyoçeşitliliği ve ekosistem işlevleri üzerindeki etkileri. Okyanus asitlenmesi, Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson tarafından düzenlenmiştir. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Okyanus asitlenmesi altında atıkların biyolojik arıtılması: *Mytilus edulis*'in rolünün gözden geçirilmesi. Deniz Kirliliği Bülteni 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC). İklim Değişikliği 2021: Fiziksel Bilim Temelleri. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (Erişim tarihi 01.05.2025).

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe ve Jason M. Hall-Spencer. Okyanus asitlenmesinin deniz biyolojik çeşitliliği ve ekosistem işlevleri üzerindeki etkileri. Okyanus asitlenmesi, Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson tarafından düzenlenmiştir. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

İstiridye ve midyeler, karbonat doygunluğunun azaldığı bölgelerde nüfuslarında belirgin bir düşüş göstermektedir. Okyanus asitlenmesi, istiridye nüfuslarının ve vahşi doğada sağladıkları ekosistem hizmetlerinin azalmasına yol açabilir; ayrıca deniz ürünü olarak kalitelerini de bozabilir.

Araştırmalar, mikroplastiklerin mikroalglerin büyüme¹²⁷, klorofil içeriği, fotosentez aktivitesi ve reaktif oksijen türleri (ROS) gibi biyolojik parametreler üzerinde önemli olumsuz etkileri olduğunu doğrulamaktadır.^{128, 129}

Veriler, MP maruziyetinin karasal bitkiler, deniz algleri ve tatlı su alglerinde fotosentezde %7,05 ila %12,12 arasında küresel bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır.¹³⁰ Fotosentez, atmosfere salınan moleküler oksijeni (O₂) üreten, Dünya'daki birincil süreç olarak bilinmektedir.

Deniz sedimanlarındaki mikroplastikler, mikrobiyal toplulukları değiştirir ve azot döngüsünü bozar, bu da toksik alg çiçeklenmesi gibi insan kaynaklı sorunları potansiyel olarak büyütür. Okyanus yüzeyindeki plankton topluluklarındaki değişiklikler, iklim değişikliğinin neden olduğu oksijen azalmasını şiddetlendirebilir ve deniz organizmalarını oksijensiz bırakabilir.¹³¹

Veriler, 1960'tan 2010'a kadar, su sıcaklıklarının artması ve endüstriyel, evsel ve tarımsal atıklar dahil olmak üzere kirletici maddelerin birikmesi nedeniyle okyanusların çözünmüş oksijeninin %2'sini kaybettiğini göstermektedir.¹³² Oksijenin azalması, deniz flora ve faunasının neredeyse tamamen yok olduğu ölü bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Gözlemler, 1960'larda dünya okyanuslarında 45 ölü bölge varken, 2011'de bu sayının 700'e çıktığını göstermektedir.¹³³ UNDP web sitesinde yayınlanan verilere göre, ölü bölgelerin sayısı 1960'lardan bu yana her on yılda ikiye katlanmaktadır. Bu eğilime göre, 2025 yılına kadar bu sayının 1.500'e ulaşması oldukça muhtemeldir.¹³⁴ Plastik kirliliği, Dünya sistemindeki birçok süreci etkilemektedir. Araştırmalara göre, biyolojik çeşitlilik kaybı ve iklim değişikliği gibi kritik çevre sorunlarını daha da kötüleştirebilir.¹³⁵

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Mikroplastiklerin deniz organizmalarına etkileri: Mevcut perspektifler ve ileriye dönük adımlar. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Tatlı su alglerinin fotosentez sistemi üzerinde mikroplastik maruziyetinin etkisi. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastik maruziyeti mikroalglerde büyümeyi, fotosentetik pigment sentezini ve oksidatif enzimleri inhibe eder: Sucul ortamdaki birincil üreticiler için yeni bir tehdit. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. Mikroplastik kirliliği altında çoklu ekosistemlerdeki fotosentez kayıplarının küresel tahmini. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Mikroplastikler okyanus planktonuna, iklime ve diğer önemli Dünya sistemlerine risk oluşturuyor. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-raise-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Erişim tarihi 01.05.2025).

¹³²Bhuiyan, M. M. U. ve ark. Yirmi birinci yüzyılda kıyı okyanuslarında oksijen azalması: Etkiler, eğilimler ve etkiler. *Kimya ve Çevre Mühendisliğinde Vaka Çalışmaları* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³Uluslararası Doğa Koruma Birliği (IUCN). Okyanus oksijen kaybı. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Erişim tarihi 01.05.2025)

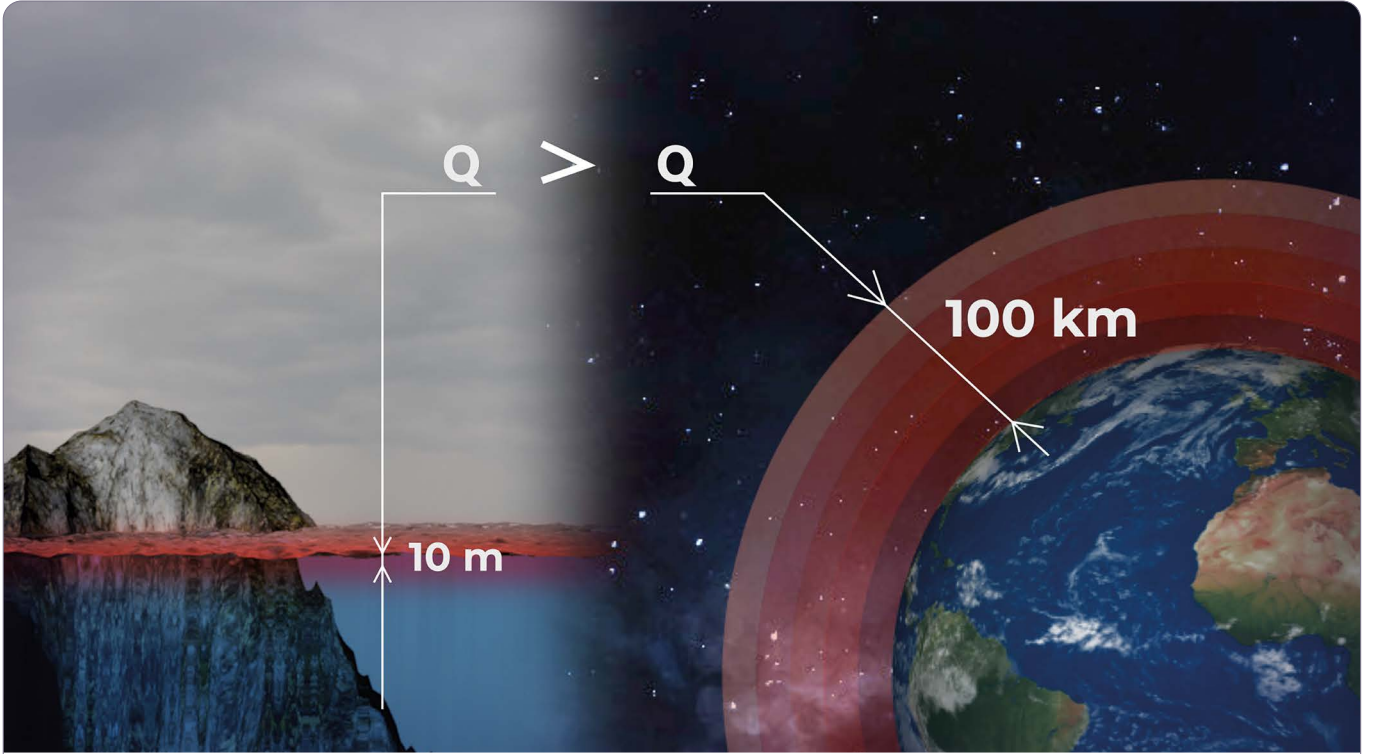
¹³⁴Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı. Okyanus hipoksisi: Ölü bölgeler. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Erişim tarihi: 01.05.2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastik kirliliği tüm gezegen sınırlarının etkilerini şiddetlendiriyor. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

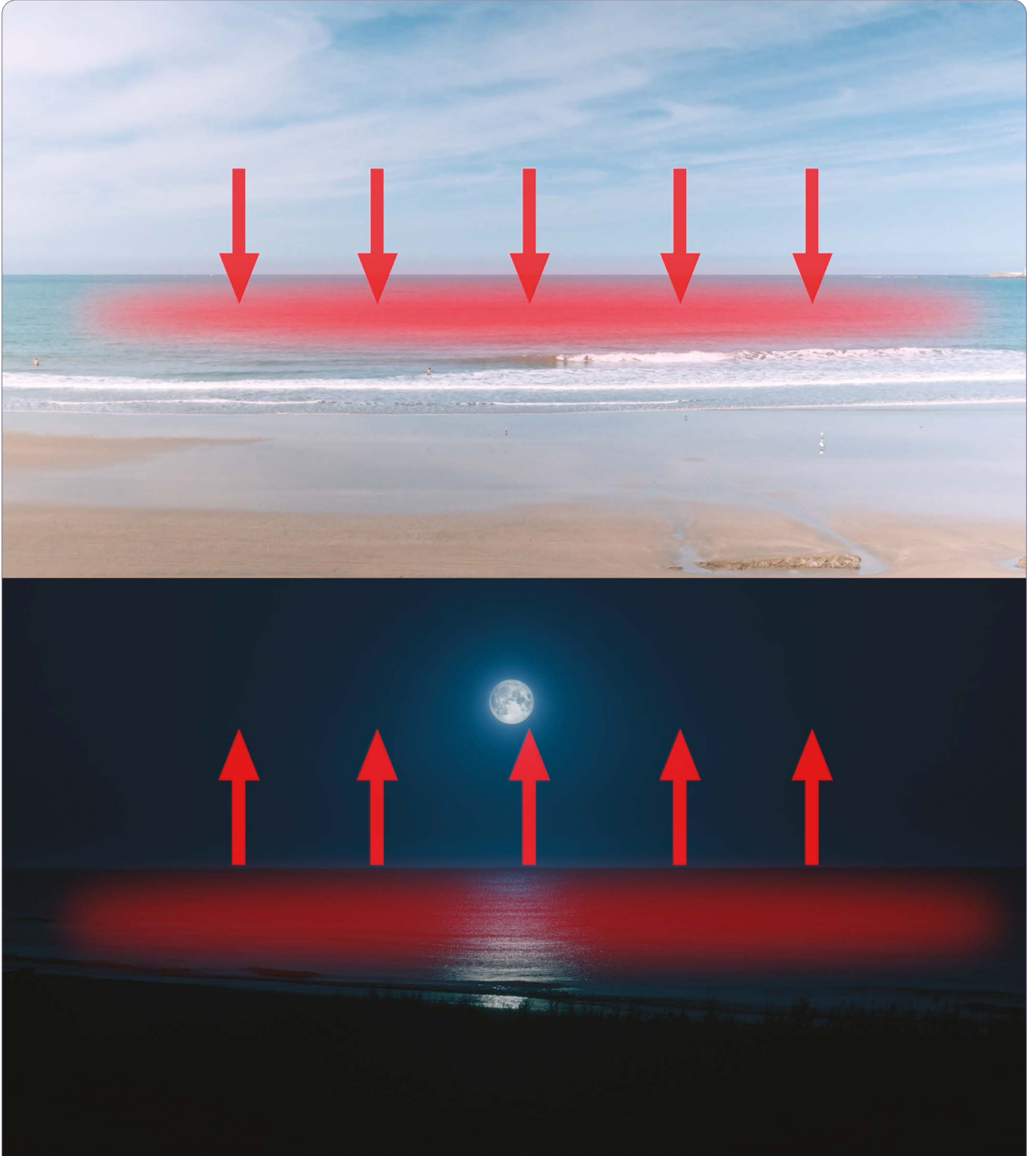
MİKRO VE NANOPLASTİKLERİN İKLİM ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Okyanusların İşlevleri

Okyanus, gezegenin iklim dengesini korumada önemli bir rol oynar ve doğal bir "klima" işlevi görür. Isıyı emme ve yavaş yavaş serbest bırakma özelliği, Dünya'daki sıcaklık dalgalanmalarını dengelemeye yardımcı olur. Sadece on metrelik bir okyanus suyu tabakası, tüm Dünya atmosferinden daha fazla ısı emebilir (Şekil 38). Bu, hem gündüz hem gece (Şekil 39) hem de mevsimler arasında (yaz ve kış) sıcaklık dalgalanmalarını azaltır.



Şekil 38: Okyanus ve atmosferin karşılaştırmalı ısı kapasitesi: Hava kütlesi daha az olmasına rağmen, okyanus on kat daha fazla ısı biriktirebilir ve tutabilir, bu da Dünya'nın iklimini düzenlemede önemli bir rol oynar.



Şekil 39: Günlük ısı değişiminin şematik gösterimi: okyanus gündüzleri ısıyı emer ve geceleri serbest bırakarak sıcaklık dalgalanmalarını dengeler.

Okyanus akıntıları, tropik bölgelerden kuzey enlemleri gibi daha soğuk bölgelere sıcak su taşır. Bu, kıyı bölgelerindeki iklimi ılımlı hale getirmeye yardımcı olur. Soğuk akıntılar ise soğumuş suyu ekvatora geri taşır. Bu şekilde okyanus, gezegenin iklimini düzenler.

Okyanus, atmosferik süreçler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve bulutların oluşumu ve yağışlarda önemli bir rol oynar. Her gün, yüzeyinden çok büyük miktarda su buharlaşır, daha sonra bulutlara yoğunlaşır ve yağmur veya kar olarak Dünya'ya geri düşer. Bu süreç, nehirler, göller ve toprağın tatlı su kaynaklarını yenilemek için hayati önem taşır.

Fitoplankton (Şekil 40) gibi okyanustaki mikroskobik algler, oksijenin %50'sinden fazlasını üretir.¹³⁶

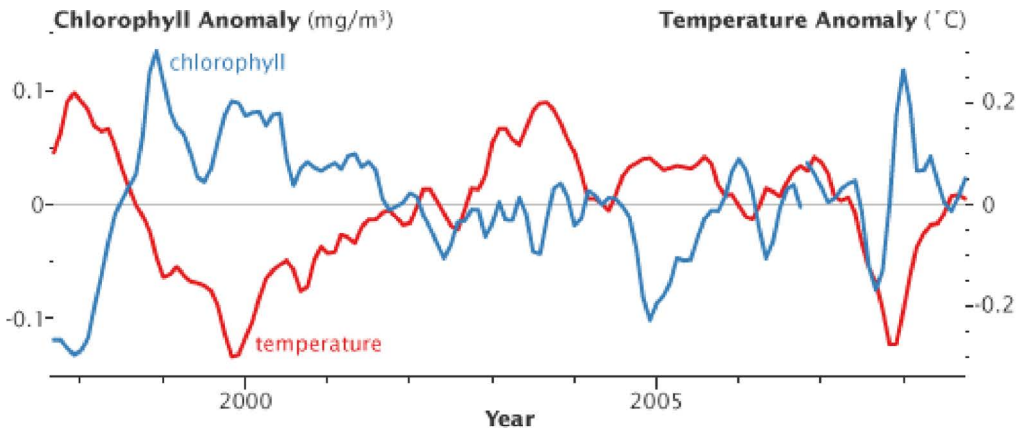
Birçok okyanus kimyası ve biyolojisi modeli, atmosferdeki sera gazlarının artmasına bağlı olarak okyanus yüzeyinin ısınmasıyla fitoplankton üretiminin azalacağını öngörmektedir (Şekil 41).^{137, 138}



Şekil 40: Fitoplanktonlar, fotosentez yapan bakterilerden (siyanobakteriler) bitki benzeri diyatomlara ve zırlı kokkolitoforlara kadar çok çeşitlidir (çizimler ölçekli değildir). (Kolaj, Sally Bensusen, NASA EOS Proje Bilim Ofisi'nin çizimlerinden ve mikrograflarından uyarlanmıştır.)

NASA. Fitoplankton nedir?

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>



Şekil 41: Okyanusun yaklaşık %70'i, birbiriyle iyi karışmayan katmanlara kalıcı olarak ayrılmıştır. 1997 sonları ile 2008 ortaları arasında, uydular bu bölgelerde ortalamadan yüksek sıcaklıkların (kırmızı çizgi) ortalamadan düşük klorofil konsantrasyonlarına (mavi çizgi) yol açtığını gözlemlemiştir. (Grafik, Behrenfeld ve ark. 2009'dan Robert Simmon tarafından uyarlanmıştır) <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

¹³⁶NOAA. Okyanuslardan ne kadar oksijen geliyor? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Erişim tarihi: 01.05.2025).

¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Geçtiğimiz yüzyılda küresel fitoplankton azalması. Nature 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. 21. yüzyılda okyanus ekosistemlerinin maruz kaldığı çoklu stres faktörleri: CMIP5 modelleriyle tahminler. Biogeosciences 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Değişen Okyanus Sıcaklık Modelleri

2024 Küresel Okyanus Raporu, endişe verici bir tablo ortaya koymaktadır: benzeri görülmemiş bir okyanus ısınma eğilimi. Araştırmalar, 1960 ile 1986 yılları arasında okyanus sıcaklıklarının sabit bir oranda arttığını göstermektedir. Ancak son yıllarda bu süreç iki kat hızlanmıştır (Şekil 42).¹³⁹

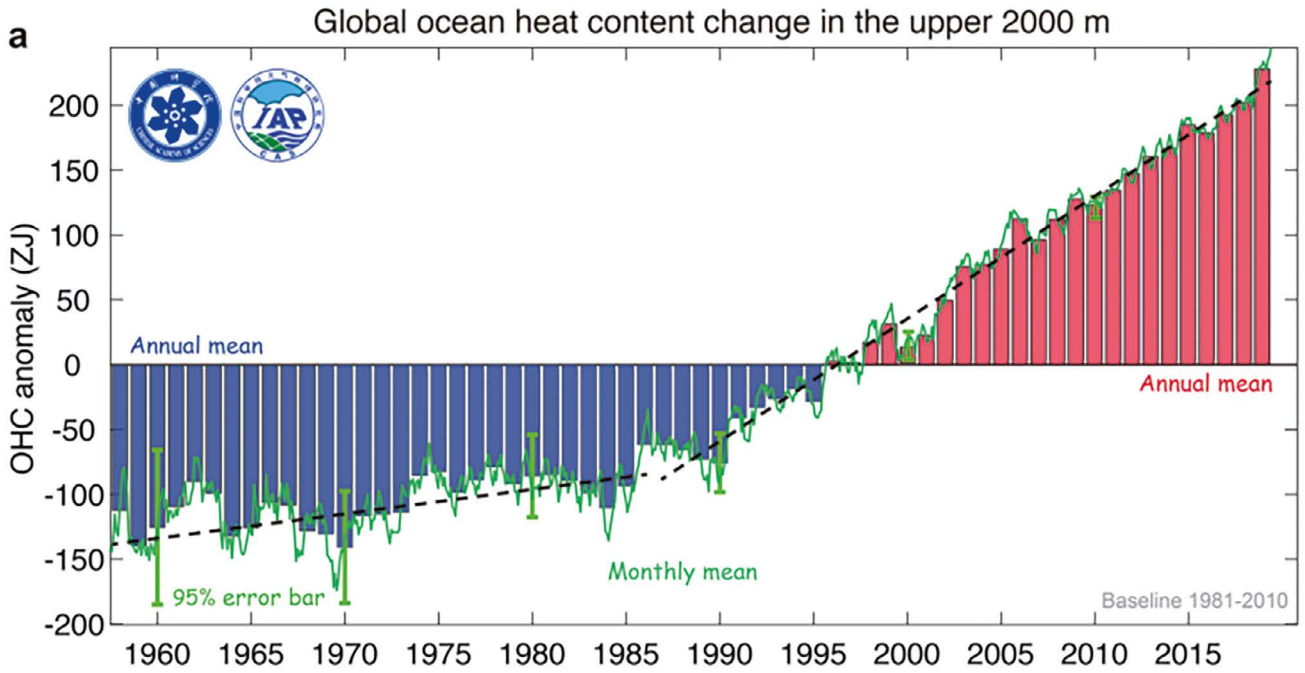


Рисунок 42. Изменение теплосодержания в верхних 2 000 метров Мирового океана.

Источник: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

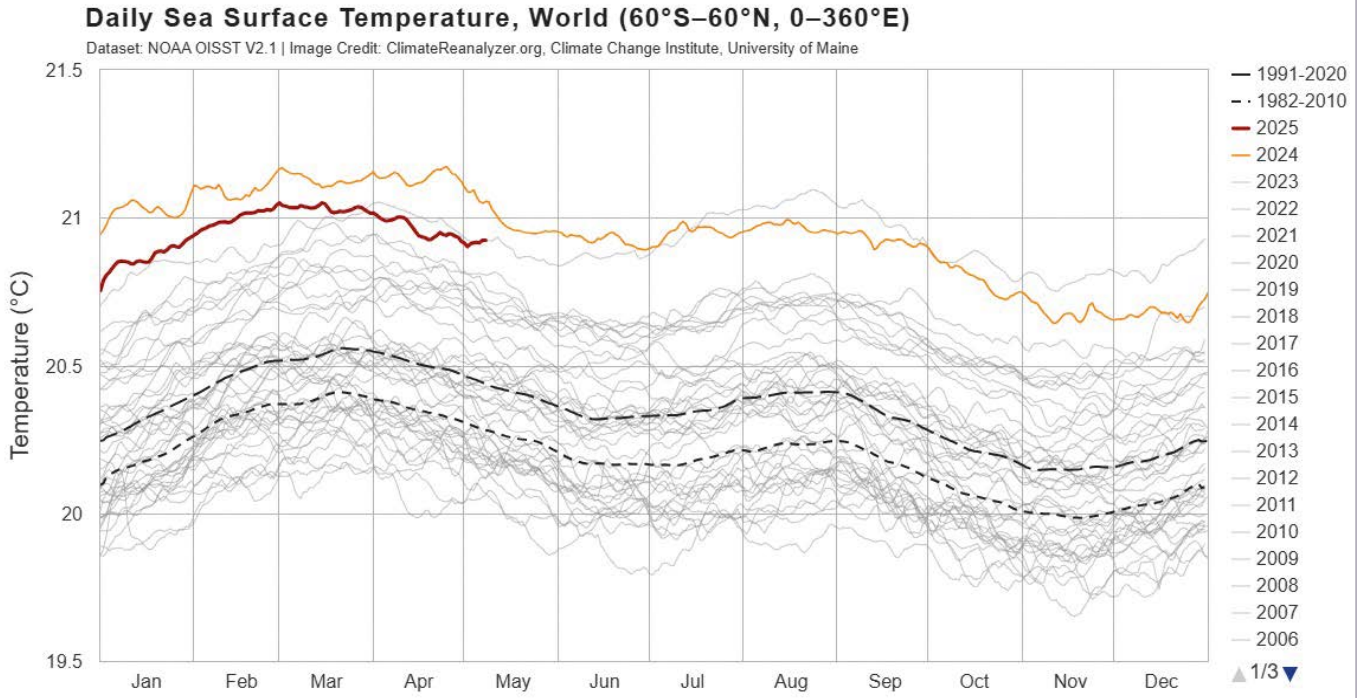
2023 yılı, 2016 yılında kaydedilen önceki en yüksek sıcaklığı geçerek, kayıtlara geçen en sıcak yıl oldu. Deniz yüzeyi sıcaklığı (SST) için de tüm zamanların rekoru kaydedildi.¹⁴⁰ Bu eğilim devam etti ve 2024 yılı 2023 yılının rekorunu kırarak (Şekil 43) kayıtlı tarihin en sıcak yılı oldu.¹⁴¹ Bu dönemde, deniz yüzeyi sıcaklıkları 15 ay boyunca rekor aylık değerlerde seyretti ve ısınma eğiliminin devam ettiğini ortaya koydu.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. ve diğerleri. 2019'da Rekor Seviyede Okyanus Isınması Devam Etti. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Dünya, kayıtlara geçen en sıcak yılını yaşadı; Okyanusların üst tabakalarındaki ısı içeriği rekor seviyeye ulaşırken, Antarktika'daki deniz buzu rekor düzeyde azaldı. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Erişim tarihi: 01.05.2025)

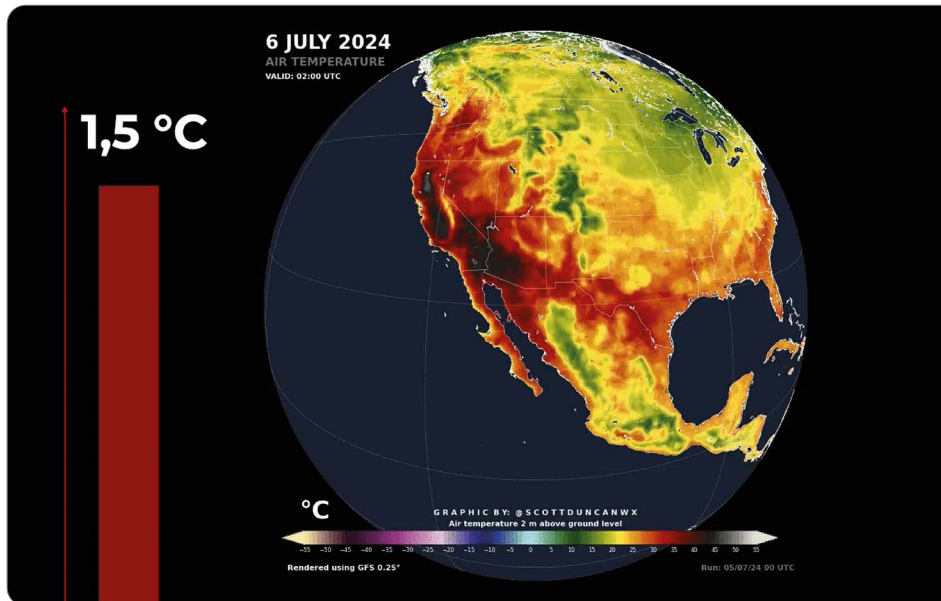
¹⁴¹Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), 2024 yılının endüstriyel öncesi seviyenin yaklaşık 1,55 °C üzerinde, kayıtlara geçen en sıcak yıl olduğunu doğruladı. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Erişim tarihi: 01.05.2025)



Şekil 43: Günlük deniz yüzeyi sıcaklığı: yıllara göre mevsimsel dalgalanmaları yansıtan üst okyanus tabakası sıcaklığındaki değişikliklerin grafik gösterimi

Kaynak: NOAA OISST V2.11 Görsel Kaynak: Climate [Reanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), İklim Değişikliği Enstitüsü. Maine Üniversitesi https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Kayıtlara göre ilk kez, küresel ortalama yüzey sıcaklığı endüstri öncesi seviyenin 1,5 °C üzerindeydi¹⁴² (Şekil 44). Uzmanlara göre bu, kritik bir eşik: bu eşiğin aşılması halinde insanlık büyük ölçekli iklim felaketleriyle karşı karşıya kalacak.¹⁴³



Şekil 44: İklim dönüm noktasının şematik gösterimi: 2024 yılında, yıllık ortalama küresel sıcaklık ilk kez sanayi öncesi seviyelere kıyasla 1,5 °C eşliğini aştı.

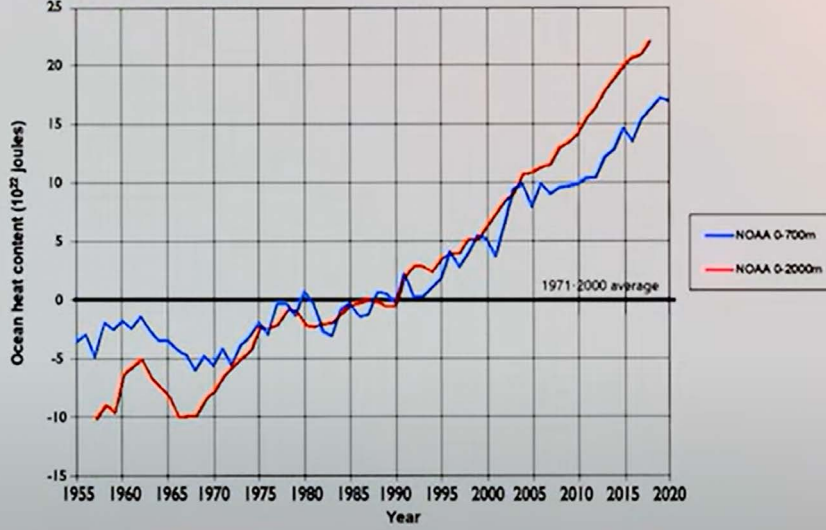
¹⁴²Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO). 2024 Küresel İklim Durumu. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Erişim tarihi: 01.05.2025)

¹⁴³IPCC. 1,5 °C'lik Küresel Isınma. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Erişim tarihi: 01.05.2025)

Böyle bir sıcaklık artışı 21. yüzyılın ortalarında bekleniyordu¹⁴⁴, ancak bu eşik çoktan aşıldı.

BM tahminlerine göre, mevcut eğilimler devam ederse, bu yüzyılda küresel sıcaklıklar yaklaşık 3 °C artabilir.¹⁴⁴

Figure TD-5. Ocean Heat Content in the Top 700 Meters and the Top 2,000 Meters in the NOAA Data Sets, 1955–2020, with Standard Errors



Data source: NOAA data portal: www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT.

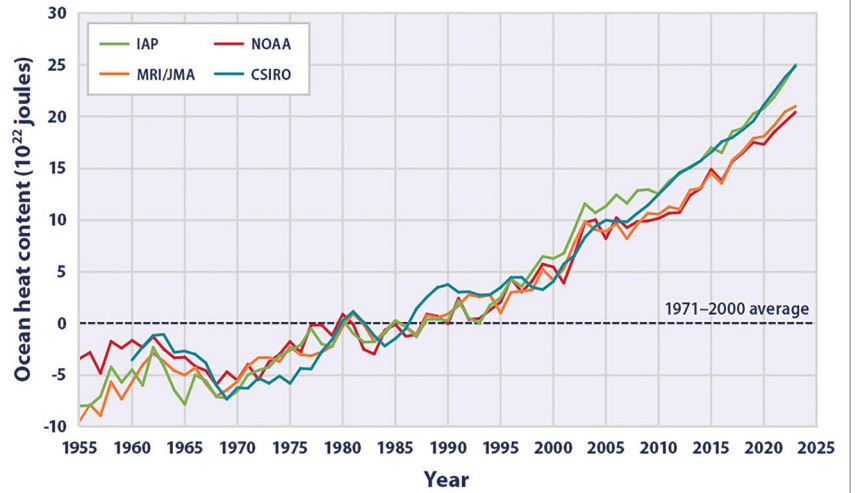
Şekil 45: 0–700 ve 0–2.000 metre derinlikteki okyanus ısı içeriği. NOAA veri setleri, 1955–2020, standart.

Kaynak: NOAA veri portalı
www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

Şekil 45:

Bu şekil, 1955 ile 2023 yılları arasında dünya okyanuslarının üst 700 metrelük kısmındaki ısı içeriğindeki değişiklikleri göstermektedir. Okyanus ısı içeriği, enerji birimi olan joule cinsinden ölçülür ve referans olarak sıfır olarak belirlenen 1971–2000 ortalamasıyla karşılaştırılır. Farklı bir referans dönemi seçilmesi, zaman içindeki verilerin şeklini değiştirmez. Çizgiler, dört ülkedeki devlet kuruluşları tarafından farklı yöntemler kullanılarak bağımsız olarak hesaplanmıştır: Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA), Avustralya Commonwealth Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Örgütü (CSIRO), Çin Atmosfer Fiziği Enstitüsü (IAP) ve Japonya Meteoroloji Ajansı Meteoroloji Araştırma Enstitüsü (MRI/JMA).

Kaynak: CSIRO, 2024;5 IAP, 2024;6 MRI/JMA, 2024;7 NOAA, 20248

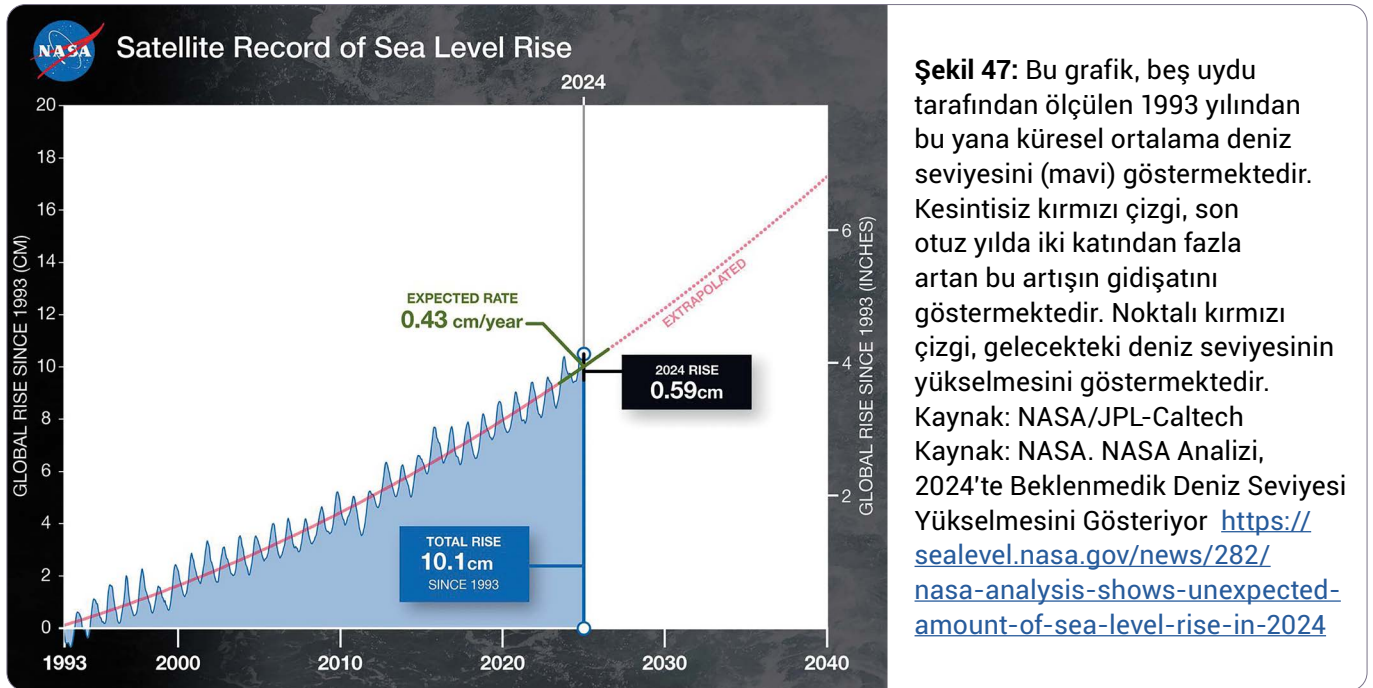


¹⁴⁴Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC). İklim Değişikliği 2021: Fiziksel Bilim Temelleri <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Pasifik Okyanusu'nun bir kısmının orta derinlikleri, son 60 yılda önceki 10.000 yılda olduğundan 15 kat daha hızlı ısınmıştır (Şekil 45-46).¹⁴⁵ Bu, küresel ısınma süreçlerinin sadece okyanusun üst katmanlarını değil, güneş ışığının ulaşmadığı daha derin bölgeleri de etkilediğini göstermektedir. Bu derinliklerdeki suyu ısıtmak için muazzam miktarda enerji gerekir, bu da sorunun boyutunu vurgulamaktadır. Bilim insanlarına göre, okyanusun mevcut hızda ısınması için, bir yıl boyunca her saniye 7 atom bombasının patlamasına eşdeğer bir enerji salınımı gerekir¹⁴⁶ – bu şaşırtıcı rakamlar şu soruyu akla getiriyor: Bu enerji nereden geliyor?

Okyanus sıcaklıklarının yükselmesi kaçınılmaz olarak deniz seviyesinin yükselmesine yol açarak tüm kıyı şeridini yutma tehlikesi yaratmaktadır. Son iki yüzyılda, küresel ortalama deniz seviyesi 21 santimetre yükseldi ve sadece son 30 yılda 10,1 santimetre yükseldi.¹⁴⁷ Mevcut artış oranı öncekinden 2,5 kat daha yüksek ve bu eğilimin devam etmesi bekleniyor. Durum değişmezse, milyonlarca insan iklim mültecisi olacak, evlerini terk etmek ve kıyılardan uzak yerlerde barınak aramak zorunda kalacak.

“2024'te gördüğümüz yükselme, beklediğimizden daha yüksekti,” dedi NASA'nın Güney Kaliforniya'daki Jet Propulsion Laboratory'de deniz seviyesi araştırmacısı Josh Willis. “Her yıl biraz farklıdır, ancak açık olan şey, okyanusların yükselmeye devam ettiği ve yükselme hızının giderek arttığıdır.”¹⁴⁸ (Şekil 47)



Okyanus ısınması, sel, tayfun ve anormal yağışlar gibi daha sık ve şiddetli aşırı hava olaylarına da katkıda bulunmaktadır. Bu değişiklikler, gezegenin ekosistemlerini ve milyarlarca insanın hayatını tehdit etmektedir ve her geçen yıl etkileri daha belirgin hale gelmektedir.

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pasifik Okyanusu'nun Son 10.000 Yılda Isı İçeriği. Science, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (31 Ekim 2013). Küresel Isınma Okyanuslarda mı Saklanıyor? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

¹⁴⁶Взяты прирост энергии океана в 1022 джоулей в 2022 году по сравнению с 2021 годом (Cheng, L. et al. Okyanuslar için Rekor Sıcaklıkların Yaşandığı Bir Yıl Daha. Adv. Atmos. Sci. 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>) ve nükleer patlama enerjisi $6,3 \times 10^{13}$ joule.

¹⁴⁷NASA. 30 Yıllık Deniz Seviyesi Yükselmesinin Takibi <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

¹⁴⁸NASA. NASA Analizi, 2024'te Beklenmedik Deniz Seviyesi Yükselmesini Gösteriyor <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

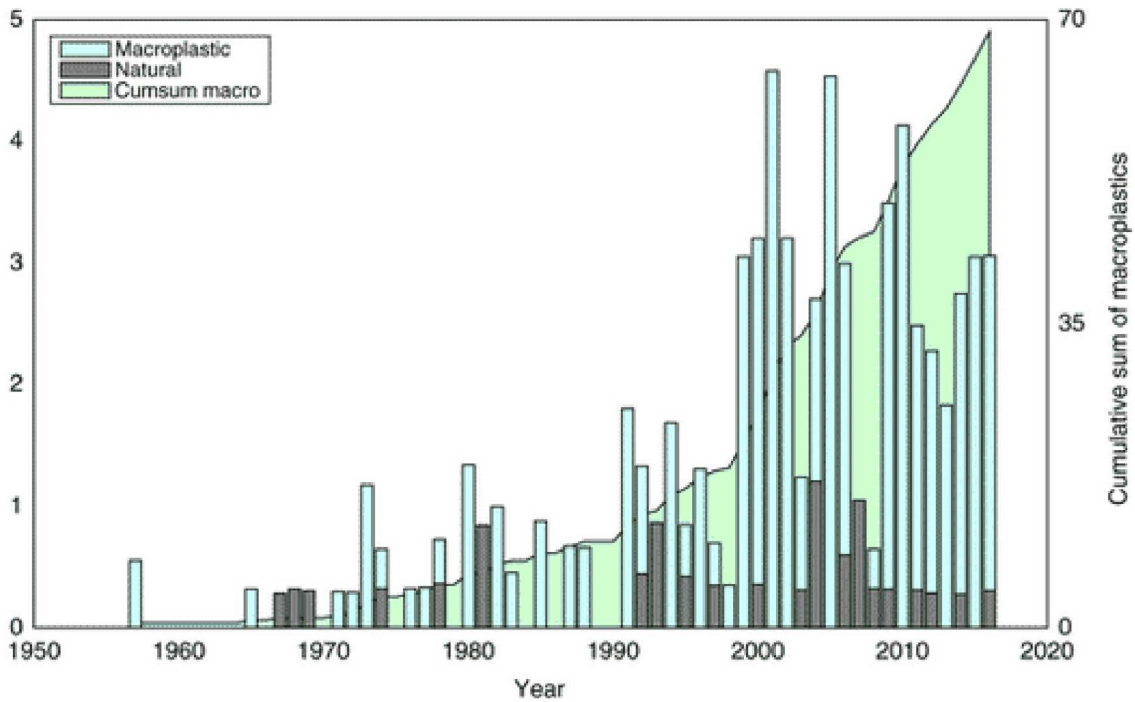
Okyanuslar Neden Isınıyor? Hipotez

Okyanusların ısınmasına katkıda bulunan ve yaygın olarak kabul edilen başlıca faktörler, atmosferdeki ısıyı hapsederek okyanusların üst katmanlarının sıcaklığını artıran CO₂ gibi sera gazlarıdır. Ancak, bu sürece önemli etkisi olabilecek başka faktörler de vardır. Okyanusların ısınmasına etki eden bir başka faktör, "X Faktörü" başlıklı bölümde ele alınacaktır.

20. yüzyılın ikinci yarısından bu yana, hızlı endüstriyel gelişme ve plastik ürünlerin seri üretimi ile aynı döneme denk gelen bir dönemde, okyanuslardaki plastik miktarında keskin bir artış olmuştur (Şekil 48).

1960 ile 2019 yılları arasında okyanus sıcaklığında da bir değişiklik gözlemlenmiştir. Grafikte (Şekil 49), 20. yüzyılın ortalarından itibaren kaydedilen ortalama deniz yüzeyi sıcaklığındaki paralel artış görülmektedir.

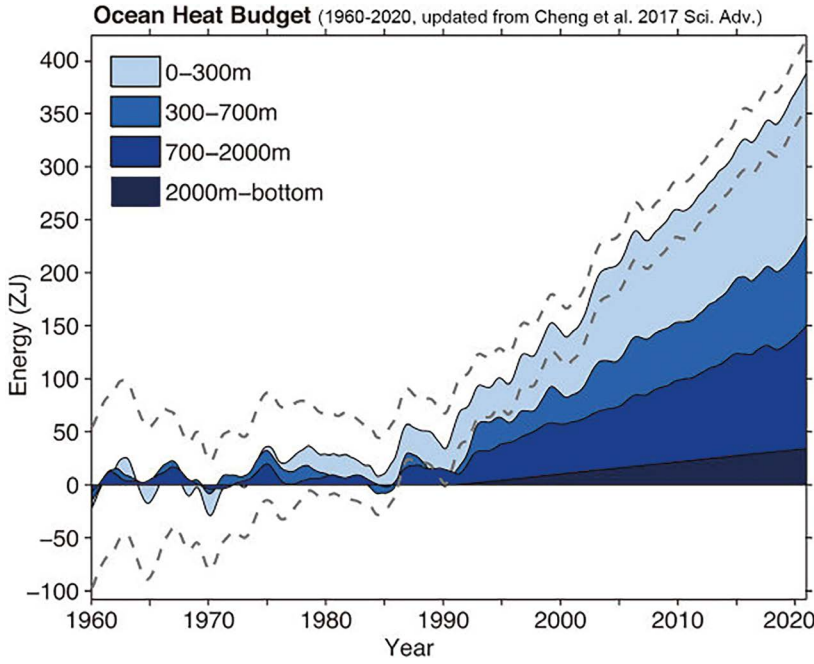
İki grafiği (Şekil 48-49) karşılaştırıldığında, okyanuslardaki plastik konsantrasyonlarının artışı ile okyanus sularının ısınması arasında bir korelasyon gözlemlenebilir. Bu, okyanuslardaki plastik kirliliğinin, okyanus sularının ısınmasına katkıda bulunan önemli ancak yeterince araştırılmamış faktörlerden biri olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 48: Son on yıllarda okyanuslardaki plastik konsantrasyonunun artışı gösteren grafik. Okyanuslardaki makroplastiklerin kümülatif miktarı ve yıllık değerler

Kaynak: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. 60 yıllık zaman serisinden kanıtlanan okyanus plastiklerinin artışı. *Nature Communications*, 10, 1622 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>



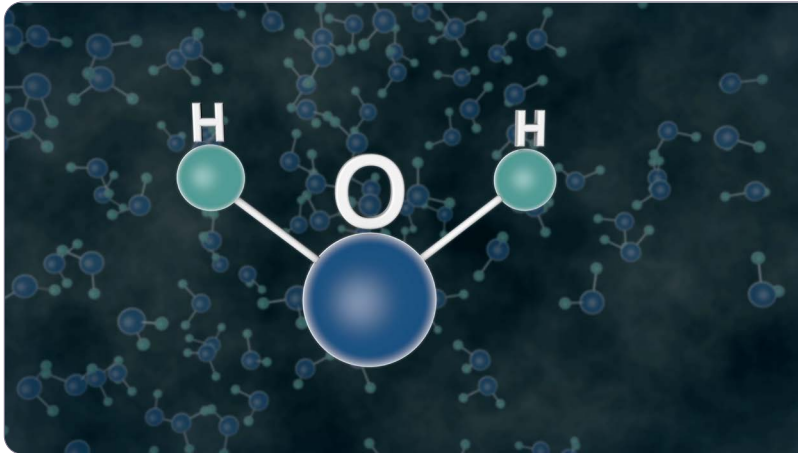
Şekil 49: Aynı dönemdeki (1960–2019) küresel okyanus sıcaklık değişikliklerinin grafiği

Kaynak: (Purkey ve Johnson, 2010; veri güncellemesi Cheng и др., 2017) Cheng, L. et al. Rekör kıran okyanus ısınması 2019'da da devam etti. Adv. Atmos. Sci. 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Bu konuyu daha ayrıntılı olarak incelemek için, plastiklerin okyanus suyunun fiziksel özelliklerini (örneğin, ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi) etkileyip etkilemediğini anlamak önemlidir. Peki, bu değişiklikler okyanus sıcaklıklarının yükselmesine katkıda bulunabilir mi? Bu süreçleri daha iyi anlamak için, suyun temel özelliklerini ve kirleticilerle nasıl etkileşime girdiğini inceleyelim.

Suyun Temel Özellikleri

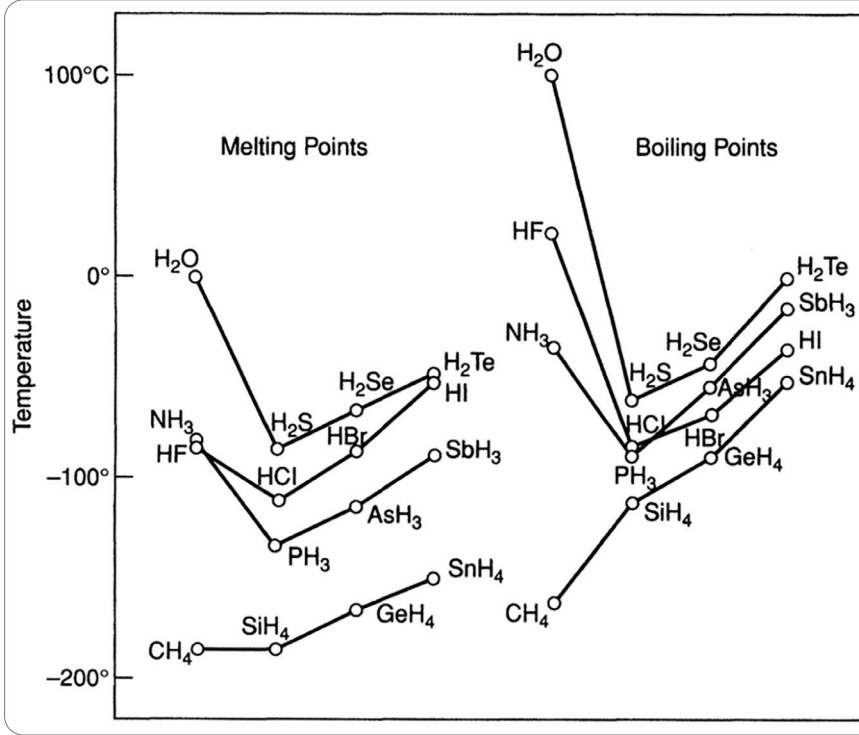
Su molekülü, daha büyük oksijen atomuna göre bir tarafında iki hidrojen atomu bulunan simetrik bir V şekline sahiptir (Şekil 50).



Şekil 50: Su molekülünün şematik gösterimi: iki hidrojen (H) atomu, bir oksijen (O) atomuna $\sim 104,5^\circ$ açıyla bağlanarak pozitif ve negatif yüklü bir dipol oluşturur.

Bu yapı, tüm atomların düz bir çizgi üzerinde düzenlendiği CO_2 gibi doğrusal moleküllerden farklıdır. Su molekülünün benzersiz şekli, onu Dünya'daki birçok süreç için hayati öneme sahip kılar.

Su moleküllerinin özel özellikleri, diğer üç atomlu moleküllerin genellikle gaz haline geçeceği sıcaklıklarda suyun sıvı halde kalmasını sağlar (Şekil 51).



Şekil 51: Hidrit moleküllerinin izelektronik dizilerinin erime noktaları (solda) ve kaynama noktaları (sağda). Suyun sıcaklıkları, benzer bileşikler için verileri ekstrapolasyonla elde edildiğinde beklenen değerlerden önemli ölçüde yüksektir. Kaynak: Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3. baskı, Bölüm 12-2, Cornell Univ. Press, 1960.

Bunun nedeni, su moleküllerini birbirine bağlayarak güçlü ve düzenli bir yapı oluşturan hidrojen bağlarıdır¹⁴⁹.

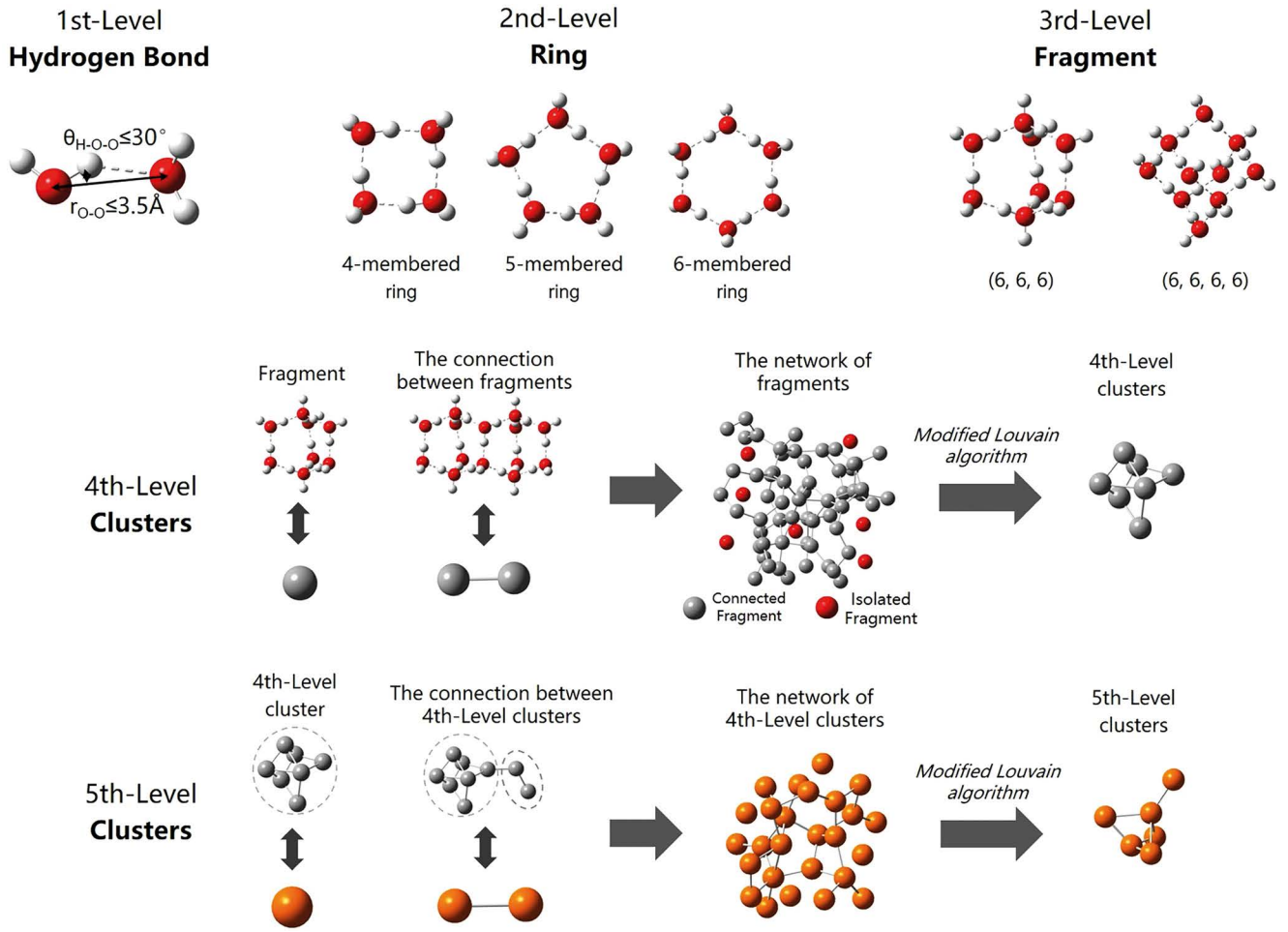
Çoğu hidrojen bağı zayıf çekim kuvvetlerine sahiptir ve bağ gücü tipik bir kovalent bağına yaklaşık onda biri kadardır. Bununla birlikte, hidrojen bağları son derece önemlidir. Hidrojen bağları olmasaydı, tüm ahşap yapılar çöker, çimento ufalanır, okyanuslar buharlaşır ve tüm canlı maddeler cansız maddelere dönüşür.¹⁵⁰

Bu nedenle su, kümeler oluşturma yeteneğine sahiptir ve bu, suyun birçok anormal özelliğini açıklamaktadır (Şekil 52-53). Su kümeleri, hidrojen bağı ağının %95'inden fazlasını kaplayabilir ve bu kümelerin bazıları, 3,0 nanometrenin ötesine uzanan binlerce molekülü kapsayabilir.¹⁵¹

¹⁴⁹ Pauling, L. Kimyasal Bağın Doğası, 3. baskı, Bölüm 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

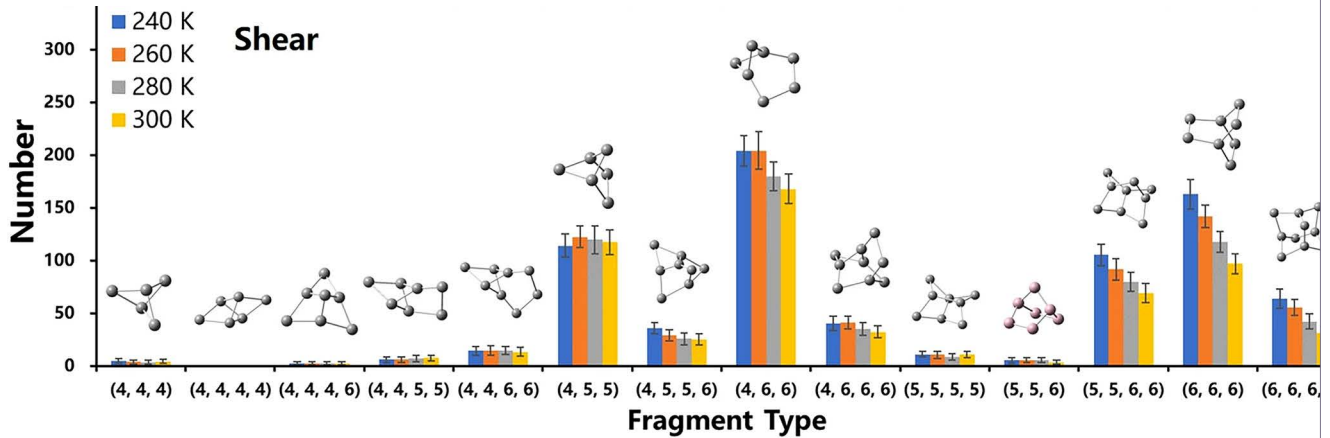
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. Hidrojen Bağlarına Giriş (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Genişletilmiş hiyerarşik kümeleme yöntemlerine dayalı sıvı sudaki su kümeleri ve yoğunluk dalgalanmaları. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

**Şekil 52:**

Bu çalışmada önerilen hiyerarşik kümeleme yönteminin şematik gösterimi. Hidrojen bağları, halkalar ve fragmanlar, kimyasal açıdan top ve çubuk modelleri olan 1., 2. ve 3. düzey yapılar olarak kabul edilir ve kırmızı ve beyaz toplar sırasıyla oksijen ve hidrojen atomlarını temsil eder. Düz ve noktalı çubuklar sırasıyla O–H kovalent bağları ve hidrojen bağlarını temsil eder. 4. ve 5. düzey kümeler topolojik perspektifle gösterilmiştir. Toplar son düzeylerin yapısını temsil etmektedir. Şekildeki yapılar, kümeleme algoritması tarafından dikkate alınan yapılar arasından seçilmiş olanlardır.

Kaynak: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. Kesmeli akıma maruz kalan sıvı sudaki hidrojen bağı ağlarının hiyerarşik kümeleme yöntemi. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>



Şekil 53:

Çeşitli durumlarda ağdaki 1., 2. ve 3. düzeylerdeki hiyerarşik yapıların dağılımı. (a) Çeşitli sıcaklıklarda hidrojen bağlarının (1. düzey yapılar) dağılımı. (b) Çeşitli sıcaklıklarda halkaların (2. düzey yapılar) dağılımı. (c) Çeşitli sıcaklıklarda fragmanların (3. seviye yapılar) dağılımı. (4, 4, 4) sembolünün, üç adet 4 üyeli halka içeren bir fragmanı temsil ettiğine dikkat edin.

Kaynak: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. Kesmeli akıma maruz kalan sıvı sudaki hidrojen bağı ağlarının hiyerarşik kümeleme yöntemi. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Suyun Isı Kapasitesi, Isı İletkenliği ve Yoğunluğu ve Bunların İşlevsel Önemi

1. Suyun Yüksek Isı Kapasitesi

Su, normal koşullar altında tüm sıvı ve katı maddelerden en yüksek özgül ısı kapasitesine sahiptir ve bu özellikte sadece hidrojen gibi birkaç gazdan sonra gelir.¹⁵² Bu, suyun kendi sıcaklığında nispeten küçük bir değişiklikte büyük miktarda ısı enerjisini emebileceği, tutabileceği ve aktarabileceği anlamına gelir.

Suyun ısı kapasitesi, 1 gram suyun sıcaklığını 1 santigrat derece artırmak için gereken ısı miktarı olarak hesaplanır ve standart koşullar altında yaklaşık 4,18 J/(g·°C) değerindedir. Bu özellik, iklim düzenlemesinde anahtar faktörlerden biridir: okyanus suyu gündüzleri ısıyı biriktirir ve geceleri yavaş yavaş serbest bırakır. Yaz aylarında okyanuslar fazla ısıyı emerken, kış aylarında yavaşça serbest bırakarak dev bir termostat görevi görür ve gezegenin sıcaklık dalgalanmalarını azaltır.

2. Suyun Isıl İletkenliği

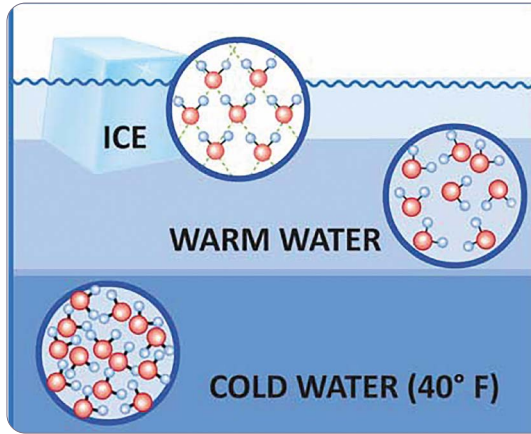
Su, metallere kıyasla nispeten düşük bir ısı iletkenliğine sahiptir, ama diğer birçok sıvıdan daha yüksektir. Isıl iletkenlik, bir maddenin kendi hareketi olmaksızın bir bölümünden diğerine ısı aktarma yeteneğini yansıtır. Standart koşullar altında (25 °C), suyun ısı iletkenliği yaklaşık 0,6 W/(m·K) olup, bu da onu okyanuslar ve diğer su kütlelerinde ısı dağılımı gibi doğal süreçlerde verimli bir ısı iletkeni yapar.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85. baskı (CRC Press, 2004).

Çalışmalar, suyun termal iletkenliğinin belirli bir noktaya kadar sıcaklık arttıkça arttığını göstermektedir¹⁵². Ayrıca, bu değer safsızlıkların veya çözünmüş maddelerin varlığında değişebilir^{153, 154}. Bu özellikler, suyun içinde ısının dağılımını etkiler ve bu da okyanus ile atmosfer arasındaki etkileşimleri anlamak için çok önemlidir.

3. Su Yoğunluğunun Anormal Davranışı

Çoğu maddenin aksine, suyun yoğunluğu sıcaklık değişimlerine göre alışılmadık bir şekilde davranır. Su 4 °C'ye kadar soğuduğunda yoğunluğu artar, ancak daha da soğuduğunda (4 °C'den 0 °C'ye) yoğunluğu azalmaya başlar (Şekil 54). Su donduğunda yoğunluğu yaklaşık %8-9 oranında azalır. Bu, buzun batmak yerine yüzmesinin nedenini açıklar. Bu fenomen, buzun altındaki suyu ve canlıları donmaktan koruduğu ve suyun dibine kadar tamamen donmasını engellediği için su kütlelerinde yaşam için çok önemlidir.



Şekil 54:

Soğuma sırasında su yoğunluğundaki değişimin şematik gösterimi: Su soğudukça moleküller birbirine yaklaşır (yoğunluk artar) ve bir noktaya gelir. Su, yaklaşık 40 derece F (4° C) sıcaklıkta en yoğun halindedir. Su daha da soğudukça, hidrojenler birbirlerine baskı yapar ve buz kristalleri oluşurken belirli bir şekilde hizalanır, genişler ve sıvı sudan yaklaşık yüzde 10 daha az yoğun buz oluşturur. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Suyun Özelliklerinin İklim ve Ekosistemlere Etkisi

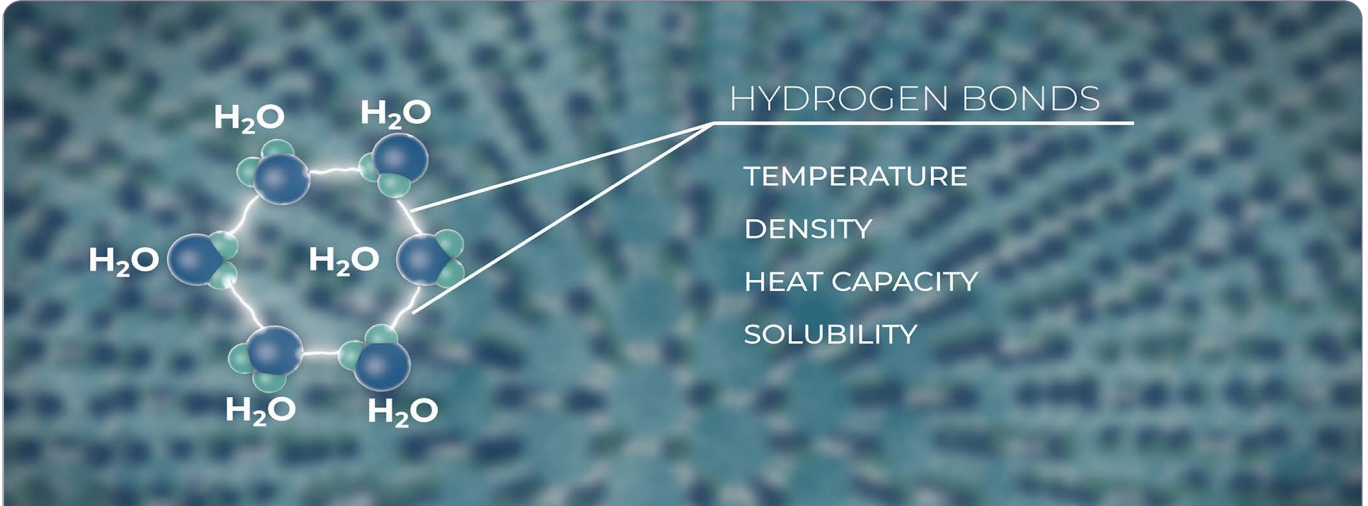
Su sıcaklığındaki değişiklikler, Dünya Okyanuslarının ısıl dengesini ve ısıyı tutma ve aktarma kabiliyetini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu da, Dünya'nın iklim sistemini etkileyecektir.

Bu nedenle, suyun fizikokimyasal özellikleri, özellikle ısı kapasitesi ve termal iletkenliği, gezegenin çevresel dengesinin korunmasında ve iklim süreçlerinin düzenlenmesinde hayati bir rol oynar (Şekil 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85. baskı (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Deniz suyunun termofiziksel özellikleri: mevcut korelasyonlar ve verilerin gözden geçirilmesi. Tuzdan Arındırma ve Su Arıtma 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Deniz suyu çözeltilerinin fiziksel özellikleri: termal iletkenlik. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

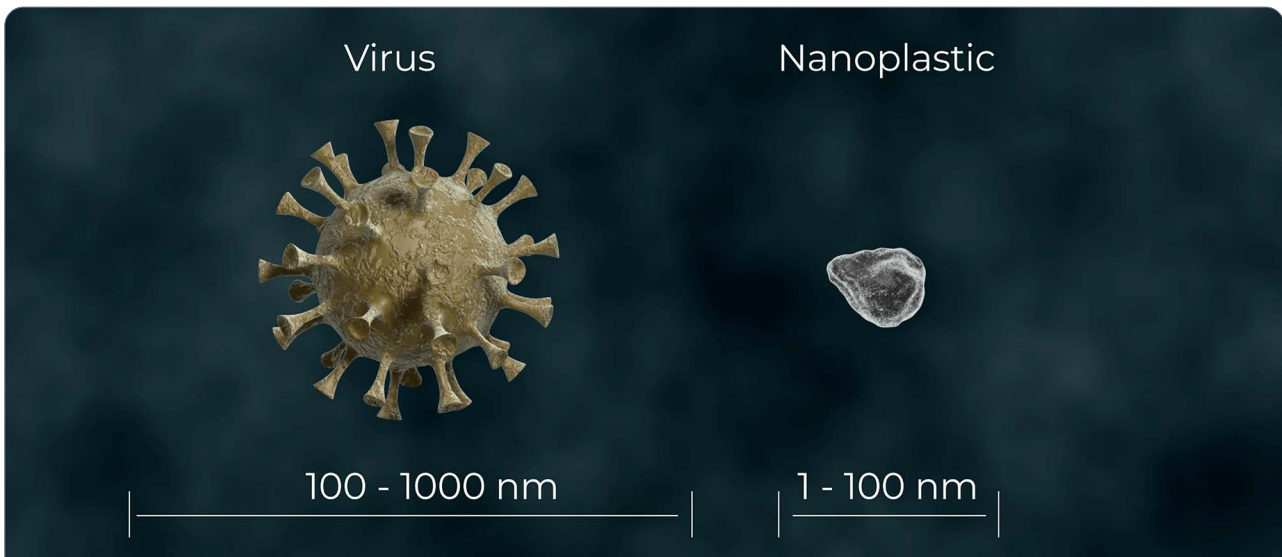


Şekil 55: Su moleküllerindeki hidrojen bağlarının şematik gösterimi ve suyun temel özellikleri üzerindeki etkileri: Hidrojen bağları, suyun yüksek ısı kapasitesine katkıda bulunarak ısının verimli bir şekilde emilmesini ve tutulmasını sağlar. Bu bağlar ayrıca suyun yoğunluğunu (maksimum 4 °C'de) ve polar ve iyonik maddeleri çözme kabiliyetini belirler, bu da suyu evrensel bir çözücü haline getirir.

MNP'lerin Deniz Suyunun Fiziksel Özelliklerini Değiştirmedeki

Petrokimya endüstrisinin ürünleri olan plastikler doğada biyolojik olarak parçalanmaz. Bunun yerine, mikro ve nanoplastik gibi daha küçük parçacıklara ayrılırlar.¹⁵⁵ Bu parçacıklar, özellikle nanoplastikler, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir ve bu da ekosistemleri ve iklim süreçlerini etkileyebilir.

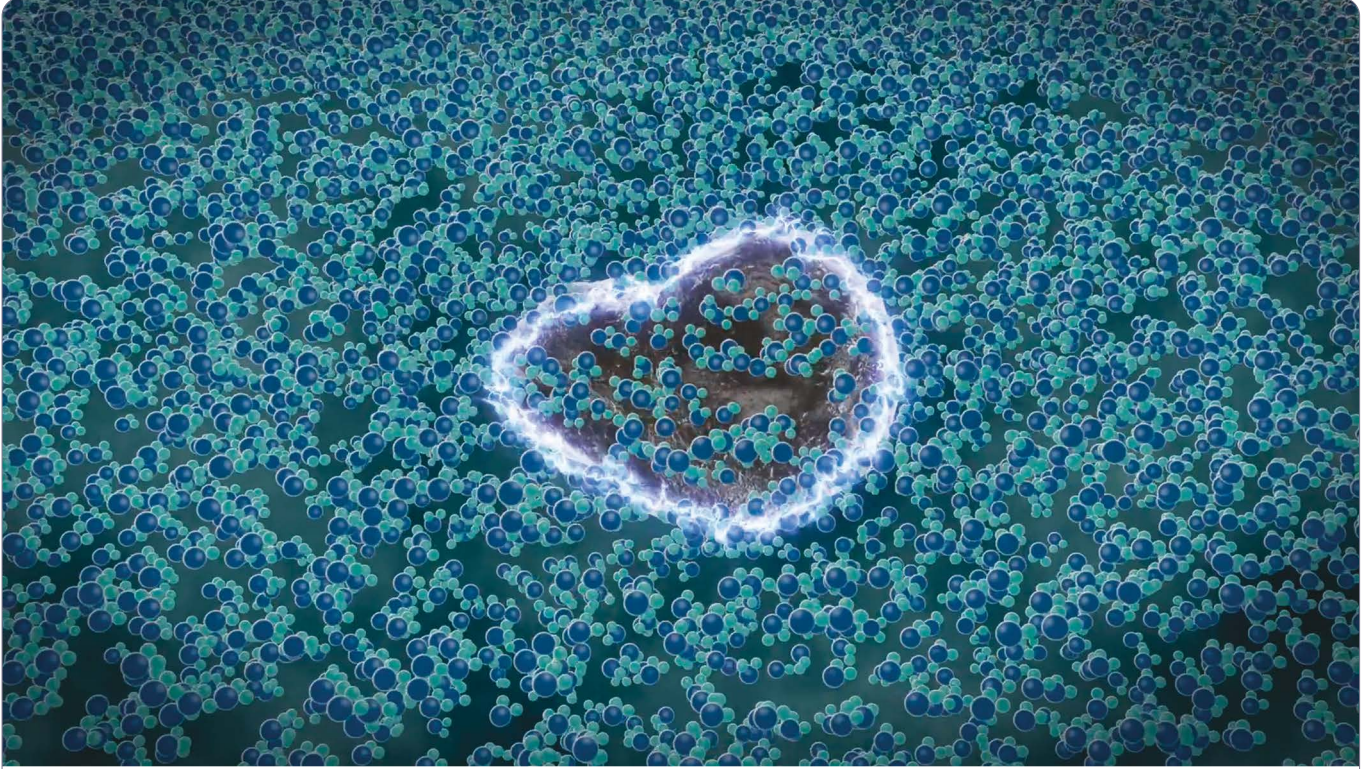
Nanoplastikler, nanometre cinsinden ölçülen parçacıklardır, yani virüslerden daha küçüktürler (Şekil 56).



Şekil 56: Bir virüs ve bir nanoplastik parçacığının boyutlarının şematik karşılaştırması

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Mikroplastik Kirliliği: Küresel Deniz Ekosistemleri Üzerindeki Tehditler ve Etkileri. Sürdürülebilirlik 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Örneğin, azot ve oksijen içeren naylon (poliamid) nanoplastikler, su ile hidrojen bağları oluşturabilir.¹⁵⁶ Nanoplastik parçacıklar suya girdiğinde, su molekülleri arasındaki hidrojen bağlarının düzenli yapısını bozar. Bu, suyun fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilir (Şekil 57). Özellikle, su moleküllerinin hareketliliği azalır ve bu da onların ısı değişim süreçlerine verimli bir şekilde katılma yeteneklerini azaltır. Ayrıca, çeşitli maddeler içeren sulu çözeltilerde, plastik nanopartiküller elektrik yükü kazanabilir.¹⁵⁷



Şekil 57:

Suda yüklü plastik nanopartiküllerin şematik gösterimi: organik veya sentetik safsızlıkların varlığı, pH, sıcaklık veya tuzluluk gibi dengesiz su koşullarına maruz kaldığında, nanoplastiklerin yüzeyi potansiyel olarak aktif hale gelir ve su ortamında elektrik yükleri oluşturabilir.

Kaynak: Rahman, A. M. N. A. A. et al. Suda mikroplastik yüzey etkileşimleri ve potansiyel yakalama yöntemlerinin gözden geçirilmesi. Su Bilimi ve Mühendisliği 17, 361–370 (2024).

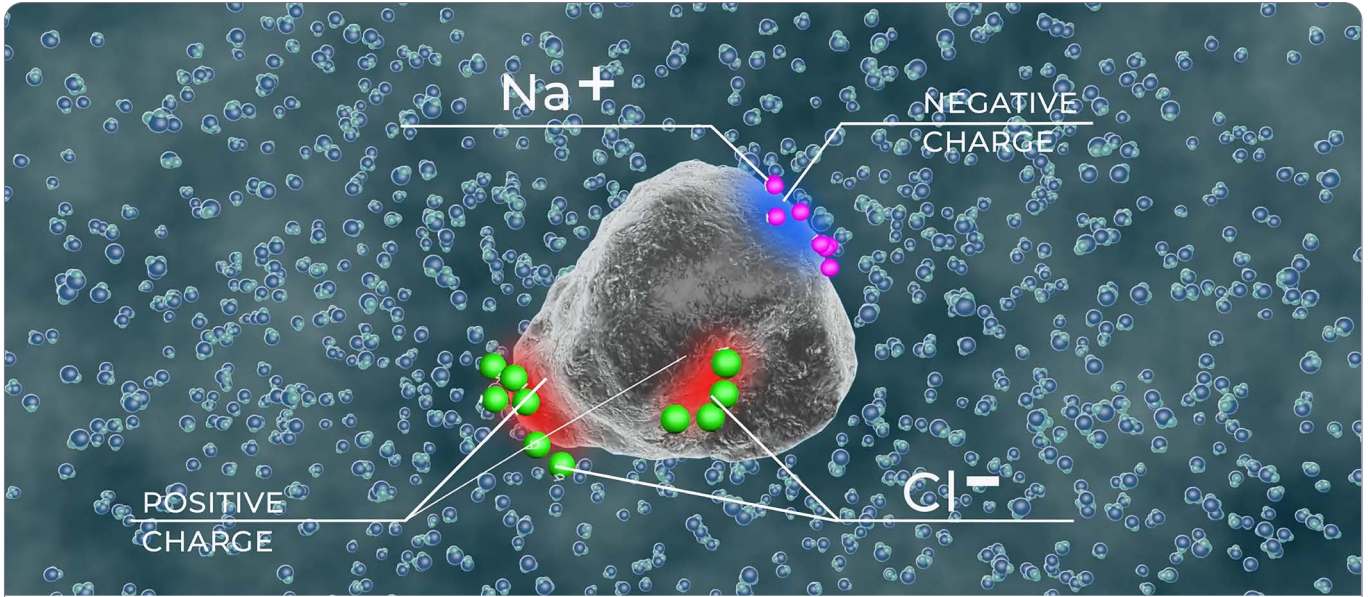
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Bu, deniz suyundaki iyonların (örneğin sodyum (Na^+) ve klor (Cl^-)) oksidasyonu ve adsorpsiyonu gibi yüzeylerinde meydana gelen kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. İyonlarla çevrili yüklü plastik nanopartiküller su moleküllerini çeker ve etraflarında bir hidrat kabuğu oluşturur¹⁵⁸ (Şekil 58).

¹⁵⁶Ivleva, N. P. Mikroplastiklerin ve Nanoplastiklerin Kimyasal Analizi: Zorluklar, Gelişmiş Yöntemler ve Perspektifler. Chem. Rev. 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. et al. Suda mikroplastik yüzey etkileşimleri ve potansiyel yakalama yöntemlerinin gözden geçirilmesi. Su Bilimi ve Mühendisliği 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

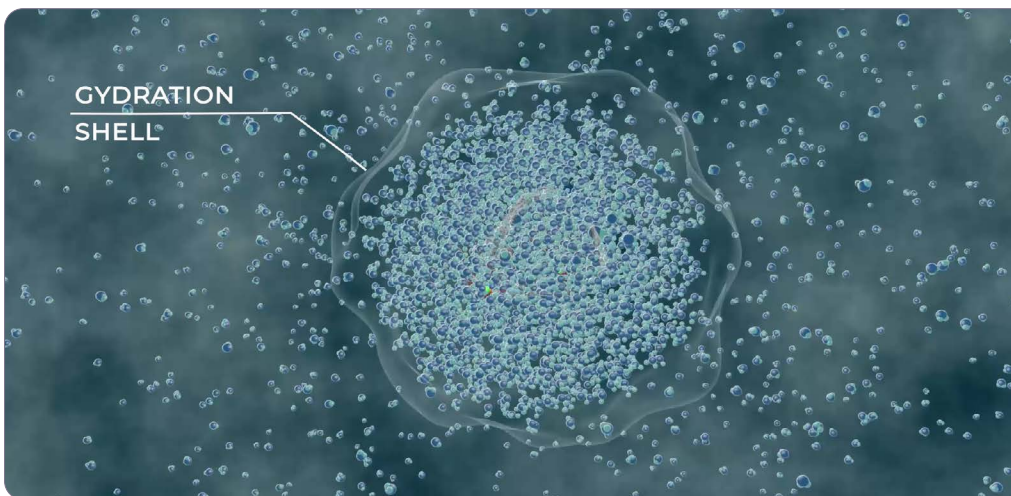
¹⁵⁸Chen, Y. et al. Elektrolitler, hacimsel suyun H-bağ ağında uzun menzilli yönelimsel düzen ve serbest enerji değişikliklerine neden olur. Sci. Adv. 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

**Şekil 58:**

Yüklü plastik nanopartiküllerin etrafında oluşan hidrat kabuğunun şematik gösterimi: Bu süreçte, yüklü nanopartiküller iyonları çeker, etraflarında su moleküllerinin oluşumuna katkıda bulunur ve koruyucu bir hidrat kabuğu oluşturur.

Kaynak: Chen, Y. et al. Elektrolitler, hacimsel suyun H-bağ ağında uzun menzilli yönelimsel düzen ve serbest enerji değişikliklerine neden olur. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Lozan Politeknik Okulu (EPFL) araştırmacıları, iyonların bu hidrat kabuğunun boyutunu, yani bir iyon kaç su molekülünün tepki verdiğini belirlemeye karar verdiler. Bir iyonun, etrafındaki yaklaşık bir milyon su molekülünü etkileyebildiği ortaya çıktı. Bu etki, bir parçacığın yüzey yükü büyük ve adsorbe edilmiş iyon konsantrasyonu yüksekse daha da artar. Bu nedenle, tek bir nanoplastik parçacık milyonlarca su molekülünün özelliklerini değiştirebilir¹⁵⁸ (Şekil 59). Hidrat kabuğuna bağlanan moleküller daha az hareketlidir.¹⁵⁹ Sonuç olarak, suyun toplam ısı kapasitesi azalır.^{160, 161}



Şekil 59: Nanoplastik parçacıkların etrafındaki hidrat kabuğunun şematik gösterimi

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Elektrolitler, hacimsel suyun H-bağ ağında uzun menzilli yönelimsel düzen ve serbest enerji değişikliklerine neden olur. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsässer, T. & Hynes, J. T. Biyomoleküllerin Hidrasyon Kabuklarındaki Su Dinamiği. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

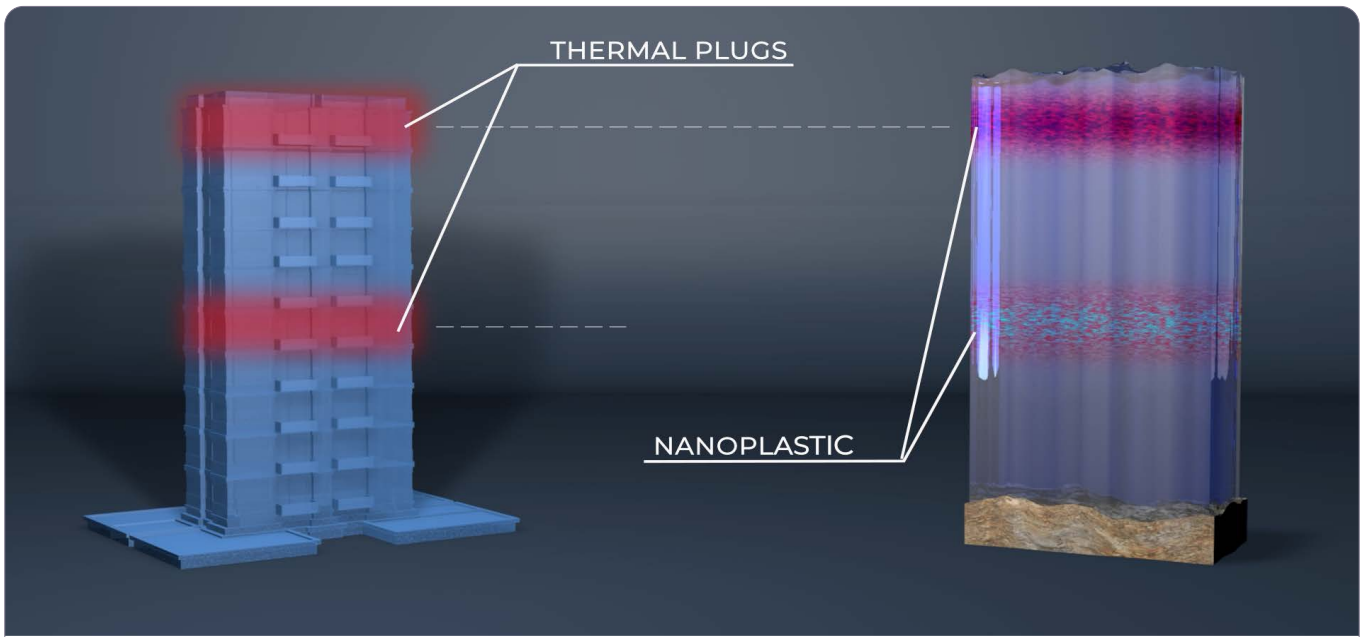
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Dodesilbensülfonik Asit Katkılı Polianilin Parçacıklarının Termal İletkenliği ve Özgül Isı Kapasitesi – Su Bazlı Nanoakışkan. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. Nanoakışkanların özgül ısı kontrolü: Eleştirel bir inceleme. *Uluslararası Termal Bilimler Dergisi* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jthermalsci.2016.03.024>

Hidrojen bağı yapılarının bozulması da ısı iletkenliğinin azalmasına neden olur.¹⁶² Sonuç olarak, su ısıyı etkili bir şekilde aktaramadığı için nanoplastiklerin yakınında ısınmış halde kalabilir.

Okyanusta Mikro ve Nanoplastiklerin Yoğunlaştığı Alanlar

Mikro ve nanoplastikler akıntılarla okyanusun her yerine dağılabilirken, daha yoğun parçacıklar veya kirlenmiş plastikler okyanus tabanında çökebilir. Nanoplastiklerin birikimi, sıcak yüzey suları ile daha soğuk derin sular arasındaki geçiş tabakaları olan termoklin bölgelerinde de gözlemlenmektedir¹⁶³ (Şekil 60).

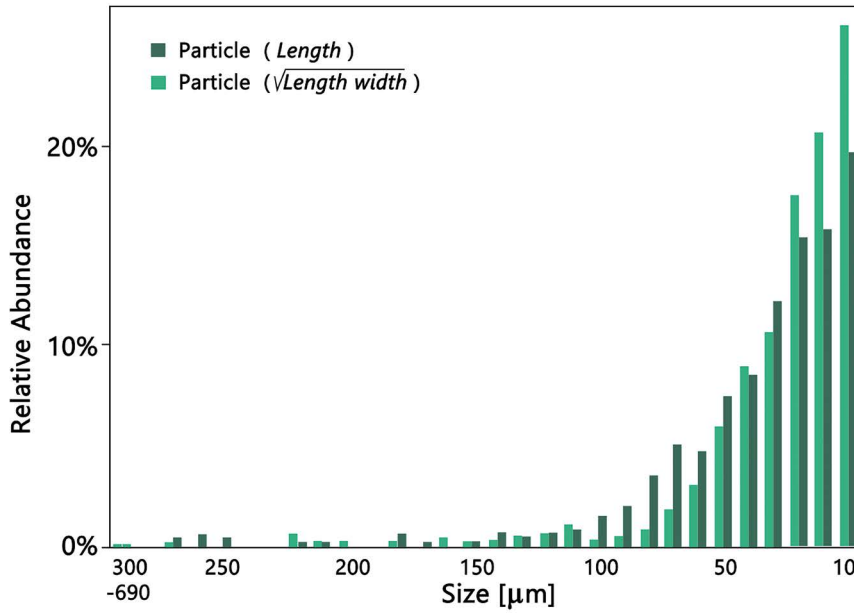


Şekil 60: Bu görüntü, okyanustaki mikro ve nanoplastik konsantrasyon alanları ile 5. ve 10. katlarında termal engeller bulunan çok katlı bir binayı karşılaştırmaktadır. Engeller normal ısı alışverişini engelleyerek ısıya eşit olarak dağılmak yerine bu katlarda birikmesine neden olur. Bir termal kamera, binanın içindeki sıcaklığın engellerin olmadığı benzer bir binaya göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu gösterir. Benzer şekilde, nanoplastikler sudaki doğal ısı değişim mekanizmalarını bozarak okyanusta “termal engeller” oluşturur.

Okyanuslardaki nanoplastik konsantrasyonlarının artması, küresel ısı dengesinde değişikliklere neden olabilir. Bu, okyanus sıcaklıklarının yükselmesine etki ederek iklim değişikliğine yol açabilir. Az miktarda nanoplastik bile ekosistemler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini unutmamak önemlidir. Okyanus yüzey sıcaklığındaki artış, plastik atıkların mikro ve nanoplastiklere parçalanmasını hızlandırır (Şekil 61). Sonuç olarak, bu parçacıkların sayısı artar ve su buharı ile birlikte atmosfere girer. Atmosferdeki mikro ve nanoplastiklerin varlığı, daha fazla ısınmaya katkıda bulunur ve bu da okyanusların ısınmasını yoğunlaştırır. Böylece, süreçlerin birbirini karşılıklı olarak güçlendirdiği bir geri besleme döngüsü oluşur.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Nanoakışkanların Etkili Isı İletkenliği: Ölçüm ve Tahmin. Int J Thermophys 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. Ladoga Gölü Su Sütununda Mikroplastiklerin Dikey Dağılımı. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>



Şekil 61: Analiz edilen tüm istasyonlarda mikroplastik parçacıkların boyutlarına göre göreceli dağılımı (np = 543). Resimler, Raman spektroskopisi ile bulunan ve doğrulanan en küçük (solda) ve en büyük (sağda) MP parçacıklarını göstermektedir.

Kaynak: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Atlantik Okyanusu'nda $\geq 10 \mu\text{m}$ boyutundaki deniz mikroplastiklerinin bolluğu, boyutu ve polimer bileşimi ve modelleme yoluyla belirlenen dikey dağılımı. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

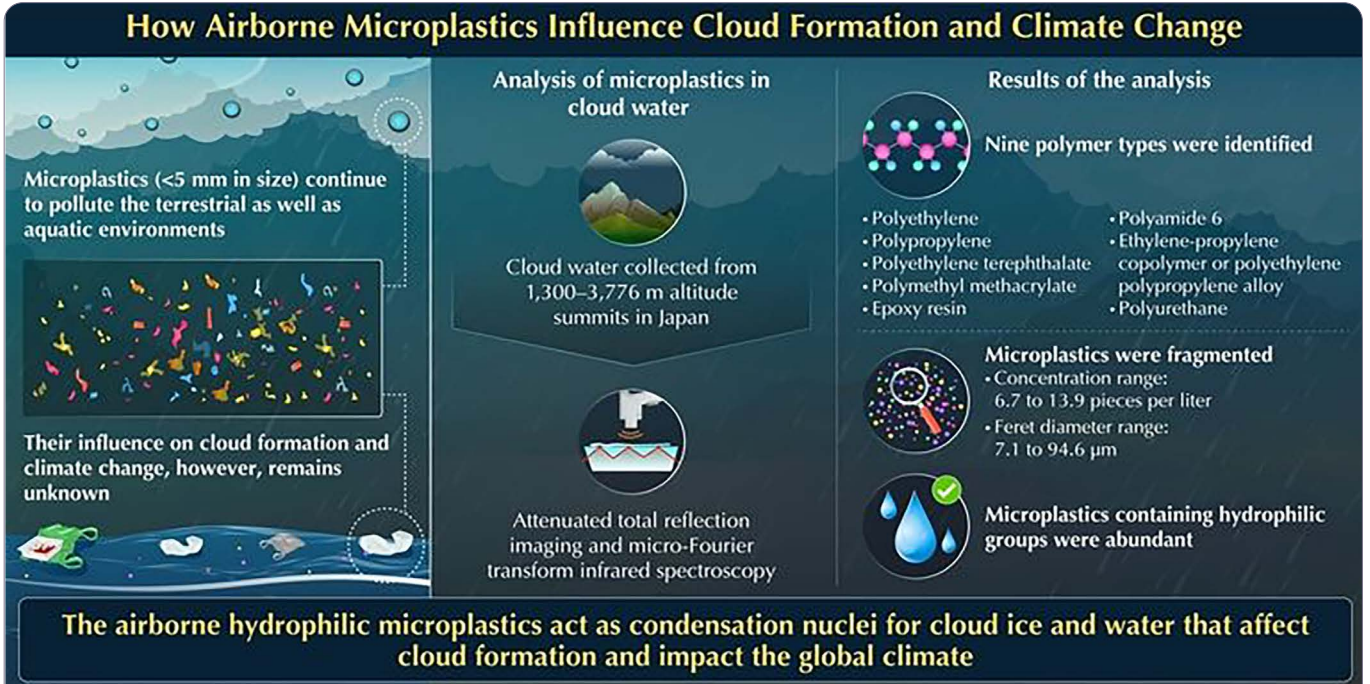
MNP Elektrostatik Yüğü ile Atmosferik Olaylar Arasındaki Bağlantı

Mikro ve nanoplastikler çeşitli yollardan atmosfere girer. Okyanusların ve diğer su kütlelerinin yüzeyinden buharlaşan su buharı, mikro partikülleri havaya taşır.¹⁶⁴ Karada, atmosferik plastiklerin başlıca kaynakları fabrikalar, atık yakma tesisleri ve çöp depolama alanlarıdır. Ayrıca, tarım gübreleri ve plastik malçlar kuruyup rüzgarla dağıldığında mikroplastikler havaya yükselir. Mikroplastik parçacıkları, otomobil lastiklerinin sürtünmesi sonucu da salınır.

Bu ve diğer birçok kaynak, atmosfer kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu süreçler, mikroplastiklerin atmosferde birikmesini ve yayılmasını teşvik ederek ciddi çevre ve iklimle ilgili tehditler yaratır. Atmosfere girdikten sonra, mikro ve nanoplastik parçacıklar su buharı için yoğuşma çekirdeği görevi görebilir. Bu çekirdeklerin sayısı ne kadar fazla olursa, su buharının damlacıklara yoğuşması o kadar hızlı olur. Japonya'nın dağ zirvelerinden toplanan bulut suyu örneklerinde havada mikroplastikler bulunmuştur¹⁶⁵ (Şekil 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Okyanuslardan mikroplastik emisyonu. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Yüksek irtifalarda bulut suyunda bulunan havadan kaynaklı hidrofilik mikroplastikler ve bulut oluşumundaki rolleri. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



Şekil 62: Yüksek irtifalarda bulut suyunda bulunan havada asılı hidrofilik mikroplastikler ve bulut oluşumundaki rolleri

Kaynak: Hiroshi Okochi, Waseda Üniversitesi

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>

66

Penn State Üniversitesi Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri Bölümünden Kimya Profesörü Miriam Friedman, *"Mikroplastikler gibi çok daha fazla aerosol partikülünün bulunduğu kirli bir ortamda, mevcut suyu çok daha fazla aerosol partikülüne dağıtarak, bu partiküllerin etrafında daha küçük damlacıklar oluşur. Damlacık sayısı arttığında yağmur miktarı azalır, ancak damlacıklar yeterince büyüdüklerinde yağmur yağar, bu nedenle damlacıklar yağacak kadar büyümeden önce bulutta daha fazla su toplanır ve sonuç olarak yağmur yağdığında yağış miktarı artar"* dedi.¹⁶⁶

Bu, son yıllarda çeşitli bölgelerde neden anormal yağışların gözlemlendiğini açıklıyor.

¹⁶⁶Pennsylvania Eyalet Üniversitesi Araştırması. Mikroplastikler bulut oluşumunu etkileyerek hava ve iklimi de etkileyebilir. (2024)

<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Bulutlardaki Elektrik Yükleri

Dünya atmosferi, su moleküllerinin hayati bir rol oynadığı karmaşık bir elektrik sistemidir. Benjamin Franklin'in atmosferin elektrikli olduğunu ve gök gürültülü fırtınaların elektrikselsel bir yapıya sahip olduğunu ilk kez 1752 yılında kanıtlamasından bu yana, buhar, sıvı ve buz formundaki suyun bu süreçlerde önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır. Saf su elektrikselsel olarak nötr olmakla birlikte, erime ve donma gibi faz değişiklikleri sırasında ve moleküllerin çarpışmaları sırasında iyonları diğer parçacıklara aktarabilir. Bu, elektrik yüklerinin birikmesine yol açar ve atmosferik elektrikselsel olaylara katkıda bulunur.

Atmosferde, özellikle doğal elektrik alanlarının varlığında, buz kristalleri, aşırı soğutulmuş su damlacıkları ve diğer parçacıklar arasındaki çarpışmalar, yüklerin ayrılmasına neden olur. Bu süreç, gök gürültülü bulutların oluşumu da dahil olmak üzere atmosferik elektriğin gelişiminde önemli bir rol oynar. Ayrıca bulutların ve yağışların oluşumu için de gereklidir. Elektrik yüklü damlacıklar birbirlerine doğru çekilir ve daha büyük damlacıklar halinde birleşmelerini hızlandırır. Bu, nihayetinde yağmur, kar veya dolu gibi yağışlara neden olabilecek bulutların oluşumuna yol açar.



"Yükler gerçekten çok önemlidir ve bulut oluşumunda yükler pratikte her şeydir. Bulduğumuz şey, yüklerin kritik öneme sahip olduğudur," dedi Washington Üniversitesi biyomühendislik profesörü, disiplinlerarası araştırma dergisi WATER'ın baş editörü ve kurucusu Gerald H. Pollack, PhD.¹⁶⁷

1843 yılında Michael Faraday, su damlacıklarının metal yüzeylere sürtünmesiyle elektrik üretilebileceğini ve suyun etkili bir şekilde yüklenebileceğini keşfetti. Bu bulgu, sürtünme, faz geçişleri ve temas elektrifikasyonu yoluyla suyun nasıl elektrikselsel olarak yüklendiğine dair daha fazla araştırmaya yol açtı ve hatta bu etkiyi yeni enerji kaynakları için kullanma çabalarına bile yol açtı.

Nemli havanın, iyonların hareket etmesine ve biriken yükü dağıtmasına izin veren ince bir su filmi oluşturarak yüzey yüklerini nötralize edebildiği bilinmektedir. Ancak bazı durumlarda, suyu emen yüzeyler nemli atmosferden yük biriktirebilir ve bu da çevredeki elektrikselsel ortamı etkileyebilir.¹⁶⁸ Araştırmalar, ağır metallerin mikroplastiklere kolayca bağlanabildiğini ve bu kombinasyonun küresel ekosistemler için ciddi riskler oluşturabileceğini de göstermiştir.

¹⁶⁷AllatRa TV. Okyanusların yok oluşunda insan faktörü: Popüler bilim filmi. Süre 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. Yüksek Bağlı Nem Koşullarında Farklı Metaller Arasında Kendiliğinden Oluşan Gerilim Birikimi Üzerine. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Dahası, mikroplastikler ve yüzeylerindeki madde karışımı sadece diğer kirleticilere yapışmakla kalmaz, aynı zamanda birbirleriyle etkileşime girerek kimyasal özelliklerini de değiştirebilir.¹⁶⁹ Mikro ve nanoplastik parçacıklar atmosfere girdiğinde, atmosferik süreçlerin hassas dengesini bozabilir. Plastik parçacıklar yük taşıyabilir, bu da polar su moleküllerinin çekimini artırarak damlacık oluşumunu teşvik eder. Polen, deniz tuzu veya kurum gibi tipik yoğunlaşma çekirdeklerinden farklı olarak, plastik parçacıklar nötr parçacıklardan daha verimli bir şekilde damlacıkları toplayabilir.¹⁷⁰

Bu, yüklü parçacıkların etrafında su damlacıklarının daha hızlı oluşmaya başladığı anlamına gelir. Bu durum bulut yapısını etkiler ve daha büyük damlacıkların ve hatta anormal büyüklükte buz kristallerinin oluşmasına yol açabilir.¹⁷¹ Örneğin, bir grup araştırmacı tarafından yapılan yakın tarihli bir çalışmada, Japonya'nın dağ zirvelerindeki bulutlarda su çeken yüzeylere sahip plastik peletler bulunmuştur.¹⁷²

Bulut Oluşumu ve Yağış Üzerindeki Etkisi

Mikroplastikler, atmosferdeki buz kristallerinin bulutları oluşturma şeklini etkileyerek yağışların niteliğini, hava tahminlerini, iklim modellemesini ve hatta uçuş güvenliğini etkileyebilir.

Bir çalışma¹⁷³, mikroplastik içeren su damlacıklarının, mikroplastik içermeyen damlacıklara göre 4–10 °C daha yüksek sıcaklıklarda donduğunu, yani daha düşük irtifalarda donduğunu göstermiştir. Tipik olarak, herhangi bir safsızlık içermeyen bir su damlacığı –38 °C civarında donar. Ancak mikroplastiklerin durumunda, plastik türüne bağlı olarak damlacıkların %50'si –18 ila –24 santigrat derecede donmuştur.

Mikroplastik içeren su damlacıkları daha hızlı donarak daha büyük buz parçacıkları oluşturur. Bu parçacıklar hava akımları tarafından yukarı taşınır, tekrar tekrar buz tabakalarıyla kaplanır ve ardından yere düşer. Bu tür bir fenomen, dolu tanelerinin boyutunun artmasına (Şekil 63-64) yol açarak yıkıcı etkilerini şiddetlendirebilir ve buz bulutlarının oluşumunu hızlandırabilir. Sonuç olarak, yağmur ve kar dahil olmak üzere yağışların sıklığı ve şiddeti değişebilir. Bu, iklimi, hidrolojik döngüyü ve ekosistemleri etkileyen zincirleme etkileri tetikleyebilir.

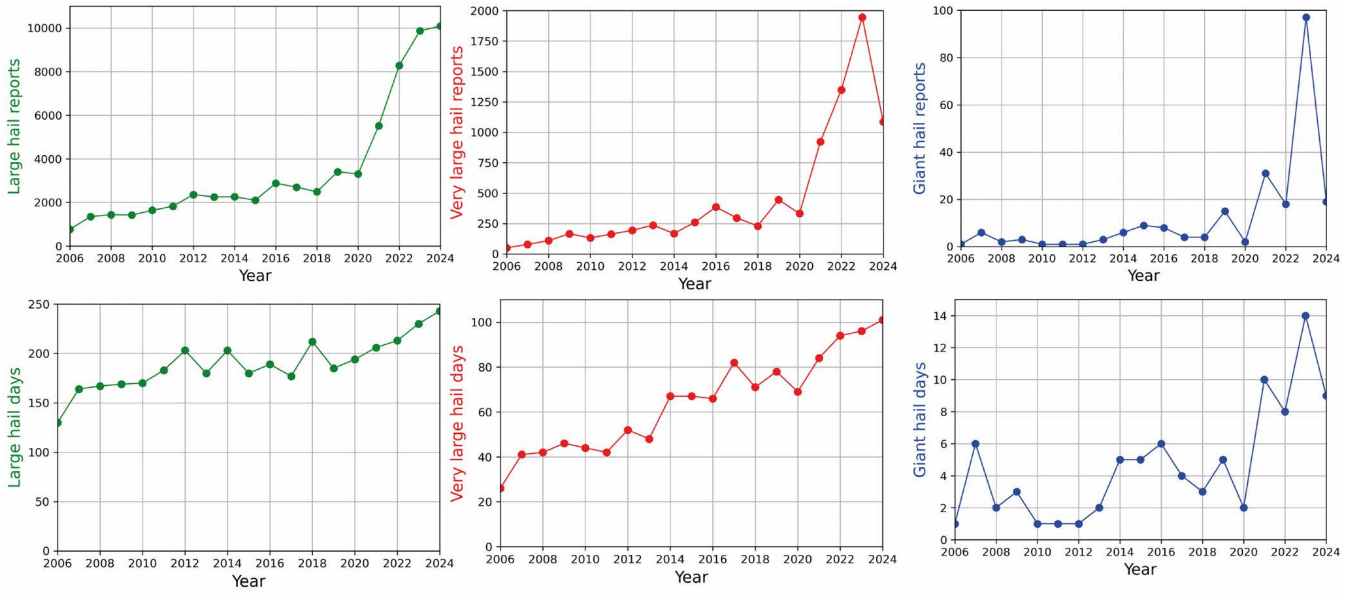
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Çok çözünürlü sistemlerde mikroplastikle bağlanmış kromun sorpsiyon davranışı, türleşme ve toksisitesi. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmosferik elektrik ve bulut mikrofiziği <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (01.05.2025).

¹⁷¹Pennsylvania Eyalet Üniversitesi Haberleri. Mikroplastikler bulut oluşumunu etkiliyor, muhtemelen hava ve iklimi de etkiliyor. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (01.05.2025).

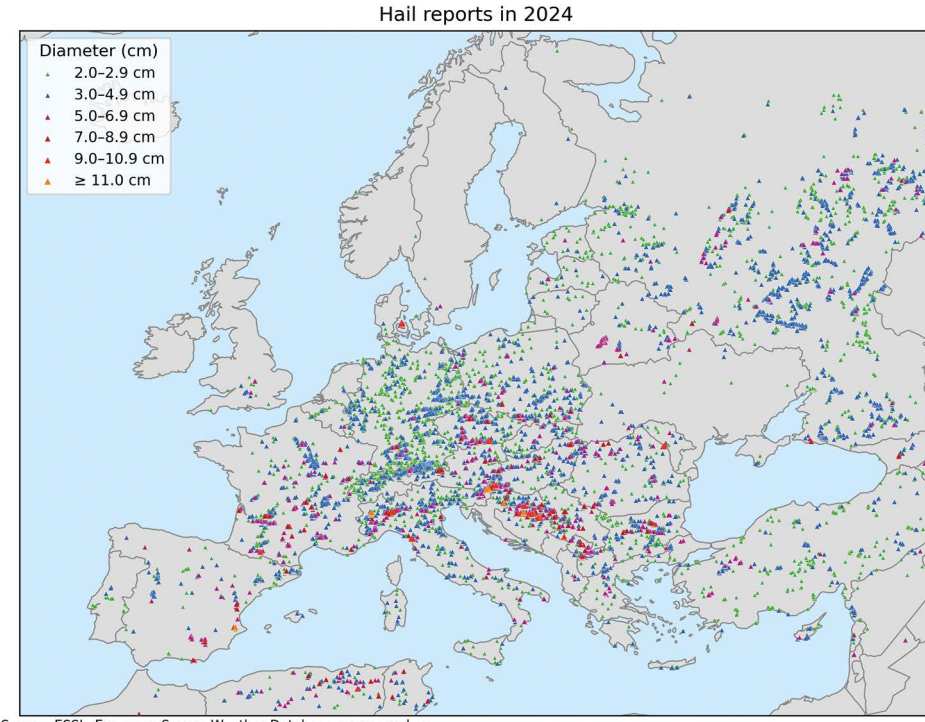
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. ve diğerleri. Yüksek irtifalarda bulut suyunda bulunan havadaki hidrofilik mikroplastikler ve bulut oluşumundaki rolleri. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Saf ve Eskimiş Mikroplastikler, Daldırma Donma Yoluyla Buz Çekirdeği Oluşturabilir. ACS ES&T Air 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>



Şekil 63: 2006'dan 2024'e kadar (0,8+ inç), çok büyük (2+ inç) ve dev (4+ inç) dolu yağışı raporlarının sayısı ve gün sayısı

Kaynak: Avrupa Şiddetli Fırtınalar Laboratuvarı. 2024 dolu fırtınaları
<https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>



Şekil 64: 2024 yılında Avrupa ve çevresindeki bölgelerde bildirilen büyük dolu yağışlarının coğrafi dağılımı

Kaynak: Avrupa Şiddetli Fırtınalar Laboratuvarı. 2024 dolu fırtınaları

<https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Atmosferde nanoplastik parçacıklar bulunduğunda, bulutlar daha düşük irtifalarda (genellikle 1980 metrenin altında) oluşmaya başlar. Bu, bulutların hareket kabiliyetini azaltarak normal yağış düzenini bozar. Sonuç olarak, bazı bölgeler kuraklık yaşarken, diğerleri aşırı yağış alabilir.

MNP'lerin Dünya'nın İklim Dengesi Bozulmasında Rolü

Daha yoğun bulutlar, atmosferin alt katmanlarında ısıyı hapsedmeye başlar ve termal enerjiyi emip Dünya'nın yüzeyine geri yayararak bir battaniye görevi görür. Bu, uzaya kaçan ısı miktarını azaltır ve atmosferin ısınmasına katkıda bulunur. Yükselen sıcaklıklar okyanuslardan buharlaşmanın artmasına neden olurken, havadaki nemin artması ısınmayı daha da artırarak kendini besleyen bir döngü oluşturur. Özellikle, sıcaklıkta her 1 °C artışla, atmosferdeki nem miktarı yaklaşık %7¹⁷⁴ artar ve yıldırım çarpma sıklığı yaklaşık %12¹⁷⁵ artar.



ABD Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi (NCAR) 'nın önde gelen iklimbilimcilerinden ve IPCC raporlarının baş yazarlarından Kevin Trenberth'in belirttiği gibi, **"Bu iki unsur, yani artan sıcaklık ve artan su buharı, atmosferin dengesizliğinin artmasına neden olur. Bu da daha fazla konveksiyona, daha fazla fırtınaya yol açar ve bunların bazıları, daha şiddetli olanlar, gök gürültülü fırtınalara dönüşür. Sonuç olarak, şiddetli gök gürültülü fırtınaların riski artar. Gök gürültülü fırtınalar bir araya gelip birleşirse, tropikal fırtınalarda olduğu gibi, daha şiddetli kasırgalar da oluşabilir. Dolayısıyla, tüm bu faktörler bir araya geliyor. Ve şiddetli fırtınalar, şiddetli gök gürültülü fırtınalar, özellikle dolu yağışı ve bazı yerlerde uygun koşullarda kasırgalara neden olan süper hücre fırtınaları gibi fırtına türlerinin riski artmaktadır."**

Böylece, aşırı elektrik ve atmosferdeki ısı ile birlikte aşırı okyanus ısınması, iklim durumunu kötüleştirerek şiddetli gök gürültülü fırtınalar, kasırgalar, yıldırımlar ve atmosferik elektrik gibi daha yıkıcı hava olaylarına neden olmaktadır.

Atmosferde plastikler sadece çevreyi kirletmekle kalmaz, aynı zamanda bulut oluşumunu ve yağışları etkileyerek iklim süreçlerini de bozar. Atmosferdeki elektrostatik yükü artırır, su buharının yoğunlaşmasını hızlandırır ve bulut yoğunluğunu etkiler — bunlar fırtınaların, gök gürültülü fırtınaların ve diğer aşırı hava olaylarının şiddetini artıracak faktörlerdir. Bu etkinin iklim üzerindeki tam boyutunu anlamamızın eşiğindeyiz ve bu da hem okyanuslarda hem de atmosferde plastik parçacık kirliliğini azaltmak için acil ve kapsamlı önlemlerin alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

¹⁷⁴NASA. Buharlı ilişkiler: Atmosferik su buharı Dünya'nın sera etkisini nasıl güçlendirir? (2022)

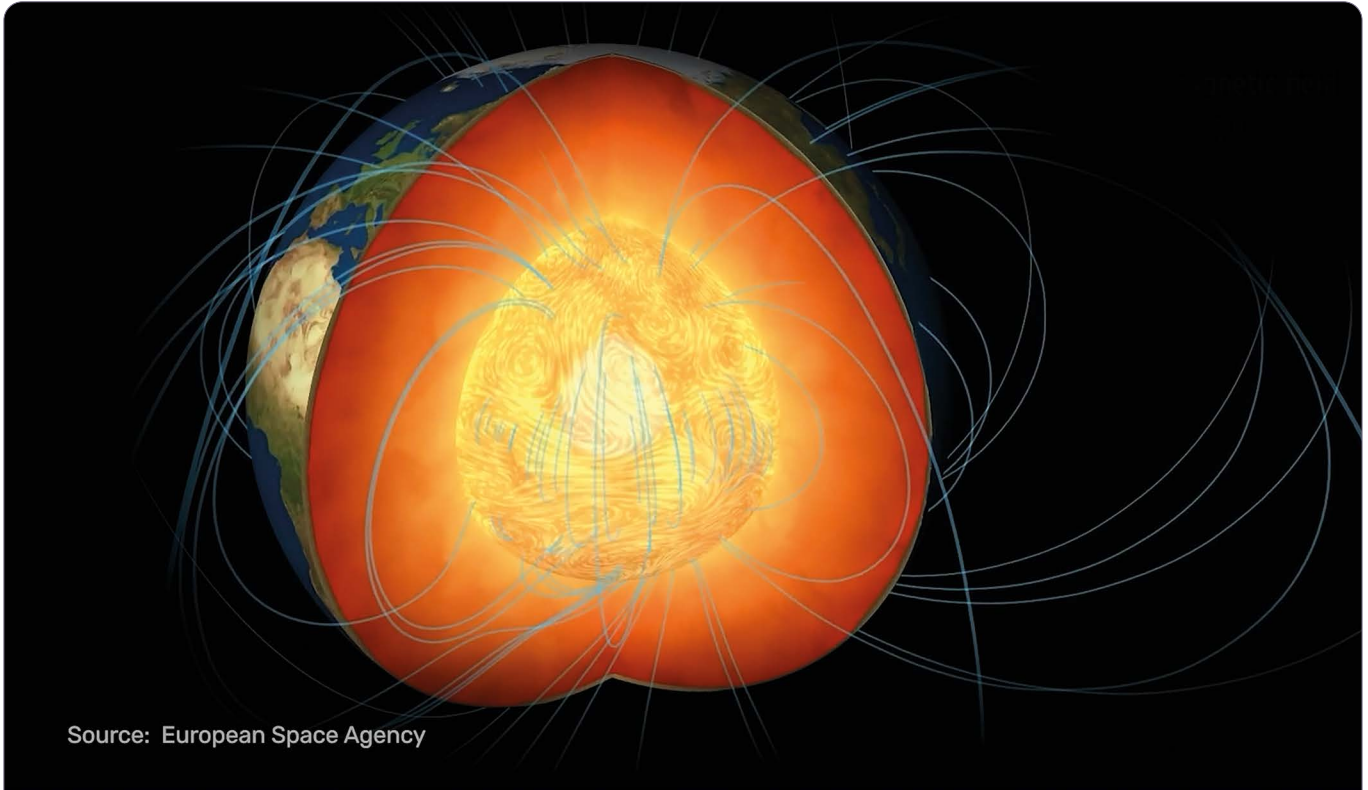
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (01.05.2025).

¹⁷⁵ Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Küresel ısınma nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri'nde yıldırım çarpmalarında öngörülen artış. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Okyanus ve Dünya'nın Manyetik Alanı Arasındaki Etkileşim

Okyanuslar, Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'ini kaplar ve sadece devasa su rezervuarları değildir: gezegenin karmaşık elektrik sistemlerinde çok önemli bir rol oynarlar. Okyanuslar, Dünya'nın manyetik alanı ile etkileşime girer ve elektromanyetik süreçlere aktif olarak katılır.

Dünya'nın manyetik alanı, gezegenin yüzeyini güneş rüzgarı ve kozmik radyasyondan koruyan doğal bir kalkan görevi görür. Bu alan olmasaydı, atmosferimiz yok olurdu. Bu jeomanyetik alan, gezegenin derinliklerinde, metallere dönüşen sıvı dış çekirdeğin katı iç çekirdeğin etrafında hareket ederek jeodinamik olarak bilinen bir süreçle doğal bir jeneratör oluşturduğu yerde oluşur (Şekil 65).



Source: European Space Agency

Şekil 65: Jeomanyetik alan oluşum sürecinin şematik gösterimi: Dünya'nın sıvı dış çekirdeği, katı iç çekirdeğinin etrafında dönerek, gezegenin manyetik alanını üreten jeodinamik olarak bilinen doğal bir jeneratör görevi görür.

Kaynak: Avrupa Uzay Ajansı (ESA) – <https://www.esa.int/>

Dünya'nın manyetik alanı, hem okyanuslarda hem de atmosferde elektriksel olaylarla etkileşime girer. Tuz ve çözünmüş iyonlar açısından zengin deniz suyu, yüksek iletkenliğe sahiptir ve elektrik akımını iletebilir. Bu akımlar da gezegenin manyetik alanı ile etkileşime girerek, Dünya'nın jeomanyetik sisteminin dinamiklerini etkileyen karmaşık elektromanyetik süreçler oluşturur.

Daha önce de belirtildiği gibi, özellikle mikro ve nanoplastiklerden kaynaklanan okyanus kirliliği, deniz suyunun kimyasal ve elektriksel özelliklerini değiştirebilir. Kirlletici maddelerin konsantrasyonu ne kadar yüksekse, doğal elektromanyetik süreçler o kadar fazla bozulur. Kirli su buharlaştığında, metal, mikroplastik ve diğer maddeleri de beraberinde taşıyarak atmosferik süreçleri etkileyebilir.

Buharlaşma sırasında, mikroskobik damlacıklar ve aerosoller mikro ve nanoplastikleri, ağır metalleri¹⁷⁶ ve diğer kirlleticileri atmosfere taşıyabilir ve burada yerel elektromanyetik koşulları etkileyebilir. Bu süreç, manyetik bir nesneyi mıknatısın yakınına koymaya benzer: manyetik alanı bozar ve belirli alanlarda gücünü zayıflatır.

Okyanus kirliliğinin Dünya'nın manyetik alanı üzerindeki etkisi, özellikle küresel iklim değişikliği bağlamında daha fazla araştırma gerektirir. Bu süreçlerin daha iyi anlaşılması, bilim insanlarının gezegenin iklim sistemi ve ekosistemleri üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmesine yardımcı olabilir.



¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Çok çözünürlü sistemlerde mikroplastikle bağlanmış kromun sorpsiyon davranışı, türleşme ve toksisitesi. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

MİKRO VE NANOPLASTİKLERİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ



Plastikler sadece okyanuslarımızı ve su yollarımızı kirletmekle ve deniz yaşamını öldürmekle kalmıyor, aynı zamanda hepimizin içinde var ve plastik tüketiminden kaçınmamız mümkün değil. Bu krizi çözmek için acil ve küresel çapta eylemler alınması gerekiyor.

Marco Lambertini
WWF Uluslararası Genel Direktörü

21. Yüzyıl Salgınlarında Ortaya Çıkan Risk Faktörleri Olarak Mikro ve Nanoplastikler

Son 30 yılda kalp krizi, felç, kanser, diyabet, alerji ve iltihaplı bağırsak hastalıklarında istikrarlı bir artış görülmektedir. Dünya çapında hem çocuklarda hem de yetişkinlerde bağışıklık fonksiyonlarında bir düşüş gözlemlenmektedir. Kısırlık giderek yaygınlaşmaktadır. Kısırlık sorunu yaşayan birey ve çiftlerin sayısına ilişkin veriler sınırlı olsa da, Dünya Sağlık Örgütü yetişkin nüfusun yaklaşık %17,5'inin¹⁷⁷ — dünya çapında yaklaşık her 6 kişiden 1'inin — kısırlık sorunu yaşadığını tahmin etmektedir.

2010 yılından bu yana zihinsel yeteneklerde bir düşüş gözlemlenmektedir. Gelişmiş ülkelerde bile yetişkinlerin %25'i temel matematik problemleriyle mücadele etmektedir; Amerika Birleşik Devletleri'nde bu rakam %35'e ulaşmaktadır. Dikkat süresi, mantıksal düşünme ve basit görevleri çözme yeteneği kötüleşmektedir. Çeşitli demans ve bilişsel bozuklukların yaygınlığı artmaktadır.¹⁷⁸

Ruh sağlığı bozukluklarındaki artış, fiziksel hastalıkların artışını geride bırakmıştır.¹⁷⁹ Anksiyete bozuklukları, otizm, depresyon, bipolar bozukluk ve dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (DEHB) salgın boyutlarına ulaşmaktadır.

Mikro ve nanoplastiklerin bu sağlık sorunlarının gelişiminde rol oynadığına dair kanıtlar artmaktadır.

¹⁷⁷ Dünya Sağlık Örgütü. Küresel olarak her 6 kişiden 1'i kısırlıktan etkilenmektedir. (2023)

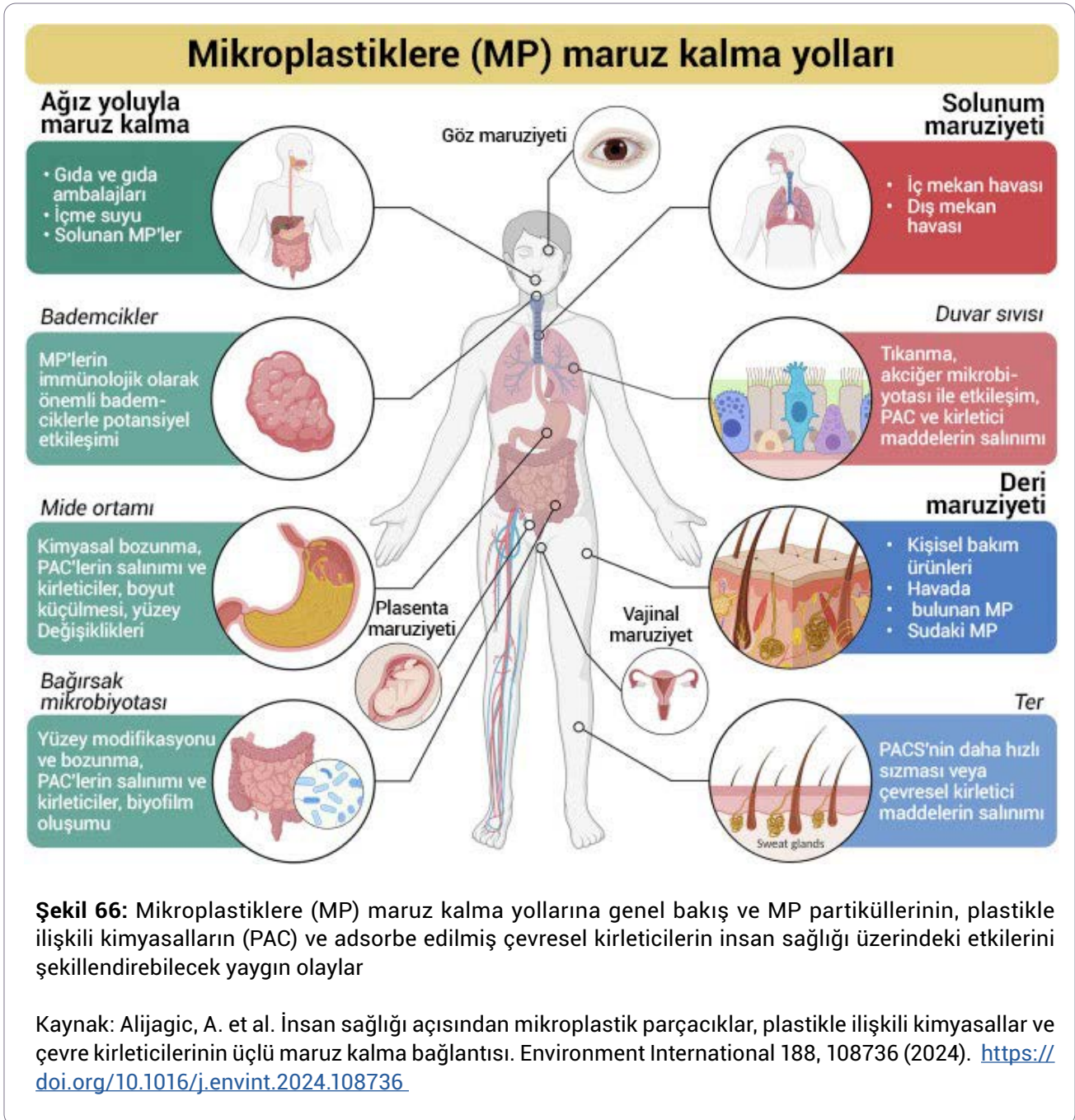
<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁷⁸ Financial Times. İnsanlar beyin gücünün zirvesini geçti mi? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Sağlık Hizmetleri Raporu 2024: Ruh sağlığı en büyük sağlık sorunu olarak görülüyor. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

MNP Toksisitesinin Moleküler Mekanizmaları: DNA, Mitokondri ve Hücre Zarlarının Tahribatı

Mikro ve nanoplastikler (MNP'ler), çevrede en yaygın insan kaynaklı kirlilik türleri arasındadır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle plastik parçacıklar, coğrafi ve ekolojik engelleri aşarak uzun mesafeler kat edebilir. Mikro ve nanoplastiklerin insan bedenine girmesinin başlıca yolları, sindirim (su ve gıda yoluyla), solunum ve deri yoluyla emilimdir¹⁸⁰ (Şekil 66).



¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Mikroplastikler ve insan sağlığı: bağırsak mikrobiyomunun bozulması ve kronik hastalık risklerinin ortaya çıkarılması. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Bölüm 1: "Çevrede Plastikler:

Sorunun Ölçeği"nde belirtildiği gibi, deniz ortamı ikincil mikroplastiklerin ana kaynağıdır. Tahminlere göre, deniz esintileri her yıl yaklaşık 136.000 ton mikroplastığı kıyı bölgelerine taşır. Ayrıca, atık su ve yağmur suyu sistemleri dahil olmak üzere kentsel alanlardaki açık su kütleleri, plastik parçacıkların birikmesi ve daha da yayılması için önemli merkezler haline gelmiştir ve konsantrasyonları önceki tahminleri %90'a kadar aşabilir.

Gıda ürünleri, MNP'lerin insan bedenine girmesinin başlıca yoludur. Bitkiler, kök sistemleri aracılığıyla nanoplastikleri biriktirebilir: sulama veya yağmur sırasında parçacıklar toprağa girer ve suyla emilir, odun dokusu boyunca hareket eder ve yaprak ve meyve dokularında birikir.¹⁸¹

En yüksek plastik parçacık konsantrasyonları elma, armut, havuç ve brokoli gibi mahsullerde bulunmuştur.

Deniz ürünleri, MNP'lerin transferi için başka bir yoldur. Deniz organizmaları tarafından mikroplastiklerin yutulması, tüm beslenimsel seviyelerde kaydedilmiştir. Newcastle Üniversitesi'nin araştırmasına göre, ortalama bir kişi yılda 250 grama kadar mikroplastik tüketebilir — bu, haftada yaklaşık 5 gram veya bir plastik kredi kartının ağırlığına eşittir. Ayrıca, bebek maması ambalajları da dahil olmak üzere plastik kaplar mikrodalga fırında ısıtıldığında, yüzey alanının her santimetrekaresi başına 2 milyardan fazla nanopartikül ve 4 milyon mikroplastik parçacık gıdaya karışabilir.

Mikroplastikler içme suyunda yaygın olarak bulunmaktadır. Araştırmalar, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki musluk suyu örneklerinin %90'ına kadarının MNP içerdiğini göstermektedir. Kirlenmenin başlıca kaynakları arasında atık su akıntıları, endüstriyel emisyonlar ve havadaki plastiklerin atmosferik birikimi bulunmaktadır. Kirlenmiş su buharlaştığında, plastik parçacıkları atmosfere yükselebilir ve daha sonra yağmur veya karla birlikte düşebilir. 11 ABD ulusal parkında yapılan bir araştırmada, sadece 14 ayda yağışla birlikte 1.000 tondan fazla plastik parçacığın düştüğü kaydedildi. Bu miktar, 120 milyon plastik şişe üretmeye yeter.

MNP'lerin aerosol yoluyla bulaşması, insanlar için en tehlikeli maruz kalma yolları arasında sayılmaktadır. Plastik parçacıkları okyanusların ve su kütlelerinin yüzeylerinden havaya yükselir, hava akımlarıyla taşınır ve atmosferik aerosollerin bir parçası haline gelir. Tahminlere göre, büyük bir şehirde bir yetişkin iki saatlik bir yürüyüş sırasında 106.000 mikroplastik parçacığı soluyabilir. Su kütlelerinin yakınındaki bölgelerde bu rakam on kat daha yüksek olabilir.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Bitkilerde Nano/Mikroplastiklerin Alınması ve Birikimi: Eleştirel Bir İnceleme. Nanomalzemeler 11, 2935 (2021).. <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Amerikan Kardiyoloji Koleji konferansında (ACC.25) sunulan yeni bir araştırma, istenmeden yutulabilen veya solunabilen mikroplastiklere daha fazla maruz kalmanın, kronik bulaşıcı olmayan hastalıkların yaygınlığının artmasıyla ilişkili olduğunu ortaya koydu.



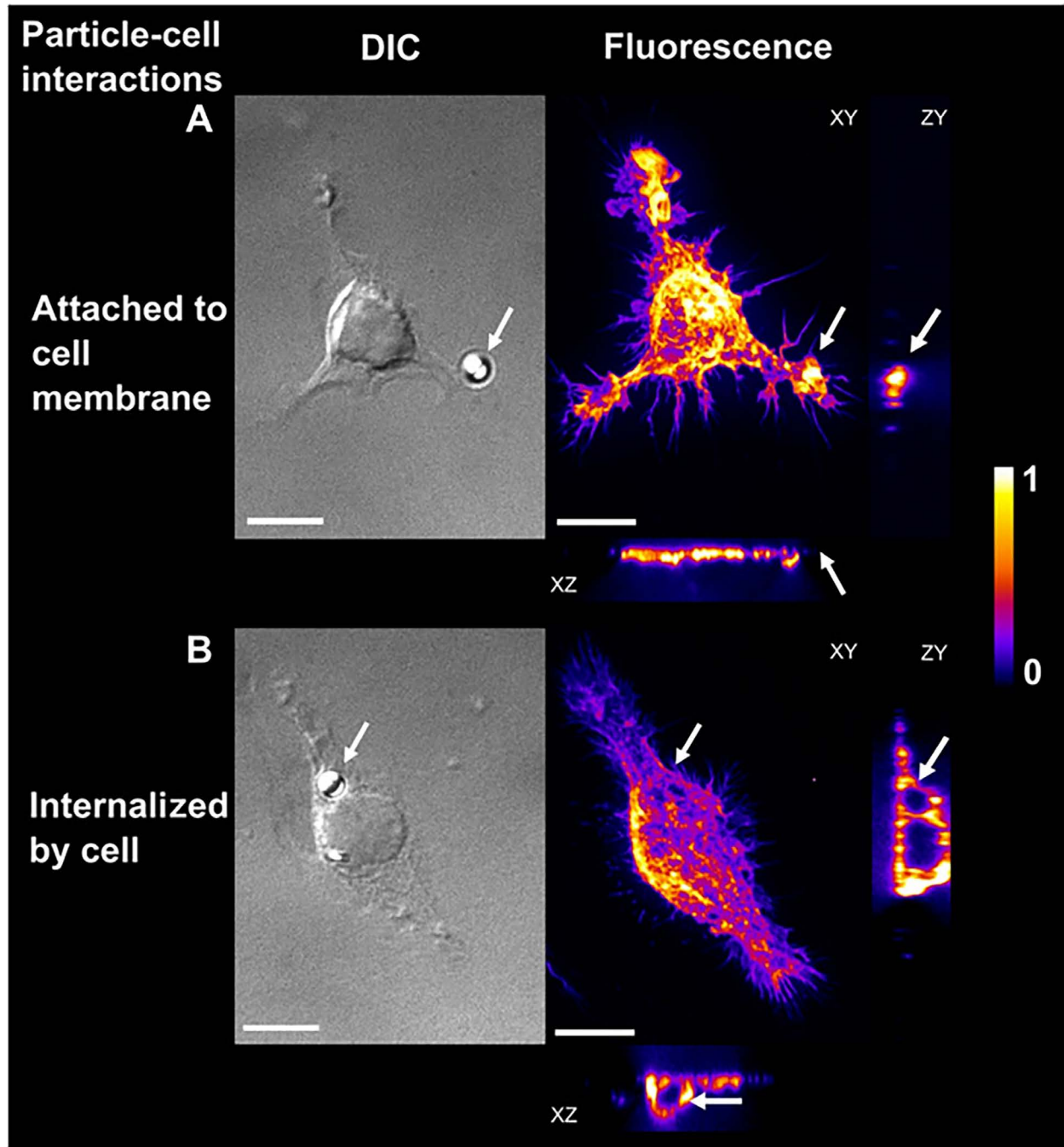
Ohio'daki Case Western Reserve Tıp Fakültesi'nde araştırma veri bilimcisi ve çalışmanın baş yazarı olan Sai Rahul Ponnana, ***"Bu çalışma, mikroplastik maruziyetinin kardiyovasküler sağlık, özellikle yüksek tansiyon, diyabet ve felç gibi kronik, bulaşıcı olmayan hastalıklar üzerinde etkisi olduğuna dair ilk kanıtları sunuyor" dedi. "Analizimize 154 farklı sosyoekonomik ve çevresel özelliği dahil ettiğimizde, mikroplastiklerin kronik bulaşıcı olmayan hastalıkların yaygınlığını tahmin etmede ilk 10'da yer alacağını beklemiyorduk."***¹⁸²

Mikro ve nanoplastiklerin bağırsak, akciğer, beyin ve plasenta gibi biyolojik bariyerleri geçebildiği ve aşabildiği bulunmuştur.¹⁸³ Tatlı suya veya deniz suyuna maruz kalan mikroplastikler, yüzeylerinde biriken biyomoleküller sayesinde hücrelere daha kolay nüfuz eder (Şekil 67). Bu biyomoleküller, mikroplastiklerin sindirim sisteminden geçmesine ve dokulara entegre olmasına yardımcı olan bir kaplama (eko-korona) oluşturur. Bu kaplama, bir "Truva atı" gibi partiküllerin hücrelere girmesini kolaylaştırır.¹⁸⁴

¹⁸²Amerikan Kardiyoloji Koleji. Yeni kanıtlar mikroplastikleri kronik hastalıklarla ilişkilendiriyor. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin insanlar üzerindeki toksikolojik etkisi: etkileşimin mekanik yönünün anlaşılması. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴Ramsperger, A. F. R. M. et al. Çevresel maruziyet, mikroplastik parçacıkların hücrelere içselleştirilmesini artırır. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>



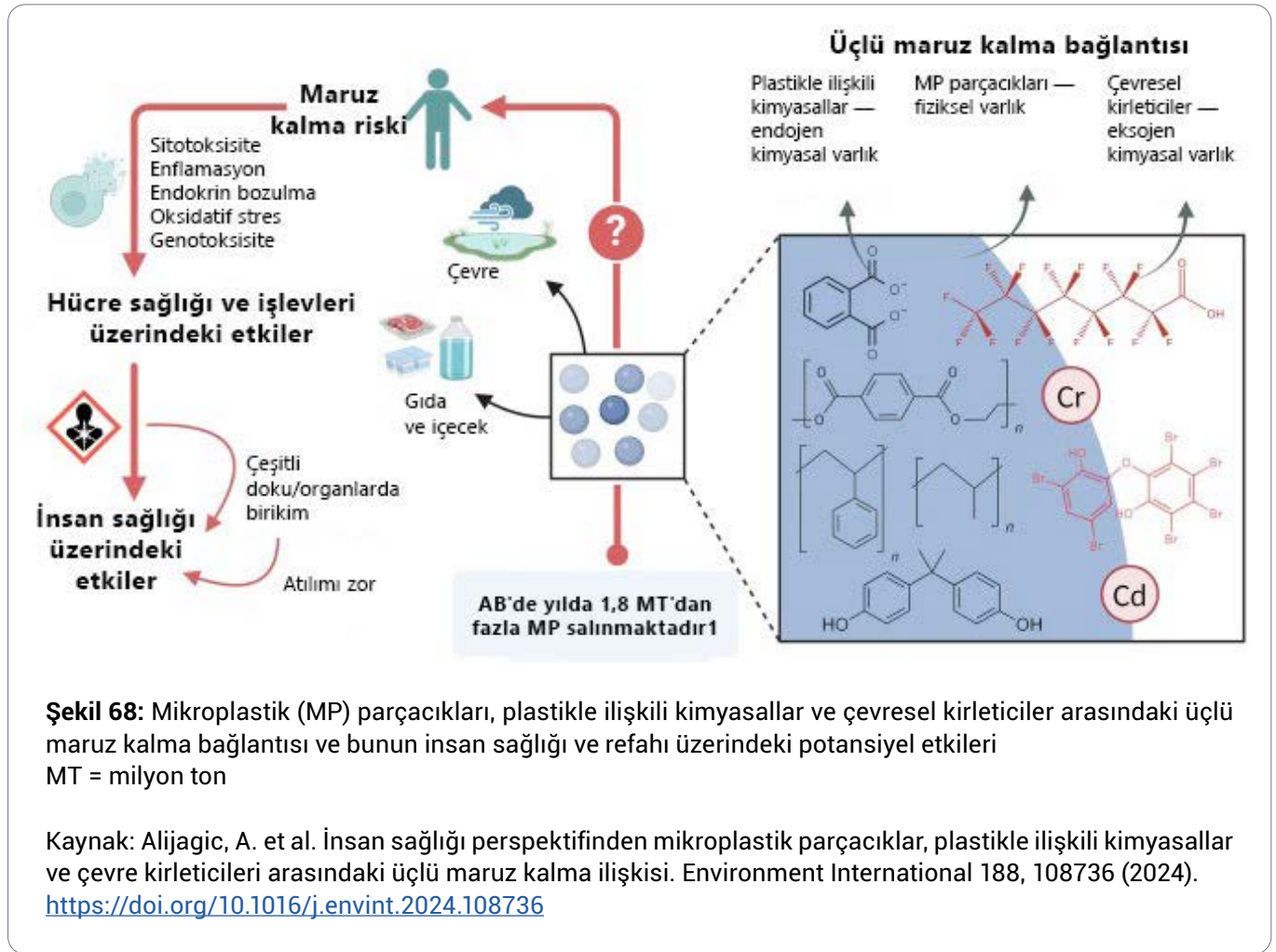
Şekil 67: 2 hafta boyunca tatlı suya maruz kalan mikroplastik parçacıkların hücrelerle etkileşimlerinin görüntüleri

DIC: Parçacık-hücre etkileşimlerinin diferansiyel girişim kontrast mikroskobu görüntüleri. Floresan: Floresan etiketli filamentli aktin içeren hücrelerin dönen disk eş odaklı görüntüleri (yanlış renkli görüntü, rastgele birimleri gösteren maksimum yoğunluk projeksiyonu). Üç boyutlu eş odaklı görüntülerin XY, YZ ve XZ projeksiyonları, hücre zarlarına bağlanan mikroplastik parçacıkları (A) veya içselleştirilmiş mikroplastik parçacıkları (B) ayırt etmeyi sağlar. Oklar mikroplastik parçacıkların konumunu gösterir. Ölçek çubukları, 10 μm .

Kaynak: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Çevresel maruziyet, mikroplastik parçacıkların hücrelere içselleştirilmesini artırır. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Mikroplastiklerin toksisitesini etkileyebilecek birçok faktör vardır, bunlar arasında boyut, şekil, yüzey yükü, hava koşullarına maruz kalma/yaşlanma süreci, adsorpsiyon vb. sayılabilir.¹⁸⁵ Daha küçük parçacıklar hücrelere daha kolay nüfuz eder ve daha belirgin oksidatif stres yaratır. Mikroplastiklerin yüzey yükü, hücreler tarafından ne kadar verimli bir şekilde alınacağını belirleyen anahtar faktörlerden biridir, çünkü yapışmayı etkiler. Ayrıca, mikroplastikler polimerler ve çeşitli kimyasal katkı maddelerinden oluşur ve bu da zararlı etkilerini daha da artırır.¹⁸³

Mikro ve nanoplastik parçacıklar, plastiklerde kullanılan kimyasal bileşikler ve plastiklerin emdiği çevre kirliliği, karmaşık¹⁸⁶ ve zararlı bir şekilde birlikte etki ederek insan sağlığı için önemli bir tehdit oluşturur (Şekil 68).



Şekil 68: Mikroplastik (MP) parçacıkları, plastikle ilişkili kimyasallar ve çevresel kirlenmeler arasındaki üçlü maruz kalma bağlantısı ve bunun insan sağlığı ve refahı üzerindeki potansiyel etkileri
MT = milyon ton

Kaynak: Alijagic, A. et al. İnsan sağlığı perspektifinden mikroplastik parçacıklar, plastikle ilişkili kimyasallar ve çevre kirlenmeleri arasındaki üçlü maruz kalma ilişkisi. *Environment International* 188, 108736 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

¹⁸⁵Li, Y. et al. Mikroplastiklerin Potansiyel Sağlık Etkileri: Çevresel Dağılım, İnsan Maruziyeti ve Toksik Etkilerin Gözden Geçirilmesi. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Alijagic, A. et al. İnsan sağlığı açısından mikroplastik parçacıklar, plastikle ilişkili kimyasallar ve çevre kirlenmelerinin üçlü maruziyet bağlantısı. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

Sadece bir gram mikroplastik, 24.000 nanogram kadar kalıcı organik kirletici madde içerebilir.¹⁸⁷ Bu maddeler oldukça zehirlidir, organizmalarda birikir ve düşük konsantrasyonlarda bile zarar verebilir.

Mikroplastikler, diğer kirleticileri de daha tehlikeli hale getirebilir,¹⁸⁸ çünkü hem plastik kendisi hem de yüzeyindeki kimyasal karışım diğer kirleticilere yapışmakla kalmaz, aynı zamanda onlarla etkileşime girerek kimyasal özelliklerini de değiştirir.

Araştırmalar, mikro ve nanoplastiklere maruz kalmanın çeşitli biyolojik organizmalara ciddi toksisiteye neden olduğunu göstermektedir:

- **Makromoleküller:** DNA ve gen hasarı, gen ifadesinde bozulma ve protein transkripsiyonunda değişiklik.
- **Organel hücreleri:** Değişmiş hücre bölünmesi, hücresel toksisite, programlı hücre ölümü, oksidatif stres reaksiyonu, metabolizma, kalsiyum iyonlarında artış.
- **Doku:** Enflamasyon, fibroz ve kemik dokusu erimesi.
- **Organlar:** Bağışıklık tepkileri, organ fonksiyon bozukluğu, nörotoksisite, kanserojen oluşumu, beslenme değişikliği, metabolik ihtiyaçta değişiklik ve enerji rezervlerinin yeniden dağılımı.
- **Hayvan ve İnsan Popülasyonları:** Doğurganlıkta azalma, büyümede yavaşlama ve popülasyonda azalma.

Bu etkiler, mikro ve nanoplastiklerin biyolojik sistemler üzerindeki çok seviyeli etkisini vurgulamaktadır.¹⁸⁹

1. Hücre Fonksiyonlarının Bozulması

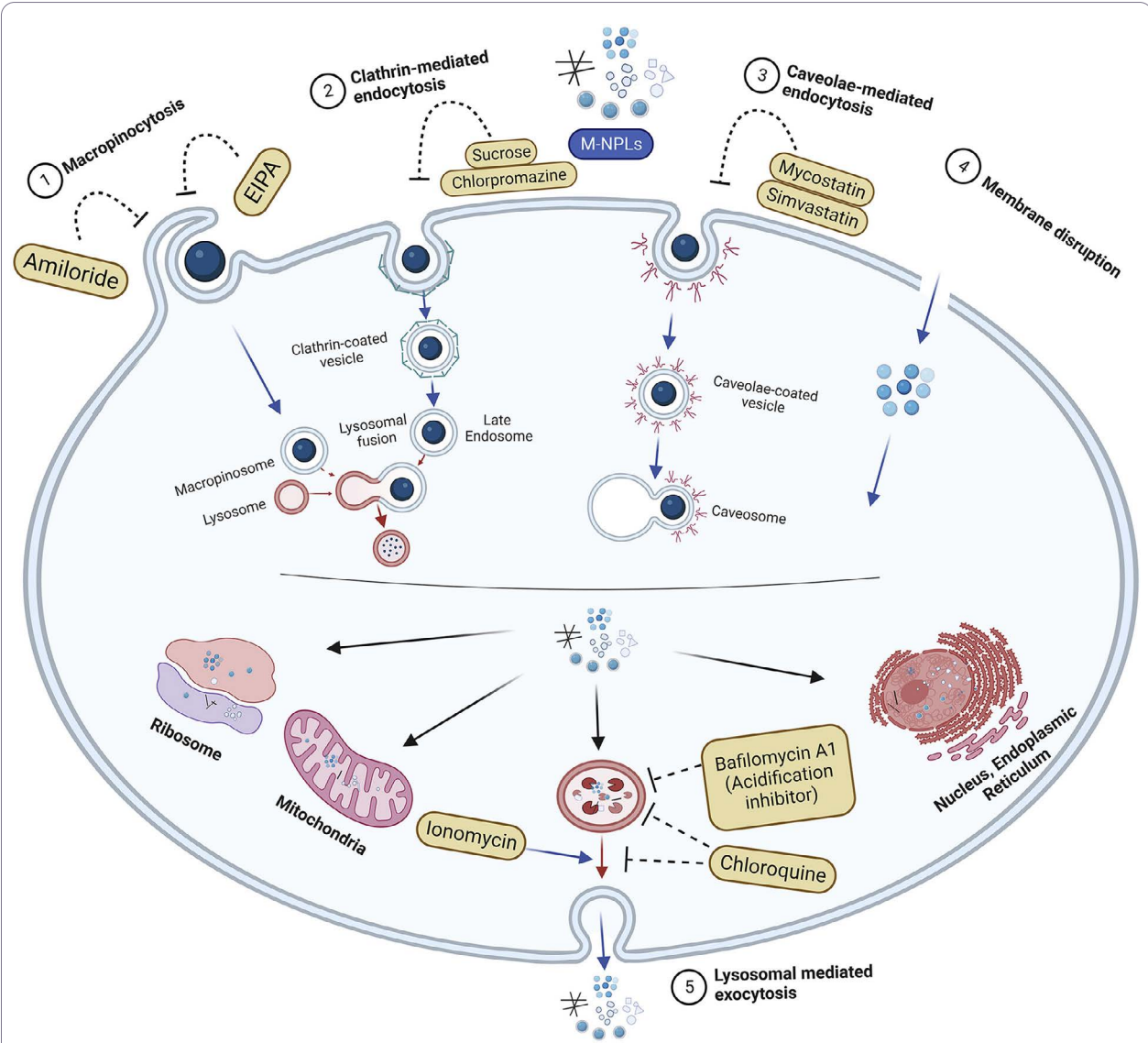
Mikro ve nanoplastiklerin etkisi altında insan bedeninin tahribatı hücre düzeyinde başlar.¹⁹⁰ MNP'ler, çeşitli bağlar (örneğin hidrojen, halojen) veya hidrofobik, van der Waals ve elektrostatik kuvvetler aracılığıyla hücre zarlarıyla etkileşime girer. MNP'ler, dengeleyici bir faktör olarak hücre zarlarının bütünlüğünü ve işlevini bozar (Şekil 69).

¹⁸⁷ Shanwei Hükümeti. Çevre sağlığı ile ilgili içerik. İnsanbedeninde ilk kez bulunan mikroplastikler sağlığa zararlı mı? İşte cevap. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Çoklu çözünürlüklü sistemlerde mikroplastikle bağlanmış kromun sorpsiyon davranışı, türleşme ve toksisitesi. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/mikro plastik, beyine giren görünmez bir tehdit. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. İnsan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin alımı, toksisitesi ve moleküler hedeflerine ilişkin son bulgular. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>



Şekil 69: M-NPL'lerin hücresel alımı ve salımı. M-NPL'ler çeşitli endositoz türlerini kullanır.

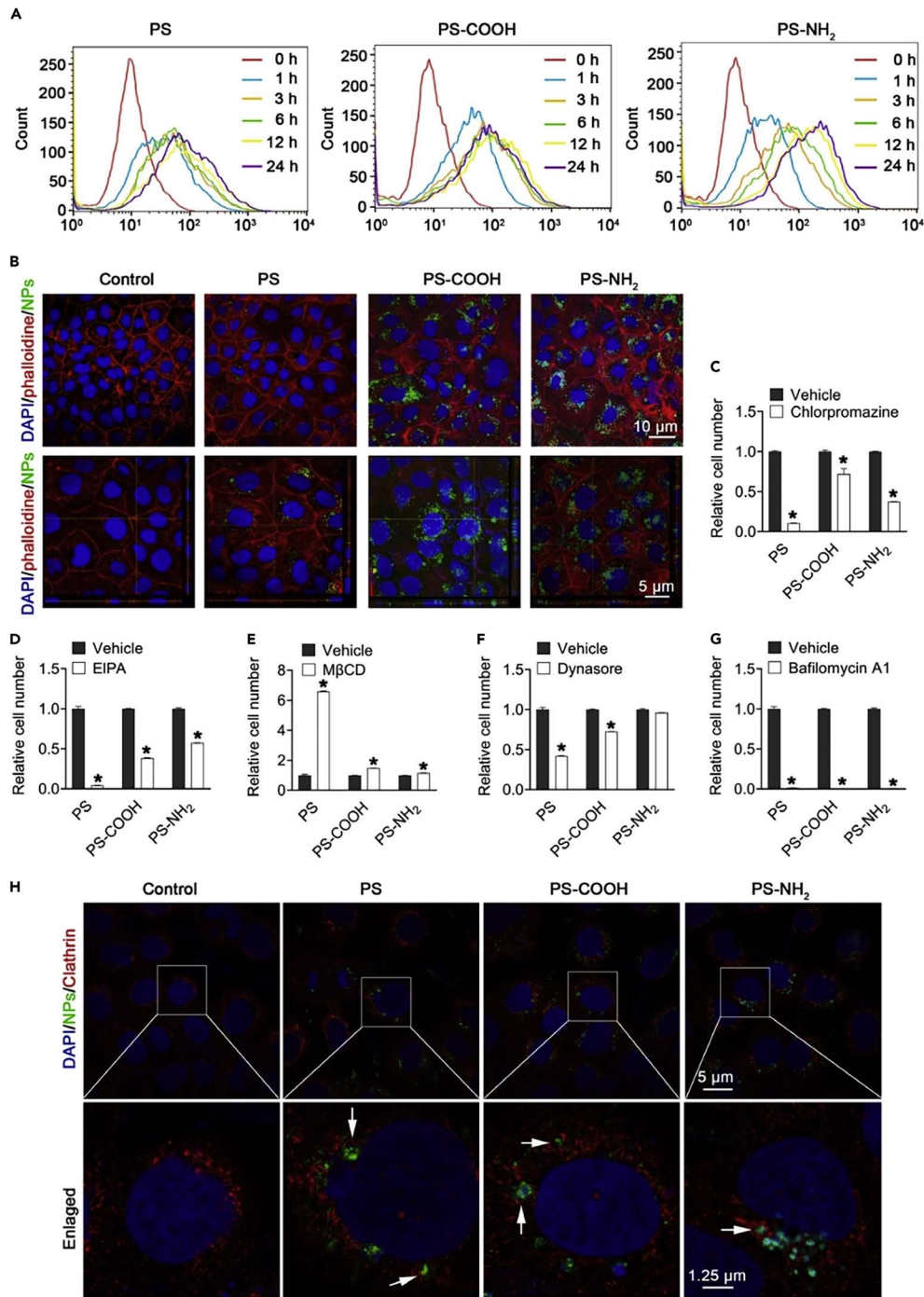
(1) Makropinocitoz, (2) Klatrin aracılı endositoz, (3) Caveolæ aracılı endositoz ve içselleştirilmek için hücre zarının bozulması. M-NPL'ler, 4) lizozomal aracılı endositoz yoluyla hücrelerden salınır.

Kaynak: Khan, A. & Jia, Z. İnsan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin alımı, toksisitesi ve moleküler hedefleri hakkında son bilgiler. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Küçük boyutları nedeniyle, MNP'ler insan hücrelerine kolayca nüfuz edebilir (Şekil 70). Küçük boyutları ve biriken elektrostatik yükleri, MNP'lerin insan bedeni üzerinde sistemik bir etki yaratmasını sağlar.¹⁹¹

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Hücre içi nanoplastiklerin genotoksik ve nörotoksik potansiyeli: Bir derleme. *Uygulamalı Toksikoloji Dergisi* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>



Şekil 70: NPL'leri içselleştiren Caco-2 hücreleri

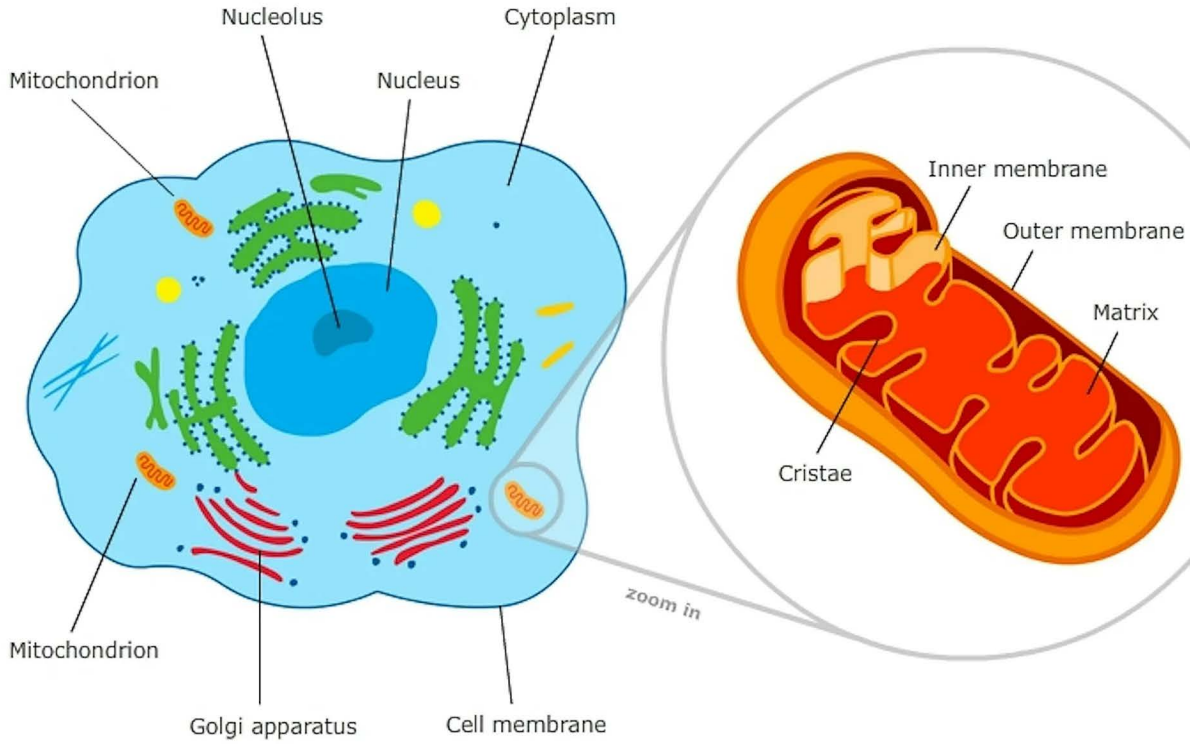
(A–G) Akış sitometrisi (A) ve konfokal mikroskopi (B) kullanılarak Caco-2 hücreleri tarafından NPL'lerin içselleştirilmesinin analizi. Klorpromazinin (C), EIPA (D), MβCD (E), dynasore (F) ve bafilomycin A1 (G) ile 1 saat ön işlemden geçirilmiş Caco-2 hücrelerinin akış sitometrisi analizi, ardından 24 saat NPL'lerle son işlem. Konfokal mikroskopi ile incelenen klatriin aracılı veziküllerde NPL'lerin lokalizasyonu (H). Elsevier'in izniyle alınmıştır.

Kaynak: Khan, A. & Jia, Z. İnsan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin alımı, toksisitesi ve moleküler hedeflerine ilişkin son bulgular. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Hücre düzeyinde yıkıcı etkilerinin temel bir yönü, hücre zarlarına, mitokondriye ve DNA'nın tahribatına yol açmasıdır. Elektrostatik yüklü mikro ve nanoplastik parçacıklar, hücrelerin, özellikle nöronların zar potansiyelini bozarak spontan elektrik sinyallerine, hücreler arası iletişim bozukluklarına veya hücre ölümüne neden olabilir.

Hücre içinde, nanoplastiklerin yıkıcı etkisinin ana hedefi, hücrenin hayatta kalması ve iyileşmesinden sorumlu temel organeller olan mitokondriyadır (Şekil 71). Hücrenin “enerji santrali” olarak işlev görmek için, mitokondriyalar genel sağlık, strese direnç, kronik hastalıkların gelişimi ve yaşlanma sürecini etkileyen çok işlevli roller oynar.



© 2007-2011 The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

Şekil 71: Bir hücre ve mitokondrinin şematik gösterimi

Mitokondriyal fonksiyonun düzgün çalışması, hücrelerin hayatta kalması, homeostaz ve enerji üretimi için hayati öneme sahiptir. Mitokondriyal yapı ve fonksiyonlar, mitokondriyal biyogenez, dinamikler (füzyon ve fizyon), mitofaji ve mitokondriyal katlanmamış protein yanıtı (UPRmt) gibi süreçleri içeren mitokondriyal kalite kontrol sistemi tarafından korunur. Mitokondriyal disfonksiyon veya hasar, nörodejeneratif bozukluklar, kardiyovasküler hastalıklar, yaşa bağlı hastalıklar, diyabet ve kanser dahil olmak üzere birçok insan hastalığının başlangıcı ve ilerlemesi ile ilişkilendirilmiştir. Çevresel stres ve kirlenmeler, mitokondriyal hassasiyeti artırabilir ve disfonksiyonu tetikleyebilir.

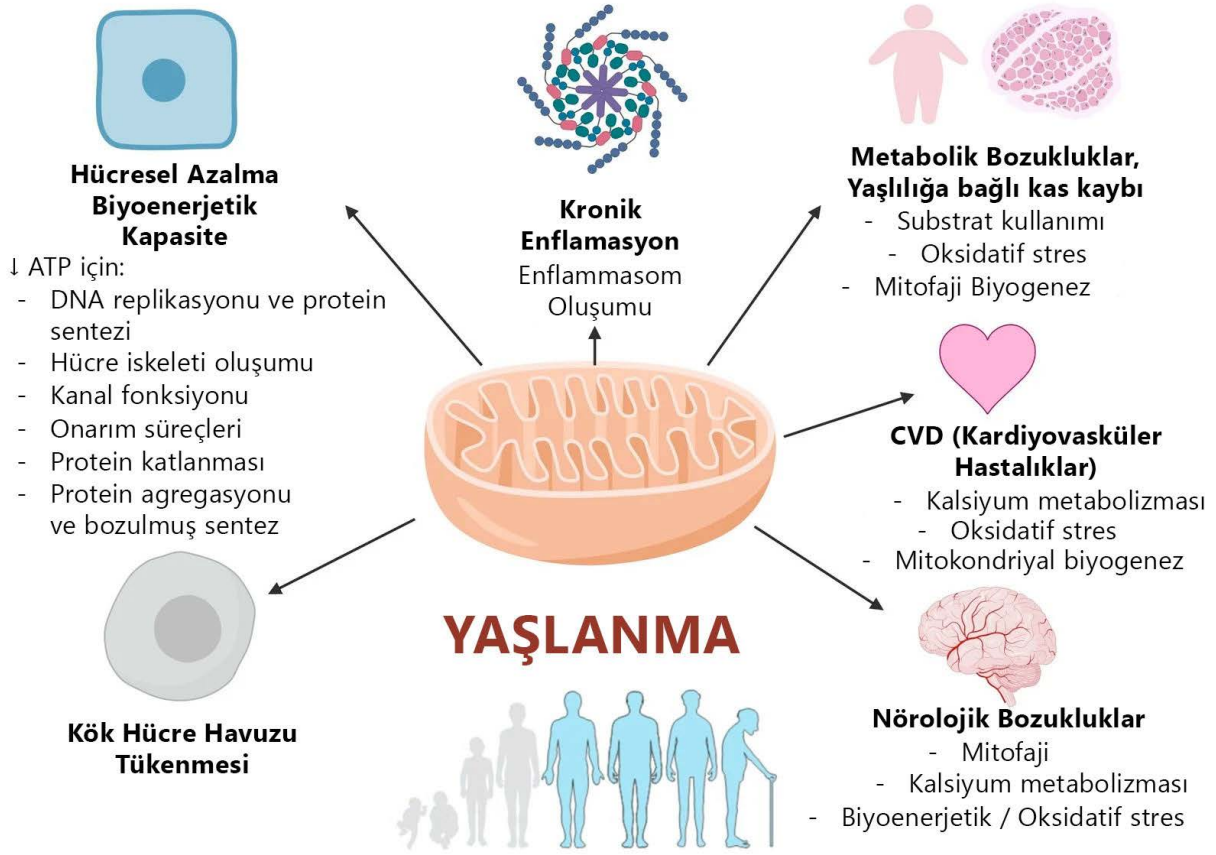
Mikro ve nanoplastiklerin mitokondriyal sağlık üzerindeki etkisine dair kanıtlar giderek artmaktadır. MNP'lerin oksidatif stresi indüklediği ve reaktif oksijen türlerinin üretimini artırdığı, sonuçta mitokondriyal membran potansiyelini bozduğu gösterilmiştir. Bu parçacıklar insan bedenindeki biyolojik bariyerleri geçerek hücreler tarafından emilebilir ve mitokondriyal dinamikleri, biyoenerjisi ve sinyal yollarını değiştirerek hücre metabolizmasını ve işlevini etkileyebilir.

Mitokondrinin hem hücresel hem de genel sağlıkta kritik rolü göz önüne alındığında, MNP'ler mitokondriyal bütünlüğü için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Mevcut bulgular, sadece çevreyi korumak için değil, aynı zamanda insan sağlığını korumak için de MNP kirliliğinin yaygın sorununu acilen ele almanın gerekliliğini vurgulamaktadır.¹⁹²

Mitokondri, kas kasılmasından sinir impulslarının iletilmesinden hormon üretimine ve hücre bölünmesine kadar tüm biyolojik süreçlere enerji sağlayan evrensel enerji molekülü olan ATP'yi sentezler. Karbonhidrat, yağ ve amino asitlerin metabolizmasında rol oynayarak bedeninin metabolik dengesini korumaya yardımcı olur.

Mitokondri ayrıca, hasarlı veya potansiyel olarak tehlikeli hücrelerin birikmesini önleyen kritik öneme sahip bir süreç olan hücre ölümünü veya apoptozu düzenler. Bu sistemdeki bozukluklar, kanser, otoimmün bozukluklar ve nörodejeneratif hastalıkların gelişimi ile bağlantılıdır. Ek olarak, mitokondri, reaktif oksijen türlerinin (ROS) seviyelerini düzenleyerek antioksidan savunmada önemli bir rol oynar. Bu sistem bozulduğunda, hücresel hasar birikir, yaşlanma hızlanır ve kronik iltihaplanma ve hastalık riski artar (Şekil 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mikro ve nanoplastik toksisitesinin hedefi olarak mitokondri. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

**Şekil 72:**

Çevre kirliliğinin neden olduğu mitokondriyal disfonksiyon, çeşitli hastalıklara yol açabilir.

Kaynak: Borisova, O. Mitochondria medicine. Open Longevity. (2019) https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Mitokondri, anne tarafından miras alınan kendi DNA'sını içerir ve bu da onları genetik hastalıklara benzersiz bir şekilde katkıda bulunan yapılar haline getirir. Mitokondri, nükleer genlerin aktivitesini düzenler ve hücrelerin dış ortamdaki değişikliklere uyum sağlamasına yardımcı olur. Mitokondri, kortizol, östrojen ve testosteron gibi steroid hormonların sentezinde de rol oynar. Nanoplastiklere maruz kalma nedeniyle mitokondriyal fonksiyonun bozulması, bir dizi patolojik sürecin temelinde yer alır. Bu süreçler, sadece tek tek organ ve sistemlerde değil, bedende bir bütün olarak ciddi ve potansiyel olarak geri dönüşü olmayan sonuçlara yol açabilir (bkz. Tablo 1).

Nörolojik hastalıklar	Parkinson hastalığı, Alzheimer hastalığı, Amyotrofik lateral skleroz (ALS), Epilepsi, Migren, Mitokondriyal ensefalomiyopatiler (MELAS sendromu gibi)
Kalp ve damar hastalıkları	Kardiyomiyopatiler, Kalp yetmezliği, Ateroskleroz (oksidatif stres yoluyla)
Bağışıklık ve enflamatuvar hastalıklar	Otoimmün hastalıklar (örneğin, sistemik lupus eritematozus), Kronik enflamatuvar durumlar (ROS ve sitokin sinyal iletiminin bozulması yoluyla)
Metabolik bozukluklar	Tip 2 diyabet, Obezite, Metabolik sendrom, Yağ asidi ve laktat metabolizması bozuklukları
Onkolojik hastalıklar	Mitokondriyal disfonksiyon, mutasyon ve kötü huylu hücre dönüşümü riskini artırır
Kas rahatsızlıkları	Mitokondriyal miyopatiler, kronik kas güçsüzlüğü ve yorgunluk
Duyu organı hastalıkları	Ağkatman körlüğü, Leber kalıtsal optik nöropati (görme kaybına neden olan kalıtsal hastalık)
Genetik mitokondriyal bozukluklar	Leigh sendromu, Kearns–Sayre sendromu, Barth sendromu

Tablo 1. Mitokondriyal Disfonksiyonla İlişkili Seçilmiş Hastalıkların Genel Bakışı

MNP'lerin Erken Yaşlanma ve Kanser Gelişimindeki Rolü

Nanoplastiklere maruz kalmak, mitokondriyal fonksiyonu bozarak ve bedenin genetik programlarını bozarak erken yaşlanmayı tetikleyebilir. Mitokondriyal hasar, reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı üretimine yol açarak oksidatif strese neden olur. Bu da DNA'ya zarar verir, genetik stabiliteyi bozar, iltihaplanmayı tetikler ve doku yaşlanmasını hızlandırır. Ek olarak, nanoplastikler telomerlerin kısalmasına katkıda bulunarak hücrenin bölünme yeteneğini sınırlar.



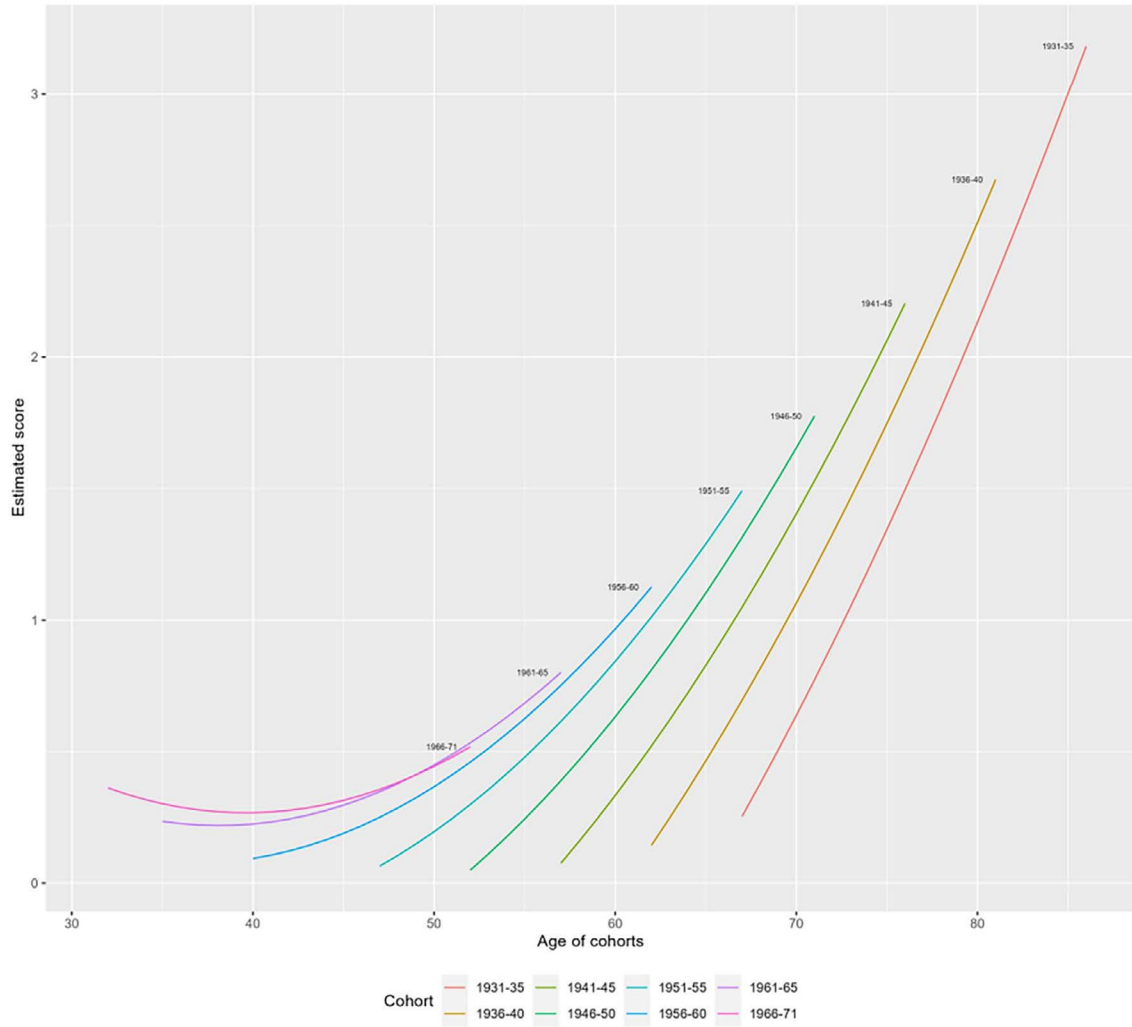
UB Jacobs Tıp ve Biyomedikal Bilimler Fakültesi Pediatri Bölümü'nde Profesör ve Genetik Bölüm Başkanı olan Taosheng Huang, MD, PhD, ***"Mitokondriyal DNA'da mitokondriyal fonksiyon bozukluğu ile spesifik olarak ilişkili ve pediatrik mitokondriyal bozukluklara neden olan tek bir nükleotid değişikliğinin yaşlanmayı nasıl hızlandırabileceğini insanlarda da gösterebildik"*** dedi. ***"Mitokondriyal fonksiyon bozukluğuna bağlı reaktif oksijen türlerinin zamanla DNA hasarını artırdığını bulduk."***¹⁹³

Epigenetik yaşlanma, DNA'nın kendisini değiştirmeden, DNA seviyesinde meydana gelen değişiklikler (genlerin açılması veya kapatılması) yoluyla gen düzenlemesinde meydana gelen değişiklikleri ifade eder. Ölçülebilen ince bir "moleküler saat"tir ve kronolojik yaşlanmadan daha hızlı veya daha yavaş ilerleyebilir. Yüksek mitokondriyal DNA aktivitesi, hızlandırılmış epigenetik yaşlanma ile bağlantılıdır. Bazı bireylerde, 20'li ve 30'lu yaşlarda bile, hücrelerin biyolojik yaşı kronolojik yaşlarını önemli ölçüde aşabilir, yani vücutları beklenenden daha hızlı yaşlanır.

Mitokondriyal disfonksiyonu olan kişiler genellikle erken yaşta demans, kalp-damar hastalıkları, aritmi ve kalp yetmezliği gibi yaşa bağlı hastalıklar geliştirir. İskoç araştırmacılar, kişinin doğduğu tarih ne kadar geç olursa, 50 yaşına kadar hastalık riskinin o kadar yüksek olduğunu bulmuştur. Örneğin, 1956 ile 1960 arasında doğanlar, aynı yaştaki 1951-1955 veya 1946-1950 kohortlarına göre daha yüksek hastalık skorlarına sahiptir (Şekil 73).¹⁹⁴

¹⁹³Medindia. Çalışma, mitokondriyal disfonksiyonun erken yaşlanmaya nasıl yol açtığını ortaya koyuyor. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Daha genç ama daha hasta mı? İskoçya'daki orta yaşlı ve yaşlı yetişkinlerde hastalık birikimindeki kohort eğilimleri, İskoç Boylamsal Çalışması'ndan elde edilen sağlık verileri kullanılarak. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckæ062>



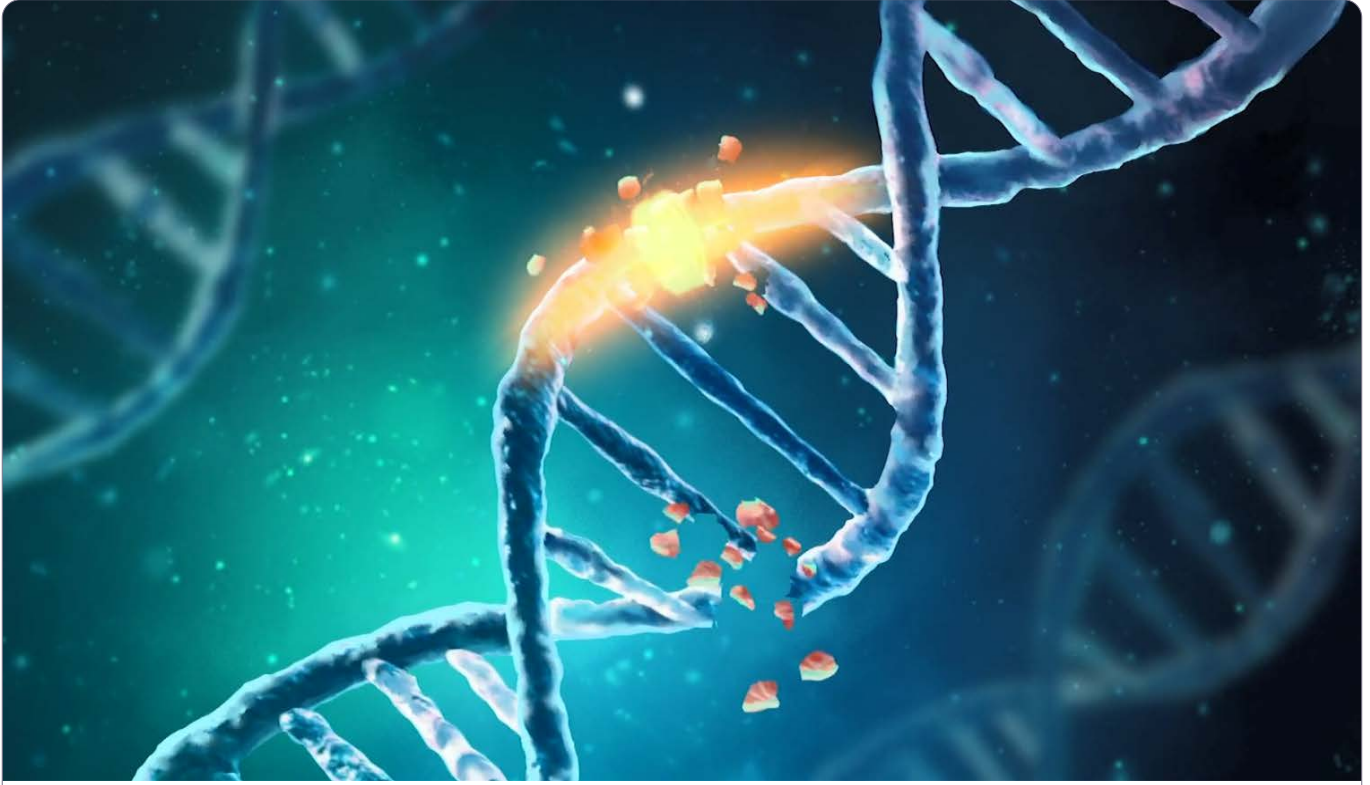
Şekil 73: Küme ve yaşa göre tahmin edilen çoklu hastalık puanları

Kaynak: İskoç Boylamsal Çalışma. Kaynak: İskoç Boylamsal Çalışma.
Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Daha genç ama daha hasta mı?
İskoç Boylamsal Çalışma'dan elde edilen sağlık verilerini kullanarak İskoçya'daki
orta yaşlı ve yaşlı yetişkinlerde hastalık birikimindeki küme eğilimleri. Avrupa Halk
Sağlığı Dergisi 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckæ062>

Yaşlanma ve Kanserde Mitokondriyal DNA Mutasyonları

Yaşlanma ve kanser gelişiminin altında yatan temel mekanizmalar birçok ortak özelliğe sahiptir. Her iki süreçte de merkezi bir faktör, enerji üretiminden sorumlu hücre organellerinin bozulması olan mitokondriyal disfonksiyondur. Yaşla birlikte, mitokondriyal DNA'da (mtDNA) mutasyonlar insan dokularında birikir ve benzer mutasyonlar çeşitli kanser türlerinde uzun süredir gözlemlenmektedir.¹⁹⁵

Bir hücrede mutasyon meydana geldiğinde, bu mutasyon hücrenin davranışını değiştirebilir. Örneğin, mutasyona uğrayan hücre daha hızlı büyümeye ve bölünmeye başlayabilir, olması gereken durumda bile hücre ölümüne direnebilir, bağışıklık sistemi tarafından "görünmez" hale gelebilir veya oksijen veya besin eksikliğine daha etkili bir şekilde tolerans gösterebilir.



Şekil 74: Mutasyonlara yol açan DNA hasarı

Nöronlar, kardiyomiyositler ve bazı kas hücreleri gibi mitotik sonrası hücreler, mitokondriyal hasara karşı özellikle hassastır. Bu hücreler bölünmediğinden, zamanla biriken mutasyonlar, özellikle mitokondriyal DNA'daki mutasyonlar (Şekil 74), hücrenin tüm ömrü boyunca hücre içinde kalır. Mitotik sonrası hücreler metabolik olarak son derece aktiftir: nöronlar sinyalleri iletmek için önemli miktarda enerjiye ihtiyaç duyar ve kalp hücreleri sürekli olarak kan pompalar. Sonuç olarak, mitokondriyaları

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Yaşlanma ve kanserde mitokondriyal DNA mutasyonları. Moleküler Onkoloji 16, 3276–3294 (2022).
<https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

maksimum kapasitede çalışır ve büyük miktarda reaktif oksijen türleri (ROS) üretir. Bu reaktif oksijen türleri mitokondriyalara zarar vererek, ROS üretiminin artması ve daha fazla hasara yol açan bir döngüyü tetikler. Zamanla, bu biriken hasar nörodejeneratif bozukluklar, kardiyovasküler hastalıklar, kanser gibi patolojik süreçleri başlatabilir ve hatta ölüme yol açabilir.

Bu mekanizma, kalp-damar hastalıkları, kalp krizi, felç ve kanserin neden dünya çapında önde gelen ölüm nedenleri olduğunu açıklayabilir. Ayrıca, son 10 ila 20 yılda dramatik bir şekilde artan nanoplastiklerin toksik etkisi, bu hastalıkların neden daha genç yaşlarda ortaya çıktığını ve pandemik boyutlara ulaşarak her yıl on milyonlarca kişinin hayatını kaybettiğini açıklayabilir. Nanoplastikler öncelikle mitokondriyal fonksiyonu bozar, oksidatif stresi artırır ve mitokondriyal ve nükleer DNA'da mutasyonlara neden olur.

MNP'lerin Tetiklediği Hormon Sistemi Bozukluğu

Plastik üretimi, endokrin sistemin işleyişini bozan ve hormon dengesini bozan kimyasallar içerir. Bu kimyasallar, doğal hormonların etkisini taklit edebilir, engelleyebilir veya değiştirebilir ve çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilir.

Ambalajlarda kullanılan 3.000'den fazla kimyasal madde insan vücudunda tespit edilmiştir.¹⁹⁶ Bu kimyasalların yaklaşık 100'ü insan sağlığı için yüksek riskli olarak sınıflandırılmıştır.

Bisfenol A

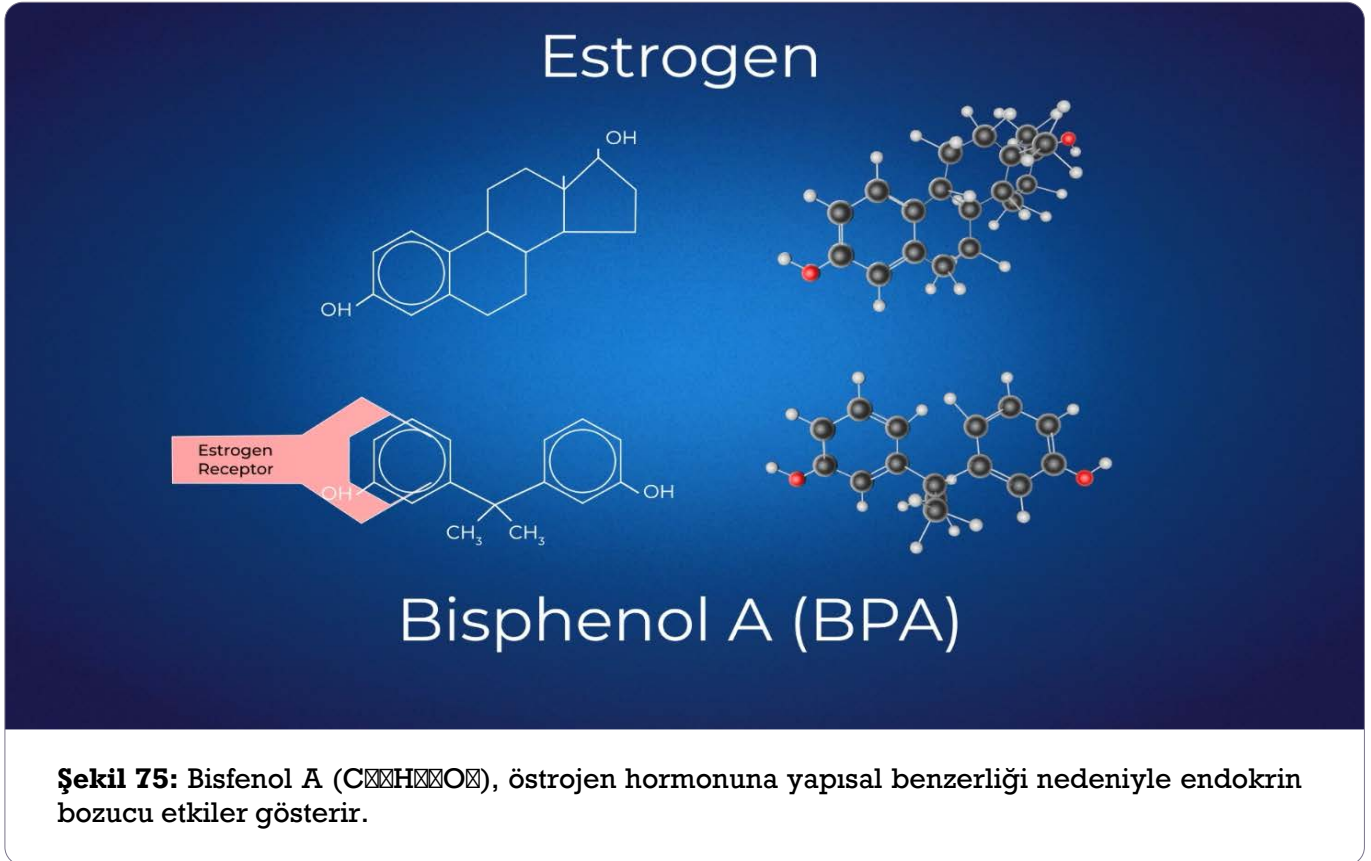
Bisfenol A (BPA), polikarbonat plastiklerde (şişeler ve kaplar gibi), epoksi reçinelerde (konserve gıdaların kaplamasında kullanılır) ve tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılan sentetik bir plastikleştiricidir.

Isıtıldığında BPA gıda ve içeceklere geçer.

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Gıda ile temas eden kimyasallara yaygın insan maruziyetine dair kanıtlar. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>



Melbourne Üniversitesi Kimya Fakültesi'nden çevre kimyasalları uzmanı Profesör Ian Rae, *"BPA, genellikle bu yollarda rol oynayan doğal hormonları etkisiz hale getirmek için 'haydut' bir hormon görevi görüyor"* diyor (Şekil 75).¹⁹⁷



Dünya çapında 8 milyon tondan fazla bisfenol A üretilmekte ve her yıl yaklaşık 100 ton atmosfere salınmaktadır.¹⁹⁸

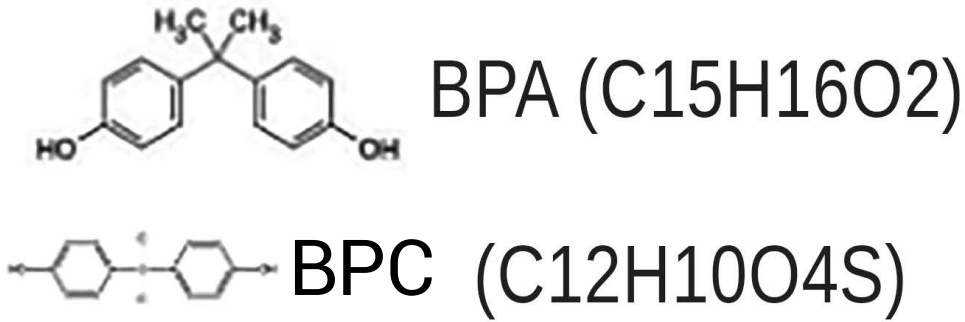
Araştırmalar, BPA ve onun ikamesi olan bisfenol S'nin (BPS) sinir sistemindeki uyarıcı ve engelleyici sinyallerin koordinasyonunu bozduğunu göstermektedir.¹⁹⁹ Her iki bileşik de yüksek konsantrasyonlarda benzer patolojik etkiler yaratmaktadır (Şekil 76). Beyin hücreleri üzerinde yapılan deneyler, bir ay boyunca maruz kalındığında, çok küçük miktarlarda BPA veya BPS'nin bile sinapslar aracılığıyla sinyallerin kimyasal ve elektriksel iletimini değiştirdiğini ortaya koymuştur.²⁰⁰

¹⁹⁷New Atlas. Erkek çocuklarda otizm, anne karnında yaygın plastik maruziyetiyle bağlantılı. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁹⁸Küresel Endüstri Analistleri. Bisfenol A: Küresel stratejik iş raporu. Araştırma ve Pazarlar. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

¹⁹⁹Schirmer, E., Schuster, S. & Machnik, P. Bisfenoller, olgun omurgalıların beyinlerinde nöronal sinyalleşmeye zararlı etkiler gösterir. Commun Biol 4, 465 (2021). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-Medical. Plastikleştiriciler insanlarda önemli beyin fonksiyonlarını bozabilir. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-im-pair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).



Şekil 76: Bisfenol A (BPA) ve bisfenol S (BPS) molekül yapıları ve kimyasal formülleri.

2023 yılında yapılan bir araştırmada, dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (DEHB) olan çocuklarda, bu bozukluğu olmayan çocuklara kıyasla daha fazla bisfenol A (BPA) ve ftalat bulunduğu ortaya çıktı.²⁰¹

Melbourne'daki Florey Nörobilim ve Ruh Sağlığı Enstitüsü'nden araştırmacılar, annelerinin hamilelik sırasında BPA seviyeleri daha düşük olan erkek çocukların 11 yaşına kadar otizm tanısı alma olasılığının 6 kat daha yüksek olduğunu buldu.²⁰²

66

Profesör Ponsonby, *"BPA, nörohormonları kontrol eden ve özellikle erkek fetüslerin beyin gelişiminde önemli bir rol oynayan aromataz adlı önemli bir enzimi susturarak, hormonların kontrolündeki erkek fetüslerin beyin gelişimini çeşitli şekillerde bozabilir"* dedi. *"Bu, otizm bulmacasının bir parçası gibi görünüyor."*¹⁹⁷

Aromataz enziminin baskılanması, otizm tanılarındaki cinsiyet farkını açıklayabilir: her bir kız çocuğuna karşılık 4 ila 5 erkek çocuk.²⁰³ Otizm kızlarda daha az görülse de, kızlar daha şiddetli formlarda otizm yaşama eğilimindedir.²⁰⁴

Bisfenol A (BPA) da hiperglisemi ve insülin direncine neden olarak tip 2 diyabetin gelişimine katkıda bulunur²⁰⁵. Diyabetten kaynaklanan küresel ölüm oranı istikrarlı bir şekilde artmaya devam etmektedir (Şekil 77).

²⁰¹EarthDay.org. Bebekler ve Plastik Raporu. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. ve ark. Erkek otizm spektrum bozukluğu, çok modlu araştırmalarda prenatal BPA'nın beyin aromataz bozukluğuyla bağlantılıdır ve 10HDA, ilgili fare fenotipini iyileştirir. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. ve ark. Otizmin küresel yaygınlığı: Sistemik bir inceleme güncellemesi. Otizm Araştırmaları 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

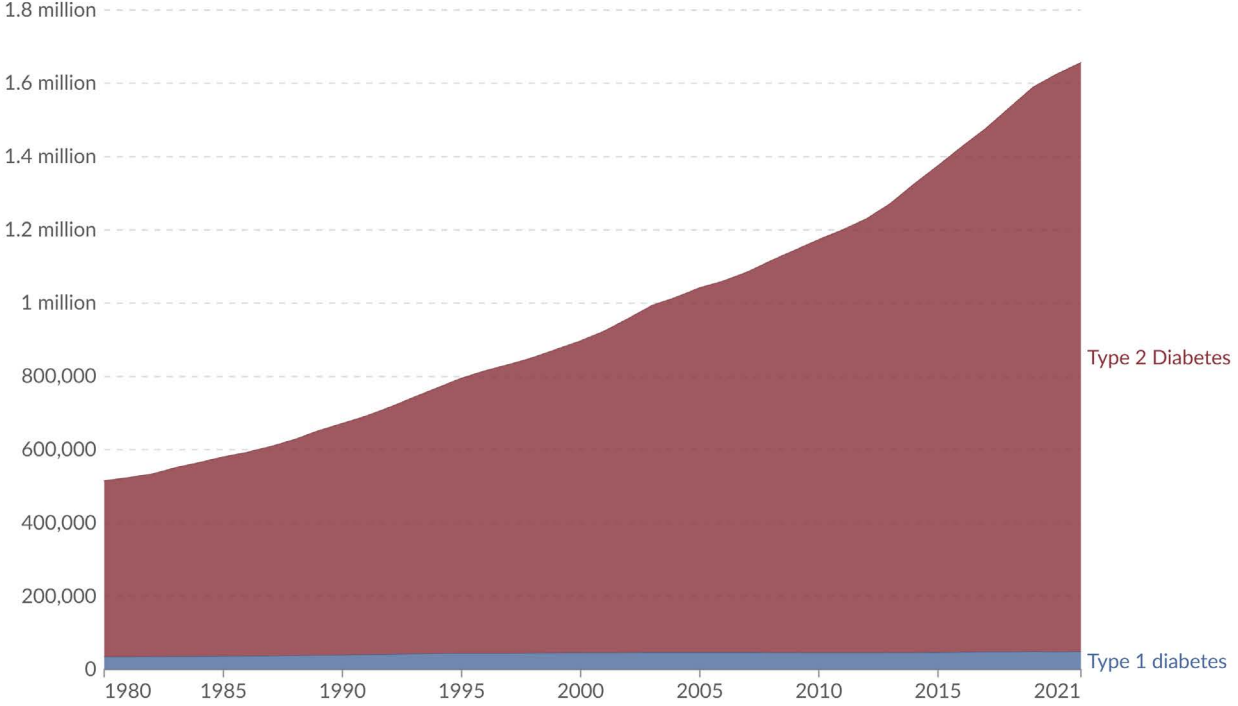
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Simons Simplex Koleksiyonunda Otizmlı Kadın ve Erkeklerin Davranışsal ve Bilişsel Özellikleri. Amerikan Çocuk ve Ergen Psikiyatrisi Akademisi Dergisi 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. İdrar Konsantrasyonlarında Bisfenol A ve Ftalat Metabolitleri ile Tip 2 Diyabet Riski Arasındaki İlişki: Hemşire Sağlığı Çalışması (NHS) ve NHSII Kohortlarında Prospektif Bir Araştırma. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Şekil 77: Diyabet nedeniyle ölümler, türüne göre, Dünya, 1980-2021

<https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

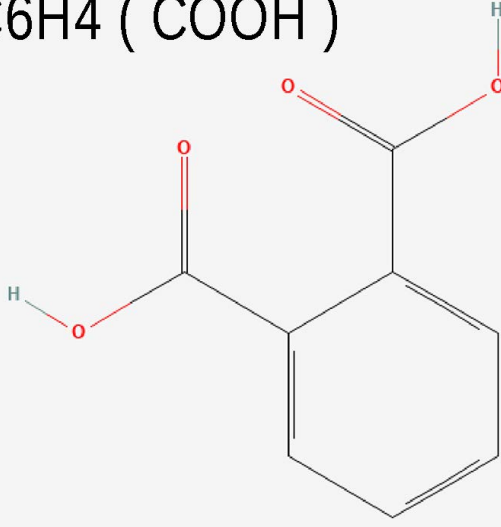
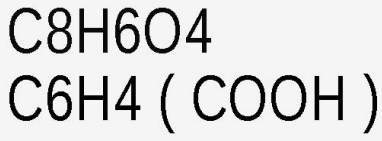
Ftalatlar

Ftalatlar, esas olarak plastikleştirici olarak kullanılan bir grup kimyasal bileşiktir. Plastikleştiriciler, polivinil klorür (PVC) gibi plastikleri daha esnek, yumuşak ve dayanıklı hale getiren maddelerdir.

Ftalatlar, çeşitli endüstrilerde ve günlük yaşamda yaygın olarak kullanılmaktadır, ama endokrin sistemi bozma özellikleri endişe yaratmaktadır.²⁰⁶

Moleküler formül (Şekil 78). Ftalatlar hormon değildir, ama erkeklerin gelişimi için özellikle önemli olan androjenlerin (testosteron gibi) etkisini baskılayabilir. Ftalatlara maruz kalma, sperm hareketliliğinde azalma ve üreme organlarının gelişiminde anormallikler (örneğin yenidoğanlarda kriptorşidizm) ile ilişkilendirilmiştir. Kısırlık tanısı alan erkeklerde daha yüksek ftalat konsantrasyonları bulunmuştur.

²⁰⁶Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Ftalatlar ve insan sağlığı üzerindeki etkileri: Eritrositler ve üreme sistemi üzerine odaklanma. Karşılaştırmalı Biyokimya ve Fizyoloji Bölüm C: Toksikoloji ve Farmakoloji 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>



Şekil 78: Kimyasal Yapı Tasviri

Kaynak: Ulusal Biyoteknoloji Bilgi Merkezi. Bisfenol A, 2D Yapısı. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Kadınlarda ftalatlar adet döngüsünü bozabilir ve düşük ve erken doğum riskini artırabilir. Hamilelik sırasında fetüsün ftalatlara maruz kalması, beyin gelişiminin gecikmesine, IQ'nun düşmesine ve çocuklarda davranış sorunlarına yol açabilir.²⁰⁷

Bilim adamları, çevresel ftalatlar (günlük tüketim ürünlerinde bulunan toksik kimyasallar) ile kadınlarda en sık görülen tümörler olan rahim fibroidlerinin büyümesinde artış arasında nedensel bir bağlantı olduğunu kanıtlamıştır.²⁰⁸

Plastiklerde bulunan ftalatlara maruz kalmak, çocukluk çağı kanseri riskini %20 artırır, kötü huylu kemik tümörleri vakalarında üç kat artış ve lenfoma ve lösemi vakalarında iki kat artış görülür.²⁰⁹

5.000'den fazla Amerikalı annenin katıldığı bir araştırmada, ftalatların düşük doğum ağırlıklı bebeklerin ve prematüre bebeklerin doğma riskiyle ilişkili olduğu bulunmuştur.²¹⁰ Yazarlar, bu faktörlerin bebek ölüm olasılığını orta derecede artırdığını ve çocukların akademik performansını etkileyebileceğini, ayrıca çocuklarda kalp hastalığı, diyabet ve otizm ve DEHB gibi zihinsel bozuklukların riskini artırılabileceğini belirtmektedir.²¹¹

²⁰⁷ Welch, B. M. ve ark. Ftalat Maruziyetinin Prenatal Üriner Biyobelirteçleri ile Erken Doğum Arasındaki İlişkiler: 16 ABD Kohortunun Birleştirilmiş Çalışması. JAMA Pediatrics 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸ Izuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) ftalat, triptofan-kinurenin-AHR yolunun aktivasyonu yoluyla uterus leiomyoma hücrelerinin hayatta kalmasını destekler. Ulusal Bilimler Akademisi Bildirileri 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

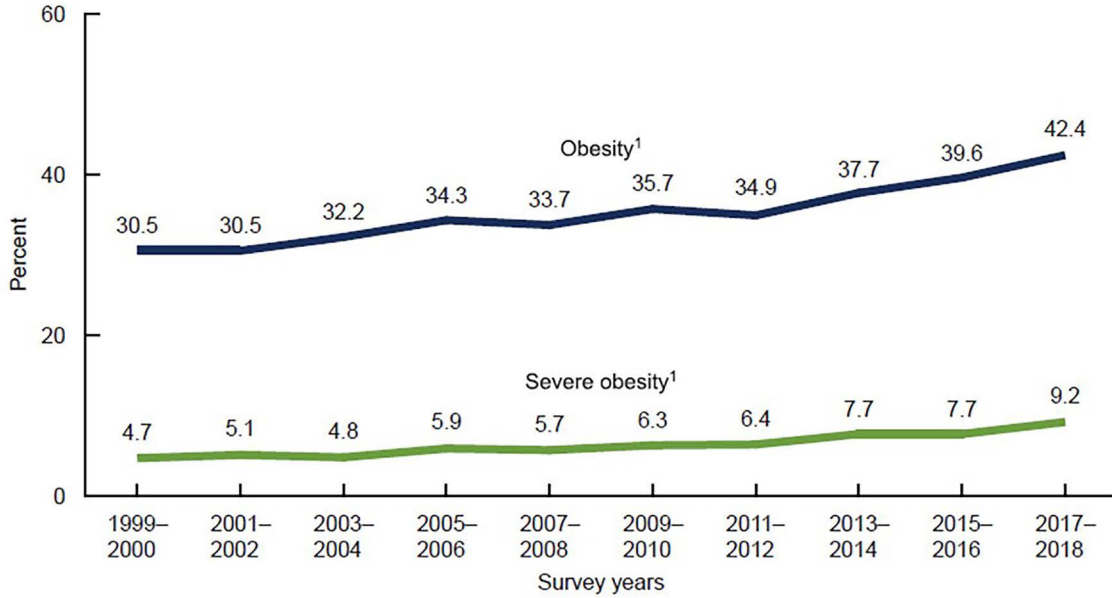
²⁰⁹ Ahern, T. P. ve ark. İlaçlarla İlişkili Ftalat Maruziyeti ve Çocukluk Çağı Kanser İnsidansı. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ Trasande, L. et al. ABD'de doğum öncesi ftalat maruziyeti ve olumsuz doğum sonuçları: doğumların prospektif analizi ve atfedilebilir yük ve maliyet tahminleri. The Lancet Planetary Health Cilt 8, Sayı 2, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹ Baker, B. H. ve ark. Ultra işlenmiş ve fast food tüketimi, hamilelik sırasında ftalat maruziyeti ve ftalat maruziyetindeki sosyoekonomik eşitsizlikler. Environment International 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Plastiklerdeki kimyasal katkı maddeleri obezitenin gelişmesine katkıda bulunmaktadır.²¹² Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, 1990'dan 2020'ye kadar yetişkinler arasında küresel obezite oranı iki katından fazla artarken, ergenler arasında dört kat artmıştır.²¹³

Amerika Birleşik Devletleri'nde yetişkinler ve gençler arasında obezite eğilimleri (Şekil 79-80)



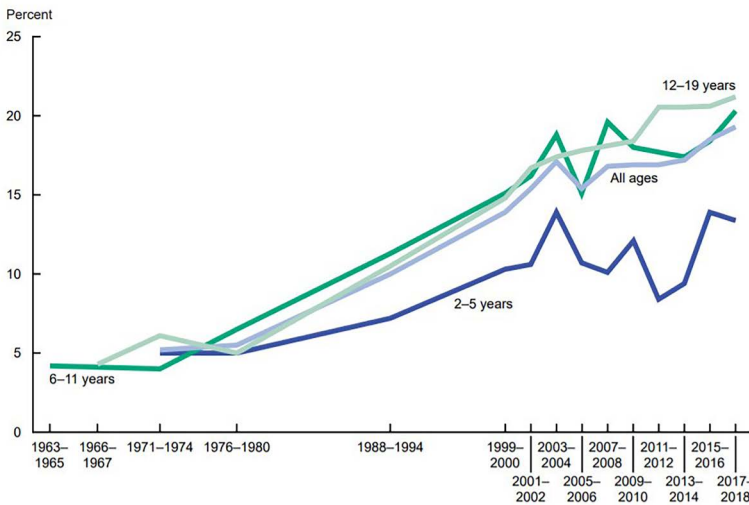
Şekil 79:

20 yaş ve üzeri yetişkinlerde yaşa göre ayarlanmış obezite ve şiddetli obezite prevalansı eğilimleri: Amerika Birleşik Devletleri, 1999–2000 ile 2017–2018 arası

Kaynak: Ulusal Diyabet, Sindirim ve Böbrek Hastalıkları Enstitüsü. Aşırı kilo ve obezite istatistikleri. NIDDK. (2021)

<https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity>

(erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).



Şekil 80:

2-19 yaş arası çocuk ve ergenlerde obezite eğilimleri, yaşa göre: Amerika Birleşik Devletleri, 1963-1965 ile 2017-2018 arası

Kaynak: Ulusal Diyabet, Sindirim ve Böbrek Hastalıkları Enstitüsü. Aşırı kilo ve obezite istatistikleri. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity>

(erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

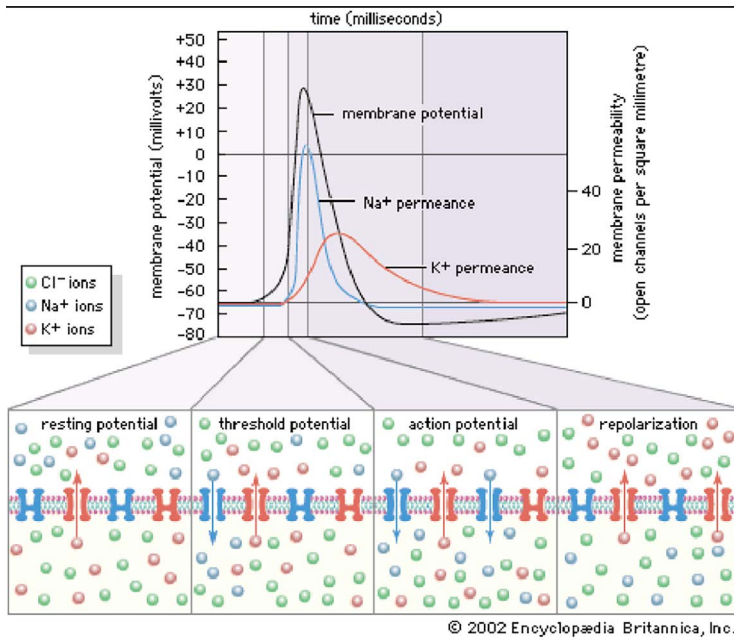
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedø, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Plastik Tüketici Ürünlerinde Kullanılan Kimyasalların Adipojenik Etkinliği. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³Dünya Sağlık Örgütü. Obezite ve aşırı kilo. WHO Bilgi Formları. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

Nanoplastiklerin Elektrostatik Yüğü, İnsan Bedeni İçin Yüksek Toksisitesinin Ana Etkeni

İnsan bedeni sürekli olarak biyoelektrik enerji üretir. Kalp aktivitesinden duyuşsal algılamaya ve üst düzey bilişsel işlevlere kadar tüm fizyolojik süreçler, elektrik yüklerinin hareketiyle başlayan kimyasal reaksiyonlar tarafından yönlendirilir. Proteinler içeren hücre içi ve hücre dışı sıvılar, esas olarak elektropolar özelliklere sahip sudan oluşur. Sonuç olarak, hidrojen bağları, iyonik bağlar ve hidrofobik paketlenme dahil olmak üzere elektrostatik etkileşimler, proteinlerin işlevleri için gerekli olan protein yapılarının oluşumunda ve dolayısıyla organizmanın canlılığının korunmasında çok önemli bir rol oynar.²¹⁴

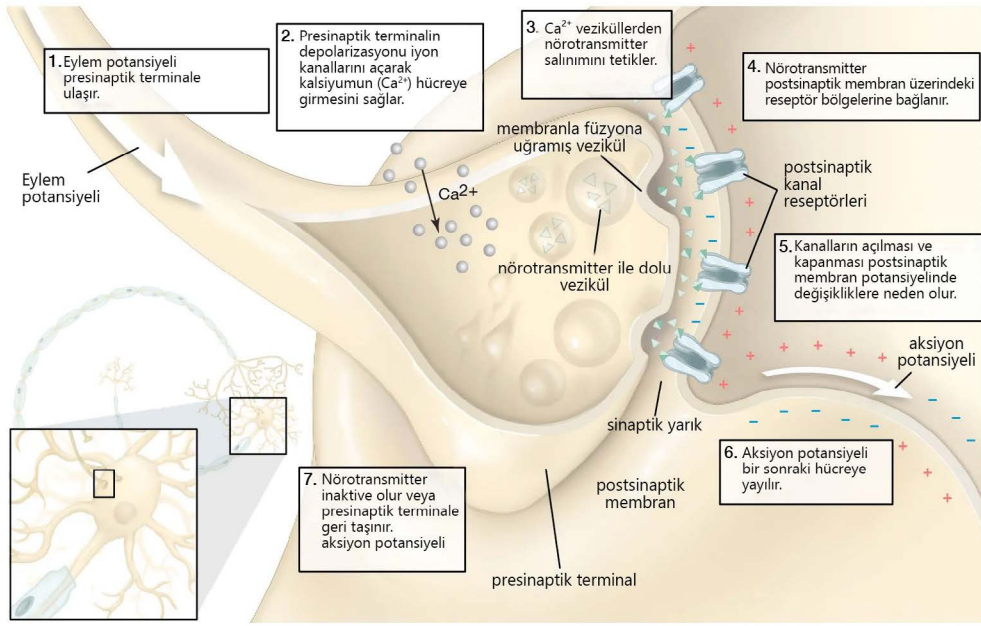
Biyoelektrik, iyon kanalları ve membran potansiyellerinin etkileşimi yoluyla hücre işlevlerini doğrudan etkiler. Her hücre, hücre içi ve dışı iyon konsantrasyonları arasındaki farkla elde edilen, dinlenme membran potansiyeli olarak bilinen iç ve dış ortamları arasındaki elektrik potansiyeli farkını korur (Şekil 81). İnsan bedeninde bulunan başlıca iyon kanalları sodyum, potasyum, kalsiyum ve klorür kanallarıdır. Bu kanallar, membran potansiyeli ile birlikte çeşitli hücre tiplerinin temel işlevlerini kolaylaştırır (Şekil 82-83).



Şekil 81: İyon geçirgenliği ve aksiyon potansiyeli

Aksiyon potansiyelinin altında yatan iyon geçirgenliğindeki değişiklikler. Elektrik potansiyeli solda milivolt cinsinden, iyon geçirgenliği sağda milimetre kare başına açık kanallarda derecelendirilmiştir. Dinlenme potansiyelinde, membran potansiyeli K+'nın denge potansiyeli olan EK'ye yakındır. Sodyum kanalları açıldığında, membran depolarize olur. Depolarizasyon eşik potansiyeline ulaştığında, bir aksiyon potansiyeli tetiklenir. Eylem potansiyelinin oluşması, membran potansiyelini Na+'nın denge potansiyeli olan ENa'ya yaklaştırır. Sodyum kanalları kapandığında (Na+ geçirgenliği azalır) ve potasyum kanalları açıldığında (K+ geçirgenliği artar), membran repolarize olur. Kaynak: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

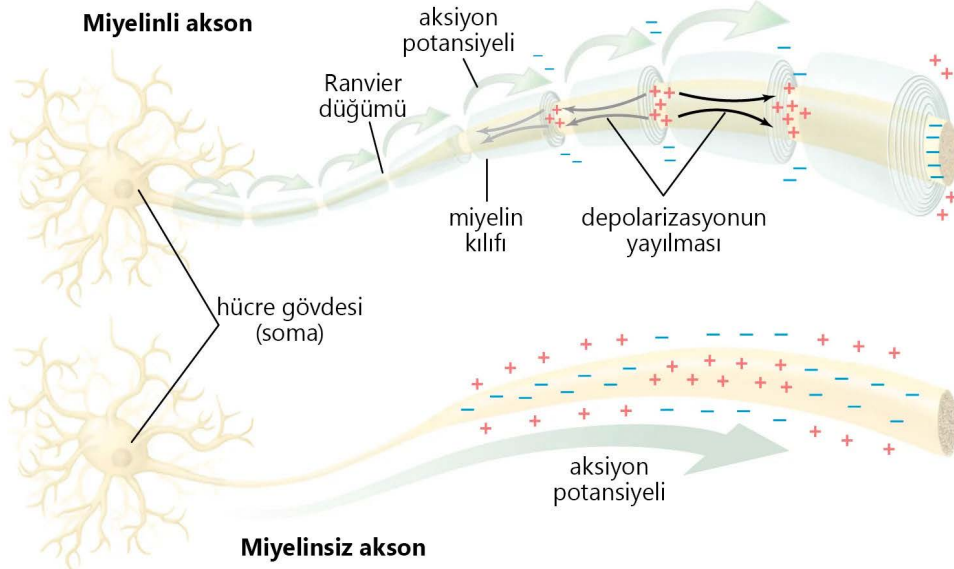
²¹⁴Azım Premji Üniversitesi. Elektrik Biyolojisi: Elektrik, insan bedeninin işleyişi için neden bu kadar önemlidir? (2022) <https://azimpremiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).



Şekil 82: Sinaps: Sinapsda sinir uyarısının kimyasal iletimi

Sinir uyarısının presinaptik terminale ulaşması, sinaptik boşluğa nörotransmitterlerin salınmasını uyarır. Nörotransmitterlerin postsinaptik membran üzerindeki reseptörlere bağlanması, postsinaptik nöronda aksiyon potansiyelinin yenilenmesini uyarır.

Kaynak: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).



Şekil 83: Nöron: Aksiyon potansiyelinin iletimi

Miyelinli bir aksonda, miyelin kılıfı yerel akımın (küçük siyah oklar) membran boyunca akmasını engeller. Bu, akımın sinir lifinden aşağı doğru, iyon kanallarının yoğun olduğu miyelinlenmemiş Ranvier düğümlerine doğru ilerlemesini sağlar. Uyarılma üzerine, bu iyon kanalları aksiyon potansiyelini (büyük yeşil oklar) bir sonraki düğüme yayar. Böylece, aksiyon potansiyeli her düğüme yeniden üretilirken lif boyunca atlar; bu sürece sıçrayan iletim denir. Miyelinize olmayan bir aksonda, aksiyon potansiyeli tüm membran boyunca yayılır ve membrandan geri difüze olarak orijinal depolarize bölgeye ulaştığında zayıflar.

Kaynak: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Kas kasılmaları veya sinir sinyallerinin iletimi sırasında insan bedeninde üretilen biyoelektrik, fizyolojik süreçlerin temel bir parçası olduğu için tamamen doğal ve zararsızdır. Ancak, mikro ve nanoplastikler bedene girdiğinde, uzun süre tutabilecekleri elektrostatik yük taşırlar. Hayati biyolojik işlevleri bozarak potansiyel sağlık riski oluşturan da bu yüküdür.

Nanoplastikler, 1 mikrometreden daha küçük plastik parçacıklardır. Benzersiz yapıları nedeniyle elektrostatik yük biriktirebilirler, bu da bilim insanları için giderek artan bir endişe kaynağıdır.

Mikro veya nanoplastik parçacıklar, triboelektrik etkiyle (diğer yüzeylerle temas ve sürtünme sonucu) elektrikleterek pozitif veya negatif yük kazanırlar. Bu yük, bu parçacıkların insan bedeninde ve çevrede nasıl davrandığını önemli ölçüde etkiler.

Nanoplastik parçacıkların benzersiz yapısı, kirleticileri, iyonları ve organik molekülleri adsorbe etmelerini sağlar, bu da ekosistemlerde toksin taşıyıcıları olarak rollerini güçlendirir.^{215, 216}

Nanoplastiklerin kimyasal bileşimi, elektrostatik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar: polistiren (PS), polietilen (PE) veya polipropilen (PP) gibi polimerler genellikle, çevre koşullarına bağlı olarak iyonlaşabilen karboksil (-COOH), sülfat (-SO₃H) veya amino (-NH₂) gibi fonksiyonel gruplar içerir. Örneğin, Langmuir dergisinde yayınlanan bir çalışma, karboksil grupları (PS-COOH) içeren polistiren nanopartiküllerin negatif zeta potansiyeline sahip olduğunu, amino grupları (PS-NH₂) içerenlerin ise pozitif zeta potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Bu da fonksiyonel grupların nanoplastik yükü üzerindeki etkisini doğrulamaktadır.²¹⁷

Yük birikimi süreci sadece kimyasal özelliklerle sınırlı değildir. Üretim veya sürtünme gibi mekanik süreçler sırasında nanoplastikler, temas elektrifikasyonu yoluyla yüklenebilir. Plastik kaplar üzerinde yapılan bir çalışma, polistirenin -10 kV'a kadar yük biriktirebildiğini, bu yükün uzun süre korunabildiğini ve toz veya bakteri sporları gibi zıt yüklü parçacıkları çektiğini ortaya koymuştur.²¹⁸ Ayrıca, polimer yapısındaki değişiklikler (örneğin polar grupların varlığı) nanoplastiklerin ortamın pH değerine bağlı olarak pozitif veya negatif yük sergilemesine neden olur. Asidik ortamlarda amino grupları parçacıklara pozitif yük verirken, alkali koşullarda karboksil grupları baskın olur ve negatif yük verir. Bu bulgular, Arabidopsis thaliana bitkileri üzerinde yapılan çalışmalarda da doğrulanmıştır.²¹⁹

²¹⁵Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Mikro ve nano ölçekli plastik polimerler üzerinde çevresel kirleticilerin adsorpsiyonu ve hava koşullarının adsorpsiyon özelliklerine etkisi. Journal of Hazardous Materials 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. Doğal su ortamındaki üçlü sistemde PE mikroplastikler tarafından Cr(VI) iyonlarının adsorpsiyon mekanizması. Environmental Pollution 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. ve ark. Yüzey işlevselleştirilmiş Polistiren Nanopartiküller, Küresel Çift Katman Bütünlüğünü Koruyan İyon Seçici Gözenekler Aracılığıyla Transmembran Potansiyelini Değiştirir. Langmuir 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Elektrostatik Yükün Havadaki Bakteri Sporlarının Plastik Gıda Kaplarına Bulaşmasına Etkisi. Applied Microbiology 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Farklı yüklere sahip nanoplastikler, Arabidopsis thaliana'da farklı birikim gösterir. Nat. Nanotechnol. 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Böylece, nanoplastiklerin yapısını ve elektrostatik özelliklerini anlamak, sadece fiziksel doğalarını ortaya çıkarmakla kalmaz, aynı zamanda bu parçacıkların ekosistemleri ve canlı organizmaları nasıl etkileyebileceğini analiz etmenin temelini de oluşturur. Bu konular, patojenik mekanizmaları bağlamında daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Yüksek dielektrik geçirgenlikleri (elektrik yükünü tutma yeteneği) sayesinde, nanoplastikler bedene girdikten sonra, normal koşullar altında bedenin doğal iletken sistemleri tarafından nötralize edilip dağıtılacak olan zararlı yükleri biriktirmeye devam ederler. Bu durum, bedenin kendi kendini düzenleme süreçlerini bozar ve anormal elektrostatik enerjiye uzun süre maruz kalma nedeniyle hücresel yapılar için riskler yaratır.

Bedene giren nanoplastiklerin oluşturduğu tehdidin boyutunu kavramak için, bir kez daha bedenin biyoelektrik sistemlerine, yani elektriksel uyarıların hücreler arası iletişim dili olarak işlev gördüğü karmaşık mekanizmalara bakabiliriz.

Her hareket ve düşünce, hücrelere komutlar ileten görünmez sinyaller sayesinde mümkün olur. Nöronlar elektriksel uyarılar yoluyla bilgi alışverişinde bulunur, kaslar bu sinyallere tepki olarak kasılır ve beyin, biyoelektrik ve kimyasal etkileşimlerin bir kombinasyonu yoluyla bilgileri işler. Nefes alma, refleksler, görme ve işitme bile organların işlevini düzenleyen küçük elektriksel deşarjlara bağlıdır.

Milyonlarca yıllık evrimle rafine edilmiş bu görünmez akımlar, biyoelektrik uyarıları yaşam diline çevirir. Ama bu uyum, yabancı unsurlar tarafından bozulur: nanoplastiklerin mikroskobik parçacıkları.

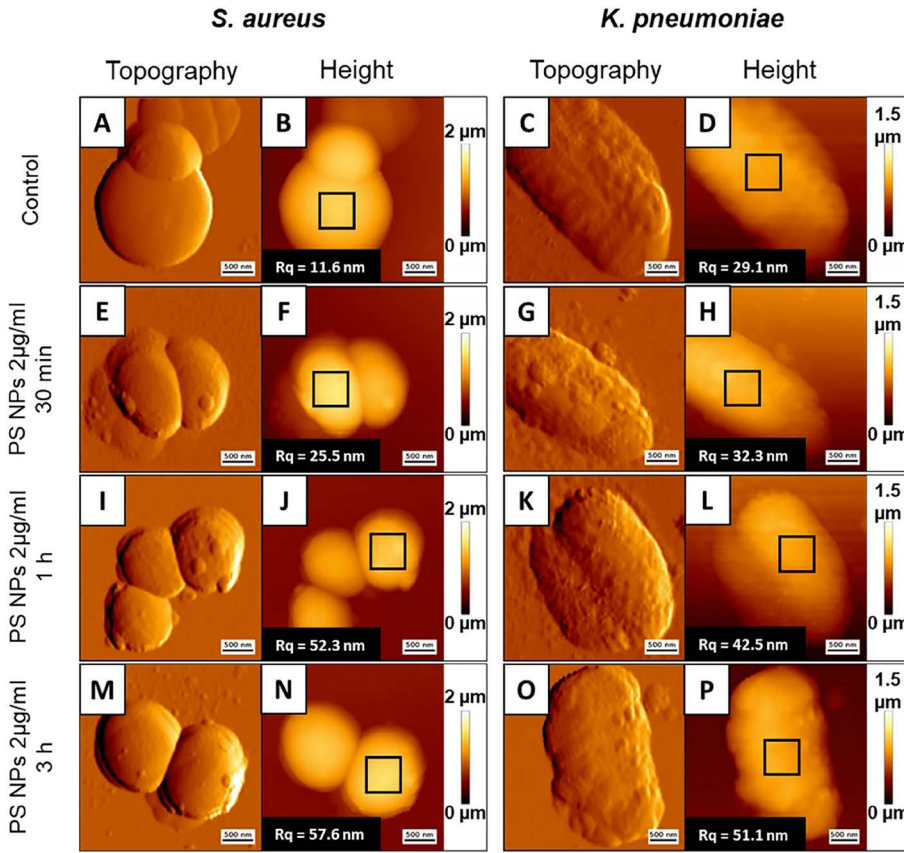
Bedene girdikten sonra nanoplastikler iyonları adsorbe edebilir ve anormal elektrik iletkenliği bölgeleri oluşturabilir, bu da doğal iyon dengesini ve hücreler arası sıvılar tarafından düzenlenen yerel yük nötralizasyon süreçlerini bozar. Nanoplastiklerin yüzeyinde iyon adsorpsiyonu, bu parçacıklar üzerinde elektrostatik yük birikmesine yol açar. Bu fenomen, reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumu yoluyla oksidatif stresi tetikleyebilir ve hücreler arasındaki elektrokimyasal iletişimi bozarak işlevlerini bozabilir.

Bu durum, 100 nm polistiren parçacıklarının, sodyum iyonları (Na^+) varlığında bile, negatif yüklerine rağmen stabil kaldığını ve bakteri yüzeylerine adsorbe olduğunu gösteren araştırmalar²²⁰ ile doğrulanmıştır. Örneğin, *Staphylococcus aureus* ve *Klebsiella pneumoniae* ile yapılan deneyler, nanoplastiklerin hücrelerin zeta potansiyelini önemli ölçüde değiştirdiğini, yüzeylerini daha negatif yüklü hale getirdiğini ve böylece doğal elektrostatik dengeyi bozduğunu göstermiştir.

²²⁰Zajac, M. et al. Polistiren nanopartiküllere maruz kalma, bakteri hücrelerinin zeta potansiyelinde değişikliklere yol açar. Sci Rep 13, 9552 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Yüklü nanoplastik parçacıklar, hücreleri çevreleyen elektrik alanlarını etkileyerek sinyal iletimini bozabilir. Bu, radyo iletişimindeki parazite benzer: net komutlar yerine, hücrelerin bilgi alışverişini bozan kaotik bir gürültü oluşur. Sinir hücreleri üzerindeki doğrudan etkiler araştırılmamış ve insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda sonuçlar henüz öncü nitelikte olup daha fazla araştırma gerektirmektedir. Ancak, bakteri yüzey yükünde gözlemlenen değişiklikler, nanoplastiklerin hücre zarlarının elektrokimyasal özelliklerini değiştirebileceğini düşündürmektedir. Örneğin, mililitrede 64 mikrogramın üzerindeki konsantrasyonlarda, polistiren parçacıkları zeta potansiyelinde önemli değişikliklere neden olur ve bu da hücreler arası iletişim için kritik öneme sahip iyon kanallarının veya reseptörlerin işlevini bozabilir.

Yukarıda bahsedilen çalışmada atomik kuvvet mikroskobu görüntülerinde gösterildiği gibi (Şekil 84), nanopartiküllerin yüzeylere "yapışması" özelliği, uzun süreli maruz kalma riski oluşturmaktadır. Dokulara gömüldükten sonra, parçacıklar, özellikle nanoplastik hücreler içine nüfuz ederek hücreler arası sıvının koruyucu mekanizmalarını atlatırsa, sodyum ve potasyum iyonlarının tamamen nötralize edemediği kalıcı elektrostatik anomaliler oluşturabilir.



Şekil 84: *S. aureus* suşu ATCC 6538 ve *K. pneumoniae* suşu ATCC 4352'nin 100 nm polistiren nanopartiküllere 2 µg/mL dozlarında maruz kaldığında yüzey topografyası (A, C, E, G, I, K, M, O) ve yükseklik görüntüleri (B, N, P) *S. aureus* suşu ATCC 6538 ve *K. pneumoniae* suşu ATCC 4352'nin 100 nm polistiren nanopartiküllere 2 µg/mL dozlarında 0,5 saat (E–H), 1 saat (I–L) ve 3 saat (M–P) süreyle maruz bırakılması ve işlenmemiş kontrol (A–D) ile karşılaştırılması. Ölçek çubuğu = 500 nm. Panellerin içinde, yüzey RMS pürüzlülüğünün hesaplandığı işaretli alanlar (siyah kareler) ve ölçülen bakteri yüzeylerinin pürüzlülük değerleri (Rq parametresi) (değerlendirme uzunluğu boyunca profil yüksekliklerinin karekök ortalaması).

Kaynak: Zajac, M. et al. Polistiren nanopartiküllere maruz kalma, bakteri hücrelerinin zeta potansiyelinde değişikliklere yol açar. Scientific Reports, 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Nanoplastiklerde biriken patojenik yükün tehlikesi, bağışıklık hücrelerinin çevresinde elektriksel girişim yaratma kabiliyetinde de yatmaktadır. Bu durum, pozitif yüklü nanoplastiklerin (PS-NH₂) negatif yüklü olanlara (PS-COOH) kıyasla bağışıklık hücrelerinin canlılığını ve lizozomal membranların stabilitesini önemli ölçüde azalttığını gösteren bir çalışma²²¹ ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, nanoplastiklerin hücrelerle etkileşimlerinde yüzey yükünün kritik rolünü vurgulamaktadır.

Elektrostatik yüklü MNP partikülleri, hücre zarlarına, dokulara ve diğer biyolojik yüzeylere adsorbe olma kabiliyetinde artış gösterir ve kelimenin tam anlamıyla bunlara yapışır. Bu yapışma, hücrelerin yapısını ve işlevini bozarak hem mekanik hem de kimyasal hasar riskini artırır.

Bu tür yükler, MNP parçacıklarının kan-beyin bariyeri veya kan-plasenta bariyeri gibi karmaşık biyolojik bariyerlerden geçmesini de kolaylaştırabilir. Sonuç olarak, toksinler beyine veya gelişmekte olan fetüse ulaşabilir ve nörotoksik etkilerin ve fetal gelişim bozukluklarının riskini artırabilir.

Nanoplastiklerin elektrostatik etkisi, proteinlerin, iyon kanallarının ve hücre reseptörlerinin yapısını ve işlevini bozabilir, bu da hücre sinyali bozarak oksidatif stresi tetikler ve bağışıklık savunmasını zayıflatır.

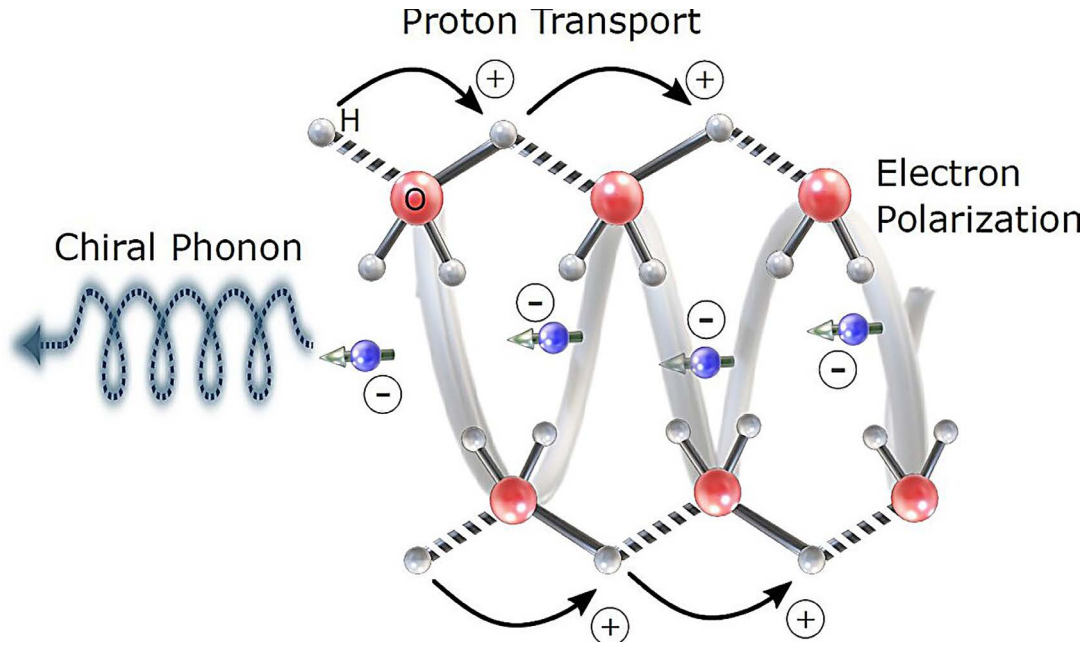
Bu bozulmalar, kronik inflamasyon, nörodejeneratif bozukluklar, kötü huylu tümör oluşumu ve sistemik disfonksiyon gibi bir dizi patolojik süreci başlatarak ciddi hastalık riskini önemli ölçüde artırabilir.

Bu nedenle, nanoplastikler üzerinde elektrostatik yükün birikmesi sadece fiziksel bir fenomen değildir – mikro ve nanoplastiklerin tehlikesini artıran bir mekanizmadır. Elektrostatik yükün MNP'lerde uzun süre kalabilmesi ve bu parçacıkların insanbedeninden atılmaya karşı son derece dirençli olması nedeniyle bu durum özellikle önemlidir.

Bu fenomenin incelenmesi, nanoplastikler üzerinde biriken patojenik elektrik yüklerinin insan türünün hayatta kalması için makroskobik bir tehdide nasıl dönüşebileceğinin daha iyi anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Yakın zamana kadar, hücresel enerjinin temeli olan proton taşınmasının tamamen kimya tarafından yönetildiği düşünülüyordu: protonların bir su molekülünden diğerine "atladığı" sanılıyordu. Ancak, *Proceedings of the National Academy of Sciences* dergisinde yayınlanan yeni bir çalışma bu görüşü kökünden değiştiriyor. Canlı organizmalarda proton taşınmasının sadece kimyasal özelliklere değil, aynı zamanda kuantum faktörlerine, özellikle elektronların dönüşüne ve biyolojik moleküllerin kiralitesine de bağlı olduğu ortaya çıktı (Şekil 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Akdeniz Deniz Kestanesi *Paracentrotus lividus*'un Nanoplastiklerle Bağışıklık Sistemi Arasındaki Etkileşim. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>



Şekil 85: Şematik bir oyuncak model. Proton taşınımı, kiral ortamlarda elektron polarizasyonu ile birlikte gerçekleşir. CISS etkisi nedeniyle, bu elektrik polarizasyonu dönüş polarizasyonu üretir. Açısal momentumun korunması, proton transferini artıran kiral fononlar üretir.

Kaynak: Goren, N. et al. Kiral biyolojik kristallerde elektronların spin ve proton transferi arasındaki kuplaj. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

İsrail'in Hebrew Üniversitesi'nde İsrailli bilim adamları tarafından yapılan bir araştırma, lizozim gibi proteinlerde, "doğru" dönme yönüne sahip elektronlar eklendiğinde proton transferinin önemli ölçüde hızlandığını, dönme yönü ters olduğunda ise yavaşladığını ortaya koydu. Bu durum, canlı sistemlerdeki proton ve elektronların koordineli bir kuantum mekanizması olarak çalışmasından kaynaklanıyor. Dönme yönlerindeki en ufak değişiklikler bile enerji üretimi, metabolizma ve hücre içi düzenleme gibi temel biyolojik süreçleri etkileyebiliyor.

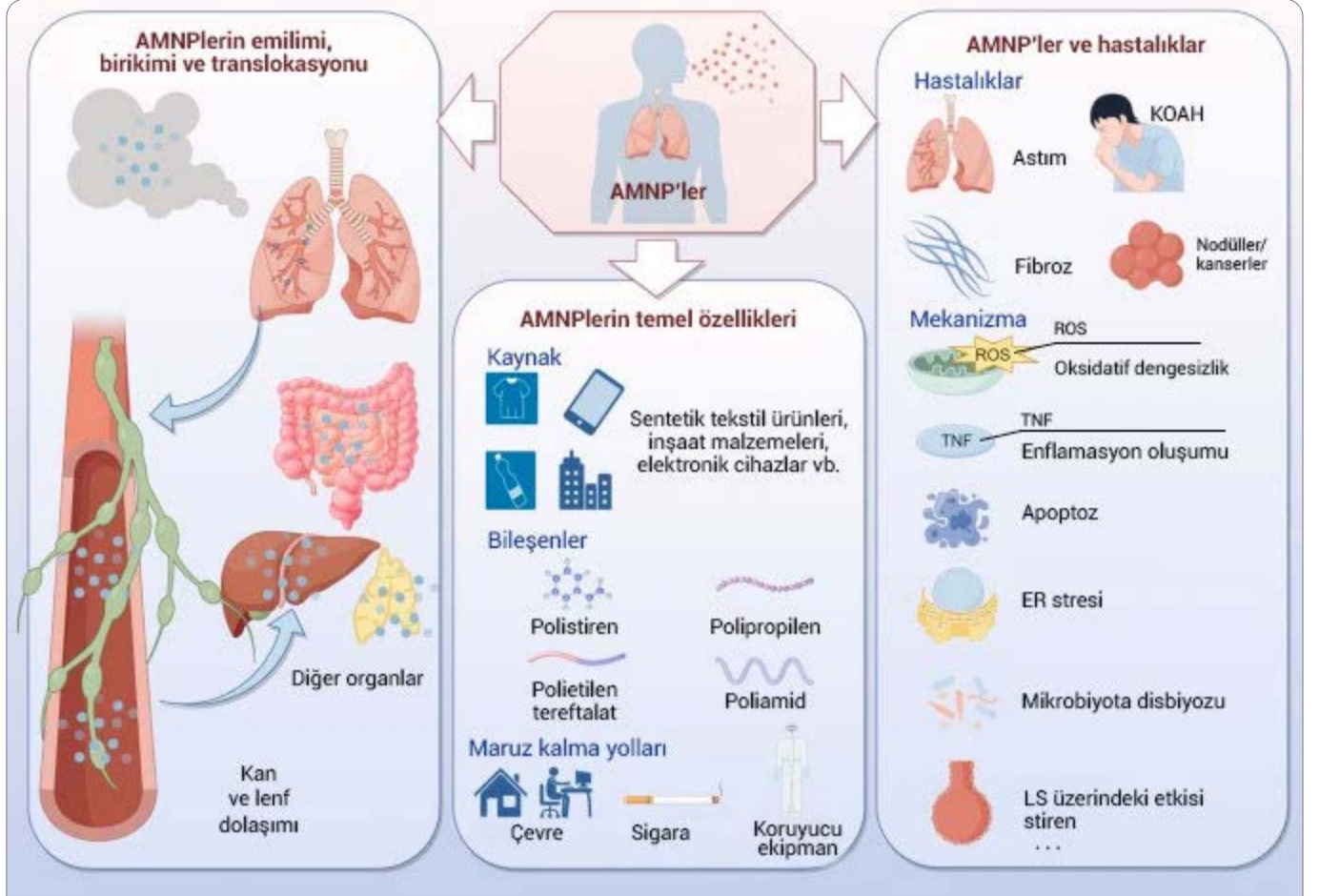
66

Çalışmanın baş araştırmacısı Naama Goren, **"Bulgularımız, protonların biyolojik sistemlerdeki hareketinin sadece kimya ile ilgili olmadığını, aynı zamanda kuantum fiziği ile de ilgili olduğunu gösteriyor"** diyor. Bu, elektrik yükü veya manyetik yönelimdeki en ufak bir bozulmanın bile hücresel metabolizmayı, enerji üretimini ve genel sağlığı etkileyebileceğini düşündürüyor.²²²

²²²[Phys.org](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html). Proteinlerde kuantum etkileri: Küçük parçacıklar hücre içindeki enerji transferini nasıl koordine eder? (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

MNP'lerin İnsan Organları ve Fonksiyonel Sistemleri Üzerindeki Sistemik Etkileri

Mikro ve nanoplastikler (MNP'ler) insan bedenine girdikten sonra kan dolaşımı yoluyla tüm organ ve dokulara ulaşır (Şekil 86). Plastik parçacıkları insan kanında, kalp ve kemik dokusunda, beyinde, plasentada, akciğerlerde, karaciğerde ve diğer organlarda tespit edilmiştir.²²³



Şekil 86: MNP'lerin solunması ve insan bedeni üzerindeki toksik etkileri

Kaynak: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Havadaki mikro ve nanoplastikler: solunum hastalıklarının yeni nedenleri. *Partikül ve Lif Toksikolojisi* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

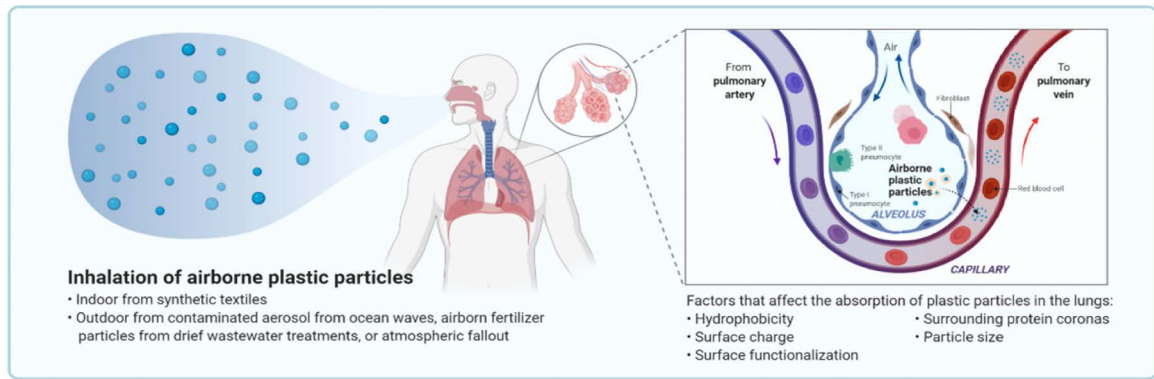
Solunan MNP'lerin Solunum Sistemine Zararı

MNP'lerin insan bedenine girmesinin başlıca yollarından biri solunumdur. Çinli bilim adamları tarafından yapılan araştırmalar²²⁴, yetişkinlerin açık havada geçirdikleri iki saatlik aktif süre boyunca yaklaşık 106.000 mikroplastik parçacık soluduğunu, çocukların ise yaklaşık 73.700 parçacık soluduğunu ortaya koymuştur.

Termodinamik özellikleri nedeniyle, 0,1 mikrometreden küçük parçacıklar, üst solunum yollarından alveollere kadar solunum sistemi boyunca etkili bir şekilde birikebilir.²²⁵

Akciğerler, geniş bir alveolar yüzey alanına (yaklaşık 150 m²) ve ince bir doku bariyerine (1 mikrometreden az) sahiptir, bu da nanoplastiklerin kan dolaşımına kolayca girmesini sağlar (Şekil 87).

20 insan akciğer dokusu örneğinin 13'ünde mikroplastikler tespit edilmiştir²²⁶



Şekil 87: İnsan bedenine giren plastik parçacıkların solunum yolu²²⁷

Solunum hastalığı olan 22 hastayı kapsayan bir çalışmada, tüm balgam örneklerinde mikroplastikler bulunmuş²²⁸ ve 10 ml'de 18,75 ila 91,75 parçacık arasında değişen miktarlarda tespit edilmiştir²²⁹

Alerjik rinit ile mikroplastikler arasında da bir bağlantı kurulmuştur.²³⁰

MNP'ler, astım, pulmoner fibroz, kronik obstrüktif akciğer hastalığı ve tümörler dahil olmak üzere çeşitli solunum rahatsızlıklarının başlangıcı ve ilerlemesi ile yakından bağlantılıdır.²²⁹ Araştırmalar, kötü huylu akciğer örneklerinin %97'sinde mikroplastik lifler bulunduğunu ortaya koymuştur.²³¹

²²⁴Pekin Üniversitesi Çevre Bilimi ve Mühendisliği Fakültesi. Prof. Yi Huang'ın ekibi, atmosferik mikroplastik dağılımı ve insan sağlığı riskleri konusunda yeni ilerlemeler kaydetti. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Havada bulunan mikro ve nanoplastikler: solunum hastalıklarının yeni nedenleri. Partikül ve Lif Toksikolojisi 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. ve ark. İnsan akciğer dokusunda havadan yayılan mikroplastiklerin varlığı. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Mikroplastiklerin ve Nanoplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisi. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. İnsan Balgamında Mikroplastiklerin Tespiti ve Analizi. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Huang, X., Saha, S. C., Saha, G., Francis, I. & Luo, Z. İnsan solunum sisteminde mikroplastik ve nanoplastiklerin taşınması ve birikmesi. Environmental Advances 16, 100525 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100525>

²³⁰Tuna, A., Taş, B. M., Başaran Kankılıç, G. ve ark. Alerjik rinitli hastalarda mikroplastiklerin tespiti. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. İç ve dış ortamlarda mikroplastikler dahil tekstil liflerine ilişkin ilk genel bakış. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Olası mekanizmalar arasında oksidatif stres, inflamasyon ve akciğer mikrobiyomunun bozulması yer almaktadır. Mikro ve nanoplastikler pulmoner inflamasyonu tetikleyebilir.²³²

DSÖ raporuna göre, alt solunum yolu enfeksiyonları küresel olarak en ölümcül bulaşıcı hastalık olmaya devam etmekte ve dünya çapında beşinci sıradaki ölüm nedeni olarak yer almaktadır. Ayrıca, trakea, bronş ve akciğer kanserlerinden kaynaklanan ölümler artmış ve şu anda altıncı sıradaki ölüm nedeni olarak yer almaktadır.²³³

MNP'lerin Nörotoksik Etkileri:

Merkezi ve Periferik Sinir Sistemlerine Zarar

Araştırmalar, nörolojik bozuklukların dünya çapında fiziksel ve bilişsel engelliliğin başlıca nedeni olduğunu ve şu anda yaklaşık 3,4 milyar insanı etkilediğini doğrulamaktadır. Hasta sayısı son 30 yılda önemli ölçüde artmıştır.²³⁴ Ayrıca, kronik nörodejeneratif hastalıkların yükünün önümüzdeki yirmi yıl içinde en az iki katına çıkması beklenmektedir.

DSÖ verilerine göre, dünya çapında her sekiz kişiden biri ruh sağlığı bozukluğundan muzdariptir.²³⁵

Ergenler ve genç yetişkinler arasında bipolar bozukluğun görülme sıklığı, 1990 yılında 100.000 kişi başına 79,21 iken, 2019 yılında 100.000 kişi başına 84,97'ye yükselmiştir.²³⁶ Son otuz yılda, hem erkeklerde hem de kadınlarda görülme sıklığı artmıştır (Şekil 88).

Son araştırmalar, çocuk ve ergenlerde ruh sağlığı bozukluklarının arttığını göstermektedir. 2022 Ulusal Sağlık Hizmetleri Kalite ve Eşitsizlik Raporu'na göre, 2016'dan 2019'a kadar, ruh sağlığı ile ilgili ana tanıyla acil servise başvuru oranları sadece 0-17 yaş grubunda 100.000 kişi başına 784,1'den 869,3'e yükselmiştir. Ayrıca, 2008'den 2020'ye kadar, 12 yaş ve üstü kişilerde intihar nedeniyle ölüm oranları genel olarak %16 artarak 100.000 nüfus başına 14,0'dan 16,3'e yükselmiştir.²³⁷

Sağlık sigortası şirketi Blue Cross Blue Shield'ın bir raporuna göre, majör depresyon olarak da bilinen klinik depresyon tanıları 2013'ten bu yana %33 artmıştır. "Bazı literatürde, 2030 yılına kadar depresyonun uzun ömür veya yaşam kaybının bir numaralı nedeni olacağı öngörülmeye başlanmıştır. Raporda, depresyonlu kadın ve erkeklerin ortalama olarak 9,6 yıla kadar sağlıklı yaşam süresini kaybedebileceği belirtilmektedir.²³⁸

²³²Bengalli, R. et al. Atık plastiklerden elde edilen mikro partiküllerin karakterizasyonu ve bunların insan akciğer A549 hücreleri ile biyo-etkileşimi. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³Dünya Sağlık Örgütü. En önemli 10 ölüm nedeni. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

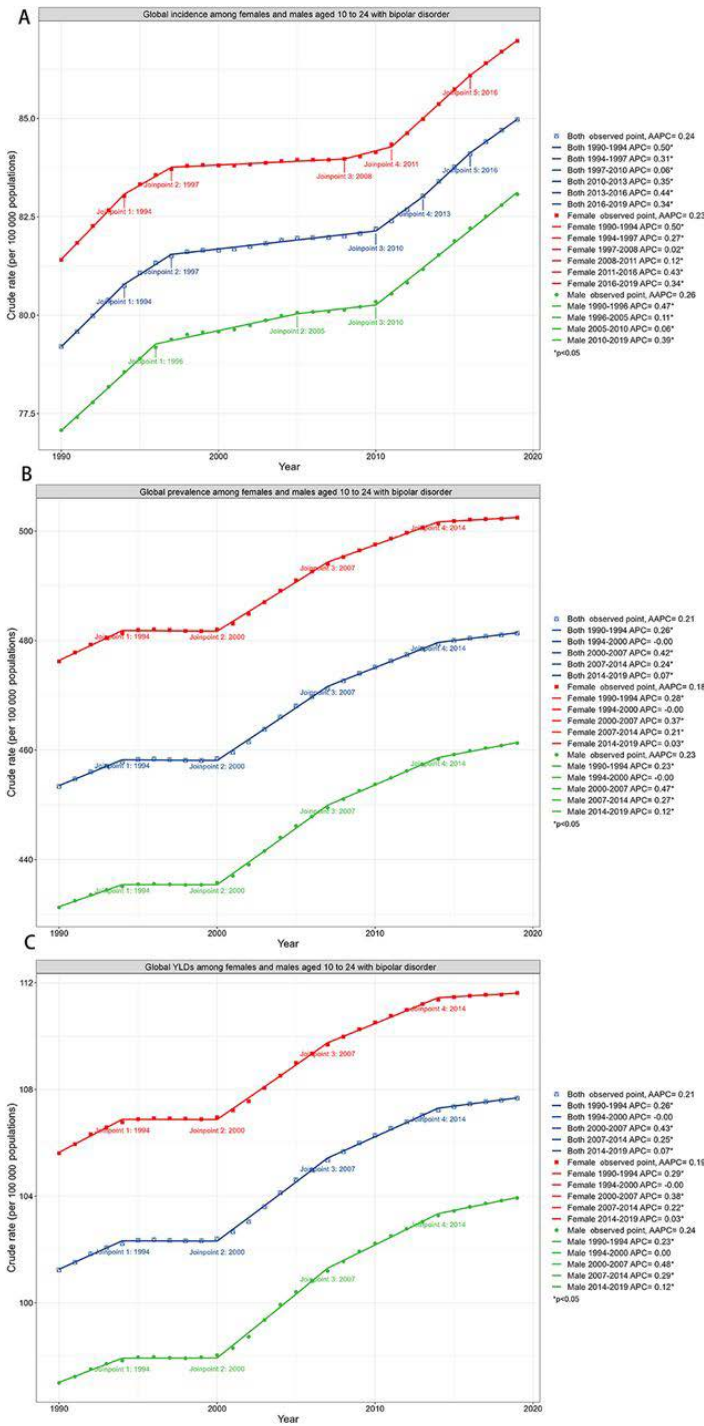
²³⁴VDünya Sağlık Örgütü. Her 3 kişiden 1'inden fazlası, dünya çapında hastalık ve sakatlığın başlıca nedeni olan nörolojik rahatsızlıklardan etkilenmektedir. (2024) <https://www.who.int/news/item/14-03-2024-over-1-in-3-people-affected-by-neurological-conditions--the-leading-cause-of-illness-and-disability-worldwide> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²³⁵Dünya Sağlık Örgütü. Ruhsal bozukluklar. WHO Bilgi Notları. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Ergenlerde ve genç yetişkinlerde bipolar bozuklukların küresel, bölgesel ve ulusal yükü: 1990'dan 2019'a trend analizi. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷ABD Sağlık ve İnsan Hizmetleri Bakanlığı. 2022 Ulusal Sağlık Hizmetleri Kalitesi ve Eşitsizlikleri Raporu. Rockville, MD: Sağlık Hizmetleri Araştırma ve Kalite Ajansı. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²³⁸Blue Cross Blue Shield. Majör depresyon: Genel sağlık üzerindeki etkisi. Rapor. (2018) <https://www.bcbs.com/news-and-insights/report/major-depression-the-impact-on-overall-health> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).



Şekil 88: 1990'dan 2019'a kadar 10-24 yaş arası tüm, kadın ve erkek ergen ve genç yetişkinlerde küresel bipolar bozukluk görülme sıklığı, yaygınlığı ve sakatlıkla geçirilen yılların (YLD) birleşme noktası regresyon analizi. *p<0,05; AAPC, ortalama yıllık yüzde değişim; APC, yıllık yüzde değişim; YLD, sakatlıkla geçirilen yıllar.

Kaynak: Zhong, Y. et al. Ergen ve genç yetişkinlerde bipolar bozuklukların küresel, bölgesel ve ulusal yükü: 1990-2019 yılları arasında bir eğilim analizi. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

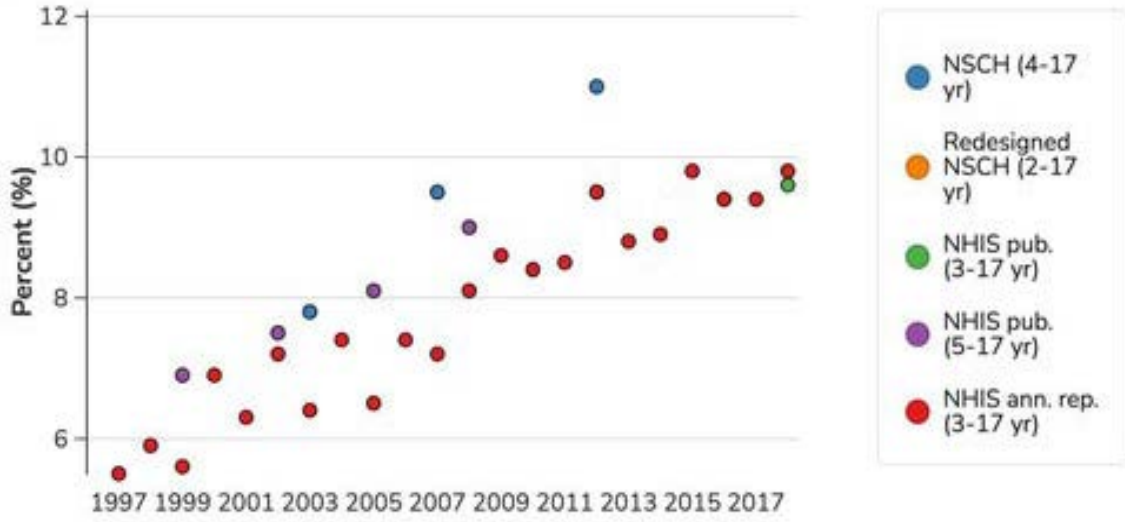
Son birkaç on yılda, dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğu (DEHB) tanıları giderek artmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan ulusal anketler, 1997'den 2016'ya kadar olan 20 yıllık dönemde görülme sıklığının %6,1'den %10,2'ye çıktığını göstermektedir (Şekil 89).²³⁹

31 ülkeyi kapsayan 2023 tarihli bir inceleme, okuryazarlık ve matematik becerilerinde düşüş olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 90).²⁴⁰

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. ABD'deki Çocuk ve Ergenlerde Tanı Konulan Dikkat Eksikliği/Hiperaktivite Bozukluğunun Yirmi Yıllık Eğilimleri, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

²⁴⁰Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü. Yetişkinler, değişen dünyada başarılı olmak için gerekli becerilere sahip mi? OECD Yayınları. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Ebeveynleri tarafından DEHB tanısı konulan çocukların yüzdesi

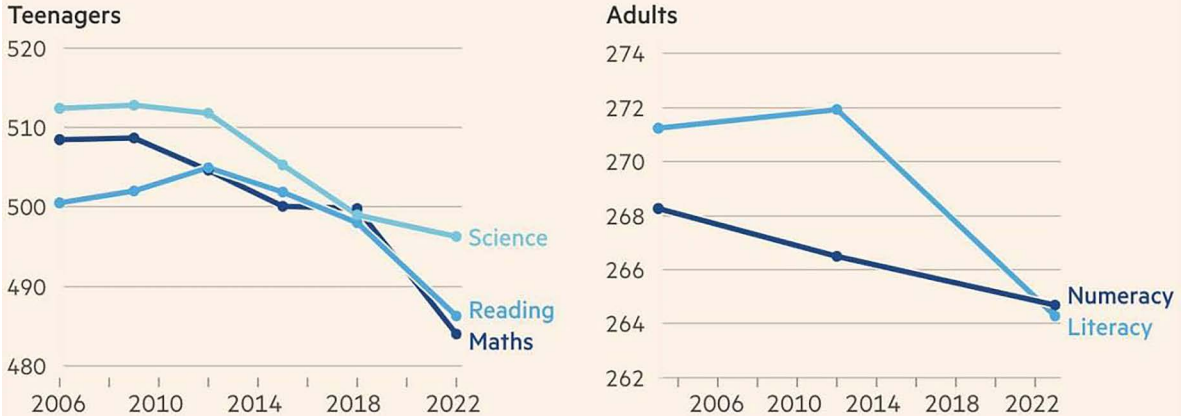


Şekil 89: 1997'den 2016'ya DEHB prevalans eğilimlerinin grafiği

Kaynak: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. ABD'deki Çocuk ve Ergenlerde Tanılanan Dikkat Eksikliği/Hiperaktivite Bozukluğunun Yirmi Yıllık Eğilimleri, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)



Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch
©FT

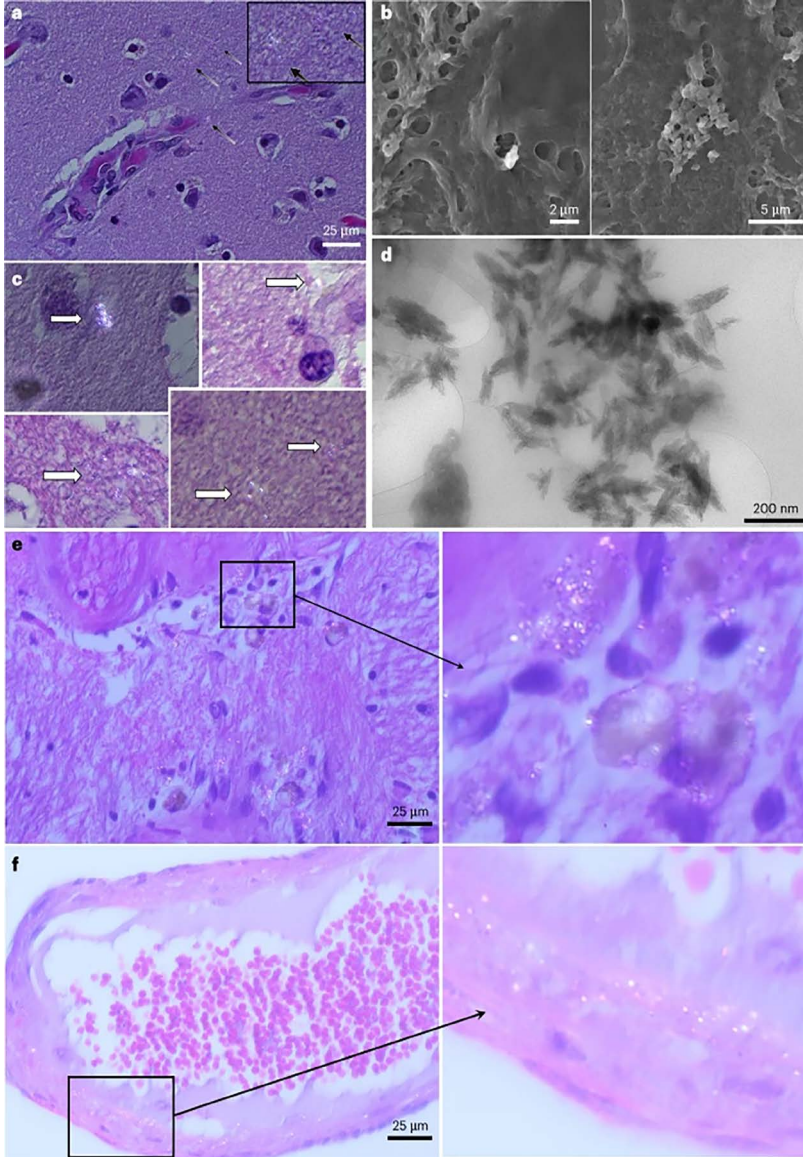
Şekil 90: Mantık ve problem çözme testlerindeki performans düşüş göstermiştir.

Kaynak: OECD PISA, PIAAC ve Yetişkin Okuryazarlık ve Yaşam Becerileri Anketi

FT grafiği: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Nörodejeneratif ve nöropsikiyatrik bozuklukların artışıdaki eğilimler, çevrede plastiklerin varlığının artmasıyla açıkça ilişkilidir (Şekil 96-97).

En yüksek nanoplastik konsantrasyonları insan beyin dokusunda bulunmuştur – karaciğer veya böbreklerden 7 ila 30 kat daha yüksek. Demans tanısı konulan bireylerin beyin doku örneklerinde, demans olmayan bireylerin beyin dokusuna kıyasla 10 kata kadar daha yüksek MNP varlığı saptanmıştır (Şekil 91).²⁴¹ Beyinde baskın olan parçacıklar, ambalajlamada en yaygın kullanılan plastiklerden biri olan küçük polietilen parçacıkları veya pullarıydı.



Şekil 91: a, b, Polarizasyon dalga mikroskobu (a, siyah oklar refrakter inklüzyonları gösterir; iç kısım netlik için dijital büyütmedir) ve SEM (b, görsel alanlar 15,4 ve 20,1 μm genişliğindedir) kullanılarak vefat etmiş insan örneklerinden alınan beyin kesitleri taranmıştır. c, Büyük (>1 μm) inklüzyonlar gözlenmemiştir; ek polarizasyon dalgası örnekleri vurgulanmıştır (beyaz oklar mikron altı refrakter inklüzyonları vurgulamaktadır). Bu teknolojilerin çözünürlük sınırlamaları, Py-GC/MS için kullanılan peletlerden elde edilen özütleri incelemek için TEM kullanımını gerektirmiştir. d, Örnek TEM görüntüleri, dispersiyondan sonra sayısız parçacık veya pul benzeri katı partikülleri ortaya çıkarmıştır; bu partiküllerin boyutları büyük ölçüde uzunlukları <200 nm ve genişlikleri <40 nm'dir. e, f, Polarizasyon dalga mikroskobu, demans vakalarında, özellikle bağışıklık hücresi birikiminin olduğu bölgelerde (e) ve damar duvarları boyunca (f) önemli ölçüde daha fazla refraktif inklüzyonlar ortaya çıkarmıştır. Tüm görüntüler, analitik kimyayı destekleyen görsel kanıt sağlamak için küçük bir katılımcı grubundan (normal beyinler için n = 10; demans vakaları için n = 3) toplanmıştır. Kaynak: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Vefat etmiş insan beyinlerinde mikroplastiklerin biyolojik birikimi. Nat Med 31, 1114–1119 (2025).

<https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Vefat etmiş insan beyinlerinde mikroplastiklerin biyobirikimi. Nat Med 31, 1114–1119 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

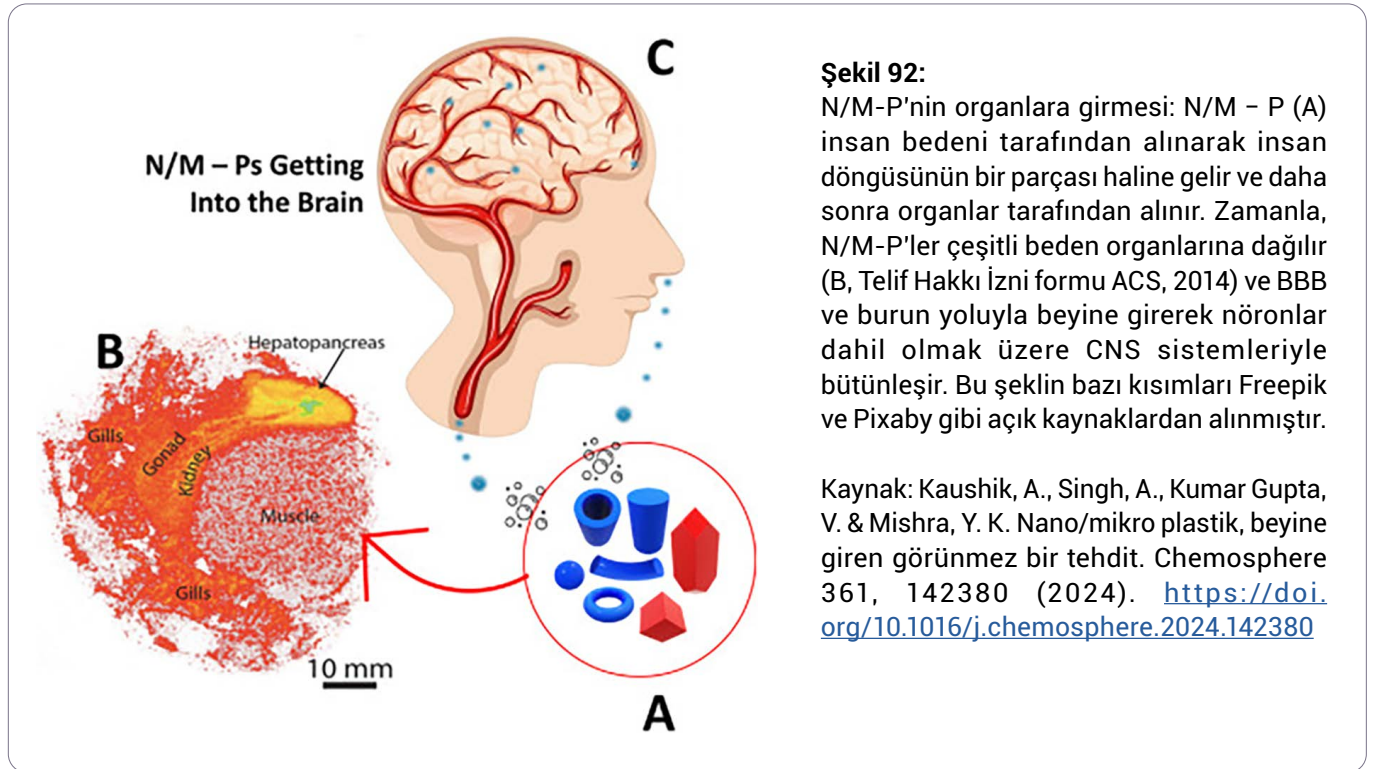
Yeni veriler, 2016'dan 2024'e kadar sekiz yıl içinde insan beynindeki plastik miktarının %50 arttığını doğruluyor.²⁴¹



"Ortalama yaşı 45-50 civarında olan normal bireylerin beyin dokusunda gördüğümüz konsantrasyonlar gram başına 4.800 mikrogramdı. (...) Bu, standart bir plastik kaşığın tamamına eşdeğer. Bu da, bugün beyinlerimizin %99,5'inin beyin, geri kalanının ise plastik olduğu anlamına geliyor." dedi.²⁴²

Atmosfer, su ve gıdalardaki plastik parçacıklarının artan seviyeleri göz önüne alındığında, bedenlerimizdeki nanoplastik miktarının artmaya devam edeceği kesindir. Bu eğilim devam ederse, beyindeki plastik içeriği önümüzdeki dört yıl içinde %50 daha artabilir.

Mikro ve nanoplastikler, kan dolaşımı yoluyla kan-beyin bariyerini (BBB) geçerek ve koku sinirleri yoluyla solunum yoluyla beyine girer (Şekil 92).



Şekil 92:

N/M-P'nin organlara girmesi: N/M - P (A) insan bedeni tarafından alınarak insan döngüsünün bir parçası haline gelir ve daha sonra organlar tarafından alınır. Zamanla, N/M-P'ler çeşitli beden organlarına dağılır (B, Telif Hakkı İzni formu ACS, 2014) ve BBB ve burun yoluyla beyine girerek nöronlar dahil olmak üzere CNS sistemleriyle bütünleşir. Bu şeklin bazı kısımları Freepik ve Pixaby gibi açık kaynaklardan alınmıştır.

Kaynak: Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/mikro plastik, beyine giren görünmez bir tehdit. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Vefat etmiş insan beyinlerinde mikroplastiklerin biyobirikimi. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Beyin, "bir kaşık dolusu plastik" mikroplastik içerir. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Kan-beyin bariyeri, kan dolaşımından merkezi sinir sistemine madde geçişini düzenleyen özel bir fizyolojik sistemdir (Şekil 93). Toksinleri ve patojenleri engellerken, besin maddelerinin ve oksijenin geçişine izin verir (Şekil 94). Bu mekanizma, nöronal ortamın homeostazisini koruyarak beyni kritik bir şekilde korur.

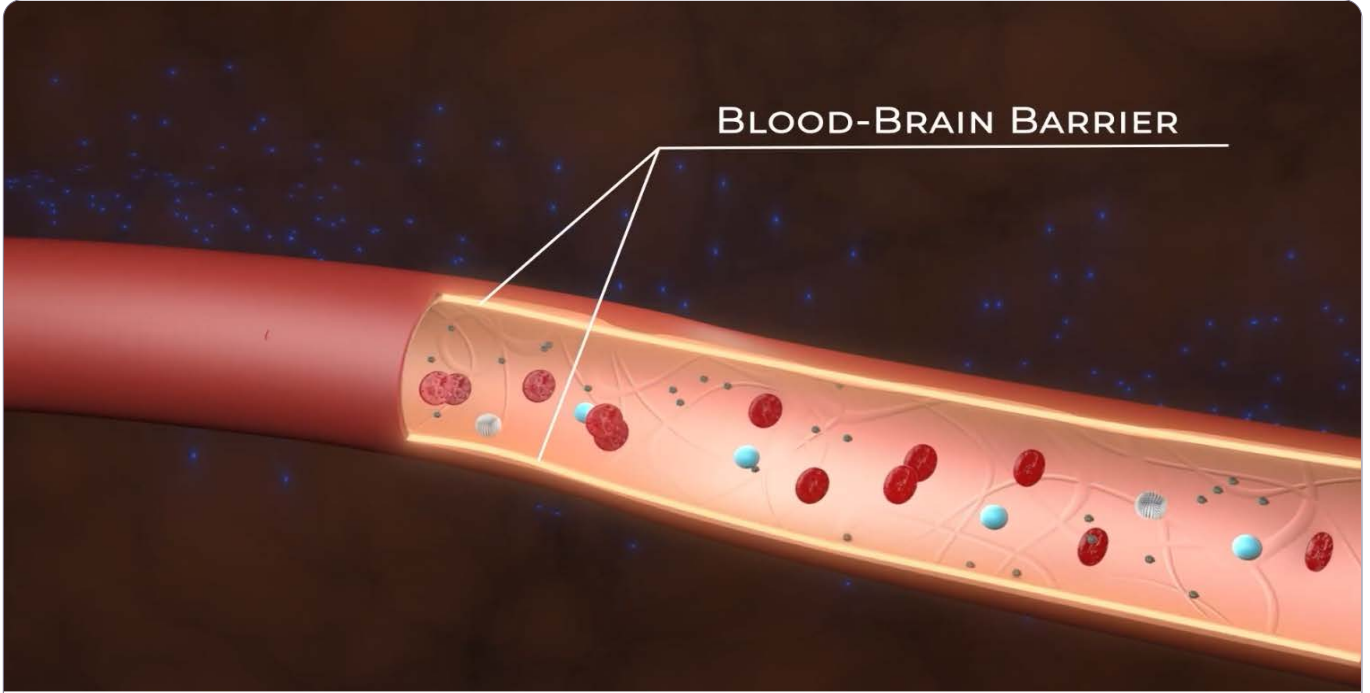
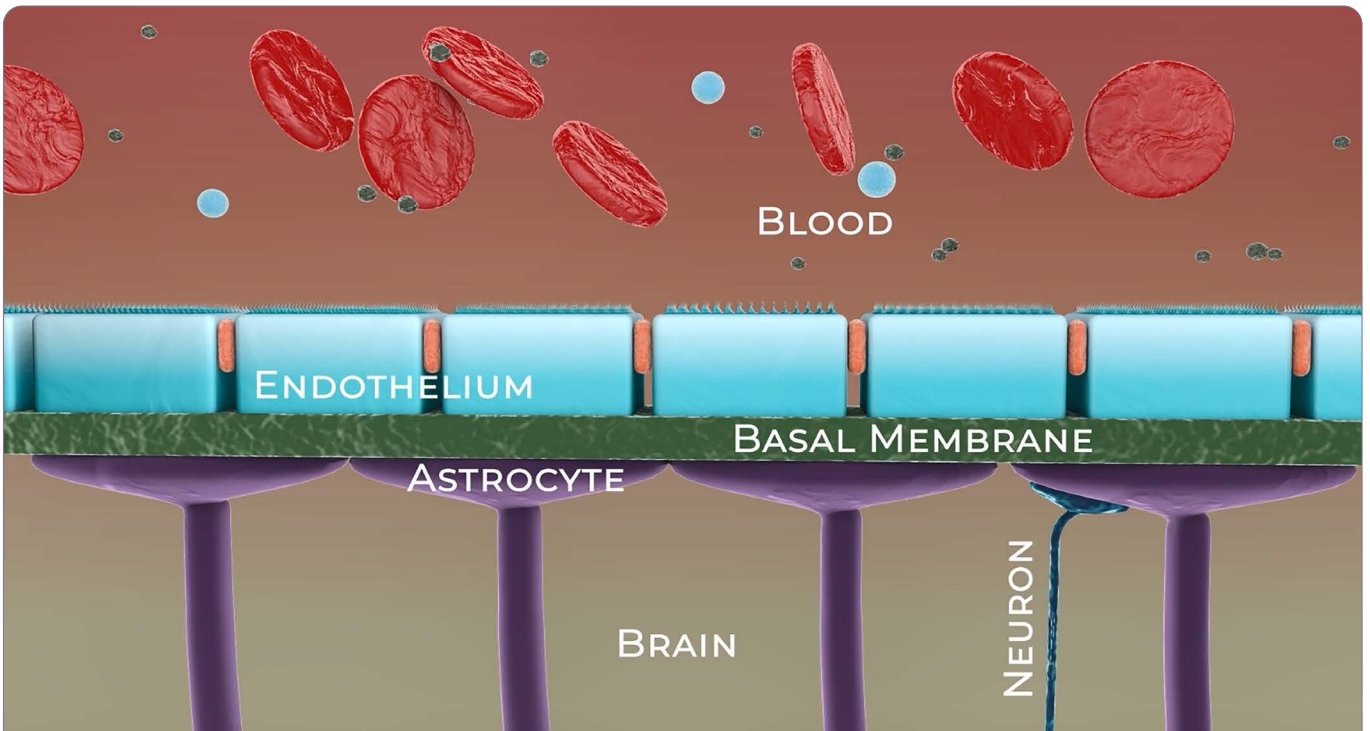


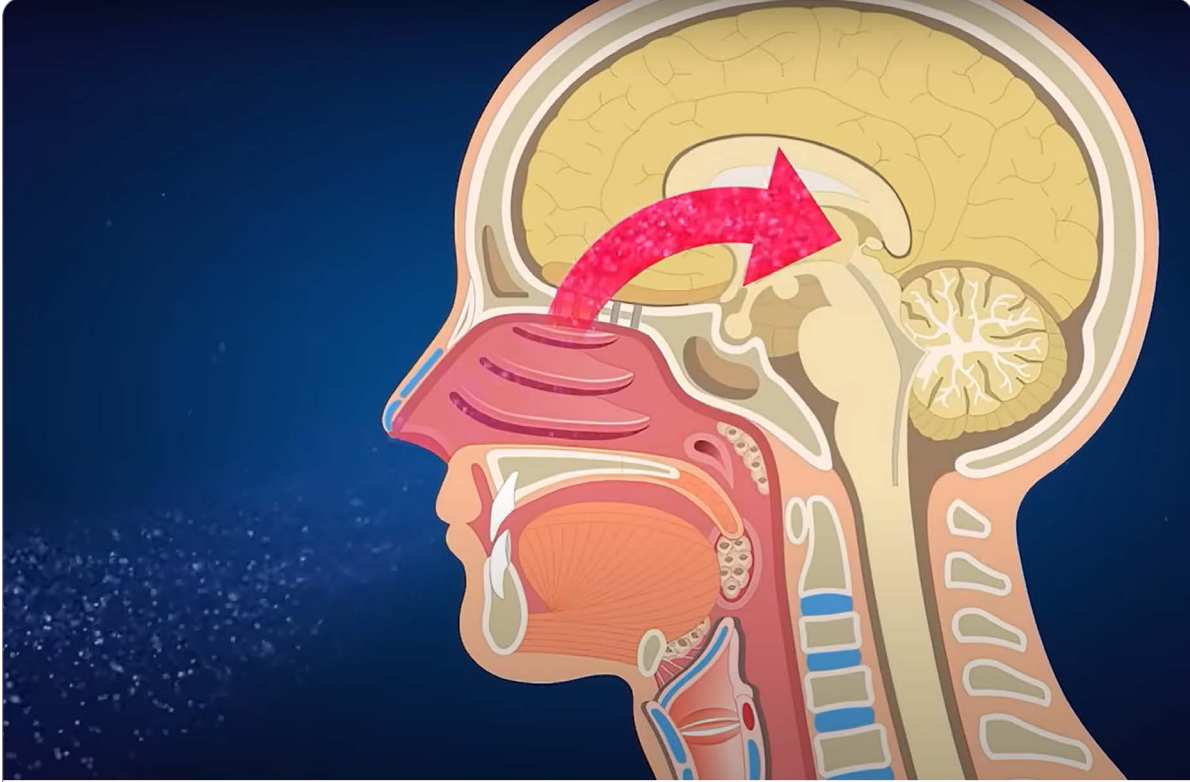
Рисунок 93. Схематическое изображение кровеносного сосуда головного мозга



Şekil 94: Kan-beyin bariyerinin şematik gösterimi

Mikron altındaki boyutları ve fizikokimyasal özellikleri nedeniyle, plastik nanopartiküller bedene girdikten sadece iki saat içinde beyine nüfuz edebilir.²⁴³

Solunduğunda, plastik nanopartiküller koku sinirleri yoluyla doğrudan kokuları işleyen beyin bölgesine ulaşır (Şekil 95).²⁴⁴ Sonuç olarak, diğer organlara göre beyine daha kısa ve daha doğrudan bir yoldan ulaşırlar.



Şekil 95: NP'lerin koku sinirleri yoluyla beyine nüfuz etmesi

Nanoplastikler beyine nüfuz ettiğinde, beyin hücrelerinin (nöronların) işlevini bozar. Araştırmalar, nanopartiküllerin yüzey özelliklerinin ve elektrik yükünün nöronlarla etkileşimini ve sinir uyarılarının iletimini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Nanoplastiklerin elektrostatik yükü, insan vücudundaki her hücrenin işlevine serbestçe müdahale etmelerine, hücrelere nüfuz etmelerine, oksidatif stres ve kronik iltihaplanmaya neden olmalarına, mitokondriyal fonksiyonu bozmalarına ve potansiyel olarak mitokondriyal yıkıma ve hücre ölümüne yol açmalarına olanak tanır.

Çalışma²⁴⁵, negatif yüklü nanopartiküllerin nöronal membranların depolarizasyonunu tetikleyerek elektriksel aktivitelerini değiştirebileceğini göstermiştir.

²⁴³Kopatz, V. et al. Mikro ve Nanoplastikler Kan-Beyin Bariyerini (BBB) Aşıyor: Biyomoleküler Korona'nın Rolü Ortaya Çıktı. Nanomalzemeler 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. ve ark. İnsan Beyninin Koku Bezi'nde Mikroplastikler. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. İnorganik Nanopartiküllerle Nöronların Seçici Hedeflemesi: Nanopartikül Yüzey Yükünün Önemli Rolünün Ortaya Çıkarılması. ACS Nano 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>

Deneyler, negatif yüklü nanoplastik parçacıkların sinir impulslarının iletilmesinde aktif rol oynayan nöronlara seçici olarak bağlandığını ortaya koymuştur. Bu parçacıklar nöron hücre gövdelerine, dendritlere ve sinaptik yarıklarına yapışırken, elektriksel aktivitesi olmayan glial hücreler bunlarla etkileşime girmez.

Böylece, nöronların elektriksel aktivitesi, negatif yüklü nanoplastiklerin hücre zarlarına bağlanmasının birincil tetikleyicisi olarak işlev görür.

Araştırmalar, mikro ve nanoplastiklerin, nöronları çevreleyen ve sinir sinyallerinin iletimini kolaylaştıran, lipid açısından zengin beyin miyelin kılıfında birikme eğiliminde olduğunu göstermektedir.²⁴⁶ Nanoplastikler, aksonların etrafındaki miyelin kılıfının bozulmasını tetikleyerek,^{247,248} nöronlar arasındaki sinir uyarılarının iletimini bozar.

Nanoplastiklerin Nöronlar Üzerindeki Etkisi

Nanoplastikler, aşağıdaki mekanizmalar yoluyla nöronları etkileyebilir:

1. Nöronal Membran Potansiyeli Üzerindeki Etkisi

Nöronlar, iyon gradyanları (Na^+ , K^+ , Cl^- vb.) ve iyon kanallarının aktivitesi tarafından sürdürülen membranlarındaki elektrik potansiyeli farkına (dinlenme durumunda yaklaşık -70 mV) göre işlev görür. Yüklü bir nanoplastik parçacık nöron zarının yakınına geldiğinde, elektrik alanını değiştirebilir ve zar potansiyelini dengesizleştirebilir. Bu durum depolarizasyon veya hiperpolarizasyona ve ciddi durumlarda spontan nöron aktivasyonuna veya sinyal blokajına yol açabilir.

2. İyon Kanalları ile Elektrostatik Etkileşim

Nöronal membranlardaki iyon kanalları, özellikle kanalın "kapı" bölgelerinde yüklü amino asitler içerir. Güçlü negatif veya pozitif yüklü bir nanoplastik parçacık, bu bölgelerle elektrostatik olarak etkileşime girerek kanalın konfigürasyonunu değiştirebilir. Bu, kanalın tıkanmasına veya yanlış aktivasyonuna neden olarak normal nöronal fonksiyonu bozabilir.

3. Sinaptik Fonksiyonun Bozulması

Sinapslar, Ca^{2+} , Na^+ iyonlarının ve nörotransmitterlerin hassas aktivitesine bağlıdır.²⁴⁹ Elektrostatik yüklü nanoplastik parçacıklar, nörotransmitter salınımını engelleyebilir veya yanlış sinyaller üretebilir, bu da sinir uyarılarının iletimini bozabilir.

²⁴⁶Pekin Üniversitesi Çevre Bilimi ve Mühendisliği Merkezi. Prof. Yi Huang'ın ekibi, atmosferik mikroplastik dağılımı ve insan sağlığı riskleri konusunda yeni ilerlemeler kaydetti. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Küresel Serebral İskemi Sonrası Nöronal Ölüm Üzerine Mikroplastik Birikiminin Etkileri. Hücreler 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Fetal sıçan beyinde polistiren nanoplastiklerin seçici biyobirikimi ve miyelin gelişimine zarar. Ekotoksikoloji ve Çevre Güvenliği 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moinafshari, K. et al. Mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin insan merkezi sinir sistemi üzerindeki potansiyel etkisine ilişkin bir bakış açısı. Çevre Bilimi: Nano 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Oksidatif Stres ve Enflamasyon

Yükü nanoplastikler, reaktif oksijen türlerinin seviyelerini artırarak oksidatif strese neden olabilir. Nöronlarda oksidatif stres, reaktif oksijen türlerinin hücrelerin bunları nötralize etme kapasitesini aştığında ortaya çıkar. Bu durum DNA'ya ve membranlar, proteinler ve mitokondri gibi hücresel yapılara zarar vererek normal nöron fonksiyonlarını bozar. Sonuç olarak, hücre sinir uyarılarını etkili bir şekilde iletme yeteneğini kaybeder, bu da hücrenin bozulmasına ve sonunda ölümüne yol açar. Nöronların yenilenme kapasitesi sınırlı olduğundan, oksidatif stresin neden olduğu hasar genellikle geri döndürülemez ve hafıza, dikkat ve diğer bilişsel işlevlerde ilerleyici bir düşüşe neden olabilir.

5. Mitokondriyal Fonksiyon Üzerindeki Etkisi

Pozitif yüklü nanoplastikler hücrelere nüfuz edebilir ve mitokondriyal membran potansiyelini bozarak mitokondriyal membranlarda birikebilir. Bu durum solunum zincirini bozarak elektron kaçaklarına neden olur ve bu kaçaklar oksijenle reaksiyona girerek reaktif oksijen türleri, özellikle süperoksit anyonları oluşturur. Bu türlerin aşırı birikimi oksidatif stresi artırır ve hücresel yapıları hasar görebilir.

6. Mitokondriyal Mutasyonlar

Nanoplastik parçacıklar mitokondriyal DNA'ya zarar vererek normal mitokondriyal fonksiyonu bozabilir. Bu, enerji üretimi, oksidatif stres düzenlemesi, programlanmış hücre ölümü ve metabolizma gibi kritik hücresel süreçleri etkiler. Bu sistemlerdeki bozulmalar, hastalıkların gelişmesini teşvik eden koşullar yaratabilir.

7. Nanoplastik Yüzeylerin Reaktif Özellikleri

Nanoplastiklerin yüksek özgül yüzey alanı, kimyasal reaktivitelerinin ve reaktif oksijen türleri üretme kabiliyetlerinin artmasının temel faktörlerinden biridir. Mikroplastiklere kıyasla, nanopartiküllerin birim kütle başına yüzey alanı on kat, hatta yüz kat daha büyüktür, bu da biyomoleküller ve çevre ile etkileşimlerini önemli ölçüde artırır.

Plastik parçacıklar üzerindeki elektrostatik yük, sinir uyarılarının iletimini engelleyerek veya bozarak nöronların işlevini bozabilir. Bu, sinir sisteminde işlev bozukluklarına yol açar ve bedende çok çeşitli patolojik durumları tetikleyebilir. Bu etkiler, çeşitli nörolojik, otonomik, bilişsel ve psikiyatrik bozukluklar olarak ortaya çıkar (Tablo 2).

Nanoplastiğe maruz kalmanın sinir hücreleri üzerindeki etkileri, multipl skleroz, amiotrofik lateral skleroz, Alzheimer hastalığı, Parkinson hastalığı, otoimmün bozukluklar, epilepsi, iskemik ve hemorajik inme, depresyon, anksiyete ve bilişsel bozukluklar, şizofreni, bipolar bozukluk, otizm ve daha fazlasını içeren çok çeşitli bozukluklarla bağlantılıdır.

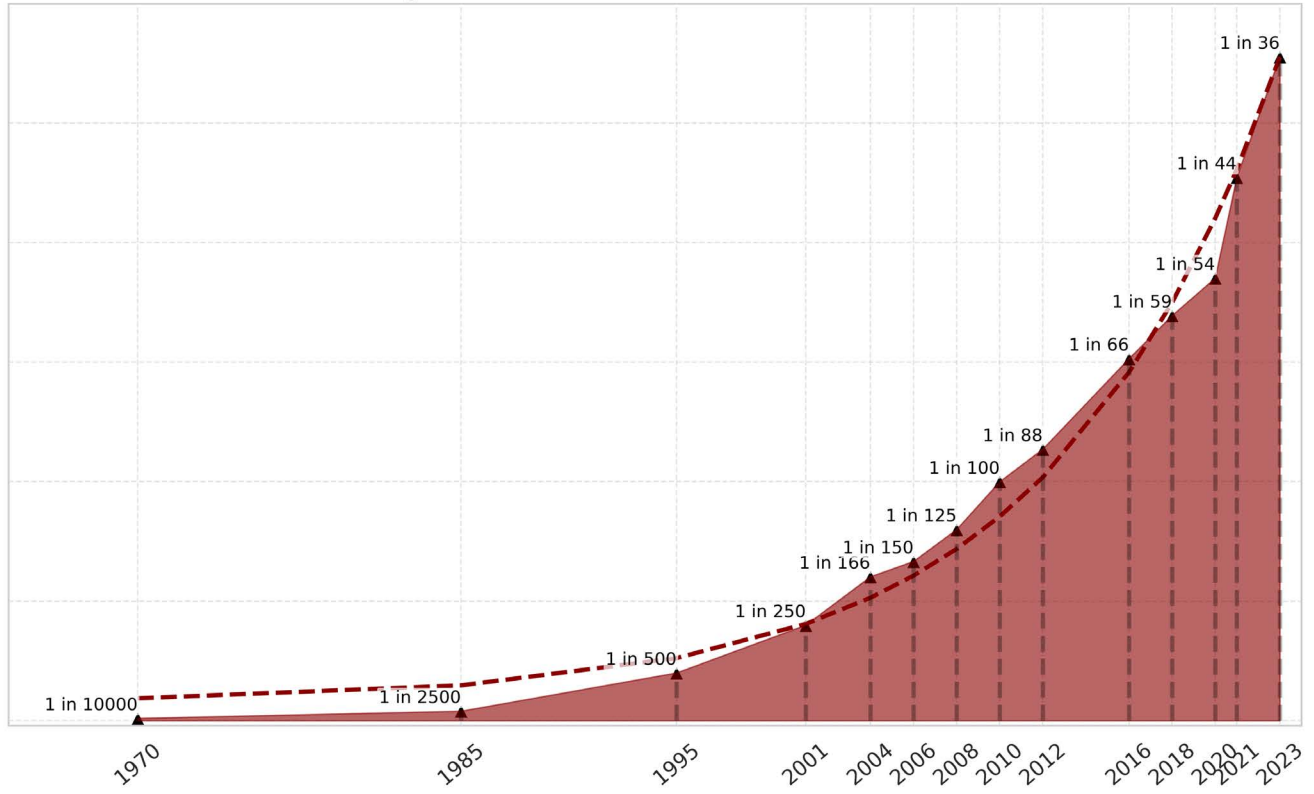
Kategori	Tezahür	Neden/Mekanizma
Motor Rahatsızlıklar	Felç	Merkezi sinir sisteminden kaslara motor impulsların iletilmesinde bozukluk
	Nöbet	Uyarıcı ve engelleyici sinir sinyalleri arasındaki dengesizlik
	Duyu kaybı	Reseptörlerden beyne bilgi ileten duyu sinir yollarında işlev bozukluğu
	Koordinasyon bozukluğu	Serebellar veya spinal iletim yollarında hasar
Duyusal Bozukluklar	Konuşma, görme ve işitme bozuklukları	Beyindeki duyu ve motor merkezlerine bağlı sinir yollarında hasar
Otonomik Disfonksiyonlar	Solunum, kalp atış hızı ve sindirim sorunları	Otonom sinir sisteminin bozulması
	Termoregülasyon bozukluğu ve organ fonksiyon bozukluğu	Otonom düzenleme merkezlerinde işlev bozukluğu
Bilişsel Bozukluklar	Hafıza ve dikkat bozuklukları	Serebral kortekste yapısal veya işlevsel değişiklikler
	Bilinç değişikliği, koma	Uyanıklık ve bilinci düzenlemede önemli rol oynayan beyin retiküler oluşumunda hasar
Psikolojik ve Duygusal Rahatsızlıklar	Anksiyete, depresyon, ruh hali bozuklukları	Nörotransmitter dengesizlikleri; beyindeki duygu merkezlerinde hasar

Tablo 2: Nanoplastiklerin Nöronlar Üzerindeki Etkisinin Neden Olduğu Patolojik Durumların Spektrumu

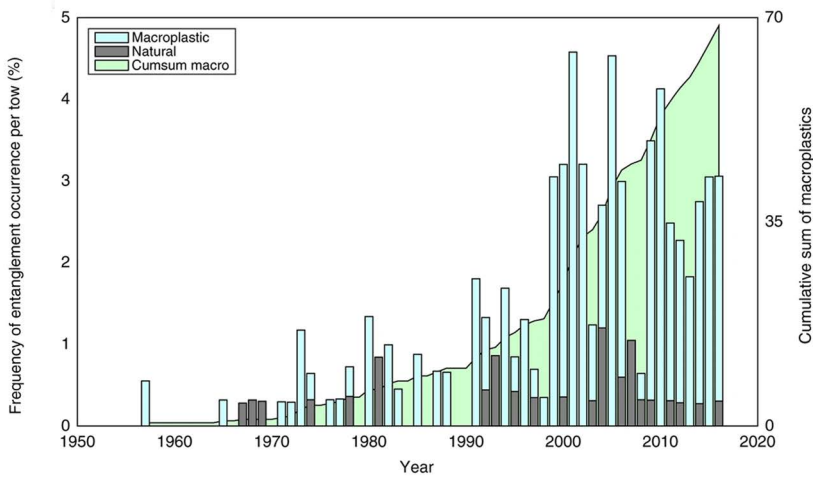
Otizm Spektrum Bozuklukları için Risk Faktörü Olarak Mikro ve Nanoplastikler

Çevresel plastik kirliliğinin artmasıyla birlikte otizm spektrum bozukluklarının (ASD) yaygınlığı da artmıştır (Şekil 96-97).

The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023

**Şekil 96:** 1970'den 2023'e kadar Amerika Birleşik Devletleri'nde otizm görülme sıklığındaki artış

Kaynak: Rogers, T. Otizmin politik ekonomisi. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025)

**Şekil 97:** 1957'den 2020'ye kadar okyanuslardaki plastik miktarındaki artış

Kaynak: Ostle, C. et al. 60 yıllık zaman serisinden kanıtlanan okyanuslardaki plastik miktarındaki artış. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

CDC'nin Otizm ve Gelişimsel Engelliler İzleme (ADDM) Ağı'na göre, 2020 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde her 36 çocuktan 1'ine ASD teşhisi kondu, bu da 2000 yılından bu yana vakalarda %317'lik bir artışa işaret ediyor.^{250, 251}

İnsan sinir sistemi, embriyonik aşamadan erken çocukluk dönemine kadar gelişir. Araştırmalar, mikro ve nanoplastiklere (MNP'ler) maruz kalma ile ASD'nin gelişimi arasında potansiyel bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Koreli araştırmacıların deneysel verileri, doğum öncesi ve doğum sonrası MNP'lere maruz kalmanın nörogelişimsel bozukluklara katkıda bulunabileceğini göstermektedir.²⁵²

Polistiren nanoplastiklerin insan sinir kök hücreleri üzerindeki moleküler etkileri üzerine yapılan bir araştırma, nanoplastiğe maruz kalmanın doku hasarına ve nörogelişimsel hastalıklara yol açabileceğini göstermiştir²⁵³

Kemirgenler üzerinde yapılan araştırmalar²⁵⁴, hamilelik ve emzirme döneminde annelerin mikro ve nanoplastiklere maruz kalmasının, yavruların hipokampal nörojenezini bozabileceğini ve motor korteks, hipokampus, hipotalamus, medulla oblongata ve koku alma bezi dahil olmak üzere beyin yapılarının hacmini azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Sinir dokusu proteinlerinin yapısı ve işlevindeki değişikliklerin otizm dahil birçok bozukluğun gelişiminde kritik bir rol oynadığı iyi bilinmektedir.²⁵⁵

Son araştırmalar, nanoplastiklerin proteinlerle öncelikle hidrofobik etkileşimler, hidrojen bağları, Van der Waals çekim kuvvetleri ve elektrostatik kuvvetler gibi zayıf etkileşimler yoluyla etkileşime girdiğini göstermektedir²⁵⁶. Bu etkileşimler, protein moleküllerinde yapısal deformasyonlara neden olarak işlevselliklerini bozar. Proteinlerin sinir ağlarının oluşumunda ve sinaptik iletimde oynadığı rol göz önüne alındığında, bu tür değişiklikler ASD'nin gelişimine katkıda bulunabilir.

²⁵⁰Otizm Ebeveynlik Dergisi. 2024'te Bilmeniz Gereken Otizm İstatistikleri. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁵¹Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri. 11 ADDM Topluluğundan Verilere Göre Otizm Yaygınlığı Artıyor. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁵²Zaheer, J. ve ark. Otizm spektrum bozukluğu için potansiyel risk faktörü olarak doğum öncesi ve sonrası mikroplastik maruziyeti. Environment International 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Polistiren nanoplastiklerin insan sinir kök hücreleri üzerindeki moleküler etkileri. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Erkek farelerin gelişimi sırasında nanoplastik alımının dopamin sistemi üzerindeki etkisi. Neuroscience 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Otizm Spektrum Bozukluklarında Dinamik ve Sistemik Perspektif: Araştırmalarda Bakış Açısının Değişmesi, İhtiyaçlar ve Çözümler için Yeni Bir Ufuk Açıyor. Beyin Bilimleri 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Mikro ve Nanoplastiklerin Protein Katlanması ve Amiloidoz Üzerindeki Etkileri. Uluslararası Moleküler Bilimler Dergisi 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

MNP'lerin Kalp-damar Hastalıklarının Patogenezindeki Rolü

Plastik parçacıklar sadece kan dolaşımında dolaşmakla kalmaz, aynı zamanda damar duvarlarına da yerleşerek bir dizi patolojik değişikliği tetikleyebilir. Özellikle endişe verici olan, aterosklerotik plaklarda mikroplastiklerin tespit edilmesidir.²⁵⁷ Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, karotis arterlerinde mikroplastik bulunan hastaların kalp krizi, felç ve ölüm riskinin 4,5 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu, plastik parçacıkların aterosklerotik plakların oluşumuna ve dengesizleşmesine aktif olarak katkıda bulunduğunu, bunların yırtılmasını ve trombüs oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir.²⁵⁸ MNP'ler ayrıca, kan damarlarının iç yüzeyini kaplayan, vasküler tonusu düzenleyen, trombüs oluşumunu önleyen ve enflamatuar yanıtları hafifleten kritik hücre tabakası olan endotelin bütünlüğünü bozar.

Plastik parçacıkların neden olduğu endotel hasarı, kronik iltihaplanmaya ve tromboz riskinin artmasına yol açar, bu da özellikle kalp ve beyni besleyen arterlerde tehlikelidir.²⁵⁹ Mikroplastikler, trombositler ve kırmızı kan hücreleri gibi kan bileşenleriyle etkileşime girerek trombosit agregasyonunu teşvik eder ve pıhtı oluşumunu başlatır. Ek olarak, mikroplastiklerin yüzeyi hücrelere mekanik hasar verebilir ve kan pıhtılaşma kaskadlarını aktive edebilir, bu da zamanla kronik hiperkoagülasyona ve mikrovasküler bozukluklara yol açabilir.

Bağıışıklık hücreleri mikroplastik parçacıkları yutabilir, ama bunları tamamen parçalamak için gerekli mekanizmalara sahip değildir, bu da hücre deformasyonuna ve boyutlarının artmasına neden olur. Bu değişime uğramış hücrelerin beyindeki küçük damarlarda birikmesi, mikro trombüs oluşumuna katkıda bulunur, beyin kan akışını bozar ve genç bireyler de dahil olmak üzere inme riskini artırır.²⁶⁰

Beyne giden oksijenin kronik olarak azalması (hipoksi), nöronların ölümüne ve beyin dokusu atrofisi dahil olmak üzere nörodejeneratif değişikliklerin gelişmesine yol açar.²⁶¹ Bu süreçlere uzun süre maruz kalmak, belirli beyin yapılarının hacmini azaltabilir.

Elektrostatik yükleri nedeniyle, MNP'ler hücre zarlarıyla aktif olarak etkileşime girerek elektrik potansiyellerini bozar. Bu da damar kasılmalarını, miyositlerdeki sinyal iletimini ve kalp ritmini etkiler.

Kalp-damar hastalıklarından kaynaklanan ölümler dünya çapında istikrarlı bir şekilde artmaya devam etmektedir (Şekil 98).

25-44 yaş arası genç yetişkinlerde görülen ani kardiyak ölüm sendromuna²⁶² (Şekil 99) özellikle dikkat edilmelidir, bu sendrom Amerika Birleşik Devletleri'nde önde gelen ölüm nedenleri arasında yer almaktadır. Son yirmi yılda vaka sayısı önemli ölçüde artmıştır. MNP'lerin yaygın varlığı göz önüne alındığında, bu trajik olaylarda potansiyel rolünün göz ardı edilemeyeceği düşünülmektedir.

²⁵⁷Liu, S. et al. Piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (Py-GC/MS) ile üç tür insan arterinde tespit edilen mikroplastikler. *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

²⁵⁸Marfella, R. et al. Ateromlarda ve Kardiyovasküler Olaylarda Mikroplastikler ve Nanoplastikler. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Kan bileşenleri ile mikronanoplastiklerin yolculuğu. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

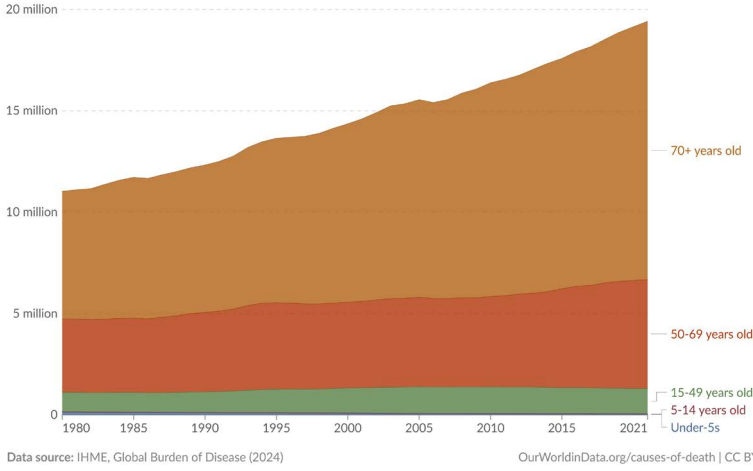
²⁶⁰Huang, H. et al. Kan dolaşımındaki mikroplastikler, hücre tıkanmasına neden olarak serebral trombozu tetikleyebilir ve nöro-davranışsal anormalliklere yol açabilir. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/mikro plastik, beyine giren görünmez bir tehdit. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Amerika Birleşik Devletleri'nde 25 ila 44 Yaş Arasındaki Yetişkinlerde Ani Kalp Ölümünde Eğilimler: 2 Büyük ABD Veritabanının Analizi. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

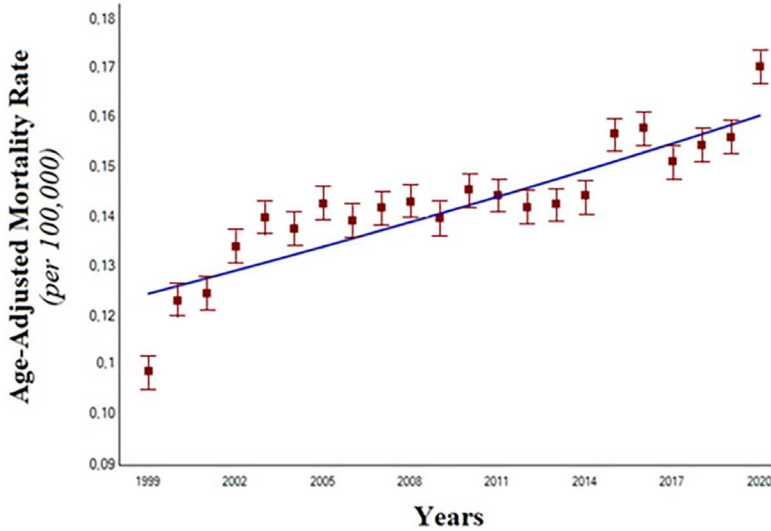
Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases¹ in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration².



1. **Cardiovascular disease:** Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially when people have risk factors like high blood pressure, smoking, alcohol use, poor diet, and air pollution.
2. **Civil Registration and Vital Statistics system:** A Civil Registration and Vital Statistics system (CRVS) is an administrative system in a country that manages information on births, marriages, deaths and divorces. It generates and stores 'vital records' and legal documents such as birth certificates and death certificates. You can read more about how deaths are registered around the world in our article: How are causes of death registered around the world?

Şekil 98: Yaşa göre kardiyovasküler hastalıklardan kaynaklanan ölüm sayısı, dünya genelinde

Our World in Data.
<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>



Şekil 99: 1999-2020 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde 25-44 yaş arası genç yetişkinlerde ani kalp ölümü nedeniyle yaşıya göre düzeltilmiş ölüm oranlarının eğilimleri ve ilgili %95 güven aralıkları.

Kaynak: Zuin, M. et al. Amerika Birleşik Devletleri'nde 25 ila 44 yaş arası yetişkinlerde ani kalp ölümü eğilimleri: 2 büyük ABD veri tabanının analizi. JAMA 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

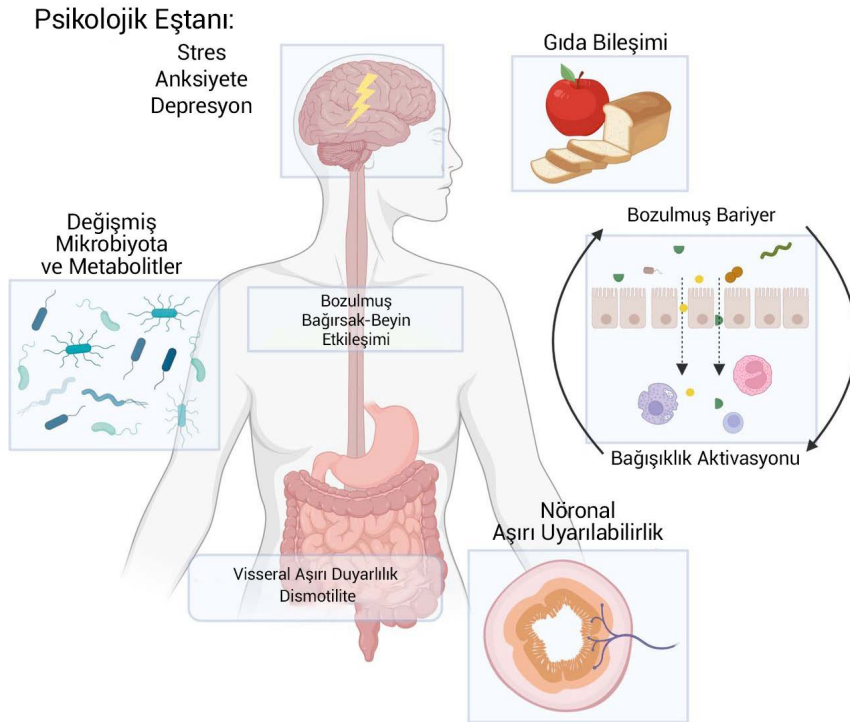
Bir diğer önemli sorun ise ani bebek ölümü sendromunun (SIDS) artmasıdır. Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde, SIDS oranı 2019'dan 2020'ye %15 artarak bebek ölümlerinin dördüncü nedeninden üçüncü nedenine yükselmiştir.²⁶³ SIDS'nin kesin nedenleri hala belirsiz olmakla birlikte, birçok bilim insanı bebeklerde kalp ritmi ve damar tonusunun düzenlenmesini bozan faktörlerin önemli bir rol oynayabileceğini öne sürmektedir. Plasentayı geçip gelişmekte olan fetüsün dokularında biriken nanoplastikler, olası bir risk faktörü olarak kabul edilmektedir. Araştırmacılar, nanoplastiklerin "görünmez katil" rolünün ana adaylarından biri olabileceği konusunda giderek daha fazla fikir birliğine varmaktadır.

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Ani Beklenmedik Bebek Ölümleri: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Bedenin en fazla enerjiye ihtiyaç duyan organlarından biri olan kalp, enerji ihtiyacını karşılamak için mitokondrilerin verimli çalışmasına büyük ölçüde bağımlıdır. Mikroplastik partiküllere maruz kalmak, mitokondriyal süreçleri bozarak miyokardiyumda enerji eksikliğine ve dolayısıyla kalp fonksiyon bozukluğuna yol açabilir.

MNP Maruziyetine Bağlı Gastrointestinal Disfonksiyon

Bağırsak, bedenin en büyük bağışıklık organıdır ve tüm bağışıklık hücrelerinin yaklaşık %70'ini, yaklaşık 500 milyon nöronu ve 100 trilyondan fazla mikroorganizmayı barındırır.²⁶⁴ Bağırsak mikrobiyotası, bağışıklık sağlığının korunmasında hayati bir rol oynar ve dengesizliği bağışıklığı zayıflatabilir ve çeşitli hastalıklara katkıda bulunabilir. Yoğun sinir ağrı ve merkezi sinir sistemi ile iletişim kurma yeteneği nedeniyle genellikle "ikinci beyin" olarak adlandırılan²⁶⁵ bağırsak, "bağırsak-beyin eksenini" aracılığıyla beyin ile karmaşık biyokimyasal sinyal alışverişinde bulunur ve bu, hem fiziksel hem de psiko-duygusal sağlığı önemli ölçüde etkiler (Şekil 100).



Şekil 100: Bağırsak-beyin etkileşim bozukluklarında patofizyolojik mekanizmalar

Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Bağırsak-beyin etkileşim bozukluklarında nöroimmün etkileşimlerin anlaşılması: fonksiyonel bozukluklardan immün aracılı bozukluklara. *Gut* 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Otonom sinir sistemi duyu nöronları ve bağırsak-beyin sinyalleri. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁵Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mikroplastikler Üzerindeki Zihin: Mikroplastiklerin Neden Olduğu Bağırsak Bozuklukları ve Bağırsak-Beyin Eksenini Sonuçlarının Araştırılması. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Sağlıklı bir bağırsak bariyeri, mikropların ve yabancı parçacıkların bağırsak lümeninden kan dolaşımına geçmesini engeller.²⁶⁵ Mikro ve nanoplastikler bu bariyeri bozarak bağırsak duvarının geçirgenliğini artırır. Bu da bağırsakta ve diğer organlarda iltihaplanmaya yol açarak bağışıklığı zayıflatır. Aynı zamanda, MNP'ler bağırsak mikrobiyotasının bileşimini değiştirerek yararlı ve patojenik mikroorganizmalar arasında dengesizliğe neden olur.²⁶⁶ Bu durum sindirimi bozar, bedenin gıda alerjenlerini parçalama yeteneğini azaltır ve gıda alerjisi riskini artırır.²⁶⁷

Bu, bir kısır döngü yaratır: plastik, bağırsak mikrobiyotasını bozar, iltihaplanmayı artırır ve bağırsak duvarının bütünlüğünü bozar. Sonuç olarak, toksinler, bakteriler ve plastik parçacıkları kan dolaşımına girmeye başlar. Kan dolaşımındaki varlıkları, bedende kronik iltihaplanmaya yol açan bir bağışıklık tepkisini tetikler. Kan dolaşımından, bu toksinler, bakteriler ve nanoplastikler kan-beyin bariyerini geçerek beyne ulaşabilir ve burada iltihaplanma reaksiyonlarına neden olabilir. Bu süreçler ise bağışıklık tepkisini daha da bozar, bedenin stres tepkisini artırır ve nöroendokrin mekanizmalar yoluyla bağırsak mikrobiyotasını olumsuz etkileyerek "bağırsak-beyin" eksenindeki kısır döngüyü tamamlar.

Bağırsak mikrobiyomu ile merkezi sinir sistemi arasındaki etkileşimin bozulması, nörolojik bozukluklarla doğrudan bağlantılıdır. Örneğin, otizm spektrum bozukluğu olan çocuklar, mikrobiyolojik analizler ve sindirim sistemi fonksiyon değerlendirmeleri ile doğrulanan önemli mikrobiyota dengesizlikleri sergilerler²⁶⁸.

İnflamatuar bağırsak hastalığı olan hastalar üzerinde yapılan çalışmalar, hastalığın ciddiyeti ile dışkıda mikroplastik konsantrasyonu arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. İnflamatuar bağırsak hastalığı olan hastalar, sağlıklı bireylere (28,0 parçacık/g) kıyasla daha yüksek mikroplastik seviyelerine (41,8 parçacık/g) sahiptir.

Ayrıca, bu hastaların rektal mukozadaki ülseratif lezyonlarda önemli miktarda mikroplastik birikimi gözlemlenmiştir.²⁶⁹ Dahası, bağırsakta kalan mikroplastikler, bedene girdikten uzun süre sonra bile zararlı etkilerini sürdürmektedir.

²⁶⁴Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Otonom sinir sistemi duyu nöronları ve bağırsak-beyin sinyalleri. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. Nano ve mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkisi: İnsan sağlığı risklerini anlamak. *Çevre Araştırmaları* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

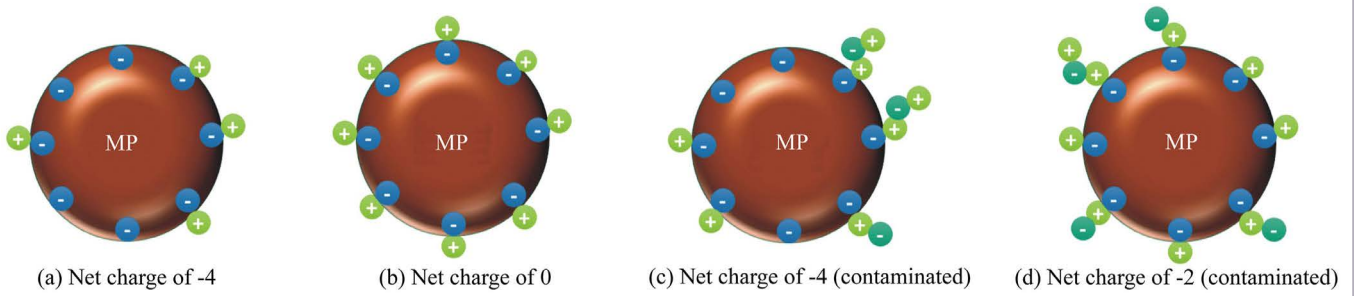
²⁶⁷Bora, S. S. et al. Mikroplastikler ve insan sağlığı: bağırsak mikrobiyomunun bozulması ve kronik hastalık risklerinin ortaya çıkarılması. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. ve ark. Otizm spektrum bozukluğu için çok krallı ve fonksiyonel bağırsak mikrobiyota belirteçleri. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹Yan, Z. ve ark. İnsan Dışkısında Mikroplastiklerin Analizi, Dışkı Mikroplastikleri ile İnflamatuar Bağırsak Hastalığı Durumu Arasındaki Korelasyonu Ortaya Çıkartıyor. *Environ. Sci. Technol.* 56, 414–421 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>

MNP'lerin Bağışıklık Sistemi Üzerindeki Etkileri

MNP'ler bedendeki bağışıklık tepkisini bozarak patojenlerin çoğalmasına elverişli koşullar yaratır. Yüklü MNP'ler toksinler, ağır metal tuzları, bakteriler ve virüsler gibi diğer molekülleri daha kolay çeker (bkz. Şekil 101). Bu, onları toksik bileşikler için bir tür "taşıma platformu" haline getirerek bu maddelerin biyolojik aktivitesini ve toksisitesini artırır. Nanoplastiklerin üzerindeki elektrostatik yük, bir enerji kaynağı veya "pil" gibi davranarak virüslerin ve bakterilerin daha uzun süre canlı kalmasına yardımcı olur.



Şekil 101: Su kirleticilerinin neden olduğu mikroplastik yüzey yüklerinin etkisinin gösterimi

Kaynak: Rahman, A. M. N. A. A. et al. Sudaki mikroplastik yüzey etkileşimleri ve potansiyel yakalama yöntemlerinin gözden geçirilmesi. Su Bilimi ve Mühendisliği 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Ayrıca, yüklü mikro ve nanoplastik parçacıklar su ve havada uzun süre asılı kalabilir. Aerosollere daha kolay yükselir ve solunum sistemine girerek insan bedenine emilme olasılığını artırır.

MNP'nin mikrobiyom, patojenler ve bağışıklık sistemi üzerindeki kümülatif etkileri, karmaşık sağlık riskleri oluşturmaktadır. Mikroplastiklerle temas eden bağışıklık hücreleri, mikroplastiklerle temas etmeyenlere göre yaklaşık üç kat daha hızlı ölmektedir.²⁷⁰

Mikroplastik parçacıklar, elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler nedeniyle virüsleri yüzeylerine adsorbe edebilir ve böylece virüslerin yaşayabilirliğini uzatabilir.²⁷¹

²⁷⁰Plastics News. Çalışma, mikroplastiklerin sağlık risklerini vurguluyor. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-micro-plastics> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Yüzey sularında plastik kirliliği ile ilişkili zarflı ve zarfsız virüslerin bağlanması, geri kazanımı ve bulaşıcılığı. Çevre Kirliliği 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Mikroplastiklerin yüzeyindeki virüsler, örneğin atık su arıtma tesislerinden plajlara ulaşmak için yeterli olan üç güne kadar aktif kalabilir.²⁷²

Mikroplastikler, patojenlerin yayılmasını kolaylaştırır ve bunların genetik rekombinasyonuna katkıda bulunabilir. Araştırmalar, plastik parçacıkların ilaçların etkinliğini bozmakla kalmayıp, antibiyotik dirençli bakteri suşlarının gelişmesine de neden olabileceğini göstermiştir.²⁷³

Mikro ve nanoplastiklerin yüklü parçacıkları, mikroorganizmaların kolonileşmesi için platform görevi görür.²⁷⁴ Bakteriler ve mantarlar, nanoplastiklerin elektrostatik alanlarını kullanarak hızlandırılmış büyüme gösterir. Daphnia üzerine yapılan araştırmalar, nanoplastiklere maruz kalmanın oksidatif stresi tetiklediğini ve mantar enfeksiyonlarının görülme sıklığını 11 kat artırdığını (özellikle Metschnikowia türü) göstermiştir.²⁷⁵ Bu bulgu, WHO'nun halk sağlığı için artan bir tehdit olarak tanımladığı mantar hastalıklarının yayılma alanının ve direncinin küresel ölçekte artmasıyla uyumludur.



“Bakteriyel antimikrobiyal direnç salgınının gölgesinden çıkan mantar enfeksiyonları artmakta ve tedavilere karşı giderek daha dirençli hale gelerek dünya çapında bir halk sağlığı sorunu haline gelmektedir” dedi DSÖ Antimikrobiyal Direnç Genel Müdür Yardımcısı Dr. Hanan Balkhy.²⁷⁶

Mikro ve nanoplastiklerin varlığında salınan mantar metabolitleri, tümör büyümesi²⁷⁷ ve kronik iltihaplanma ile ilişkilidir. Belirli kanser türlerinde mantar DNA'sı tespit edilmiştir, bu da mikro ve nanoplastiklerin kanserojenizde potansiyel bir rol oynadığını göstermektedir.²⁷⁸

²⁷²Stirling Üniversitesi. Yeni bir araştırmaya göre, otostopçu virüsler tatlı sudaki mikroplastiklerde hayatta kalabiliyor. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁷³Dick, L. et al. İlaçların nanoplastiklere adsorpsiyonu ciddi biyolojik etkilere sahiptir. Sci Rep 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. ve ark. Suda mikroplastik yüzey etkileşimleri ve potansiyel yakalama yöntemlerinin gözden geçirilmesi. Su Bilimi ve Mühendisliği 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polistiren nanoplastikler, konakçı Daphnia magna'nın iki mikroparazitinin enfeksiyon sonucunu farklı şekilde etkiler. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶Dünya Sağlık Örgütü. WHO, sağlığı tehdit eden mantarların ilk listesini yayınladı. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁷⁷Ayut, B., Pushalkar, S., Chen, R. ve ark. Mantar mikrobiyomu, MBL'nin aktivasyonu yoluyla pankreas kanserinin oluşumunu teşvik eder. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlman, A. B. ve ark. Pan-kanser mikrobiyom analizi, gastrointestinal ve akciğer tümörlerinde mantarların rolünü ortaya koymaktadır. Cell 185, 3807–3822. e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

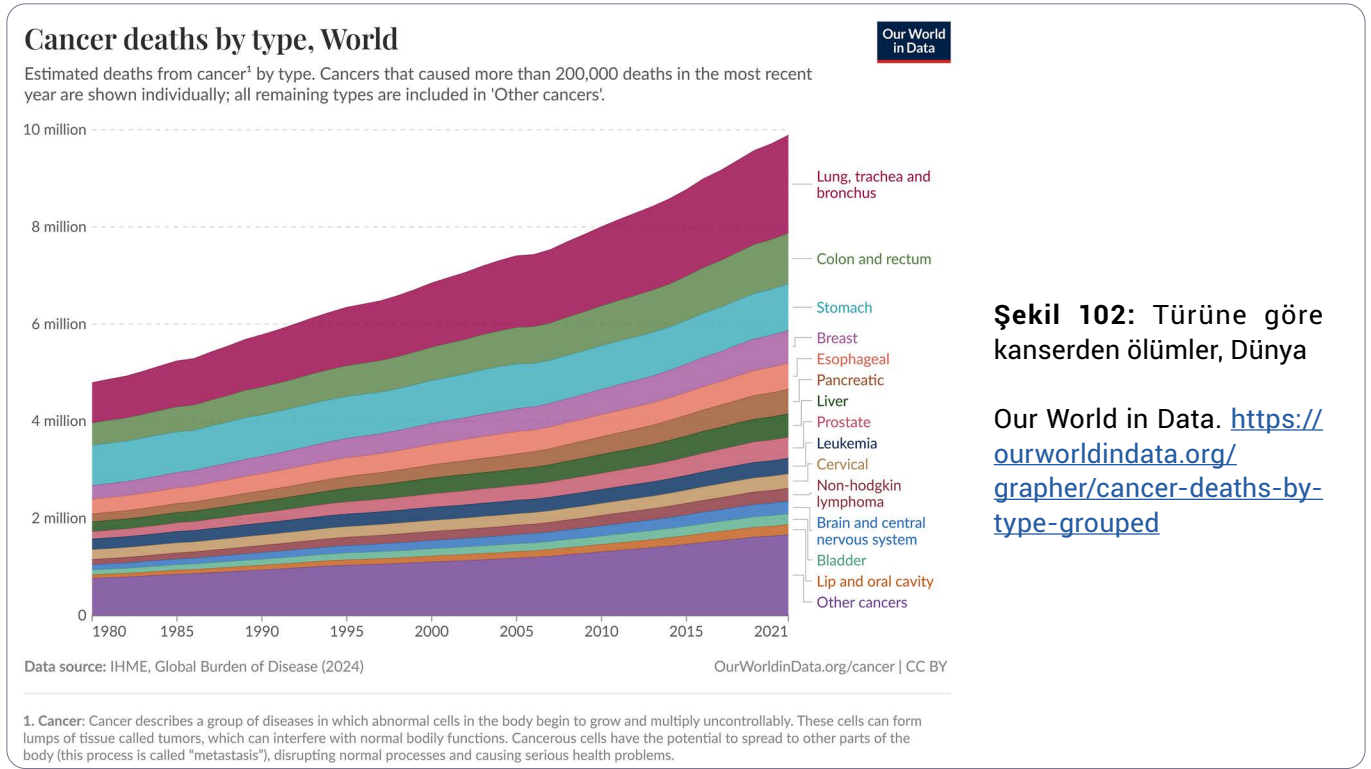
MNP'lerin Kanserojen Özellikleri: Mutasyon Yolları ve Metastatik İlerleme

Bu raporun önceki bölümlerinde belirtildiği gibi, mikro ve nanoplastikler, hem hücresel hem de sistemik düzeyde olumsuz etkileri nedeniyle kötü huylu tümörlerin gelişiminde önemli faktörlerdir.

Araştırmalar, mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin, özellikle hücre göçünü artırarak ve metastazi tetikleyerek tümör ilerlemesinde gizli katalizörler olarak işlev görebileceğini göstermektedir.²⁷⁹ Ayrıca, MNP partiküllerinin hücrelerde uzun süre kalabildiği ve bölünme sırasında yavru hücrelere geçebileceği de bulunmuştur.

Şu anda, onkolojik hastalıklardan kaynaklanan ölüm oranı dünya genelinde artmaya devam etmektedir (Şekil 102).

2050 yılına kadar yeni kanser vakalarının sayısının %77 artacağı tahmin edilmektedir.²⁸⁰



²⁷⁹Brynzak-Schreiber, E. et al. Mikroplastiklerin kanser hücresi bölünmesi sırasında hücre göçü ve dağılımındaki rolü. Chemosphere 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

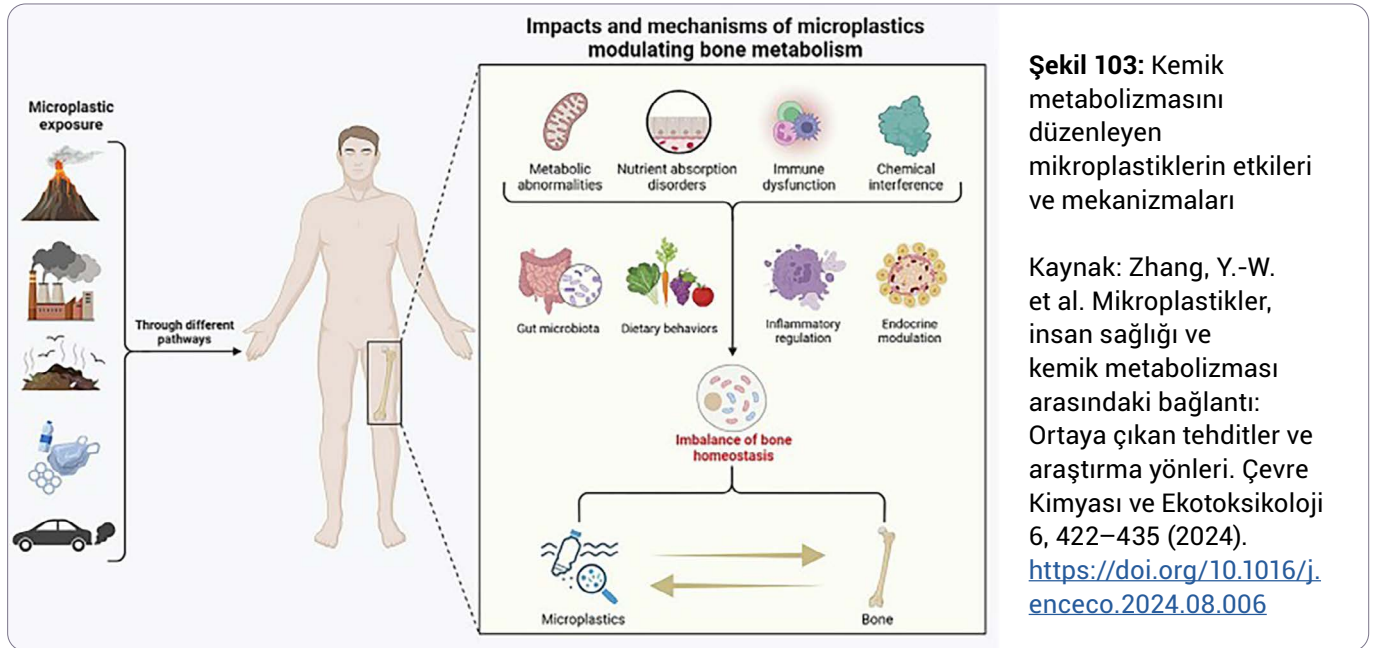
²⁸⁰Dünya Sağlık Örgütü. Hizmetlere olan ihtiyaç artarken küresel kanser yükü büyüyor. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

MNP'lerin Kalsiyum Metabolizması ve Kemik Yapısı Üzerindeki Etkileri

Plastik parçacıklar, insan bedeninin fiziksel işlevlerinin temelini oluşturan kas-iskelet sistemine bile sızabilir (Şekil 103). Yıkım ve yapım arasında hassas bir denge bulunan, kemiklerin her gün yenilediği, eklemlerin sürtünmeyi azalttığı ve kasların hareket ve sıcaklığı desteklediği bir ortamda, mikroplastikler – kısmen elektrostatik yükleri nedeniyle – yapı moleküllerinin yerini alabilir ve yavaş, yıkıcı süreçleri başlatabilir.

Araştırmalar, mikroplastiklerin kemik dokusuna nüfuz edebildiğini ve moleküler yapılarının kemik metabolizması için gerekli olan kalsiyum ve diğer mineralleri taklit etmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Sonuç olarak, plastikbeden tarafından yanlışlıkla kemiklerin yapı malzemesi olarak algılanabilir. Beden, kelimenin tam anlamıyla plastikten kemik "inşa etmeye" başlar.

Moleküler tanıma bu bozulma, bir dizi olumsuz sonuçla ilişkilidir: mikroplastikler osteoblastların ve osteoklastların işlevlerini bozabilir, kalsiyum ve fosfor metabolizmasını bozabilir ve böylece osteoporozun gelişmesine katkıda bulunabilir. Enflamatuvar kaskadlar tetiklenir, gen ifadesi değişir ve kemik dokusu yoğunluğunu ve gücünü kaybeder. Ek olarak, nanoplastiklerin varlığı kronik enflamasyona neden olabilir, eklem kıkırdığı ve kemik dokusuna zarar verebilir ve bu da osteoartrit, ağrı sendromları ve hareket sertliği riskinin artmasıyla bağlantılıdır.^{281, 282}



Şekil 103: Kemik metabolizmasını düzenleyen mikroplastiklerin etkileri ve mekanizmaları

Kaynak: Zhang, Y.-W. et al. Mikroplastikler, insan sağlığı ve kemik metabolizması arasındaki bağlantı: Ortaya çıkan tehditler ve araştırma yönleri. Çevre Kimyası ve Ekotoksikoloji 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Mikroplastikler, insan sağlığı ve kemik metabolizması arasındaki bağlantı: Ortaya çıkan tehditler ve araştırma yönleri. Çevre Kimyası ve Ekotoksikoloji 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²Çin Çevre Haberleri. Mikroplastikler insanbedenine "gizlice saldırıyor", ne kadar zarar verebilirler? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Kemirgenler üzerinde yapılan araştırmalar, polistiren mikroplastiklere maruz kalan farelerde osteoblast sayısının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.²⁸⁰

Plastik, iskelet kasları için de önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Araştırmalar, nanoplastiklerin kas hücrelerine sızarak mitokondriyal fonksiyonu bozduğunu göstermektedir. Bu durum enerji eksikliğine yol açar, agresif reaktif oksijen türlerini aktive eder, hücresel yaşlanmayı hızlandırır, efor sonrası kasların iyileşmesini bozar ve kas atrofisine katkıda bulunur. Yaşlılar ve kronik hastalığı olan hastalar bu durumdan özellikle etkilenmektedir.

Mikro ve nanoplastikler kemik iliğinde birikir²⁸³ ve kırmızı kan hücreleri, beyaz kan hücreleri, trombositler, osteositler, kondrositler ve adipositlerin kaynağı olan kök hücrelerin (hem hematopoietik hem de mezenkimal),²⁸⁴ oluşumunu bozar. Bu hücrelerin işlev bozukluğu, bedende sistemik hasara yol açar.

MNP Maruziyeti ile İlişkili Üreme Bozuklukları: Kısırlık ve Eretil Disfonksiyon

Azalan Doğurganlık

Tahminlere göre, 2045 yılına kadar dünya tamamen kısır hale gelebilir.²⁸⁵

2018 yılında Stockholm'de düzenlenen XIII. Uluslararası Spermatoloji Sempozyumu'nda önde gelen bir grup doktor ve bilim insanı, hükümetlere erkeklerin doğurganlığındaki düşüşü ciddi bir halk sağlığı sorunu olarak kabul etmeleri ve insan türünün hayatta kalması için erkek üreme sağlığının önemini tanımları çağrısında bulundu.²⁸⁶

Yaygın inanışın aksine, üreme sağlığı yalnızca hormonal denge, genetik ve yaşam tarzı ile belirlenmez. Giderek artan sayıda bilimsel çalışma, mitokondrinin gebe kalma ve embriyo gelişimi süreçlerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Tüm yaşam süreçleri için gerekli enerjiyi üreten bu küçük organeller, hem erkeklerin hem de kadınların doğurganlığında çok önemli bir rol oynar ve insan üreme fonksiyonu için önemi, daha önce anlaşıldığından çok daha derin olduğu ortaya çıkmaktadır.

Mitokondriyal aktivitedeki bozukluklar, hem kadınlarda hem de erkeklerde kısırlığın bir nedeni olabilir. Erkeklerde, spermilerin kuyruk kısmında bulunan mitokondri, döllenme için gerekli hareketliliği sağlar. Bu mitokondriyal bozukluklar, sperm hareketliliğini azaltır ve anormalliklere yol açabilir.

²⁸⁰Dünya Sağlık Örgütü. Hizmetlere olan ihtiyaç artarken küresel kanser yükü büyüyor. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁸³Guo, X. et al. İnsan kemik iliğinde mikroplastiklerin keşfi ve analizi. Tehlikeli Maddeler Dergisi 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Polistiren mikroplastiklerin farelerin kemik iliği hücrelerinde hematolojik sistem ve gen ekspresyonu üzerindeki etkilerine ilişkin ön çalışma. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

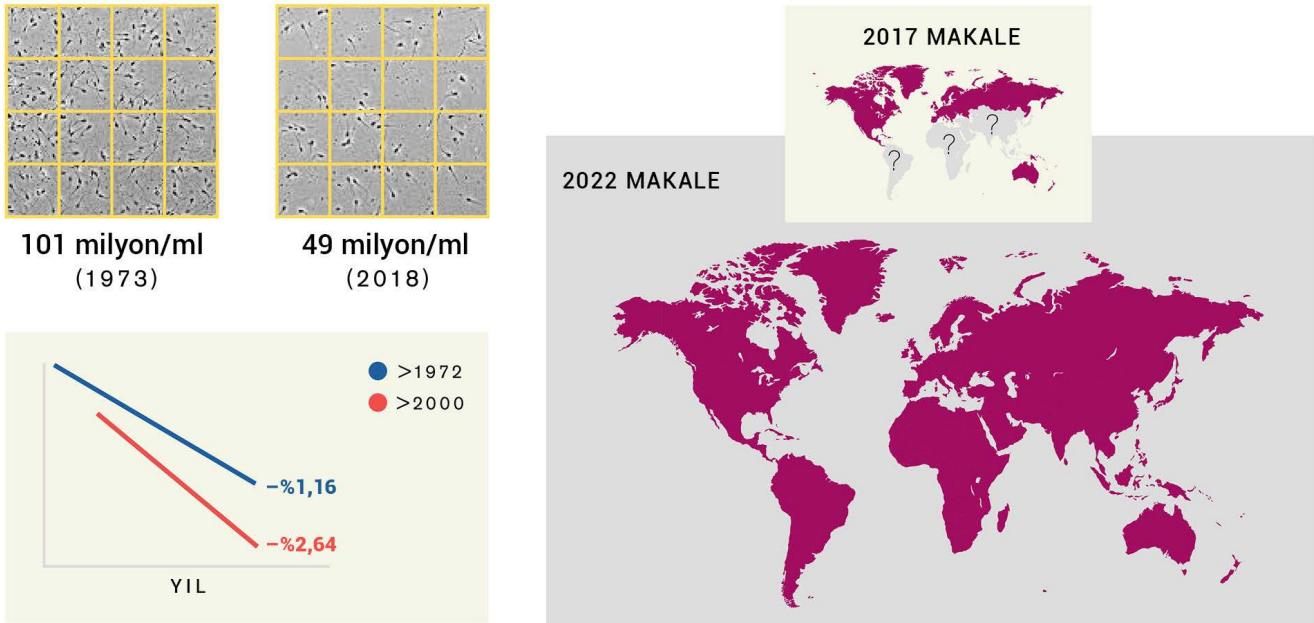
²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: "Çoğu çift 2045 yılına kadar yardımcı üreme yöntemlerine başvurmak zorunda kalabilir". (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Erkek üreme sağlığı bildirisi (XIII. Uluslararası Spermatoloji Sempozyumu, 9-12 Mayıs 2018, Stockholm, İsveç. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

Çinli bilim adamları tarafından yapılan araştırmalarda, tüm sperm örneklerinde ortalama 7 mikrometre büyüklüğünde iki parçacık mikroplastik bulunmuştur. En yaygın olanı polistirendir.²⁸⁷ Mikroplastiklerin varlığı, spermelerde morfolojik anormallikler ve telomerlerin kısalmasıyla ilişkilidir. Nanoplastikler, mikroskobik boyutları ve yükleri nedeniyle kan-testis bariyerini geçerek üreme organlarına sızabilir ve bu organların işlevlerini bozabilir.

1973'ten 2018'e kadar erkeklerde toplam sperm sayısında %62,3'lük bir düşüş eğilimi gözlemlenmesi²⁸⁸ (Şekil 104) özellikle endişe vericidir.

Sperm sayısı dünya genelinde hızla azalmaktadır.



Şekil 104: Grafik özet: Sperm sayısı dünya çapında hızla azalmaktadır

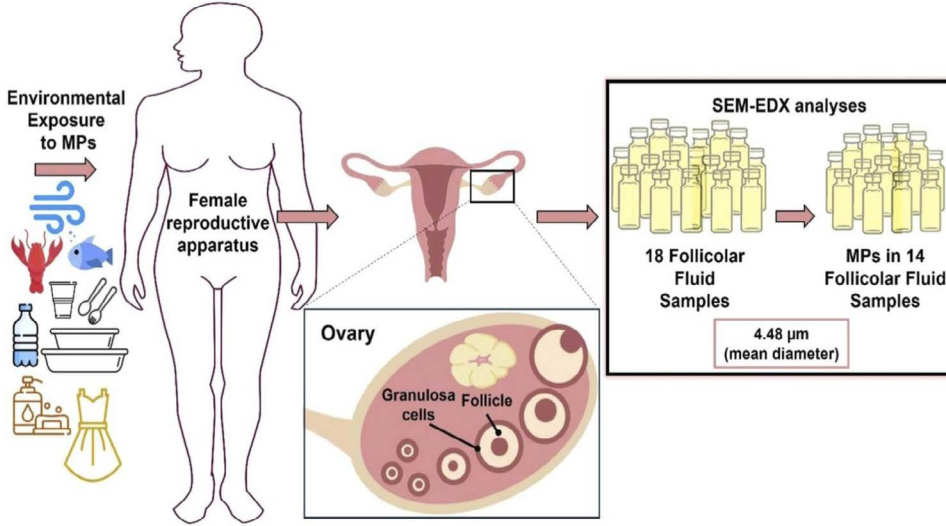
Kaynak: Levine, H. et al. Sperm sayısında zamansal eğilimler: 20. ve 21. yüzyıllarda dünya çapında toplanan örneklerin sistematik incelemesi ve meta-regresyon analizi. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Doğurganlığı etkileyen birçok faktör olsa da, giderek artan sayıda bilim insanı, plastiklerde bulunan kimyasal bileşiklerin bu süreçte önemli bir rol oynadığı görüşüne eğilim gösteriyor. Plastikleri esnek hale getirmek için kullanılan ftalatlar, hormonal dengeyi bozar, libidoyu azaltır ve erken cinsel olgunlaşma ve testis fonksiyon bozukluğuna katkıda bulunabilir.

²⁸⁷Li, N. et al. Genel insan seminal sıvısında mikroplastik kirleticilerin yaygınlığı ve etkileri: Bir Raman spektroskopik çalışma. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Sperm sayısında zamansal eğilimler: 20. ve 21. yüzyıllarda dünya çapında toplanan örneklerin sistematik incelemesi ve meta-regresyon analizi. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Kadın doğurganlığı ile ilgili durum da aynı derecede endişe vericidir. 2025 yılında yapılan bir araştırmada, 18 kadının 14'ünün yumurtalıklarının foliküler sıvısında mikroplastik parçacıklar bulunmuş ve bunların çoğu 5 mikrometreden küçük çaplı olup mililitrede ortalama 2.000 parçacık tespit edilmiştir²⁸⁹ (Şekil 105).



Şekil 105:

MP'lerin yumurtalık foliküler sıvısına geçme mekanizmasının şematik gösterimi: çevresel maruziyet (solunum, yutma ve deri teması) yoluyla insan bedenine girerek, özellikle kan-folikül bariyerini geçerek kadın üreme sistemine ulaşırlar.

Kaynak: Montano, L. et al. İnsan yumurtalık foliküler sıvısında mikroplastiklerin ilk kanıtı: Kadın doğurganlığı için ortaya çıkan bir tehdit. *Ekotoksikoloji ve Çevre Güvenliği* 291, 117868 (2025).

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Bu veriler, plastik parçacıkların yumurtalıklardaki kan-folikül bariyerini geçebildiğini göstermektedir. Hücresel düzeyde, mikro ve nanoplastikler DNA'ya zarar verebilir, hücre bölünmesini bozabilir ve iltihaplanmaya neden olabilir. Hormon düzenlemesine müdahalesi, plasenta fonksiyonlarının bozulması, anjiyogenez üzerindeki etkisi ve rahim fibroidlerinin gelişimi ile ilişkisi kanıtlanmıştır.

Eretil Disfonksiyon

Japonya'da yapılan ulusal bir araştırmanın sonuçları, genç nesillerde eretil fonksiyon ve cinsel aktivitede bir düşüş olduğunu ortaya koydu.²⁹⁰ Ereksiyon Sertlik Skoru (EHS) temel alınarak yapılan değerlendirmede, eretil disfonksiyon (ED) yaygınlığının %30,9 olduğu ve yaklaşık 14 milyon erkeği etkilediği tespit edildi. Cinsel istek, ereksiyon sertliği, orgazm ve tatmin, genç Japon erkeklerde, özellikle 20-24 yaş grubunda beklenenin altında olmakla birlikte, bu faktörler yaşla birlikte kötüleşme eğilimi göstermiştir. Özellikle, 20-24 yaş grubundaki prevalans oranı %26,6 ile 50-54 yaş grubundaki prevalans oranına (%27,8) neredeyse eşitti (Şekil 106, 107).

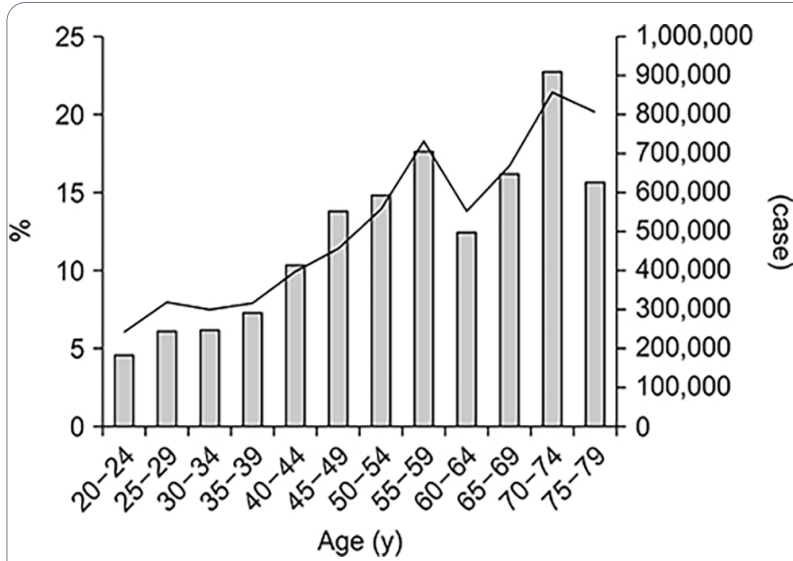
²⁸⁹Montano, L. et al. İnsan yumurtalık foliküler sıvısında mikroplastiklerin ilk kanıtı: Kadın doğurganlığı için ortaya çıkan bir tehdit. *Ekotoksikoloji ve Çevre Güvenliği* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, A. ve ark. Genç Nesilde Eretil Fonksiyon ve Cinsel Aktivite Azalıyor: Japonya'da Yapılan Ulusal Anket Sonuçları. *The World Journal of Men's Health* 43, 239-248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Ayrıca, ayrı bir küresel araştırmada, dört erkekten üçünün ED semptomları yaşadığı bildirilmiştir. Bu durum, bu rahatsızlığın nadir görülmediğini ve her yaştaki erkeği etkileyebileceğini göstermektedir.

1998 yılında yapılan Japonya'nın ilk resmi ulusal cinsel işlev araştırması, yaklaşık 11,3 milyon erkeğin orta derecede ila tam ED'ye sahip olduğunu tahmin etmiştir. Ayrıca, 1996 ve 2015 yıllarında Japonya'da erkek kısırlılığı üzerine yapılan ulusal araştırmalar çarpıcı veriler ortaya koydu. 2015 yılında yapılan araştırmada, erkeklerin %13,5'i ED'nin birincil nedeni olarak erkek kısırlılığı ile karşı karşıya kalmıştı; bu oran 1996'ya göre neredeyse dört kat daha yüksekti.

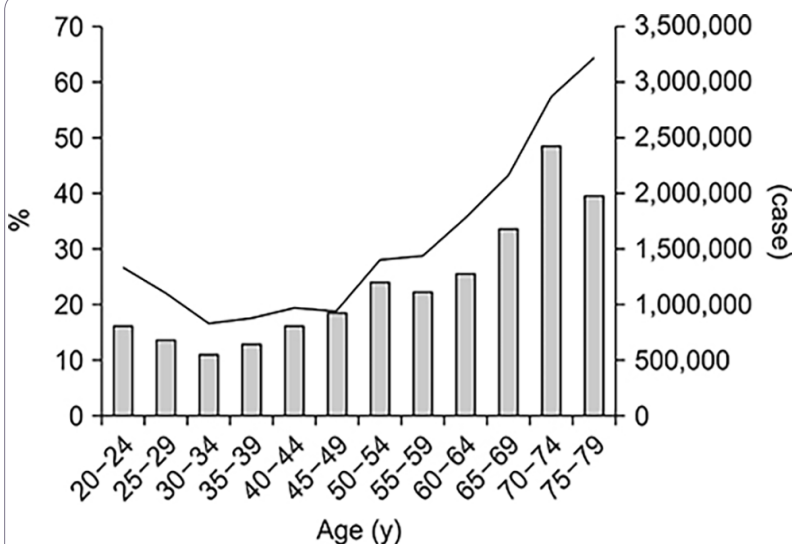
Mevcut bilimsel kanıtların toplamı, bedendeki mikro ve nanoplastiklerin üreme sağlığının bozulmasının gizli ama önemli bir nedeni olduğunu göstermektedir. Bu parçacıklar üreme organlarına sızarak mitokondriyal fonksiyonu bozar, iltihaplanmaya neden olur, hormonal dengeyi bozar ve DNA'ya zarar vererek sperm hareketliliğini ve morfolojik kalitesini azaltır. Sperm ve foliküler sıvıda bulunmaları, biyolojik bariyerleri geçebildiklerini ve derin sistemik etkiler yapabildiklerini göstermektedir. Bu durum, sadece bireysel sağlığı değil, tüm insanlığın gelecekteki üreme kapasitesini de tehdit etmektedir.



Şekil 106: "ED'den rahatsızlık duyuyor musunuz?" sorusundan elde edilen erektil disfonksiyon (ED) yaygınlığı ile değerlendirilen erektil disfonksiyon yaygınlığı ve hasta sayısı.

Kaynak: Tsujimura, A. et al. Genç Nesilde Eretil Fonksiyon ve Cinsel Aktivite Azalıyor: Japonya'da Yapılan Ulusal Anket Sonuçları. The World Journal of Men's Health 43, 239-248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>



Şekil 107: Ereksiyon Sertlik Skoru ile değerlendirilen ereksiyon bozukluğu yaygınlığı ve hasta sayısını gösteren grafik

Kaynak: Tsujimura, A. et al. Ereksiyon Fonksiyonu ve Cinsel Aktivite Genç Nesilde Azalıyor: Japonya'da Yapılan Ulusal Anket Sonuçları. The World Journal of Men's Health 43, 239-248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

MNP'nin Plasenta Bariyerinden Geçiş ve Gelişmekte Olan Beden Üzerindeki Etkileri

Fetüse Prenatal Mikro ve Nanoplastik Maruziyeti

Hamile kadınlar mikroplastiklerin etkilerine karşı özellikle hassastır.²⁹¹ Annenin bedenine giren plastik parçacıkları plasentayı geçerek hamileliği düzenleyen hormonların salgılanmasını bozabilir ve erken doğum, düşük ve fetal gelişim bozuklukları riskini artırabilir (Şekil 108). 2020 yılında, tahmini 13,4 milyon çocuk (her 10 çocuktan 1'i) erken doğmuştur (<37 hafta), bu da erken doğumun bebek ölümlerinin önde gelen nedenlerinden biri haline gelmiştir. Hayatta kalan erken doğan bebekler, ciddi hastalıklar ve kronik rahatsızlıklar açısından daha yüksek risk altındadır.²⁹²

Çocukların gelişmekte olan endokrin sistemi, hormonları taklit edebilen veya engelleyebilen plastiklerdeki kimyasallara karşı oldukça duyarlıdır²⁹³ (Şekil 109). Bebekler bu kimyasallara anne sütü yoluyla da maruz kalabilir. Ayrıca, nanoplastikler gecikmiş etkiler gösterebilir, çocukluk ve ergenlik döneminde üreme hücrelerinin oluşumunu bozarak yetişkinlikte doğurganlığı azaltabilir.

Kan-plasenta bariyeri (BPB), anne ve fetüs arasındaki madde alışverişini düzenleyerek fetüsü zararlı maddelerden koruyan kritik bir rol oynar. Ancak, araştırmalar mikro ve nanoplastiklerin BPB'yi geçebildiğini göstermektedir.

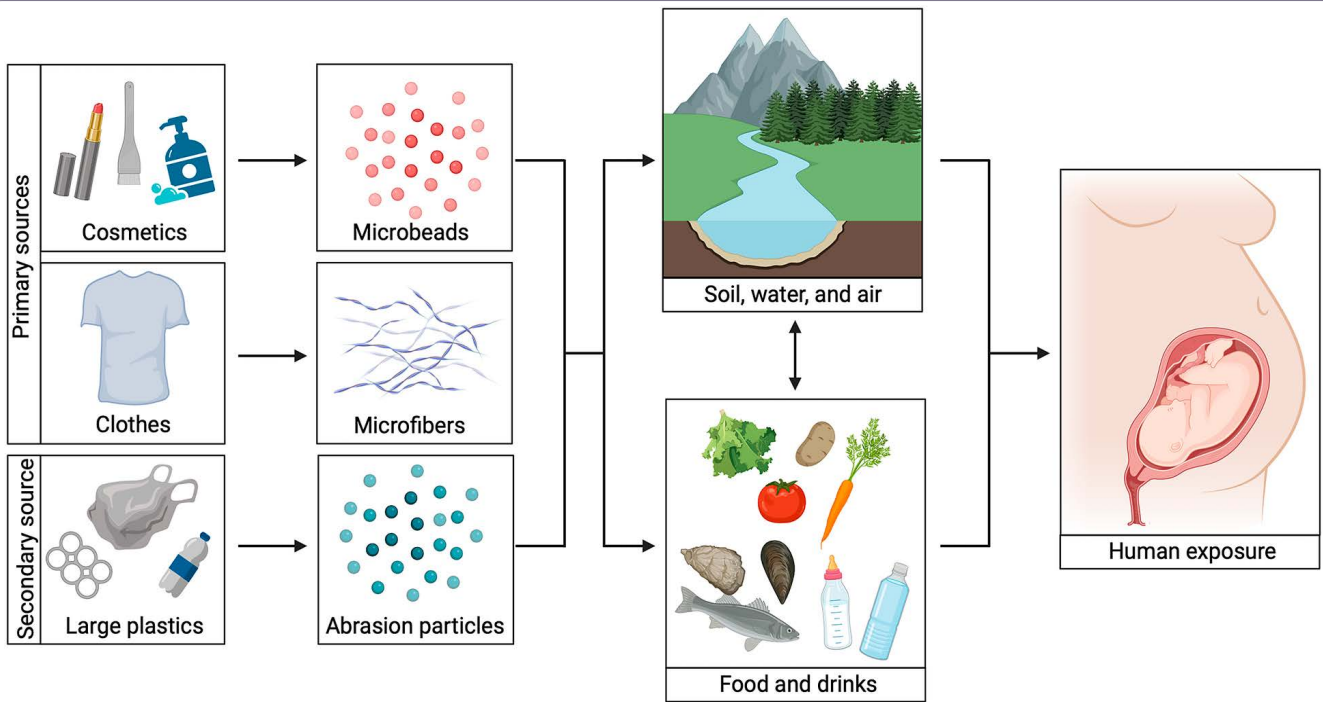
2020 yılında Antonio Ragusa liderliğinde Raman mikrospektroskopi (malzemelerin kimyasal bileşimini belirlemek için ışık saçılımını analiz eden bir yöntem) kullanılarak yapılan bir çalışmada, normal gebelikleri olan altı kadından dördünün plasentasında mikroplastik tespit edildi. Örneklerde, kozmetik, boya, yapıştırıcı ve hijyen ürünlerinde kullanılan polipropilen ve pigmentler dahil olmak üzere 5-10 µm arasında 12 parçacık bulundu.²⁹⁴

²⁹¹Dugershaw Kurzer, B. et al. Nano parçacıklar, insan plasenta salgılarını bozarak anjiyogenez ve vaskülarizasyon üzerinde olumsuz etkiler yaratır. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>

²⁹²Dünya Sağlık Örgütü. Dünya çapında her 10 bebekten 1'i erken doğmakta ve bu durum sağlık ve hayatta kalma üzerinde önemli etkilere sahiptir. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

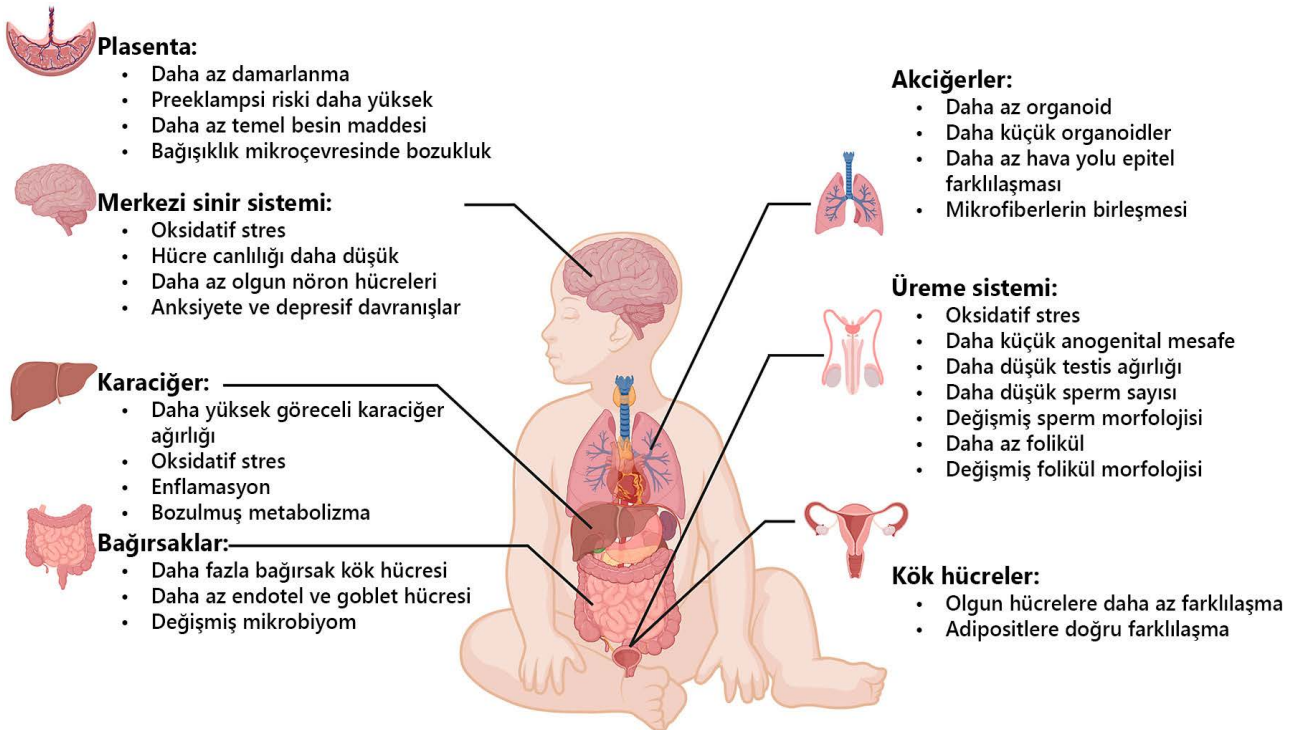
²⁹³Sharma, R. K. et al. Mikroplastiklerin Gebelik ve Fetal Gelişim Üzerindeki Etkisi: Sistemik Bir İnceleme. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticenta: İnsan plasentasında mikroplastiklerin ilk kanıtı. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>



Şekil 108: Annelerin mikroplastiklere maruz kalması

Kaynak: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Mikroplastikler: Organların gelişimi ve onarımı için bir tehdit mi? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>



Şekil 109: Mikroplastiklerin gelişmekte olan fetüsün çeşitli organ ve dokuları üzerindeki etkileri

Kaynak: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Mikroplastikler: Gelişmekte olan ve onarılan organlar için bir tehdit mi? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

New Mexico Üniversitesi tarafından yapılan bir araştırma, prematüre bebeklerin plasentalarında mikro ve nanoplastiklerin konsantrasyonunun, tam zamanında doğan bebeklere göre daha yüksek olduğunu ortaya koydu. Kütle spektrometresi kullanılarak 158 plasenta üzerinde yapılan analiz, erken doğum yapan kadınlarda plastik parçacıkların daha fazla biriktiğini ortaya koydu.²⁹⁵



Biyolog Tina Bürki, *“Nanopartiküller, haberci maddeler aracılığıyla kan damarlarının oluşumunu engelleyerek rahimdeki çocuk üzerinde dolaylı bir etkiye sahip gibi görünüyor”* dedi.²⁹⁶

Nanometre boyutundaki polistiren parçacıkları beyin gelişim bozukluklarına, özellikle bilişsel bozukluklara neden olabilir.²⁹⁷

Araştırmalara göre, hamilelik ve yaşamın ilk birkaç ayında mikroplastiklere maruz kalmak, farklı türlerin yavrularında üreme ekseninde ve merkezi sinir sisteminde kalıcı değişikliklere neden olabilir.²⁹⁸

Bebeklerde Doğum Sonrası Mikro ve Nanoplastiklere Maruz Kalma

Yenidoğanlar çevreden sürekli olarak MNP'lere maruz kalmaktadır. 2020 yılında yapılan bir araştırma²⁹⁹, bebeklerin dünya çapında kullanılan biberonların çoğunu oluşturan polipropilen biberonlarla beslenerek günde 4,5 milyon plastik parçacığı bedenlerine alabildiğini ortaya koymuştur.

Bebekler ayrıca anne sütü yoluyla da mikroplastik alabilirler. 2022 yılında, 34 sağlıklı kadının anne sütünün analizinde, örneklerin %76'sında mikroplastik tespit edilmiştir³⁰⁰ (Şekil 110). MNP'ler gecikmiş etkilere sahip olabilir ve çocukluk ve ergenlik döneminde üreme hücrelerinin gelişimini bozarak yetişkinlikte doğurganlığı azaltabilir.

²⁹⁵ Jochum, M. et al. Yenidoğan İnsan Plasentalarında Tespit Edilen Yüksek Mikro ve Nanoplastik Düzeyleri. Ön baskı (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

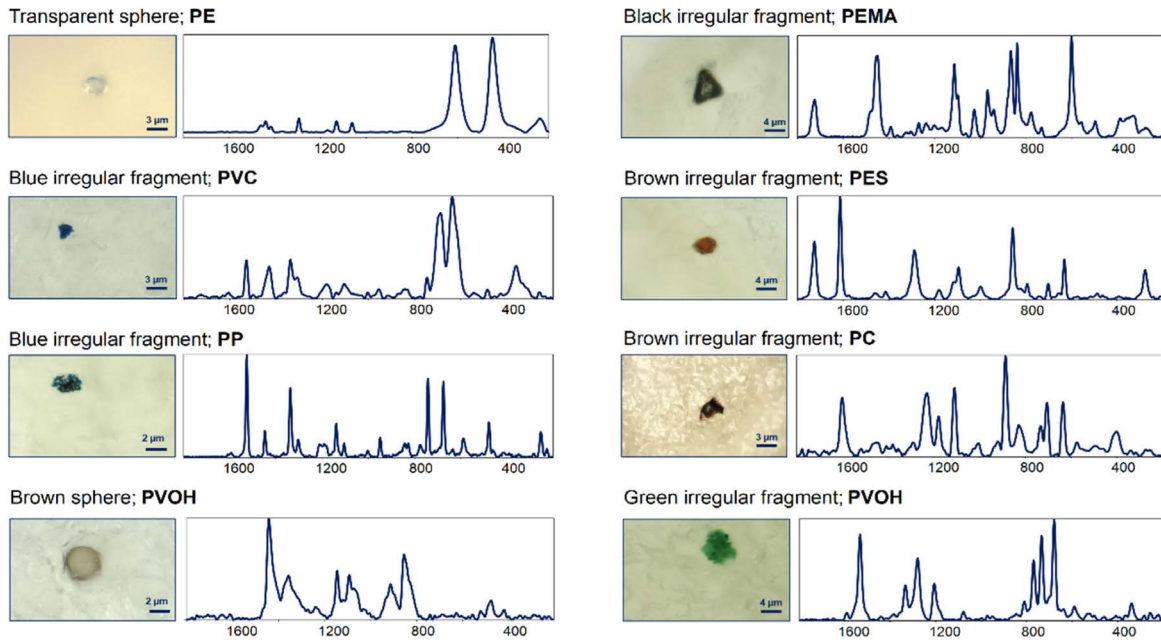
²⁹⁶ Federal Halk Sağlığı Ofisi. Kirliliğin embriyonik gelişim üzerindeki etkisi - Nanopartiküller: Rahimdeki bebekler için risk. FOPH. (2024). <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

²⁹⁷ Jeong, B. et al. Annelerin polistiren nanoplastiklere maruz kalması, yavrularda beyin anormalliklerine neden oluyor. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸ Sharma, R. K. et al. Mikroplastiklerin Gebelik ve Fetal Gelişim Üzerindeki Etkisi: Sistemik Bir İnceleme. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹ Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Bebek maması hazırlama sırasında polipropilen biberonların bozulmasından kaynaklanan mikroplastik salımı. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰ Ragusa, A. et al. Raman Mikrospektroskopi ile İnsan Sütünde Mikroplastiklerin Tespiti ve Karakterizasyonu. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>



Şekil 110: Analiz edilen anne sütü örneklerinde bulunan bazı seçilmiş MP'lerin mikrofotografaları ve Raman spektrumları (dalga sayıları, cm^{-1}). PE: polietilen; PVC: polivinil klorür; PP: polipropilen; PVOH: polivinil alkol; PEVA: poli(etilen-ko-vinil asetat); PEMA: poli(etil metakrilat); PES: polyester ve PC: polikarbonat.

Kaynak: Ragusa, A. et al. Raman Mikrospektroskopi ile İnsan Anne Sütünde Mikroplastiklerin Tespiti ve Karakterizasyonu. *Polimerler* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Ek veriler, bebek dışındaki MNP seviyelerinin yetişkinlere göre 14 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir.³⁰¹

Nanoplastikler ve bunlarla ilişkili kimyasallar anne sütünün moleküler yapısını ve işlevselliğini bozar. Bu bileşikler, insan anne sütü ve bebek mamalarındaki proteinleri değiştirebilir ve bu da daha sonraki yaşamda gelişim sorunlarına yol açabilir.^{302, 303}

Yüksek konsantrasyonlarda MNP'ler, gelişmekte olan beden üzerinde kümülatif toksik etki gösterir. Nanoplastikler, hücrelere nüfuz ederek yapısal DNA hasarına neden olabilir ve metabolik süreçleri bozabilir. Bu etkiler, genetik mutasyon ve uzun vadeli patolojiler riskini artırarak gelecek nesillerin sağlığını tehdit eder.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Bebek ve Yetişkin Dışısında Polietilen Tereftalat ve Polikarbonat Mikroplastiklerin Oluşumu. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. PFOA'nın α -Helisiteyi Azaltma, Substrat Bağlanmasını Bozma ve Model Küresel Proteinde Bağlanma Cepeleri Oluşturma Sürecine Atomik ve Moleküler Bir Bakış. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

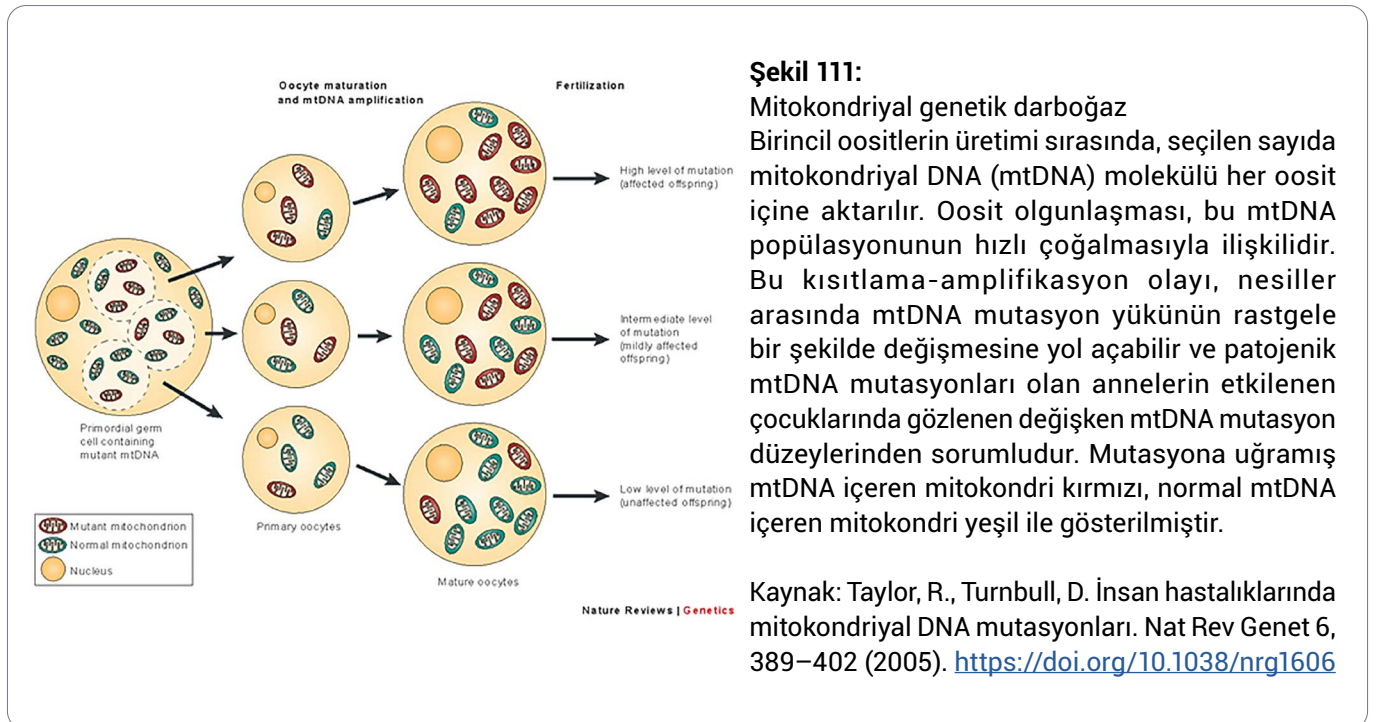
³⁰³Karim, A. et al. Nanoplastik ve Biyolojik Sistemler Arasındaki Arayüzey Etkileşimleri: Plastik Kaynaklı Biyolojik Dengesizliğin Atomik ve Moleküler Anlayışına Doğru. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

MNP Maruziyetinin Etkileri ve Konjenital Anormallikler ile İlişkisi

Doku ve hücrelere nüfuz etme yeteneğinin ötesinde, MNP'ler başka bir tehlikeli özelliğe sahiptir: gelecek nesillere "kalıtlılabirler". Hücre bölünmesi sırasında, MNP parçacıkları bir hücreden diğerine aktarılır. Bu parçacıklar, çok küçük boyutları ve elektrostatik yükleri nedeniyle kan-plasenta bariyerini kolayca geçerek fetal doku ve hücrelere girebilir ve gelişmekte olan organizma üzerinde zararlı etkiler yaratabilir. Bu raporda vurgulandığı gibi, mikro ve nanoplastik maruziyetin başlıca sonuçlarından biri mitokondriyal disfonksiyondur.

Yakın zamanda yapılan bir Mendel randomize çalışması, mitokondriyal proteinlerin ekspresyonu ile konjenital anomaliler riski arasında nedensel bir bağlantı olduğuna dair ikna edici kanıtlar sunmuştur. Çalışmada, gözlemsel verilerle tipik olarak ilişkili önyargıları azaltmak için genetik varyantlar araçsal değişkenler olarak kullanılmıştır. İncelenen 66 mitokondriyal protein özelliği arasında, kalp, kulak, sinir sistemi, genitoüriner sistem ve uzuvların gelişimsel bozuklukları ile önemli ilişkiler bulunmuştur. Bu bulgular, mitokondriyal aktivitenin embriyonik morfogenezde kritik bir rol oynadığı hipotezini desteklemektedir.³⁰⁴

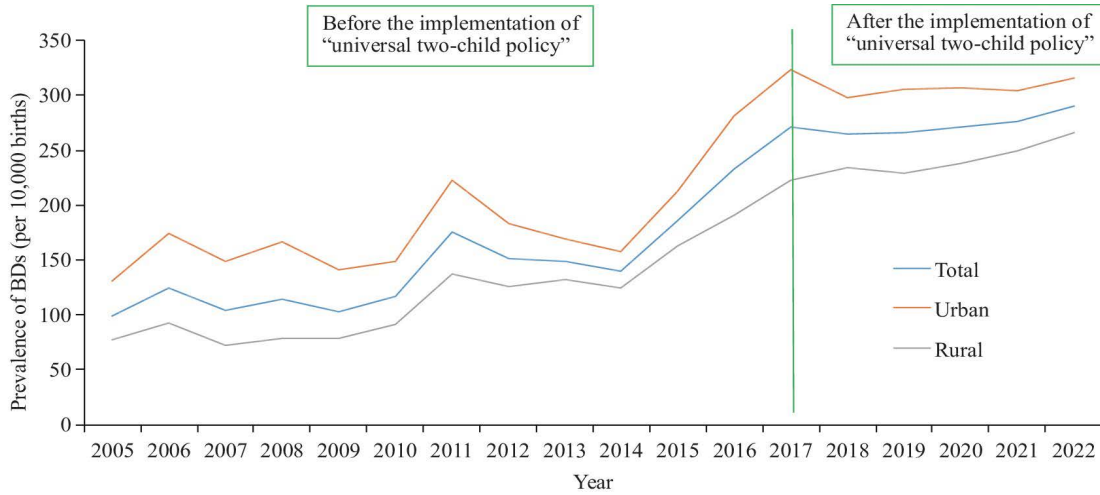
Mitokondriyal DNA'da (mtDNA) kalıtsal veya de novo olarak ortaya çıkan mutasyonlar, MELAS, MERRF, NARP, Leigh Sendromu ve diğerleri dahil olmak üzere çok çeşitli klinik sendromlardan sorumludur. Bu mutasyonlar öncelikle kalp, beyin, kaslar ve gözler gibi enerji ihtiyacı yüksek organları etkiler. Oositlerin mitokondriyal kökeni nedeniyle, aktarım sadece anne tarafından gerçekleşir (Şekil 111). Bu bozukluklar genellikle erken yaşlarda ortaya çıkar ve ciddi nörolojik ve metabolik bozukluklarla karakterizedir.



³⁰⁴Li, X. ve ark. Mitokondriyal proteinler ve konjenital doğum kusuru riski: bir mendel randomizasyon çalışması. *BMC Gebelik ve Doğum* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Mitokondriyal bozuklukları olan çocuklar sıklıkla gelişimsel gecikmeler, kas güçsüzlüğü, bilişsel bozukluklar ve koordinasyon sorunları ile karşı karşıya kalır. Kearns-Sayre sendromu, Barth sendromu, Alpers hastalığı ve diğerleri gibi durumlar, sakatlık ve hatta ölüm gibi ciddi sonuçlara yol açabilir.

Son yirmi yılda, doktorlar yenidoğanlarda konjenital doğum kusurlarında endişe verici bir artış olduğunu bildirmiştir. Yalnızca Çin'de, bu oran 2005 yılında 10.000 doğumda 99,15 iken, 2022 yılında 10.000 doğumda 290,27'ye çıkarak neredeyse üç katına çıkmıştır (Şekil 112).³⁰⁵ Benzer eğilimler diğer ülkelerde de gözlemlenmiştir. Bu artışın birçok faktörden kaynaklandığı bilinmekle birlikte, giderek artan bilimsel kanıtlar yeni ve hızla artan bir tehdide işaret etmektedir: embriyonik dokulara nüfuz edebilen ve organların ve biyolojik sistemlerin oluşumunu engelleyebilen mikroplastikler ve özellikle nanoplastikler.



Şekil 112: 2005-2020 yılları arasında kentsel ve kırsal alanlarda doğum kusurlarının yaygınlığı

Kaynak: Wei, W. et al. Doğum Kusurlarının Eğilimleri ve Nedenlerinin Analizi — Jinan Şehri, Shandong Eyaleti, Çin, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Nanoplastiklerin taşıdığı elektrostatik yük, tek bir hata bile gelişimsel anormalliklere yol açabileceği embriyonik dokular için özel bir tehdit oluşturmaktadır. Bu parçacıklar, kalp, kan damarları ve kraniyofasiyal yapıların oluşumunda önemli rol oynayan nöral kret hücreleri de dahil olmak üzere hücre yüzeylerine daha fazla yapışma gösterir. Tavuk embriyoları üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, nanoplastikler kalp ve ana damarlarda malformasyonlar dahil olmak üzere ciddi kusurlara neden olmuştur. En hızlı artan anormalliklerden biri, fetüs organlarının deri ve kaslardaki bir açıklıktan beden dışına çıkmasıyla karakterize edilen ön karın duvarının gelişimsel bir bozukluğu olan gastroşizistir (Şekil 113, 114, 115). Uluslararası verilere göre, bu durumun görülme sıklığı son otuz yılda %161 artmış ve 20 yaşın altındaki annelerde oranlar birkaç kat artmıştır.³⁰⁶ Nanoplastiklerin, hamileliğin erken döneminde (4-8. haftalar) karın duvarının gelişimini engellediği, iltihaplanmaya neden olduğu ve karın duvarının kapanmasını bozduğu hipotezi öne sürülmektedir.

³⁰⁵Wei, W. et al. Doğum Kusurlarının Eğilimleri ve Nedenlerinin Analizi — Jinan Şehri, Shandong Eyaleti, Çin, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

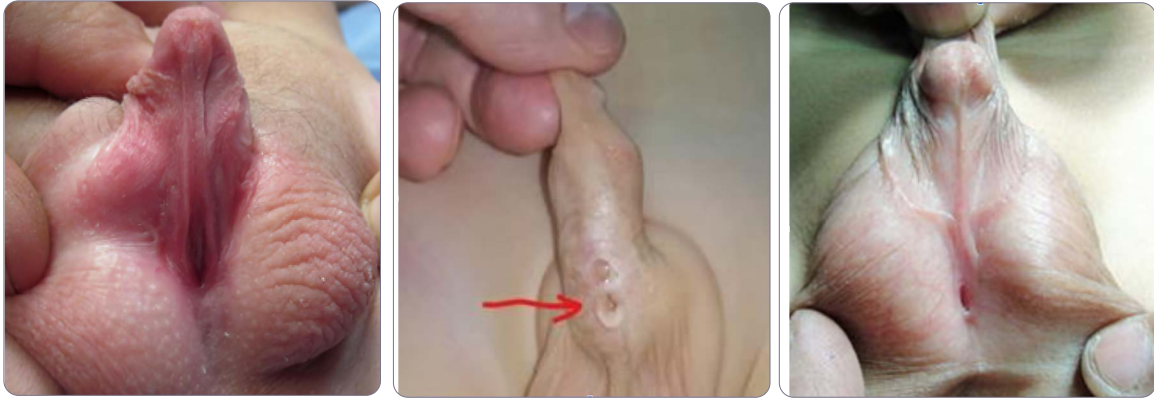
³⁰⁶Feldkamp, M. L. ve ark. 24 ülkede 27 gözetim programında gastroşizis yaygınlık örüntüleri, Uluslararası Doğum Kusurları Gözetim ve Araştırma Merkezi, 1980–2017. Doğum Kusurları Araştırması 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Şekil 113-115. Karın duvarındaki doğuştan çatlak

Bir başka durum olan hipospadias, erkeklerde üretranın anormal bir yerde açıldığı doğuştan bir kusur³⁰⁷ olup, bu durum da istikrarlı bir artış göstermiştir (Şekil 116, 117, 118). Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1997'den 2018'e kadar hipospadias vakaları 1.000 canlı erkek doğumda yaklaşık 1,06 vaka artarak (1.000'de 6,1'den 7,16'ya) yaklaşık %17'lik bir artış göstermiştir.³⁰⁸

Hayvan modelleri üzerinde yapılan araştırmalar, mikroplastiklerde yaygın olarak bulunan ftalatlarla maruz kalmanın erkek fetüslerde testosteron sentezini bozduğunu göstermiştir.



Şekil 116-118. Hipospadias

Nanoplastiklerin yüklü yüzeyine bağlanan bu maddeler, kan dolaşımına ve plasentaya kolayca taşınarak, cinsel farklılaşmanın kritik dönemlerinde hormonal bozuklukları artırmaktadır. Bu bağlamda, Down sendromu, trizomi, atriyoventriküler kalp kusurları ve diğer ciddi durumların görülme sıklığı artmış, 1999-2001 yıllarında 10.000 canlı doğumda 12,78 olan oran, 2016-2020 yıllarında 10.000'de 15,55'e yükselmiştir.³⁰⁹

Eş zamanlı olarak, anksiyete bozuklukları ve bilişsel bozukluklar dahil olmak üzere çocuklarda nöropsikiyatrik sorunlarda artış görülmektedir. Mikroplastiklerle doğrudan bir nedensel bağlantı hala araştırılmakla birlikte, iltihaplanma, epigenetik modülasyon ve mitokondriyal disfonksiyon gibi bilinen mekanizmalar, mikroplastiklerin bu duruma katkıda bulunan bir faktör olduğundan şüphelenmek için gerekeceği düşünülmektedir.^{307, 310}

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. 1997'den 2012'ye kadar Amerika Birleşik Devletleri'nde yeni doğan erkeklerde hipospadias prevalansı ve hipospadias risk faktörleri. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2018.08.024>

³⁰⁸Lavoie, C. ve ark. Amerika Birleşik Devletleri'nde hipospadias insidansının karşılaştırılması: Güncel bir analiz. *Pediatric Urology Dergisi* 21, 627-632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, E. B. et al. Ulusal nüfus temelli önemli doğum kusurları tahminleri, 2016-2020. *Doğum Kusurları Araştırması* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr.2.2301>

³⁰⁹Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. Ftalatların neden olduğu hipospadiasın altında yatan potansiyel mekanizmalar: kemirgen model çalışmalarının sistematik bir incelemesi. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Sonuçlar ve Beklentiler.

MNP'lerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisini Azaltmak Mümkün mü?

Toplanan verilerin analizi, mikro ve nanoplastiklerin insan sağlığı için önemli ve hafife alınan bir risk faktörü olduğunu göstermektedir. Mevcut bilimsel kanıtlar, MNP'lerin insan bedenindeki küresel toksik yükün ayrılmaz bir parçası olduğunu güçlü bir şekilde göstermektedir. Biyolojik bariyerleri geçme ve beyin, kalp, akciğerler ve plasenta dahil olmak üzere çeşitli dokularda birikme yetenekleri nedeniyle, MNP'ler moleküler, hücresel ve sistemik düzeylerde toksik etkiler gösterir. Yüzeylerine adsorbe olan kimyasal katkı maddeleri ve çevresel kirlleticilerle birlikte plastik parçacıklar, nörodejeneratif, onkolojik, kardiyovasküler, endokrin ve otoimmün bozukluklar dahil olmak üzere çok çeşitli hastalıkların altında yatan süreçler olan kronik inflamasyon, oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon ve DNA mutasyonlarının tetikleyicisi olarak işlev görür. MNP parçacıklarının neredeyse hiç atılamaması, yaşla birlikte bedende birikmesi ve kümülatif etkisinin yoğunlaşması özellikle endişe vericidir.

Mevcut kanıtlar, MNP'lere maruz kalmaktan kaçınmanın neredeyse imkansız olduğunu doğrulamaktadır: MNP'ler soluduğumuz havada, içtiğimiz suda, yediğimiz gıdalarda ve hatta tükettiğimiz hayvan ve bitkilerin hücrelerinde bile bulunmaktadır. Sonuç olarak, plastik parçacıklara maruz kalma, doğum öncesi gelişimden yaşamın son aşamalarına kadar her yerde ve sürekli olarak gerçekleşmektedir. Nanopartiküller kan-beyin bariyerini geçerek doğrudan beyin dokusunda birikebildiğinden, solunum yoluyla maruz kalma özellikle endişe vericidir ve merkezi sinir sistemini en savunmasız hedeflerden biri haline getirir.

Ek bir biyolojik risk, MNP'lerin elektrostatik aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Bu aktivite, MNP'lerin biyolojik yapılarla etkileşimini artırarak hücresel homeostazı bozar. Ayrıca, MNP'ler patojenler ve antibiyotik dirençli mikroorganizmalar için taşıyıcı görevi görebilir, bu da plastik kirliliğine ekoloji, toksikoloji, immünoloji, nöroloji ve üreme tıbbını kesişen belirgin bir disiplinlerarası boyut kazandırır.

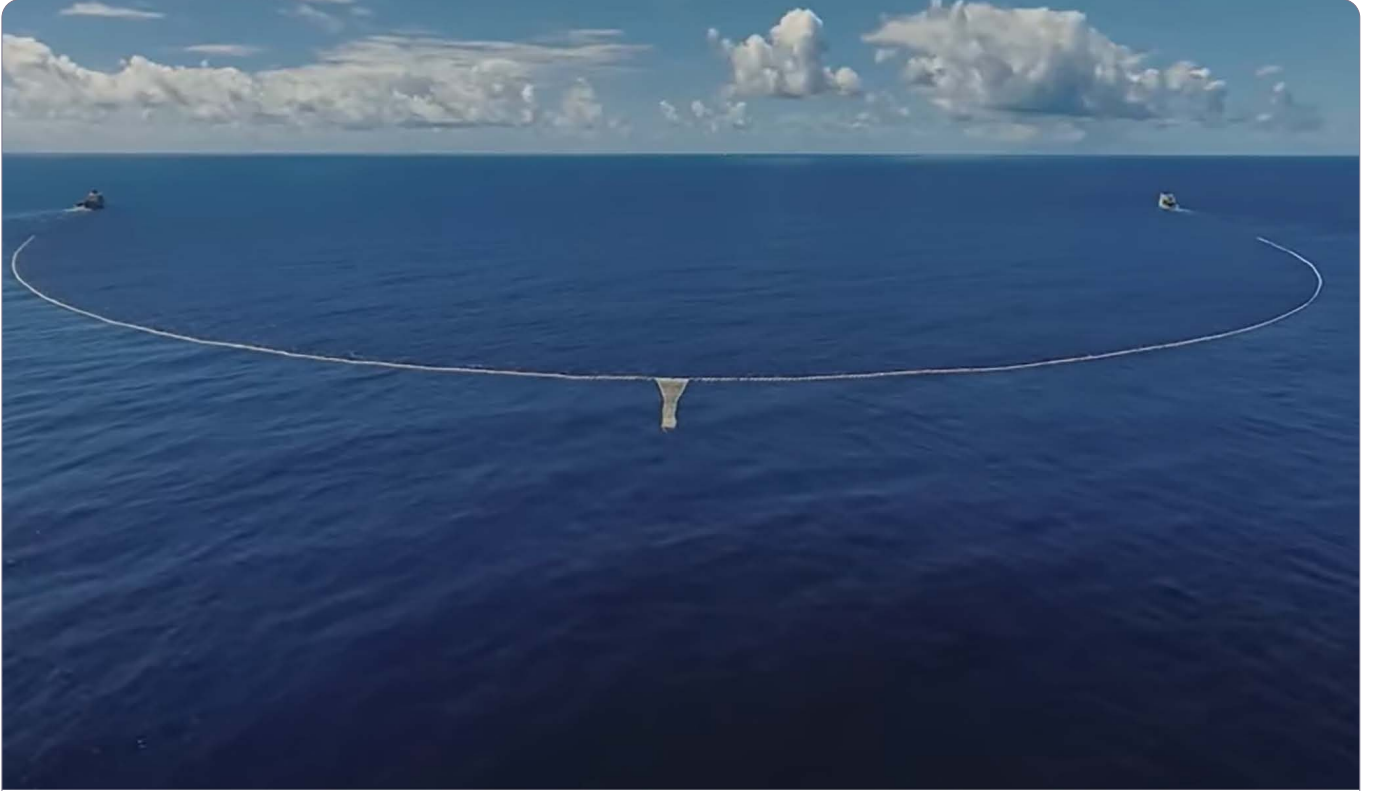
Bu bağlamda, ALLATRA tarafından MNP'lerin tehdidine karşı daha geniş çaplı bir çabanın parçası olarak önerilen stratejik yönlerden biri, nanoplastiklerin elektrostatik yükünü nötralize etmek veya korumak için yöntemler geliştirmektir. Bu tür parçacıkların elektrostatik aktivitesini azaltmak, zararlı etkilerini önemli ölçüde azaltabilir ve bedende birikimini yavaşlatabilir. Bu raporun yazarlarına göre, yük koruma veya nötralizasyon yöntemleri, MNP'lerle ilişkili potansiyel riskleri en az %50 oranında azaltabilir. Bu, MNP'leri teşhis etmek, önlemek ve bedenden uzaklaştırmak için daha kapsamlı stratejiler geliştirmek için çok önemli bir zaman kazandırabilir. Bu bağlamda, biyofizik, nanoteknoloji ve moleküler toksikoloji alanlarında daha fazla araştırma yapılması özellikle önem kazanmaktadır.

Bu konuyla ilgili bilimsel yayınların sayısı artmasına rağmen, MNP'lerin insan sağlığı üzerindeki etkisi hala yeterince anlaşılmamıştır ve halk sağlığı ve çevre koruma stratejilerinin geliştirilmesinde yeterince dikkate alınmamaktadır. Plastik kirliliğinin boyutu, bu parçacıkların biyolojik aktivitesi ve etkilerinin potansiyel olarak geri dönüşü olmayan sonuçları göz önüne alındığında, bu alan bilim camiasının ve sağlık otoritelerinin acil dikkatini gerektirmektedir. Ayrıca, mevcut verilerin sistematik hale getirilmesi, standartlaştırılmış risk değerlendirme çerçevelerinin geliştirilmesi ve hükümetler arası ve uluslararası bilimsel işbirliğinin genişletilmesi gerekmektedir.

PLASTİK KİRLİLİĞİNİ AZALTMAYA YÖNELİK MODERN STRATEJİLERİN ANALİZİ

Sucul Ekosistemlerden Büyük Plastik Atıkları Temizleme Teknolojileri

Okyanus kirliliğini gidermeye yönelik azaltma çabaları, öncelikle su yüzeyinden görünür, büyük çöp parçalarının temizlenmesine odaklanmıştır. Bugüne kadar gerçekleştirilen en iddialı projelerden biri, plastik ve diğer türden yüzen atıkların toplanmasını hedefleyen The Ocean Cleanup girişimidir. Bu girişimin yüzen sistemleri, yüzeydeki çöp parçalarını toplar (Şekil 119), ardından bunları ayırır ve geri dönüşüm veya bertaraf için hazırlar.



Şekil 119: Resim, Ocean Cleanup teknolojisinin işleyişini göstermektedir. Dayanıklı malzemeden yapılmış uzun, U şeklinde bir yüzen bariyer, okyanus yüzeyinden plastik atıkları toplar.

Kaynak: The Ocean Cleanup. Okyanuslardaki plastik kirliliğini temizlemek. <https://theoceancleanup.com> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Bu yöntem umut verici olsa da, birkaç önemli husus dikkate alınmalıdır:

1. Enkaz toplama işlemi seçici değildir, yani plastik atıklarla birlikte mikroskobik algler, balık larvaları ve denizanası gibi canlı organizmalar da yakalanabilir. Şu anda, yan avların hacmine ilişkin nicel değerlendirmeler bulunmamaktadır, ama bu organizmaların büyük ölçekte uzaklaştırılması, doğal besin zincirlerini bozarak deniz ekosistemleri için zararlı sonuçlar doğurabilir. Deniz yaşamını korumaya yönelik önlemlere rağmen, sorun hala çözülmemiştir.

2. Aktivistler okyanusları temizlemeye gerçekten karardır, ancak mevcut çabalar anlamlı sonuçlar elde etmek için yetersiz kalmaktadır.

Kasım 2024 itibarıyla, The Ocean Cleanup girişimi dünya okyanuslarından yaklaşık 20.000 ton plastik atık temizlemiştir. Bu şüphesiz dikkate değer bir başarıdır. Ancak, küresel krizin arka planında, bu miktar şu anda okyanusları kirleten tahmini 200 milyon ton plastiğin sadece %0,01'ini oluşturmaktadır. Ayrıca, yıllık yaklaşık 11 milyon ton olan yeni atık akışını da hesaba katmak önemlidir (Şekil 120). Bu rakamlar, temizlik çabaları ile sorunun boyutu arasındaki büyük orantısızlığı vurgulamaktadır.



Şekil 120: Grafik, okyanuslardaki plastik kirliliğiyle ilgili üç temel göstergiyi karşılaştırmaktadır: yüzen plastik atıkların tahmini kütlesi, okyanusa yıllık plastik girişi ve The Ocean Cleanup tarafından toplanan miktar.

Veri kaynağı: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

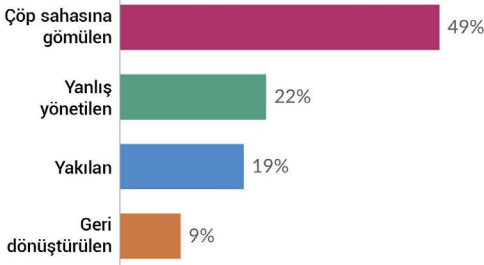
3. Temel sorun, toplanan plastiğin akıbeti olmaya devam etmektedir. Plastik atıkların küresel geri dönüşüm oranı %9'u geçmemektedir (Şekil 121). Sonuç olarak, geri kazanılan plastiğin önemli bir kısmının çöp sahalarına gitme olasılığı yüksektir ve bu da uzun vadede kirlilik sorununu çözmemektedir.

Geri dönüştürülen, düzenli depolama sahalarına gönderilen, yakılan ve yanlış yönetilen plastik atıkların payı, 2019

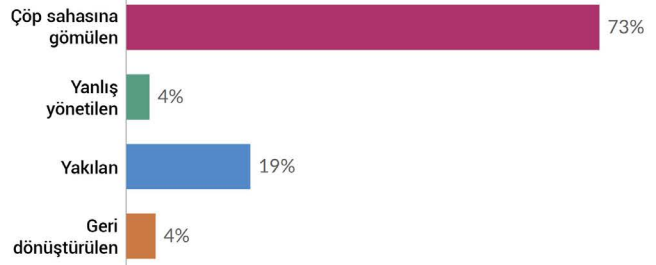
Our World
in Data

Yanlış yönetilen plastik atıklar, açık çukurlarda yakılan, denizlere veya açık sulara atılan veya sağlıksız düzenli depolama sahalarına ve çöplüklere atılan malzemeleri içerir.

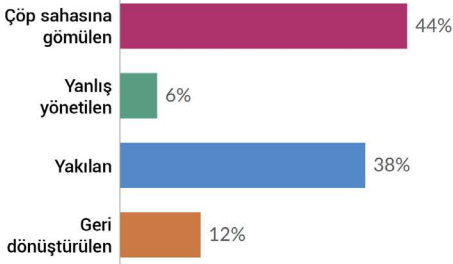
Dünya



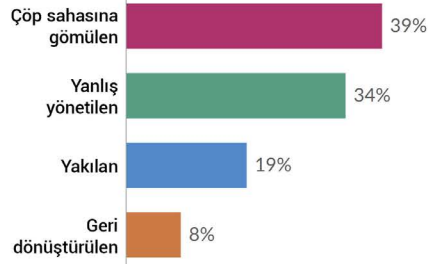
Amerika Birleşik Devletleri



Avrupa



Asya (Çin ve Hindistan hariç)



Veri kaynağı: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Not: Bölgesel toplamlar Our World in Data tarafından hesaplanmıştır ve OECD tarafından belirtilenlere dayanmaktadır.

1. OECD regions: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Şekil 121:

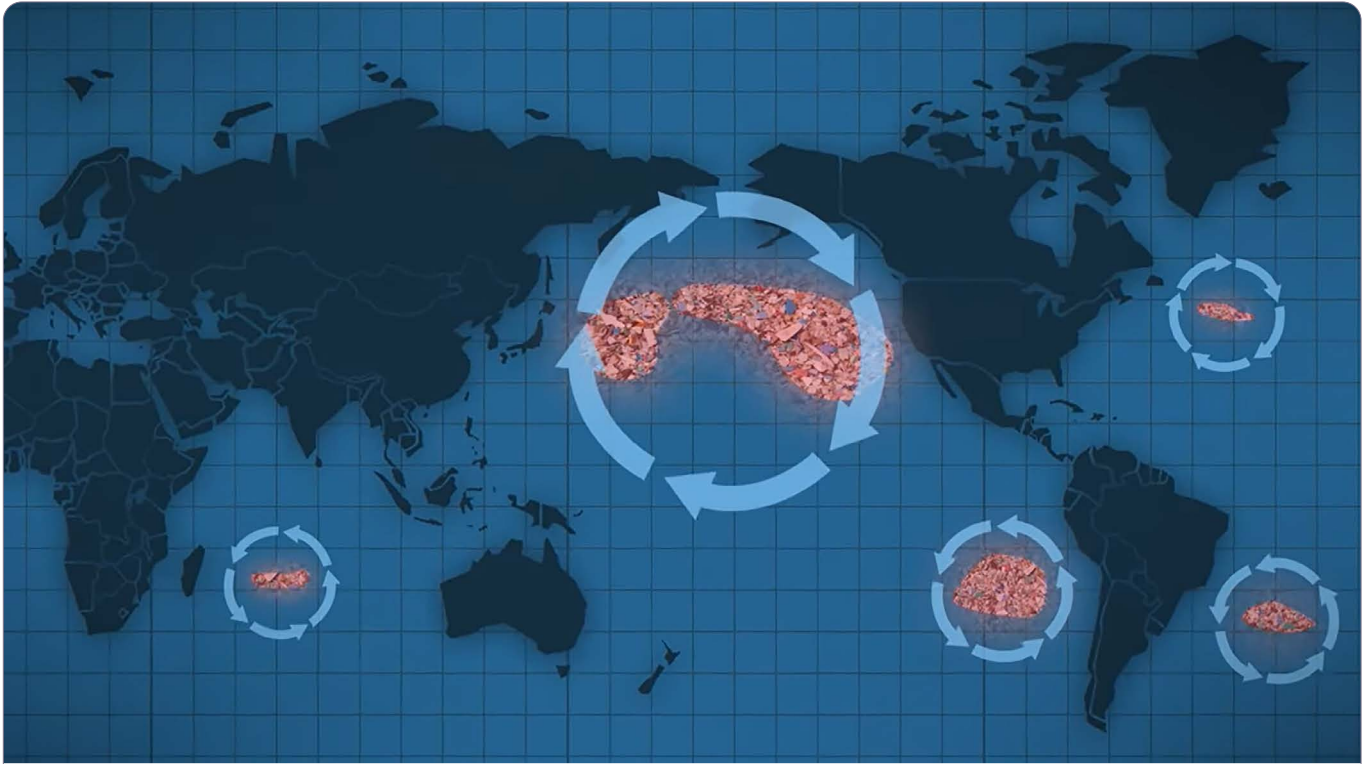
2019 yılında geri dönüştürülen, düzenli depolama sahalarına gömülen, yakılan ve yanlış yönetilen plastik atıkların payı. Yanlış yönetilen plastik atıklar, açık çukurlarda yakılan, denizlere veya açık sulara atılan veya sağlıksız düzenli depolama sahalarına ve çöp sahalarına atılan malzemeleri içerir.

Veri kaynağı: OECD (2023) – Bu veriler hakkında daha fazla bilgi

Not: Bölgesel toplamlar Our World in Data tarafından hesaplanmış ve OECD tarafından belirtilen verilere dayanmaktadır. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY

<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

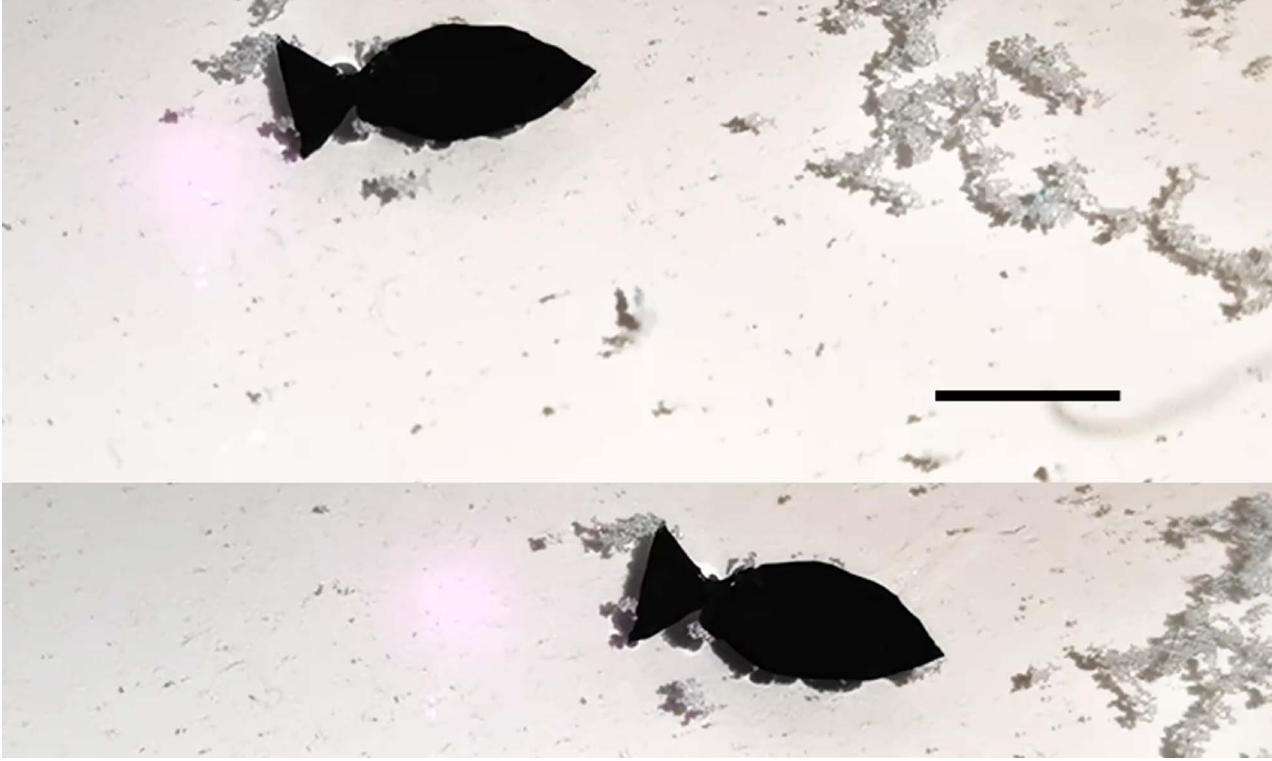
Dahası, okyanus temizleme operasyonları önemli mali maliyetler gerektirir. Örneğin, Büyük Pasifik Çöp Adası, herhangi bir ülkenin karasularından çok uzakta bulunması nedeniyle, temizlik çalışmalarının finansmanı veya yürütülmesinden tek bir ülkenin açıkça sorumlu olmadığı bir durum yaratmaktadır. Büyük Pasifik Çöp Adası'nı ilk keşfeden oşinograf ve araştırmacı Charles Moore'a göre, bu adanın tam olarak temizlenmesi, böyle bir çabayı üstlenen "herhangi bir ülkeyi iflasa sürükler". Ayrıca, dünya okyanuslarında beş benzer çöp adasının daha tespit edildiği (Şekil 122) ve bu durumun sorunu daha da kötüleştirdiği de unutulmamalıdır.



Şekil 122: Dünya okyanuslarındaki beş büyük çöp yığınının yerlerini gösteren şematik çizim

Görünür büyük çöplerin, okyanuslardaki plastik kirliliğinin sadece bir kısmını oluşturduğunu belirtmek önemlidir. Alfred Wegener Enstitüsü'nden deniz biyoloğu Melanie Bergmann'a göre, "Bu sadece okyanus yüzeyindeki plastiği ifade ediyor ve okyanusta bulunan plastiğin sadece %1'inden azını oluşturuyor.

Plastik mikro ve nanoplastiklere parçalandıkça, okyanusları bu tür kirlilikten temizlemek çok daha zor hale geliyor. Sudan mikroplastikleri temizlemek için bazı deneysel teknolojiler zaten mevcut. Örneğin, Sichuan Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, su ortamında yüzebilen ve yakınındaki serbestçe yüzen mikroplastik parçacıkları emen küçük bir robot balık (Şekil 123) geliştirdi.³¹¹ 13 milimetre uzunluğundaki bu biyonomik robot, bedenindeki malzemeler ile organik boyalar, antibiyotikler ve ağır metaller gibi mikroplastik bileşenler arasındaki güçlü kimyasal bağlar ve elektrostatik etkileşimler sayesinde mikroplastikleri etkili bir şekilde topluyor.



Şekil 123: Resim, Sichuan Üniversitesi araştırmacıları tarafından yaratılan minik bir robot balığı göstermektedir. Gerçek bir balığa benzeyen bu kompakt cihaz, etrafta yüzerek serbestçe yüzen mikroplastikleri aktif olarak emmektedir. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-ro-bo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Ancak, bu yeniliklere rağmen, bu tür teknolojilerin küresel ölçekte pratik uygulaması şu anda sınırlıdır. Küçük robotlar mikroplastikleri yalnızca yakın çevrelerinde adsorbe ederler, bu da süreci lokalize hale getirir. Sayıları çok fazla olsa bile, okyanusun geniş alanlarını kapsayamazlar. Ayrıca, besin zincirinin bir parçası haline gelebilirler. Robotların akıntılar, basınç ve tuzluluk gibi zorlu okyanus koşullarında çalışabilme yetenekleri konusunda da belirsizlikler vardır. Bu nedenle, mevcut çözümler henüz yeterince etkili değildir ve ölçeklendirme konusunda ciddi zorluklarla karşı karşıyadır.

³¹¹Wang, Y. et al. Kovalent olmayan birleştirilmiş gradyan nanoyapı ile mümkün kılınan sağlam, onarılabilir, kendi kendine hareket eden entegre robotlar. Nano Lett. 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Mikro ve Nanoplastiklerin Giderilmesinde Mevcut Yöntemler

Sentetik polimerlerin, özellikle polietilen tereftalatın (PET) enzimatik olarak parçalanmasında mikroorganizmaların, özellikle bakterilerin potansiyel kullanımına ilgi artmaktadır. Bu teknoloji, genellikle yakma gibi geleneksel plastik atık bertaraf yöntemlerine çevre dostu bir alternatif olarak sunulmaktadır. Ancak, şimdiye kadar biriken deneysel veriler, endüstriyel kullanım için etkinliği, güvenliği ve ölçeklenebilirliği konusunda şüpheler uyandırmaktadır.

2016 yılında, Shosuke Oda liderliğindeki bir Japon bilim insanı ekibi, PETase ve MHETase adlı iki enzim üreterek PET'i parçalayabilen *Ideonella sakaiensis* adlı bakteriyi keşfetti. Bu buluş, mikrobiyoloji alanında önemli bir gelişmeydi.³¹² Ancak laboratuvar çalışmaları, bozunma sürecinin son derece yavaş olduğunu gösterdi: Bakterilerin, optimal koşullarda 20 gramlık bir plastik filmi parçalaması yaklaşık yedi hafta sürdü. Açıkçası, bu bozunma hızı, plastik kirliliğinin boyutunu ele almak için yeterli kabul edilemez. Her yıl milyonlarca ton plastik atığın çevreye karıştığı küresel ölçekte, bu kadar yavaş bir hız, okyanusu bir çay kaşığıyla boşaltmaya çalışmakla eşdeğerdir.

Bilimsel çalışmalar, bakterilerin plastiği parçalamak için kullandıkları PETaz enzimini modifiye etmeye odaklanmıştır. Ancak araştırmacılar, *Ideonella sakaiensis*'ten elde edilen enzimin hala evriminin erken aşamalarında olduğunu kabul etmektedir. Enzimin verimliliği düşüktür, stabilitesi sınırlıdır ve reaksiyonu hızlandırmak için doğal ortamlarda bulunmayan sıcaklıklar gereklidir. Genetik mühendisliği bile hangi mutasyonların gerçekten iyileşmeye yol açacağını henüz tahmin edememektedir. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'ndan Elizabeth Bell'in de belirttiği gibi, ilerleme daha çok "iki adım ileri, bir adım geri" şeklinde.

Dahası, enzimatik parçalanma evrensel olmaktan uzaktır. Teorik olarak sadece PET gibi belirli plastikler bu şekilde parçalanabilir. Polietilen ve polipropilen gibi yaygın plastikler, mikrobiyal parçalanmaya neredeyse tamamen dirençlidir. Nature dergisinde yayınlanan bir makalede, bilim adamları çoğu plastiğin biyokimyasal yollarla etkili bir şekilde parçalanamayacak kadar enerji yoğun olduğunu belirtmiştir.

Yüksek verimli bir mikrop geliştirilebilse bile, çok daha rahatsız edici bir soru ortaya çıkar: Bu mikrop çevreye güvenli bir şekilde salınabilir mi? **Genetiği değiştirilmiş herhangi bir bakteri, çevresel bir felakete yol açma potansiyeli taşır. Şu anda, neredeyse tüm ülkeler bu tür organizmaların doğaya salınmasını sıkı bir şekilde düzenlemekte veya tamamen yasaklamaktadır.**

³¹²Yoshida, S. et al. Poli(etilen tereftalat)ı parçalayan ve asimile eden bir bakteri. Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Nedenleri açıktır: Bu bakterilerin "görevlerini tamamladıktan" sonra nasıl davranacakları bilinmemektedir. Diğer hayati organik bileşikler parçalamaya başlayabilirler mi? Temel mikroplarla rekabet edebilirler mi? Daha da öngörülemez sonuçlara yol açabilecek mutasyonları tetikleyebilirler mi?

Bu şekilde, bir çevre krizi kolayca başka bir krizle yer değiştirebilir — çok daha öngörülemez ve yıkıcı bir krizle.

Bakteriyel plastik bozunumu üzerine yapılan temel araştırmaların değeri yadsınamaz olsa da, şu aşamada bu teknoloji plastik kirliliği sorununa etkili, ölçeklenebilir veya güvenli bir çözüm olarak değerlendirilemez.

Kaynar Suyun Mikroplastiklerin Giderilmesine Etkisi Üzerine Çalışma: Verimlilik ve Riskler

Guangzhou Tıp Üniversitesi ve Jinan Üniversitesi (Çin) biyomedikal mühendislik ve mikroplastik araştırmacıları, yüksek kalsiyum tuzu içeriğine sahip kaynar suyun (yani sert su) mikroplastiklerin giderilmesine etkisini araştıran bir çalışma³¹³ gerçekleştirdi.

Araştırmacılar, Guangzhou şehrinden farklı sertlik seviyelerine sahip musluk suyu örnekleri topladı. Örneklerin içine 0,1 ila 150 mikrometre boyutlarında üç tür plastik parçacık (polistiren, polietilen ve polipropilen) eklendi. Su beş dakika kaynatıldı, ardından soğutuldu ve kalan mikroplastik konsantrasyonu ölçüldü.

Kaynatma işlemi sırasında, kalsiyum bakımından zengin sert su, yaygın olarak kireç olarak bilinen çözünmez kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturdu. Araştırmacılar, mikroplastik parçacıkların kalsiyum karbonat kristallerine bağlanarak çökelebileceğini ve bu durumun kaynatma sonrası mikroplastik konsantrasyonlarında gözlenen azalmayı açıklayabileceğini varsaydılar.

En yüksek arıtma verimliliği, yüksek su sertliğine sahip numunelerde (litre başına 300 mg CaCO_3) gözlemlenmiştir. Bu numunelerde kaynatma işlemi mikroplastiklerin %90'ına kadarını ortadan kaldırmıştır. Buna karşılık, yumuşak su içeren numunelerde (litre başına 60 mg CaCO_3 'den az) etki önemli ölçüde daha zayıftı ve plastik parçacıkların yalnızca yaklaşık %25'i ortadan kaldırılmıştır.

Ancak, sert suyu kaynatmanın bazı olumlu etkilerine rağmen, önemli bir endişe ortaya çıkmaktadır: mikro ve nanoplastik parçacıkların havaya salınması olasılığı. Su kaynarken buhar oluşur ve bununla birlikte mikroplastik parçacıklar aerosol haline gelebilir. Bu parçacıkların solunması, gıda veya su yoluyla yutulmasından çok daha ciddi bir sağlık riski oluşturur.

Çalışmalar, nanoplastiklerin solunduğunda iki saat içinde beyne ulaşabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, mikroplastikler sindirim sistemine girdiğinde, bir kısmı bedenden atılır. Plastik parçacıkların beyinde

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Kaynamış Musluk Suyu İçmek İnsanların Nanoplastik ve Mikroplastik Alımını Azaltır. Environ. Sci. Technol. Lett. 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

birikmesi, beyin dokularından çıkarılması neredeyse imkansız olduğundan, uzun vadeli risklerle ilişkilidir.

Bu nedenle, kaynatma içme suyundaki mikroplastik içeriğini azaltabilirken, havadan bulaşma riskini potansiyel olarak artırarak insan sağlığı için daha büyük bir tehdit oluşturur. Bu durum, daha güvenli ve daha etkili su arıtma yöntemlerine acil ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır.

Plastik İşleme Yöntemi Olarak Piroliz: Verimlilik ve Riskler

Piroliz, plastik atıkların işlenmesinde kullanılan teknolojilerden biridir ve plastik malzemelerin oksijenin sınırlı olduğu bir ortamda yüksek sıcaklıklarda termal olarak ayrıştırılmasına dayanır. Bu işlem genellikle 300 ila 800 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve katı karbon kalıntısı ile birlikte gaz ve sıvı hidrokarbon bileşiklerinin üretilmesiyle sonuçlanır.

Yüksek sıcaklıklarda, plastik malzemelerin polimer zincirleri parçalanarak yakıt olarak kullanılabilen bir hidrokarbon karışımı oluşturur. Ancak, bu yöntem, geleneksel plastik yakma ile birlikte, nanoplastiklerin salınması nedeniyle önemli çevresel riskler taşır.

Yüksek sıcaklıkların etkisi altında plastik, nanoplastikler (100 nanometreden daha küçük parçacıklar) dahil olmak üzere ultra ince parçacıklara ayrışır. Bu parçacıklar o kadar küçüktür ki, modern filtreleme sistemleri bunları tamamen yakalayamaz ve atmosfere salınmalarına izin verir.

Plastik yanması, kanserojen etkileri olduğu bilinen yüksek derecede toksik bileşikler olan dioksin ve furanların salınımıyla da eşlik eder.³¹⁴

Bu nedenle, yakıt üretimi için piroliz ve plastik yakma yöntemlerinin kullanılması, hava emisyonları açısından önemli riskler taşır ve sadece çevreye değil, insan sağlığına da tehdit oluşturur. Bu plastik bertaraf yöntemi, çevre kirliliği krizine karşı güvenli veya sürdürülebilir bir çözüm olarak kabul edilemez. Bu tür yakıtların gerçek maliyeti, insan hayatı ve refahı için oluşturdukları tehdittir.

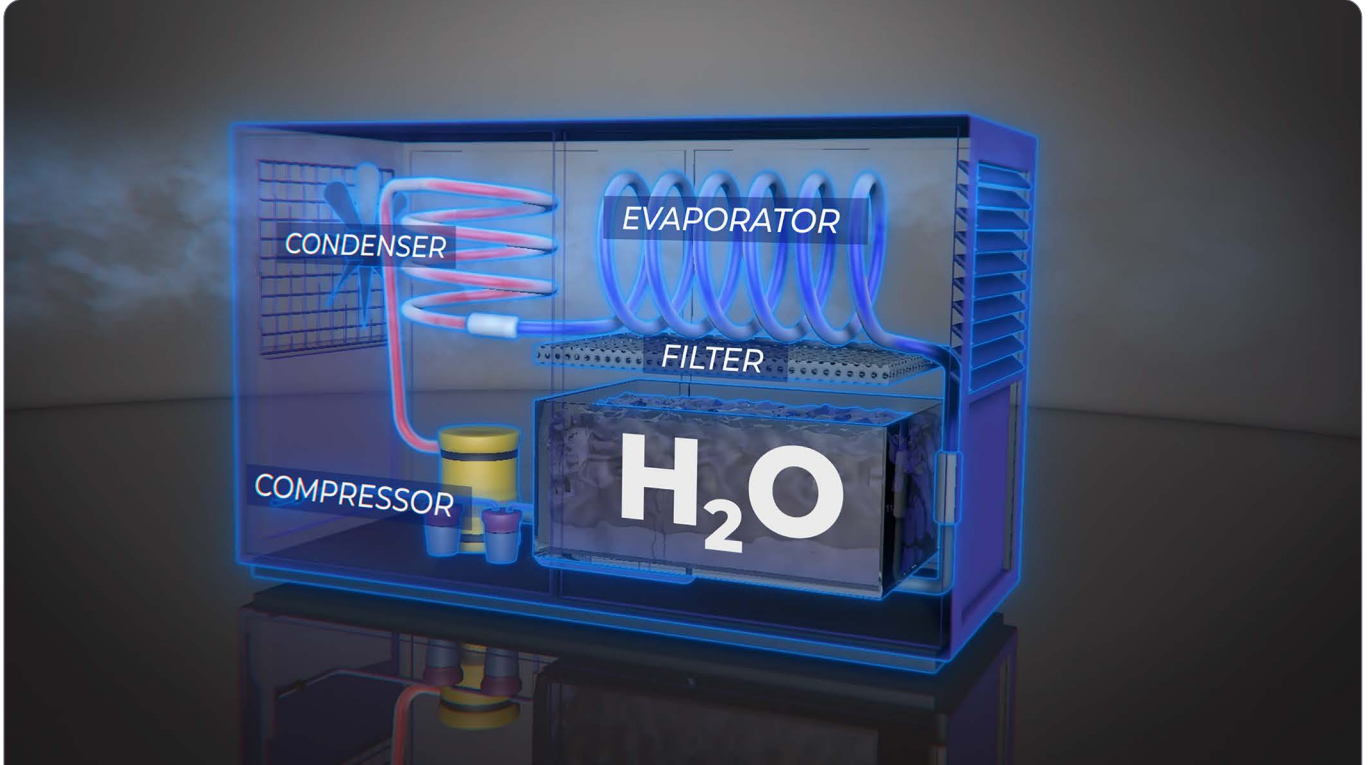
³¹⁴Baca, D. et al. Dioksinler ve plastik atıklar: Tespit yöntemlerinin bilimsel analizi ve sistematik literatür incelemesi. Environmental Advances 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

ALLATRA BİLİMSEL TOPLULUĞUNUN MİKRO VE NANOPLASTİK SALGINLA MÜCADELE YAKLAŞIMI

Okyanusları MNP'lerden Temizlemek için Atmosferik Su Jeneratörü (AWG) Teknolojileri

Ekolojik dengenin yeniden sağlanması, atmosferik su jeneratörleri (AWG'ler) gibi yenilikçi teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesini gerektirir. Günümüzde bu sistemler, ev tipi modellerden endüstriyel modellere kadar geniş bir yelpazede mevcuttur. AWG'ler, mikroplastikler dahil olmak üzere kirlenici maddeleri etkili bir şekilde gidererek havadan içme suyu üretebilir (Şekil 124). Su, tadı iyileştirmek ve ek sağlık yararları sağlamak için mineralize edilebilir.

Bu jeneratörler, havada doğal olarak bulunan nemi yoğunlaştırarak çalışır.



Şekil 124: Resim, bileşenleri ve çalışma prensibi ile birlikte bir atmosferik su jeneratörünün şematik bir gösterimini göstermektedir.

AWG'ler iki temel teknolojiye dayalı olarak çalışır:

1. Yoğuşma tabanlı teknoloji. Bu yöntem, ortam havasını üniteye çekerek soğutulmuş bir yüzeye veya soğutma bobinine maruz bırakır ve su buharının sıvı hale yoğuşmasını sağlar. Bu süreç, dondurucudan çıkarılan soğuk bir nesne üzerinde yoğuşma oluşumuna benzer. Yoğuşma tabanlı AWG'ler, sıcak ve nemli ortamlarda en iyi performansı gösterir.

2. Adsorpsiyon tabanlı teknoloji. Bu yöntem, havadaki nemi yakalamak için silika jel, zeolitler veya metal-organik yapılar gibi nem emici malzemeler kullanır. Emilen su, malzeme ısıtıldığında serbest bırakılır.

Günümüzde bu tür sistemler, iklimle ilgili afetlerden etkilenen bölgeler de dahil olmak üzere, içme suyu sağlamak için yerel olarak kullanılmaktadır.

Endüstri ve halkın ihtiyaçlarını karşılamak için AWG'lerin büyük ölçekli kullanımı, birkaç yıl içinde okyanus kirliliğini önemli ölçüde azaltabilir.

Şu anda, yemek pişirmek için kullanılan su da dahil olmak üzere evsel su kaynakları genellikle yüksek konsantrasyonlarda mikro ve nanoplastik içeren rezervuarlardan gelmektedir. Bu kirli su, insan bedeninde plastik birikimine katkıda bulunmaktadır. Kirli kaynaklara bağımlı olmak yerine havadan elde edilen suya geçmek, içme suyunun kalitesini önemli ölçüde artırabilir.

Doğal Filtrasyon ve Atmosferik Su Jeneratörleri Kullanarak Ekosistemlerin Restorasyonu

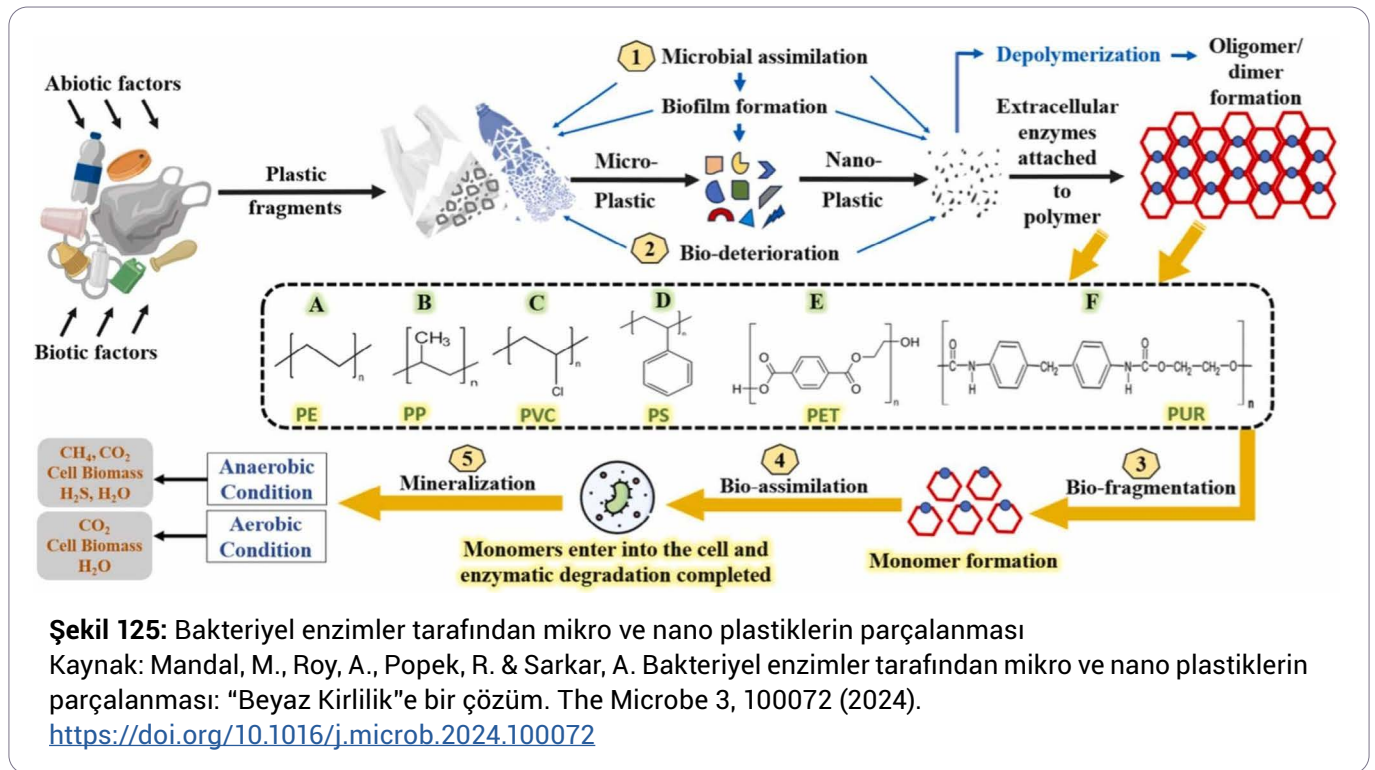
Kullanılmış sudan mikroplastikleri etkili bir şekilde uzaklaştırmak için modern filtrasyon ve asimilasyon sistemleri gibi ileri teknolojilerin kullanılması gerekir. Ayrıca, arıtılmış suyun su kütlelerine deşarj edilmesini önlemek için atık su arıtma tesisleri yenilenerek, suyun doğal mikroorganizmaların plastiği parçalayabildiği toprağa yönlendirilmesi sağlanmalıdır.³¹⁵

Bu mikroorganizmalar, laboratuvarlarda geliştirilen genetiği değiştirilmiş veya yapay olarak üretilmiş türlerden temelden farklıdır. Ekosistemlerde doğal olarak bulunurlar ve bu ortamlarda istilacı türlerin özelliklerini göstermezler.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Çöp sahasından izole edilen karışık mikrobiyal konsorsiyumun bakteriyel kolonizasyonu ile mikro-polietilen parçacıkların biyolojik bozunması. Chemosphere 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Araştırmalar³¹⁶, doğal ortamlarda yaşayan bazı toprak mikroplarının³¹⁷ polietilen³¹⁸ ve polietilen tereftalat³²⁰ gibi polimerleri³¹⁹ parçalamada önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, en yüksek mantar parçalama oranı – 16 hafta boyunca polietilende ortalama $36,4 \pm 5,53$ kütle azalması – *Aspergillus oryzae* A5, 1 suşunda gözlemlenmiştir.

Mikropların polimerleri biyolojik olarak parçalama yeteneği, plastiklerin karmaşık moleküler yapılarını parçalamalarını sağlayan enzimleri üretmelerinden kaynaklanmaktadır.³¹⁷



Deneyssel gözlemlerle doğrulanan bu bulgular, doğal mikrobiyal toplulukların mikro ve nanoplastiklerden kaynaklanan çevre kirliliğini azaltma potansiyelini vurgulamaktadır.

Hintli araştırmacılar tarafından yapılan bir inceleme çalışmasına göre, "Bugüne kadar mevcut olan çeşitli iyileştirme teknikleri arasında, mikrobiyal iyileştirme, MNP'leri çevreden parçalamak veya sürdürülebilir bir şekilde uzaklaştırmak için daha umut verici sonuçlar göstermiştir."³¹⁷

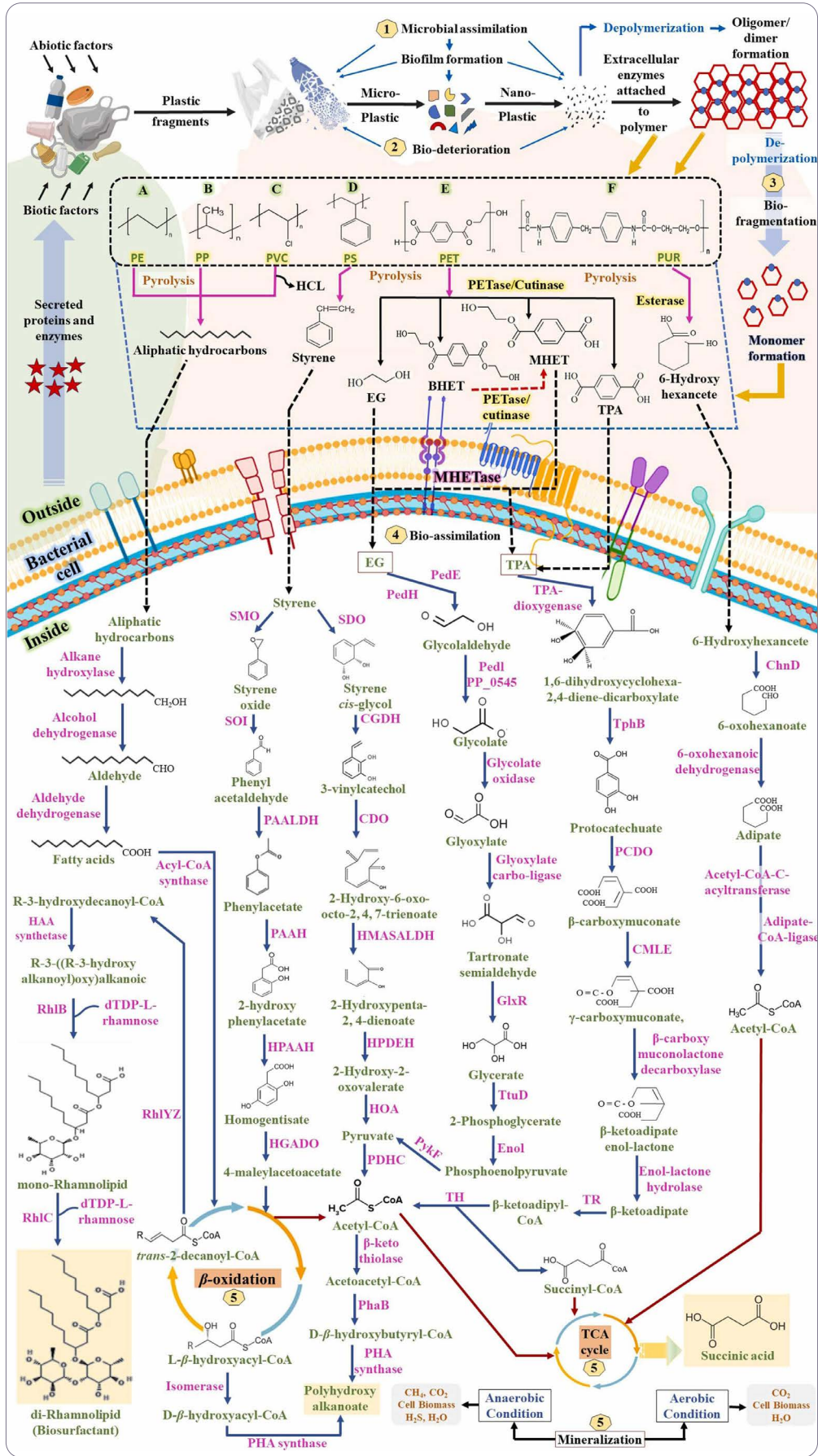
³¹⁶Auta, H. S. et al. Mangrov ortamında doğal koşullar altında PET ve PS mikroplastiklerin mikrobiyal bozunmasının artırılması. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Bakteriyel enzimler tarafından mikro ve nano plastiklerin bozunması: 'Beyaz Kirlilik'e bir çözüm. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Mangrov sedimanlarından izole edilen *Bacillus* sp. ve *Rhodococcus* sp. tarafından polipropilen mikroplastiklerin büyüme kinetiği ve biyolojik bozulması. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Nairobi-Kenya'daki Dandora çöp sahasından elde edilen bakteri ve mantarların polietilenin biyolojik bozunabilirliği. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. Polietilen tereftalati parçalayan ve asimile eden bir bakteri. *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

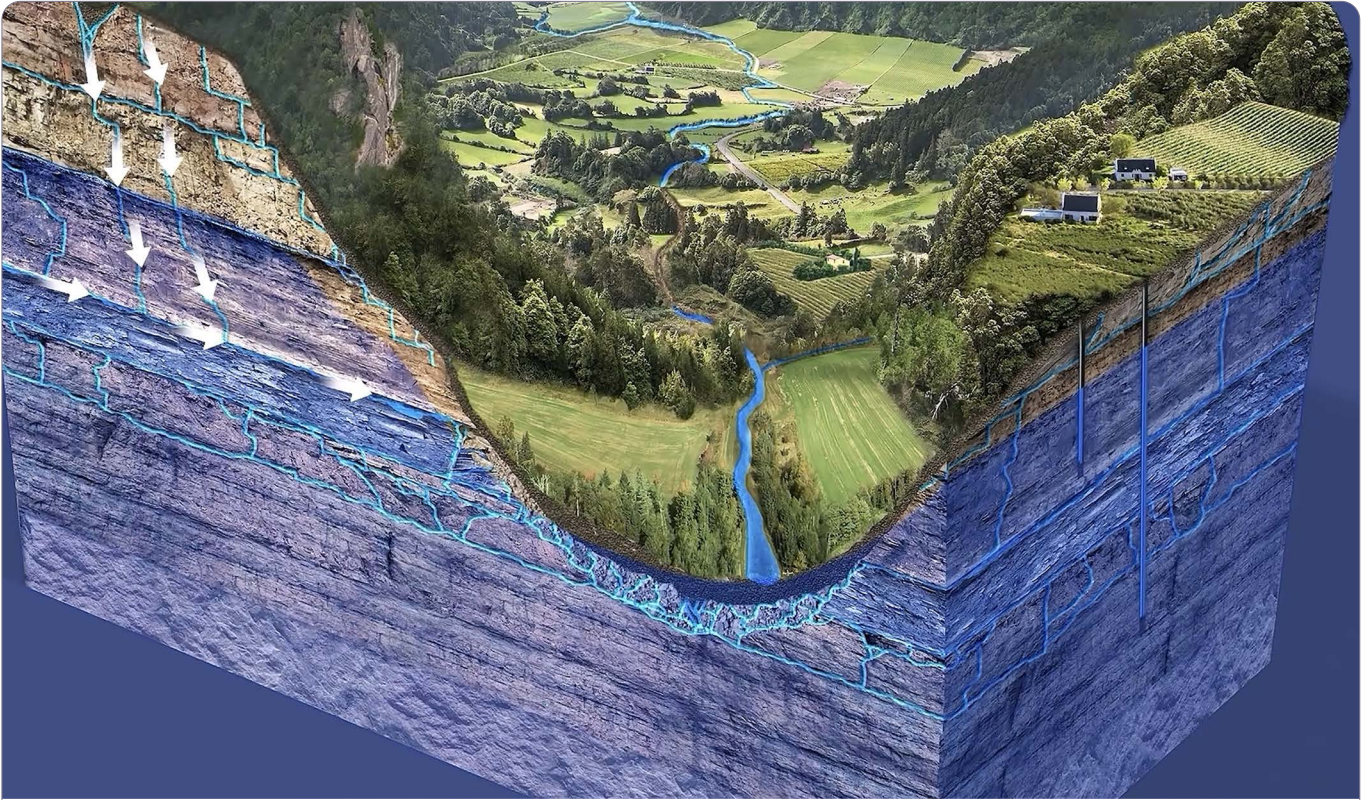


Şekil 126: Atık plastik, çeşitli abiyotik ve biyotik faktörler nedeniyle MNP'lere dönüşür.

Kaynak: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Bakteriyei enzimler tarafından mikro ve nano plastiklerin parçalanması: "Beyaz Kirlilik"e bir çözüm. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Bu nedenle, havadan elde edilen su teknolojilerine geçiş, tüketilen suyun kalitesini önemli ölçüde artıracaktır. Mikrobiyal iyileştirme teknikleriyle birleştirildiğinde, bu yaklaşım çevrede mikro ve nanoplastik kirliliğini önemli ölçüde azaltabilir.

Su kütlelerinde olduğu gibi, toprağın üst katmanlarında da plastik konsantrasyonları bir süre yüksek kalacaktır. Ancak, su yeraltına daha derine nüfuz ettikçe, doğal bir kendi kendini temizleme süreci gerçekleşir (Şekil 127). Toprakta yaşayan mikroorganizmalar, minik nanoplastik parçacıkların parçalanmasına yardımcı olur.



Şekil 127: Resim, jeolojik katmanlar aracılığıyla toprağa deşarj edilen atık suyun biyolojik arıtma sürecini şematik olarak göstermektedir. Oklar, mikroorganizmalar ve filtreleme malzemelerinin kirletici maddeleri giderdiği toprak ve kaya katmanlarından geçen atık suyun yolunu göstermektedir. Toprak katmanları farklı renklerle işaretlenmiştir: kahverengi üst toprak, gri kum ve çakıl.

Toprağa yönlendirilen arıtılmış ve filtrelenmiş atık su hacminin artırılması, sağlıklı toprak oluşumu, besin döngüsü ve genel ekosistem direncinde temel rol oynayan mikroorganizmaların (bakteriler, mantarlar ve arkeler) büyümesini teşvik eder. Zamanla, bu arıtılmış su daha derin katmanlara sızarak sonunda okyanuslara geri döner.

Kurak bölgelere atmosferik su jeneratörleri kurmak ve kullanılmış suyu toprağa geri döndürmek, küresel su krizini çözmek ve çölleşmeyi önlemek için umut verici bir strateji sunar. Bu çabalar, bitki örtüsünün ve ekosistemlerin restorasyonunu destekleyen süreçleri harekete geçirir.³²¹ AWG'lerin kullanımı, içme suyu kıtlığı sorununu çözmeye yardımcı olarak yerel toplulukların yaşam kalitesini de iyileştirecektir.

Mikrobiyal iyileştirme ile birleştirildiğinde, AWG'lerin kullanımı, sürdürülebilir su yönetimi ve bozulmuş arazilerin iyileştirilmesi yolunda önemli bir adım olabilir.

AWG teknolojisine tam geçiş, tüm insan ihtiyaçları için (evsel, endüstriyel ve tarımsal) atmosferik suyun kullanılması anlamına gelir. Bu yaklaşımın küresel ölçekte benimsenmesi, buharlaşma oranlarını artıracak, okyanusların soğumasını ve okyanusların temizlenmesinin hızlanmasını sağlayacaktır. Ayrıca, atmosferdeki fazla nemi azaltarak, AWG'ler aşırı yağış ve rüzgar olaylarının şiddetini azaltabilir ve doğal afetlerin yıkıcı etkilerini hafifletebilir (daha fazla bilgi için Havadan Su: İnsanlığın Hayatta Kalma Yolu filmi izleyin).

Atmosferik Su Jeneratörlerinin Kullanımıyla İlişkili Zorluklar ve Riskler

Ancak, AWG'lerin yaygın olarak kullanılması bir dezavantaja da sahiptir. Temel endişe, AWG'lerin insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkisinin yeterince değerlendirilmemiş olmasıdır. Bu teknoloji, okyanus sularının arıtılmasına ve iklim sistemindeki ısı iletkenliğinin iyileştirilmesine katkıda bulunabilirken, AWG'lerin büyük ölçekli kullanımı atmosferdeki mikroplastik konsantrasyonlarında önemli bir artışa da yol açabilir.

AWG'lerin çalışma mekanizması, atmosferdeki nemin yoğunlaşmasını ve ardından okyanus sularından buharlaşma yoluyla yenilenmesini içerir. Bu sular yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik ve nanoplastik içerdiğinden, bu süreçte atmosfere giren buhar ultra ince plastik parçacıkları taşıyabilir. Sonuç olarak, AWG sistemlerinin kullanıldığı bölgelerde (büyük metropoller dahil), insanların soluduğu havadaki nanoplastik konsantrasyonu, şu anda kıyı bölgelerinde gözlemlenen seviyelere yükselebilir. Bu durum ciddi bir risk oluşturmaktadır: atmosferdeki nanoplastik konsantrasyonlarının artması insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Solunan nanoplastikler, beyin dahil olmak üzere insan bedeninde birikebilir.

Ve bu da kritik noktadır. AWG'lerin okyanus suyunu arıtmaya yardımcı bir araç olarak kullanılması fikrinin, atmosferdeki mikroplastik konsantrasyonlarının hala son derece düşük olduğu bir dönemde, yirmi yıl önce ALLATRA bilim adamları tarafından ortaya atıldığını anlamak çok önemlidir. O zamanlar, bu tür teknolojilerin uygulanması, insan sağlığına ciddi riskler oluşturmada somut çevresel faydalar sağlayabilirdi.

Ancak durum büyük ölçüde değişti. Mevcut koşullar altında, AWG'lerin büyük ölçekli kullanımı, havadaki MNP konsantrasyonlarını artırma olasılığı daha yüksektir. Mevcut atmosferik MNP seviyeleri zaten yüksek olduğundan, AWG'ler aracılığıyla ek hacimler eklenmesi insan sağlığı için ölümcül olabilir.

Böylece, bir zamanlar umut verici ve yenilikçi olarak görülen bir teknoloji, artık geçerliliğini yitirmiştir. Küresel toplum olarak, AWG'lerin uygulanabilir bir çözüm olabileceği kritik bir fırsatı kaçırdık. İklim sorunları ve çevre kirliliği bağlamında, zaman faktörü belirleyici bir rol oynamaktadır. Yirmi yıl önce milyonlarca insanın sağlığını koruyabilecek ve gezegenin temizlenmesine gerçekten katkıda bulunabilecek olan şey, şimdi potansiyel olarak ciddi bir tehlike oluşturmaktadır.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

AWG artık geleceğin teknolojisi değil, kaçırılmış bir fırsatın hatırlatıcısıdır. Mevcut koşullarda, öncelik MNP'leri hem atmosferden hem de insanbedeninden uzaklaştırmak için yöntemler geliştirmeye verilmelidir. Her şeyden önce, kendimize zaman kazanmalıyız.

Mikro ve Nanoplastiklerin Toksisitesini Azaltmaya Yönelik Yenilikçi Bilimsel Yaklaşım

Mikroplastiklerin, özellikle de nanoplastiklerin insan sağlığı üzerindeki çok düzeyli ve kümülatif etkisine ilişkin sunulan veriler göz önüne alındığında, modern uygarlığın geleneksel çevre kirliliği kavramlarının ötesine geçen ekolojik ve biyomedikal bir sorunla karşı karşıya olduğu açıktır. Bu sorun sadece bireysel biyosferleri etkilemekle kalmaz, aynı zamanda Homo sapiens nüfusunun uzun vadeli sürdürülebilirliğini de tehdit eder.

Bugüne kadar üretilen neredeyse tüm plastikler (9 milyar tonun üzerinde) çevrede birikmeye devam etmekte ve yüksek kimyasal ve biyolojik aktivite gösteren mikro ve nano boyutlu parçacıklara parçalanmaktadır. Mikro ve nanoplastikler toprakta, suda, havada ve sebze ve meyvelerden et, balık, bal, süt ve tuza kadar tüm önemli gıda kategorilerinde bulunmuştur. Bu, plastik parçacıkların gıda zincirine yaygın bir şekilde sızdığını ve "güvenli" veya "sağlıklı" gıda kavramlarının geleneksel anlayışını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir.

Parçacıkların insan bedenine girme yolu, bunların biyolojik davranışını ve dağılımını büyük ölçüde belirler. Sindirim sisteminden giren plastik kısmen atılabilirken, solunum yolu önemli ölçüde daha yüksek risk oluşturur. Solunan nanoplastikler akciğer dokusunda yerleşir, kan-beyin bariyerini geçer ve doğrudan beyne ulaşabilir, burada zamanla birikebilir. Doğal detoksifikasyon mekanizmaları (karaciğer ve böbrekler gibi) bu parçacıkları tanıma ve uzaklaştırma konusunda etkili değildir.

Mikroplastiklerin en yüksek konsantrasyonu, su kütlelerinin, kıyı bölgelerinin ve ormanlık alanların yakınında, özellikle yüksek nem ve sıcaklık koşullarında bulunur. Bu tür arazilerde plastik daha uzun süre kalır, aerosol taşınmasına katılır, bitkilerde oksidatif strese neden olur ve fotosentetik süreçlerin verimliliğini azaltır. Bir zamanlar sağlık için yararlı bir aktivite olarak görülen kıyı rekreasyonu, artık ek bir solunum yükü taşımaktadır: tahminlere göre, açık su kütlelerinin yakınında solunan plastik miktarı, kentsel ortamdaki göstergelerin birçok katı daha fazla olabilir.

Epidemiyolojik çalışmalar, mikro ve nanoplastik (MNP) kirlilik düzeyleri ile hipertansiyon, diyabet, felç, depresif ve bilişsel bozukluklar dahil olmak üzere kronik bulaşıcı olmayan hastalıkların yaygınlığı arasında tutarlı bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Biyolojik bariyerleri geçme ve beyin, kalp, akciğerler ve plasenta dahil olmak üzere çeşitli dokularda birikme yetenekleri nedeniyle, MNP'ler moleküler, hücresel ve organ düzeylerinde toksik etkiler gösterir.

Plastikler bedende birikerek bağışıklık sistemini baskılayıcı, iltihaplanma ve gen toksik etkilere neden olur. Bu risklerin belirlenmesi konusunda ilerleme kaydedilmesine rağmen, MNP'leri insan bedeninden etkisiz hale getirip uzaklaştırmak için etkili mekanizmalar henüz geliştirilmemiştir.

Sistemik biyolojik etkileri olan nanoplastiklerin en kritik özelliklerinden biri, elektrostatik yük tutma kabiliyetleridir. İnert parçacıkların aksine, nanoplastikler hücre yüzeyleri, proteinler, reseptörler ve hatta genetik materyalle aktif olarak etkileşime girerek moleküler düzeyde kararlı bağlar oluşturur. Bu özellik, nanoplastiklerin kan-beyin bariyeri dahil biyolojik bariyerleri geçmesini kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda bunların bedenden atılmasını da engelleyerek dokularda, özellikle beyinde uzun süre kalmasına neden olur. Elektrostatik etkileşimler, membran depolarizasyonu, mitokondriyal disfonksiyon, oksidatif stres ve apoptoz gibi bir dizi hücresel bozukluğu tetikler ve bu da nanoplastik parçacıkların minimum konsantrasyonlarında bile toksisiteyi önemli ölçüde artırır.

Bu raporun yazarları, mikro ve nanoplastiklerin elektrostatik yükünü nötralize etmek veya korumak için önerdikleri çözümün, nanoplastiklerin biyolojik aktivitesini önemli ölçüde azaltabilecek ve kritik organlarda birikme hızını yavaşlatabilecek temel bir atılım olabileceğini öne sürüyorlar. Yazarların tahminlerine göre, elektrostatik yükün korunması veya nötralizasyonu, mikro ve nanoplastiklerin potansiyel tehlikesini en az %50 oranında azaltabilir, bu da bu araştırma alanını kritik öneme sahip hale getirir. Bu, bilim camiasına MNP ile ilgili etkileri teşhis etmek, detoksifiye etmek ve önlemek için daha kapsamlı yaklaşımlar geliştirmek için gerekli zamanı sağlayabilir. Bu bağlamda, biyofizik, nanomalzeme bilimi ve moleküler toksikoloji alanlarındaki araştırmalar büyük önem taşıyacaktır. Bu sorunun ele alınmasındaki gecikmeler, bozulma süreçlerini hızlandırabilir.

Biyomedikal çözümlerle eş zamanlı olarak, plastik atıkların güvenli bir şekilde işlenmesi için bilimsel olarak desteklenen bir stratejiye acilen ihtiyaç vardır. Mevcut atık bertaraf sistemleri, plastiklerin daha fazla parçalanmasını ve biyosfere girmesini önleyememektedir. Küreselleşme bağlamında, güvenli plastik toplama ve geri dönüşüm yöntemlerinin oluşturulması, uygulanması ve ölçeklendirilmesi için uluslararası bir teknolojik platformun geliştirilmesi esastır. Bu tür önlemler ancak kurumsal destek, sınır ötesi düzenlemeler ve bilimsel diplomasi ile gerçekleştirilebilir.

Bilim camiası, sağlık profesyonelleri ve genel halk arasında farkındalığın artırılması özellikle önemli hale gelmiştir. Bugüne kadar çoğu insan mikro ve nanoplastiklerin (MNP'ler) etkisinin tam boyutunun farkında değildir ve bilmeden bunların yayılmasına katkıda bulunmaya devam etmektedir.

Bu nedenle, mikro ve nanoplastik sorunu potansiyel bir tehdit olmaktan çıkmış ve sistemik bir risk faktörüne dönüşmüştür. Artık bu alan, bilim camiası ve sağlık otoritelerinin öncelikli ilgisini, verilerin sistematik hale getirilmesini, risk değerlendirme standartlarının geliştirilmesini ve hükümetler arası ve uluslararası işbirliğinin güçlendirilmesini gerektirmektedir. Hem kısa hem de uzun vadede biyolojik güvenliği koruyacak etkili çözümler geliştirmek için disiplinler arası bir yaklaşım, kurumsal tanınma ve uluslararası koordinasyon şarttır.

X FAKTÖRÜ: DOĞAL AFETLERİN DİNAMİKLERİNDEKİ MİKRO VE NANOPLASTİKLERİN ROLÜ

"Mikro ve Nanoplastiklerin İklim Üzerindeki Etkisi" bölümünde belirtildiği gibi, mikro ve nanoplastik parçacıklar okyanus suyunun ısı iletkenliğini azaltarak ısı birikimine ve bunun sonucunda okyanus sıcaklıklarında kritik bir artışa neden olmaktadır. Ancak mikro ve nanoplastikler, okyanus ısınmasının doğrudan kaynağı değildir.

2023 baharından bu yana ve bir yılı aşkın bir süredir, Dünya Okyanuslarının ortalama yüzey sıcaklığı her gün tarihi rekorlar kırarak, gözlem tarihinin eşi benzeri görülmemiş bir olaya imza atmaktadır (Şekil 128). Dünyanın dört bir yanındaki bilim insanları bu anormal artıştan derin endişe duyuyor.



Miami Üniversitesi Rosenstiel Deniz ve Atmosfer Bilimleri Okulu'nda kıdemli araştırmacı olan Dr. Brian McNoldy, **"Sadece bir yıl boyunca rekor kıran okyanus sıcaklıkları değil, bu rekorların kırıldığı fark da önemli — önceki rekorlara bile yaklaşamıyor"** diyor.³²²



İngiliz deniz jeofizikçisi Dr. Rob Larter da bu endişeleri paylaşıyor: **"Bu oldukça korkutucu, çünkü neden böyle bir sapma olduğu konusunda ikna edici bir açıklama yapan hiçbir bilim insanı duymadım"...** **"Ancak şu anda izlenimimiz, işlerin beklediğimizden daha hızlı ve daha ileri gittiği yönünde."**³²³

İklim araştırma verileri, mevcut modellerin okyanus yüzey sıcaklıklarında kademeli bir artış öngördüğünü gösteriyor, ancak gözlemlenen ısınma hızı tüm tahminleri önemli ölçüde aşıyor. Bilim adamları, insan kaynaklı iklim değişikliğinin bu duruma katkıda bulunan bir faktör olduğunu doğruluyor, ancak tek başına bu benzeri görülmemiş fenomeni tam olarak açıklayamıyor.

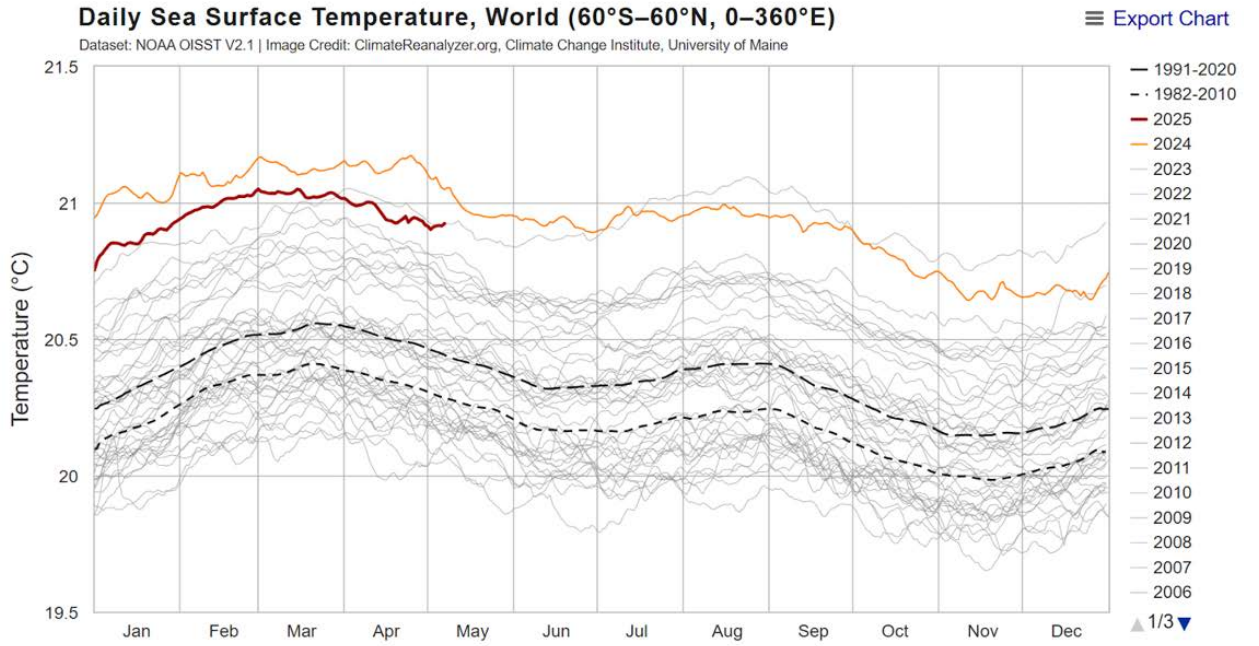
³²²NBC News. '12 aylık rekor deniz ısısı bilim insanlarını şaşkına çevirdi ve endişelendirdi'. (2024)

<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

³²³The New York Times. Bilim adamları okyanus sıcaklıkları konusunda paniğe kapıldı. (2024)

<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Okyanus sıcaklığı araştırmaları uzmanı St. Thomas Üniversitesi'nden Profesör John Abraham, uzun vadeli okyanus yüzey sıcaklığı değişikliklerini etkileyen, daha önce bilinmeyen faktörlerin varlığını öne sürdü.³²² Bu unsurların mevcut iklim modellerinde dikkate alınmadığını vurguladı. Bu raporun yazarları, okyanus ve atmosferin ek ısınmasından sorumlu olabilecek, sözde "X Faktörü"nü varlığını öne sürüyor.



Şekil 128: Ortalama Günlük Deniz Yüzey Sıcaklığı, 1981–2025

Veri kaynağı: NOAA OISST V2.1 Veri Seti | Görsel kaynağı: [ClimateReanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), İklim Değişikliği Enstitüsü, Maine Üniversitesi, Veri Seti: NOAA OISST."
https://climate.reanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 aylık rekor deniz ısısı bilim insanlarını şaşkına çevirdi ve endişelendirdi'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Okyanuslardaki Mikro ve Nanoplastikler Tanımlanamayan X Faktörü Olabilir mi?

Mikro ve nanoplastiklerin mevcut okyanus ısınmasının ana nedeni olma olasılığının analizi, kritik bir çelişki ortaya koymaktadır. Nanoplastikler okyanusun ısıyı salma yeteneğini bozsa da, kendileri termal enerji üretmezler; sadece bu enerjinin okyanustan kaçmasını engellerler.

Son 60 yılda, okyanusların ortalama derinliği önceki 10.000 yıla göre 15 kat daha hızlı ısınmıştır^{324, 325} ve bu eğilim her yıl hızlanmaktadır. İlerleme hızı giderek artmaktadır. Ancak, güneş ışığının ulaşamadığı derinliklerde sıcaklığı yükseltmek için çok büyük miktarda enerji gereklidir.^{326, 327}

Mikro ve nanoplastiklerin okyanuslara büyük ölçekli girişi nispeten yakın bir zamanda, yaklaşık 30 yıl önce başlamıştır. Ancak, okyanusların daha derin katmanlarında hızlanan ısınma 60 yılı aşkın bir süredir gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, plastikler, bu kirleticilerin okyanuslara önemli miktarlarda girmesinden çok önce başlayan, okyanusların orta derinliklerindeki uzun vadeli ve artan ısınma eğilimini açıklayamaz.

Güneş radyasyonu da yeterli bir açıklama sağlamamaktadır. Güneş ışığı okyanusa sadece yaklaşık 200 metre derinliğe kadar nüfuz eder. Su, karışmanın bir sonucu olarak Güneş tarafından maksimum yaklaşık 700 metre derinliğe kadar ısıtılabilir.³²⁸ Ancak, güneş ışığının ulaşamadığı çok daha derin tabakaların ısınması için muazzam miktarda enerji gereklidir.

Bu, okyanusta biriken ısının başka bir kaynaktan geldiğini düşündürmektedir. Bu arada, nanoplastiklerin varlığı bu ısıyı hapsederek atmosfere kaçmasını engelliyor gibi görünmektedir.

Güneş ısınması okyanus sıcaklıklarındaki katlanarak artışı açıklayamadığından, bilim adamları okyanusun çeşitli bölgelerinde ek ısı kaynakları olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Sıcaklık Anormalliklerinin Dikey Dağılımı

Son yirmi yılda Argo sisteminden elde edilen verilere dayanan, çeşitli okyanus derinliklerindeki küresel sıcaklık dalgalanmalarının analizi, yüzeyden daha derin okyanus katmanlarına doğru aşağı doğru ısı transferi şeklindeki geleneksel modelle uyuşmayan bir dizi anomali ortaya çıkarmıştır.^{329, 330}

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. Science 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

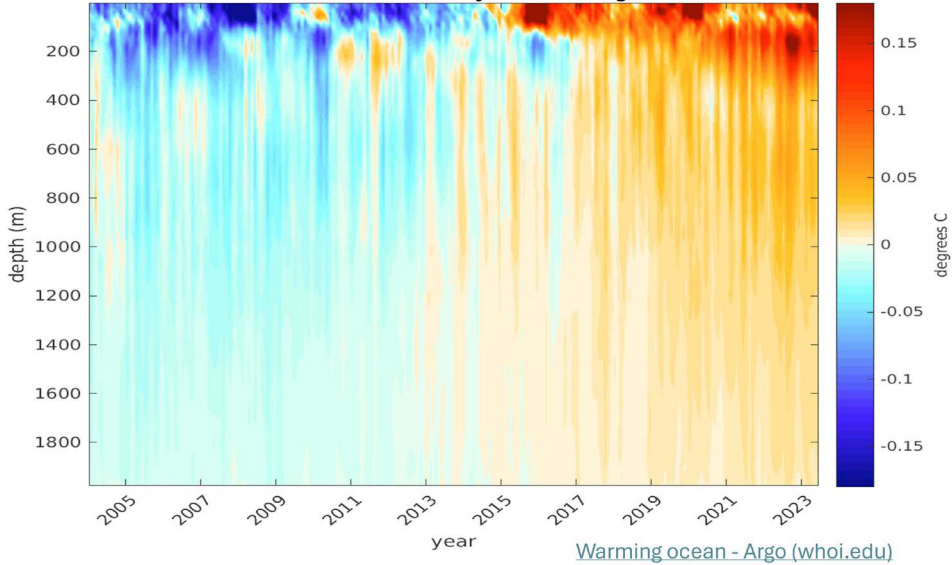
³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

İstatistiksel olarak anlamlı sıcaklık gradyanı tersine dönme vakaları belgelenmiştir; bu vakalarda, nispeten daha soğuk yüzey katmanlarının altında daha sıcak su kütleleri bulunmuştur (Şekil 129). Fizik yasalarına göre, termal enerji bir ara soğuk katmandan yukarıdan aşağıya geçemeyeceğinden, bu tür sıcaklık tabakalaşması yalnızca yüzeyden aşağıya doğru ısı transferi yoluyla fiziksel olarak imkansızdır.

ARGO verileri, son 20 yılda çeşitli derinliklerdeki sıcaklık değişimlerini göstermektedir.

Küresel ortalama okyanus sıcaklığı anomali



Şekil 129: 2004 yılından bu yana 0–1.900 metre derinliklerdeki küresel okyanus sıcaklık anomalileri

Kaynak: Argo sistemi – <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Çin Okyanus Üniversitesi'nden bilim insanlarının yaptığı son araştırmalar,³³¹ okyanus su sütunlarında yüzeyde görünmeyen termal anomalilerin varlığını doğrulamaktadır. Araştırma, deniz sıcak dalgalarının üçte birinin okyanus yüzeyinde hiç görülmediğini ve yaklaşık yarısının yaşam döngüsünün hiçbir aşamasında ortaya çıkmadığını göstermiştir.

Okyanusların ısınması nedeniyle, bu yüzey altı deniz sıcak dalgalarının yıllık sayısı son otuz yılda önemli ölçüde artmıştır. Deniz sıcak dalgalarının önemli bir kısmının okyanus yüzeyinde gözlemlenmemesi, bunların atmosferdeki ısıdan kaynaklanamayacağını açıkça göstermektedir.

³²⁹Johnson, Gregory C. ve diğerleri. "Argo-İki On Yıl: Küresel Oşinografi, Devrim". Annual Review of Marine Science, cilt 14, 2022, s. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰Wong, A. P. S. ve diğerleri. Argo Verileri 1999–2019: Küresel Profillemeye Şamandıralarından İki Milyon Sıcaklık-Tuzluluk Profili ve Yeraltı Hızı Gözlemleri. Front. Mar. Sci. 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Küresel okyanus yüzeyinin altında gizlenen sık deniz sıcak dalgaları. Nature Geoscience, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Okyanus Tabanındaki Isı Kaynaklarının İncelenmesi

Okyanus tabanındaki sıcaklıkların araştırılması ve sürekli izlenmesi, günümüzde hala son derece nadir ve sınırlıdır. Uzun süredir bilim, bu kadar derinlerdeki değişiklikleri izlemeyi öncelikli bir konu olarak görmemiştir. ARGO şamandıra ağı gibi modern izleme sistemleri, şu anda okyanus yüzeyinin yalnızca yaklaşık %0,03'ünden veri toplamaktadır ve şamandıraların çoğu, ortalama okyanus derinliğinin sadece yarısına kadar inebilmekte ve deniz tabanına ulaşmamaktadır.³³²

Bugüne kadar, insanlık okyanus tabanının sadece yaklaşık %3-3,5'ini keşfetmiştir.³³³ Bunun birkaç önemli nedeni vardır. Öncelikle, dünya okyanuslarının çoğu 3.000 ila 6.000 metre derinlikte bulunmaktadır. 6.000 metreye kadar derinliklerdeki muazzam basınca dayanabilecek derin deniz araçlarının geliştirilmesi, önemli mali ve teknolojik kaynaklar gerektirir.

İkincisi, keşif seferleri son derece karmaşık ve pahalıdır; tarih boyunca bu amaçla sadece sekiz adet özel araç inşa edilmiştir.

Bu nedenle, bazı açılardan, dünya okyanuslarının en uzak bölgelerinden daha fazla uzayı incelemiş durumdayız.

Aynı zamanda, okyanus tabanındaki jeolojik süreçlerin iklim değişikliğinde ve okyanusun ısı dengesinin oluşmasında önemli bir rol oynayabileceği giderek daha açık hale gelmektedir. Okyanus tabanı, volkanlar, fay hatları ve hidrotermal bacalar gibi milyonlarca benzersiz jeolojik özelliğe ev sahipliği yapmaktadır ve bu özellikler muazzam miktarda enerji salmaktadır. Ancak, erişilemez olmaları ve sınırlı izleme kapsamı nedeniyle, bunların potansiyel etkisinin tam boyutu bilim tarafından büyük ölçüde bilinmemektedir.

Bununla birlikte, okyanus tabanı üzerine araştırmalar devam etmekte ve bir dizi çalışma, okyanus suyunun okyanus tabanından kaynaklanan yerel ısınmaya işaret etmektedir.

Örneğin, **Arjantin Havzasının 4.500 metreden daha derin iki bölümünde**³³⁴, 2009'dan 2019'a kadar on yılda $0,02\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik önemli ısınma eğilimleri gözlemlenmiştir. Okyanus tabanındaki bu kadar büyük bir soğuk su hacmini ısıtmak için muazzam miktarda enerji gereklidir.

Batı Antarktika kıyılarının hemen açıklarında, Weddell Denizi'nin derin sularında anormal ısınma³³⁵ yaşanmaktadır. Suyun üst 700 metrelik kısmında ısınma çok az veya hiç görülmezken, daha derin bölgelerde sürekli bir sıcaklık artışı gözlemlenmektedir. Weddell Denizi, bir tarafta Batı Antarktika Rift'i, diğer tarafta Güney Sandwich Adaları'nın denizaltı volkanik sırtıyla çevrilidir.

³³²Argo Programı. 'Misyona'. (tarih belirtilmemiş) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

³³³Bell, Katherine L. C. ve diğerleri. "Ne Kadar Az Gördük: Derin Deniz Tabanının Görsel Kapsam Tahmini." Science Advances, cilt 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Arjantin'in Kuzeybatı Havzasındaki Dört Bölgede Gözlemlenen Okyanus Tabanı Sıcaklık Değişkenliği: 2009-2019 Yılları Arasında Saatlik ve Yıllık Değişkenlikler Arasında On Yıllık Derin/Abisal Isınma Kanıtları. Geophysical Research Letters 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

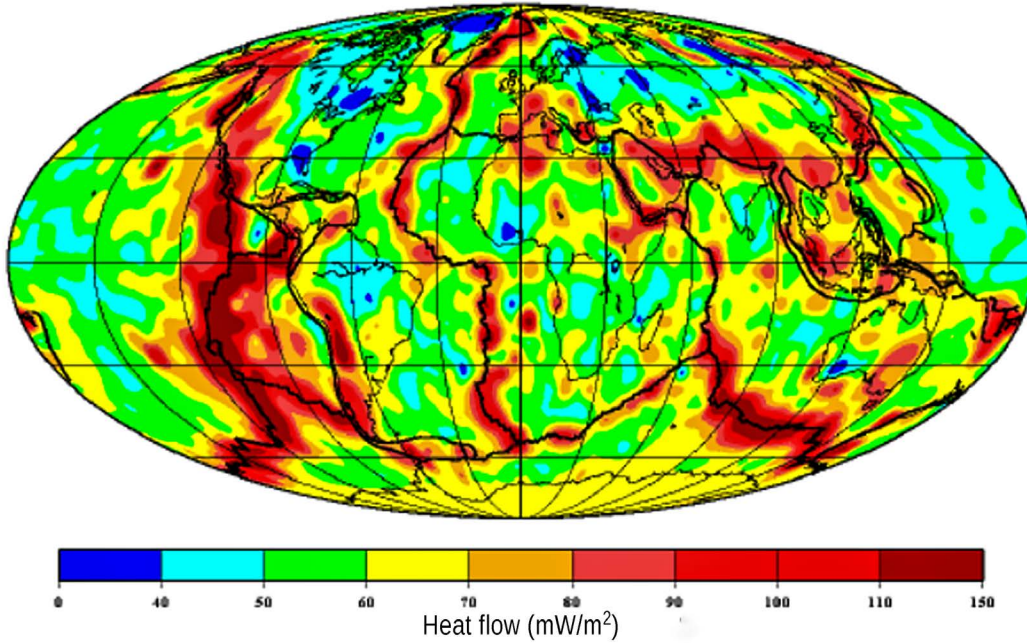
³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Antarktika'nın Derin Weddell Denizi'nde çok yıllık ısınma ve yoğunluk kaybı. Journal of Climate 33, 9863-9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Jeotermal Isı Akışı, Tektonik Aktivite ve Deniz Tabanı Volkanizmasının Rolü

Atmosferik etkinin minimum düzeyde olduğu derin su ısınma anomalileri göz önüne alındığında, Dünya'nın içinden gelen jeotermal ısı akışını ek ısı kaynağı olarak değerlendirmek mantıklı görünmektedir. Geleneksel olarak, iklim modelleri yeraltından gelen jeotermal ısı akışını sabit olarak, yaklaşık $0,09 \text{ W/m}^2$ (veya 90 mW/m^2)³³⁶ olarak ele alır; bu değer, güneş radyasyonundan birkaç kat daha düşüktür.^{337, 338}

Ancak, giderek artan bilimsel kanıtlar, bu hafife alınan ısı kaynağının önemine işaret etmektedir. Büyük ölçekli jeotermal çalışmalar, okyanus tabanından çıkan ısı akışının miktarının okyanus kabuğunun yaşına bağlı olduğunu göstermiştir: en yüksek değerler genç deniz tabanı yayılma bölgelerinde, en düşük değerler ise eski okyanus havzalarında görülmektedir³³⁹ (Şekil 130).

Bu yerel anomaliler, suyun dikey sıcaklık yapısını etkileyebilir, termoklini zayıflatabilir ve su kütlelerinin karışmasını teşvik edebilir, bu da dolaşımı, biyolojik üretkenliği ve hatta kutup bölgelerindeki buzulların istikrarını etkileyebilir.



Şekil 130: Gözlem verilerine dayalı, dijital haritalardan elde edilen tahminler ve yaş ile deneysel korelasyonla desteklenen ısı akışının küresel gösterimi.

Çizim şuradan uyarlanmıştır: Vieira, F., & Hamza, V. M. Küresel ısı akışı: Dijital haritalar ve GIS teknikleri kullanılarak yapılan yeni tahminler. Uluslararası Karasal Isı Akışı ve Uygulamalı Jeotermik Dergisi. 1, 6–13 (2018).

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Dünya'nın içinden gelen ısı akışı: Küresel veri setinin analizi. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993).

<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. Toplam Güneş Işınımının Yeni, Daha Düşük Değeri: Kanıtlar ve İklim Önemi. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011).

<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

³³⁸Dünya Enerji Konseyi. Dünya Enerji Kaynakları: Güneş 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D. & Polyak, B. G. Termal alanda zıt jeodinamik ortamların yansıması. Georesursy (2), 24–43 (2014).

Jeotermal Isı Akısı — Birim zamanda, yüzeyin birim alanı üzerinden Dünya'nın içinden salınan termal ısı miktarı, milivat/metrekare (mW/m^2) cinsinden ölçülür.

Kıtasal alanlarda ortalama jeotermal ısı akısı yaklaşık $40\text{--}60 \text{ mW}/\text{m}^2$ iken, okyanus tabanında yaklaşık $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ 'dir, ancak bazı bölgelerde bu değerlerin birkaç katı değerler görülmektedir. En yüksek ısı akısı seviyeleri, akışın 200 ila $1.000 \text{ mW}/\text{m}^2$ 'yi aşabileceği tektonik ve volkanik olarak aktif bölgelerde (örneğin okyanus ortası sırtları ve aktif rift bölgeleri) kaydedilmektedir.³⁴⁰

Sıcak sıvıların doğrudan deniz tabanına boşaldığı ve su sıcaklıklarının $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaştığı hidrotermal bacalar alanında olağanüstü yüksek ısı akışı gözlemlenir. Bu sistemler, benzersiz ekosistemler oluşturur ve dip sularının termal koşullarını önemli ölçüde etkileyen yerel ısı akışı anomalileri oluşturur.

Okyanus tabanında yüksek jeotermal ısı akışının en kapsamlı şekilde incelenen alanları, tektonik plakaların birbirinden uzaklaştığı ve yeni okyanus kabuğunun aktif olarak oluştuğu bölgeler olan okyanus ortası sırtlarıdır. Bu küresel su altı sırt sistemi, yaklaşık 60.000 kilometre uzunluğunda³⁴¹ ve bir beyzbol topunun dikişleri gibi gezegeni çevrelemektedir. Okyanus ortası sırtları, hidrotermal bacalar, denizaltı volkanları ve aktif fay hatlarının yüksek konsantrasyonu ile karakterizedir ve bunlar, Dünya'nın mantosundan önemli miktarda ısı enerjisinin okyanusa girmesini sağlar.³⁴²

Bu bölgelerde jeotermal ısı akışı, deniz tabanının geri kalan kısmının ortalamasından 10 ila 100 kat daha yüksektir,³³² bu da okyanus ortası sırtlarını Dünya'nın iç kısmı ile Dünya Okyanusu arasındaki ısı değişimi için kritik bölgeler haline getirir.

Maryland Üniversitesi'nden Profesör Arthur Viterito, 1995'ten bu yana okyanus ortası sırtları boyunca deprem aktivitesinde bir artış olduğunu belgelemiştir (Şekil 131).³⁴³ $0,7$ 'lik bir korelasyon katsayısı ile bu artış, küresel sıcaklık artışıyla uyumludur ve sıcaklık artışları sismik aktivitedeki artışın yaklaşık iki yıl gerisindedir. Sismik aktivitedeki bu artış, yeni okyanus kabuğu oluşturan magmanın yukarı doğru hareketiyle ilişkilidir.

³⁴⁰Polyak B. G. ve Khutorskoy M. D. (2018). Yeraltından gelen ısı akışı — derin süreçlerin göstergesi. *Jeo kaynaklar*, 20(4), Bölüm 2, 366–376.

<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

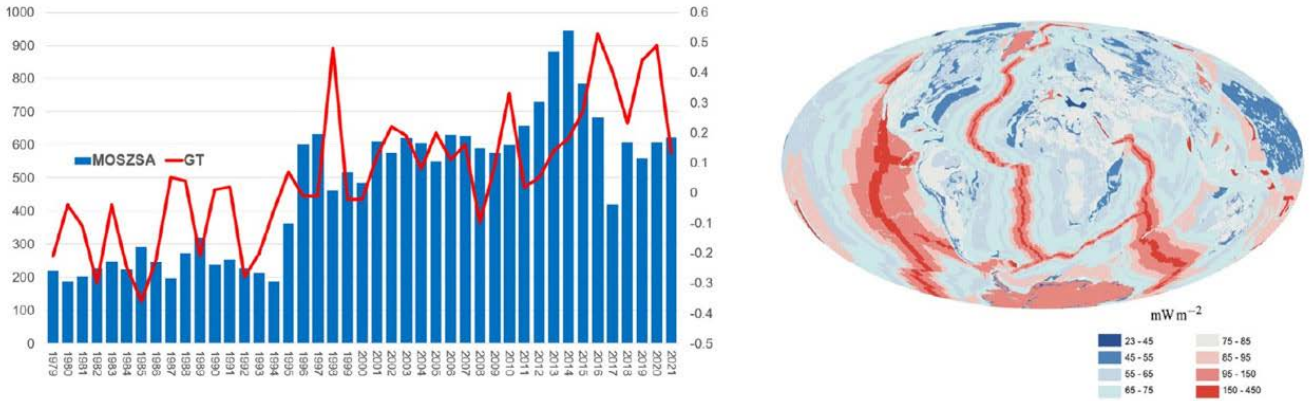
³⁴¹LaFemina, P. C. Levha Tektoniği ve Volkanizma. *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. Hidrotermal Vent Alanlarının Küresel Dağılımı. *Okyanus Ortası Sırtları: Litosfer ve Okyanuslar Arasındaki Hidrotermal Etkileşimler* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³³²Argo Programı. 'Misyon'. (tarih belirtilmemiş) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

³⁴³Viterito, A. 1995: Son Jeofizik Tarihinde Önemli Bir Dönüm Noktası. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Okyanus ortası sırtları boyunca okyanus tabanındaki deprem sayısında artış



Şekil 131:

Okyanus tabanındaki depremlerin (büyüklük 4,0–6,0) ve küresel atmosfer sıcaklıklarının eşzamanlı artışı

Kaynak: Viterito, A. (2022). "1995: Yakın Jeofizik Tarihinde Önemli Bir Dönüm Noktası." Uluslararası Çevre Bilimleri ve Doğal Kaynaklar Dergisi, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Yükselen magmanın hacmi hakkında doğrudan ölçümler bulunmamakla birlikte, küresel sismik izleme ağı, bilim insanlarının sismik verilerin miktarına bakılmaksızın artan sismik olayların sayısını ve şiddetini analiz ederek bu süreçlerin ölçeğini dolaylı olarak tahmin etmelerine olanak tanır. Viterito'nun hipotezine göre, okyanus ortası sırtları boyunca sismik ve volkanik aktivite, hidrotermal bacaların artmasına ve okyanus suyunun ısınmasına yol açar, bu da sera gazı emisyonlarına ve atmosferin ısınmasına katkıda bulunur. Bu şekilde Viterito, okyanusların jeolojik süreçlerin bir sonucu olarak sadece yukarıdan değil, aşağıdan da ısındığını göstermektedir.

Denizaltı volkanizması da okyanus tabanının termal rejiminin şekillenmesinde önemli bir rol oynayabilir. Mevcut veriler, dünyadaki tüm volkanik patlamaların yaklaşık %75'inin su altında meydana geldiğini göstermektedir.³⁴⁴ Daha önce, su altı patlamalarının lavın yumuşak bir şekilde dışarı akmasıyla meydana geldiği ve su sütununun basıncı nedeniyle patlayıcı patlamaların imkansız olduğu düşünülüyordu. Sonuç olarak, denizaltı volkanlarının su sütununu ısıtamayacağı, çünkü ortaya çıkan lavın neredeyse anında katılaşıacağı varsayılıyordu. Ancak, son araştırmalar sualtı volkanlarının patlama mekanizmalarına ilişkin anlayışımızı değiştirdi.

Magma basıncı 10.000 ila 30.000 bar arasında değişirken, okyanusun en derin kısımlarındaki su sütununun basıncı sadece yaklaşık 1.000 bar'dır.

Magma patladığında, suyun anında kaynamasına ve H₂O moleküllerinin parçalanmasına neden olarak, basıncı yüzlerce hatta binlerce bara ulaşan bir gaz-su boşluğu oluşturur.³⁴⁵ Bu, güçlü patlayıcı patlamalara neden olur.

³⁴⁴Crisp, J. A. Magma yerleştirme ve volkanik çıkış oranları. J. Volc. Geotherm. Res. 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Patlayıcı denizaltı patlamaları sırasında dev kabarcıkların oluşturduğu infrasonik sesler. Nat. Geosci. 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Bu patlamalar, tefra ve hidrotermal akıntılarla birlikte gerçekleşir. Hidrotermal akıntılar, hacimleri 40 milyon Olimpik yüzme havuzuna eşdeğer olabilen devasa aşırı ısınmış su fışkırmalarıdır. Bu tür emisyonlar, okyanusun termal dengesini sadece yerel olarak değil, küresel ölçekte de bozabilir.

Leeds Üniversitesi tarafından yapılan araştırmalar, Pasifik Okyanusu tabanında kilometrelerce genişliğinde volkanik tefra alanları olduğunu ortaya çıkardı³⁴⁶ ve bu da güçlü denizaltı patlamalarının varlığına dair güçlü kanıtlar sunuyor. Bu türden tek bir patlama, 1 terawattlık termal enerji açığa çıkarabilir — bu, Amerika Birleşik Devletleri'nin yıllık enerji tüketiminin iki katıdır.



Patlayıcı patlamaların okyanus ısınmasına katkısı, Bavyera'daki Julius-Maximilians Üniversitesi'nden Profesör Bernd Zimanowski tarafından da desteklenmektedir. Profesör Zimanowski şöyle açıklamaktadır:³⁴⁷

"Denizaltı lav patlamalarında, lavın ısısının suya aktarılması oldukça uzun zaman alır. Ancak patlayıcı patlamalarda magma küçük parçacıklara ayrılır. Bu, okyanuslardaki termal denge akımlarını yerel veya hatta küresel olarak bozacak kadar güçlü ısı dalgaları oluşturabilir."³⁴⁸

Mevcut tahminlere göre, hidrotermal olarak aktif denizaltı oluşumlarının sayısı 100.000 ila 10 milyon^{349, 350} arasında değişmektedir — bu da hidrotermal aktivitenin okyanusların ısı dengesine katkısının önemli ölçüde hafife alınmış olabileceğini göstermektedir. Patlayıcı magma püskürmeleri, yerel ölçekte okyanus ısı akımlarını bozabilecek güçlü termal dürtüler oluşturur. Ancak, okyanusun muazzam büyüklüğü göz önüne alındığında, bu kadar şiddetli sualtı püskürmeleri bile onu küresel olarak ısıtmaya yetmez. Volkanlar eşit olarak dağılmamıştır, püskürmeleri dönemsel olup, salınan toplam enerji tüm okyanusu ısıtmaya yetmez. Yine de, belirli bölgelerde yerel ısı dalgalarını tetiklemek için yeterli olabilir.

Bu tür yerel termal anomalilerin spesifik bir örneği, deniz sıcak dalgaları olarak bilinen fenomendir — okyanus sularının uzun süre anormal derecede sıcak kaldığı alanlar. Bu olayların başka bir adı da bloblar: sıcaklığı önemli ölçüde yükselmiş devasa yüzey suyu alanları. 1995'ten bu yana blobların sayısı keskin bir artış göstermiştir³⁵¹ ve Yeni Zelanda, güneybatı Afrika ve güney Hint Okyanusu kıyıları dahil olmak üzere dünya okyanuslarının çeşitli bölgelerinde daha sık görülmektedir.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Derin deniz patlamaları sırasında hızlı ısı tahliyesi mega gaz sütunları oluşturur ve tefra yayılır. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürrig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Derin deniz patlamaları, indüklenmiş yakıt-soğutucu patlamalarıyla güçlendi. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

³⁴⁸Würzburg Üniversitesi. Derin Denizlerde Volkanlar Nasıl Patlar? (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

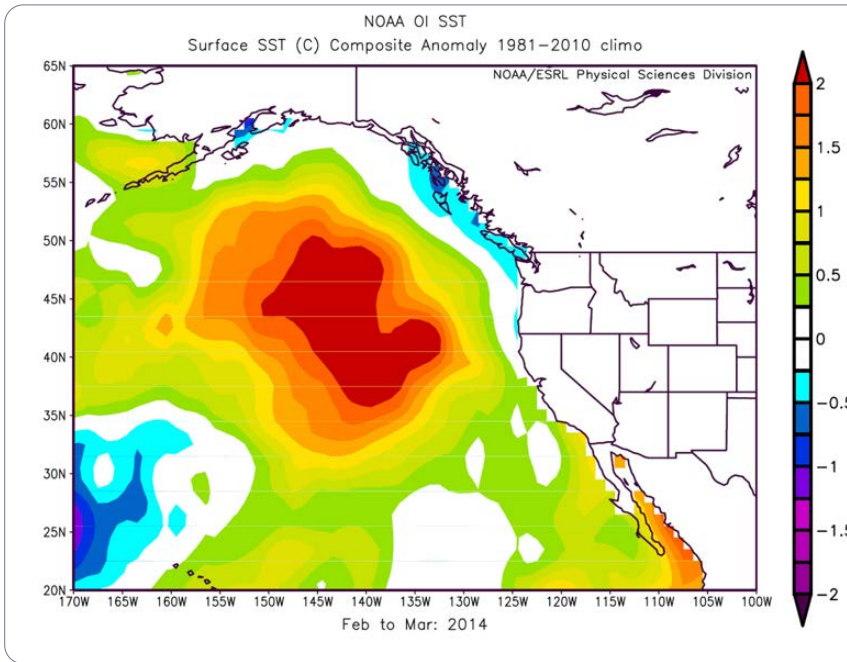
³⁴⁹Baker, E. T. et al. Kaç tane bacalar alanı var? Hidrotermal deşarj konumlarının hassas haritalandırılmasıyla okyanus sırtlarındaki bacalar alanı popülasyonlarının yeni tahminleri. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Deniz tabanında şaşırtıcı sayıda derin deniz ventleri bulunuyor. (2016) <https://www.snextplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

³⁵¹Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. İnsan kaynaklı küresel ısınmaya atfedilebilen yüksek etkili deniz sıcak dalgaları. Science 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

2013 yılında Alaska Körfezi'nde oluşan ve hızla Pasifik Okyanusu'na yayılan en bilinen ve en geniş bloblardan biri. 4.000.000 kilometrekareden fazla bir alanı kapladı – Hindistan'ın tüm yüzölçümünden daha büyük bir alan – ve bazı bölgelerde deniz yüzeyi sıcaklıkları ortalama 5–6 santigrat derece aştı (Şekil 132). Blob, üç yıl boyunca Alaska'dan Meksika'ya kadar okyanusu boyunca sürüklendi ve 2016 yılına kadar devam etti. Bu fenomen, bölgenin deniz ekosistemi ve iklimi üzerinde önemli olumsuz etkiler yarattı.

Blobun oluşumunun en olası nedeni, Alaska kıyılarındaki yoğun volkanik faaliyet ve Cobb magma bulutunun³⁵² varlığıydı. Bu bulut, derin okyanus sularını ısıttı ve daha sonra büyük hacimlerde yüzeye çıktı.



Şekil 132: Mart 2015 itibarıyla deniz yüzeyi sıcaklığı (SST) anomalisinin ABD'nin batı kıyıları boyunca nasıl göç ettiği ve yayıldığı gösteren harita. (Görüntü, NOAA/ESRL Fizik Bilimleri Bölümü, Boulder, Colorado'nun izniyle kullanılmıştır.)

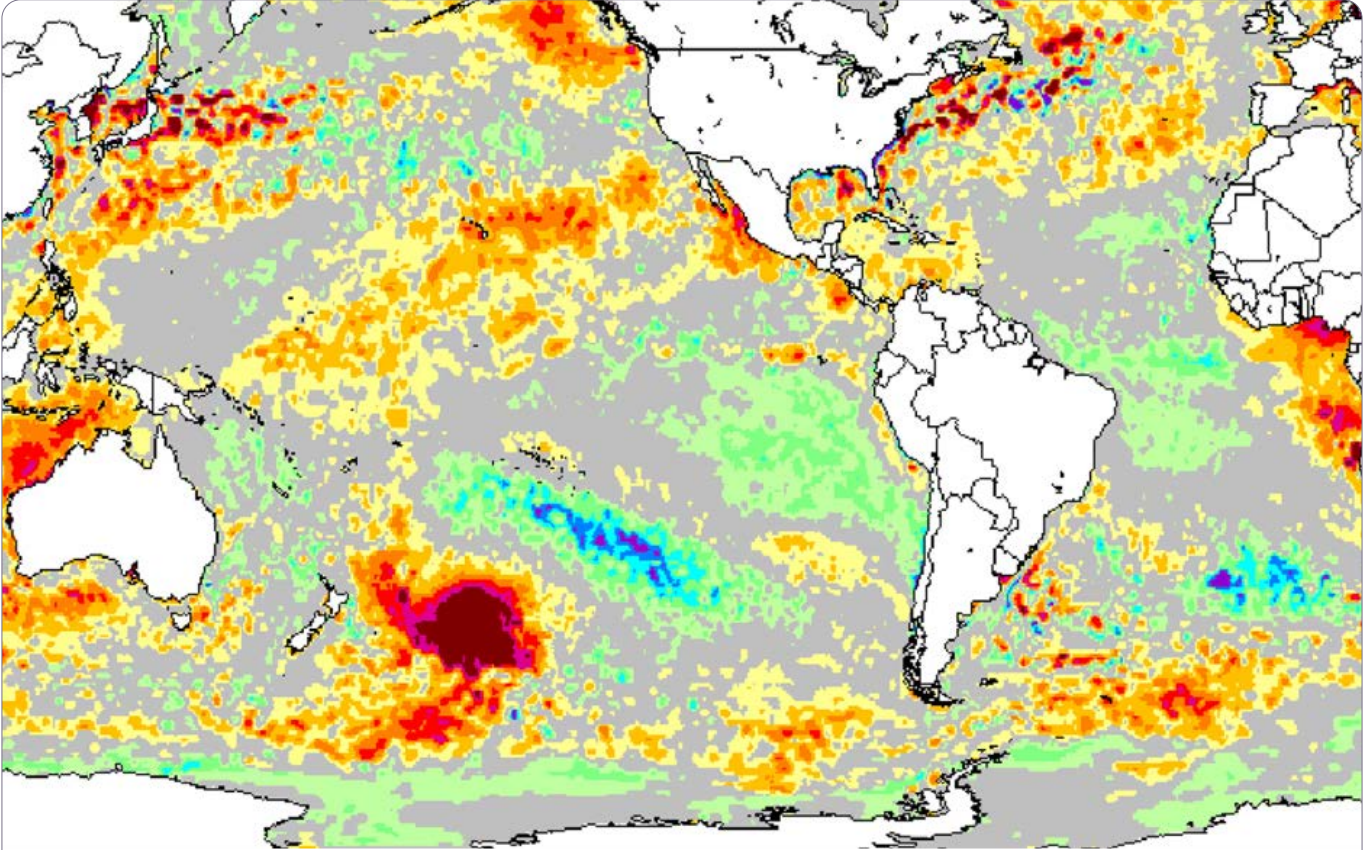
2019 yılının Aralık ayında, Yeni Zelanda'nın doğusunda, Güney Pasifik Okyanusu'nda bir sıcaklık dalgası ortaya çıktı ve bazı günler sıcaklık ortalamasının 6 °C üzerine çıktı. Bu dalga, bir milyon kilometrekareden fazla bir alanı kapladı; bu, Teksas'ın 1,5 katı veya Yeni Zelanda'nın dört katı büyüklüğündedir (Şekil 133). O zamanlar, bu olay dünya okyanuslarında görülen en büyük sıcaklık dalgası olarak kaydedildi. Ayrıca, bu bölgede kaydedilen en büyük ikinci olaydı.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. Cobb sıcak noktası: HIMU-DMM karışımı ve erimesi, giderek incelen litosferik kapak tarafından kontrol edilmektedir. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

Wellington Victoria Üniversitesi Coğrafya, Çevre ve Yer Bilimleri Fakültesi profesörü James Renwick,

*"Bu, şu anda gezegendeki en büyük ortalama sıcaklık artış bölgesi. Normalde buradaki sıcaklıklar yaklaşık 15 °C iken, şu anda yaklaşık 20 °C'dir."*³⁵³



Şekil 133:

25 Aralık 2019 tarihinde Güney Pasifik Okyanusu'ndaki deniz yüzeyi sıcaklığı anomalisinin gösterimi

Kaynak: The Guardian. Sıcak leke: Yeni Zelanda kıyılarındaki geniş sıcak su alanı bilim insanlarını şaşırtıyor. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (erişim tarihi: 11 Mayıs 2025)

Bu blobun oluşumunun muhtemel nedeni, Yeni Zelanda kıyılarında bulunan eski bir volkanik platonun faaliyetleridir.³⁵⁴

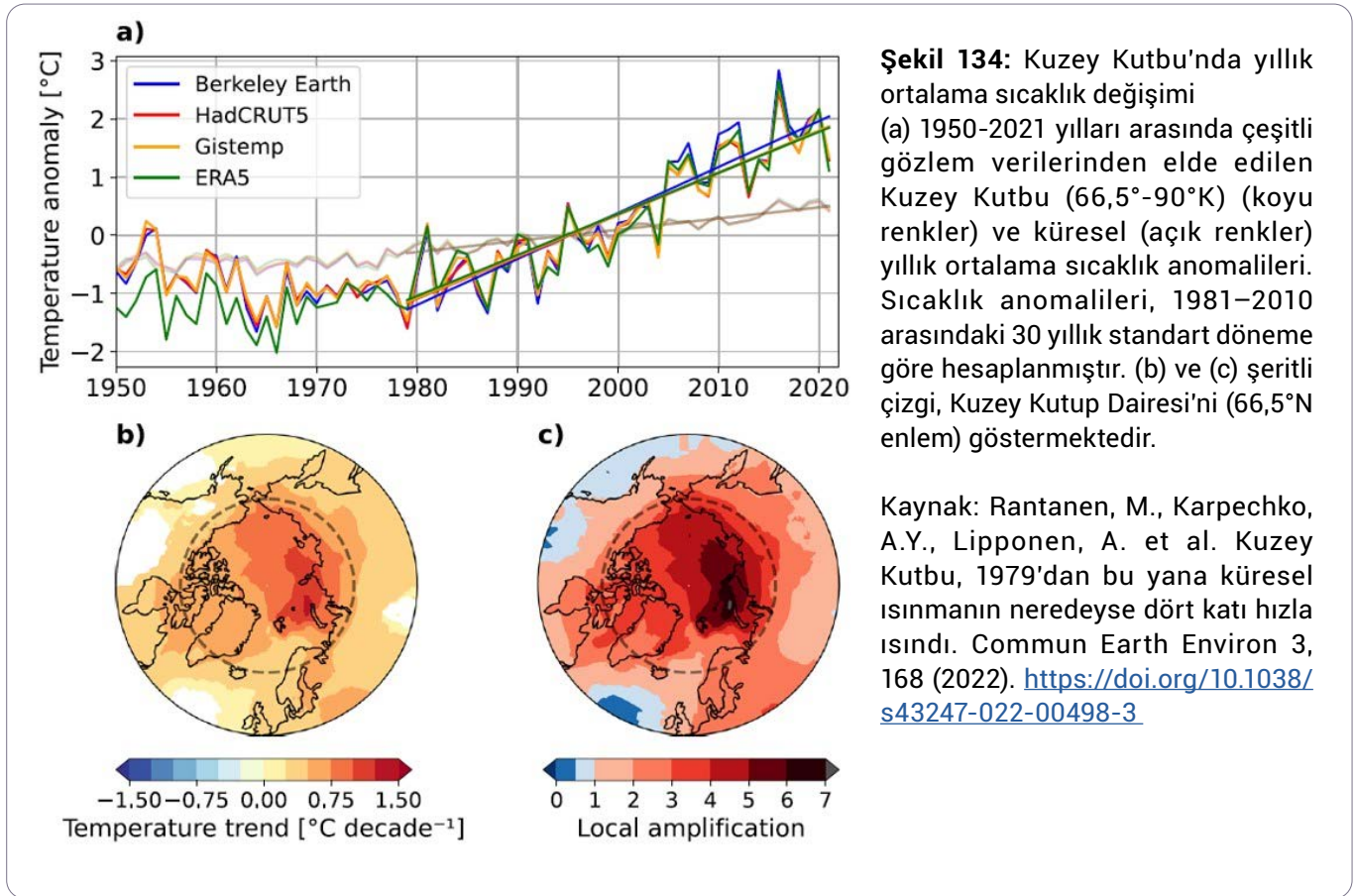
³⁵³The Guardian. Sıcak leke: Yeni Zelanda kıyılarındaki geniş sıcak su alanı bilim insanlarını şaşırtıyor. (2019)

<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Volkanik kayalar açısından zengin üst kabuk, sık megathrust ve yavaş kayma için sıvı sağlar. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023).

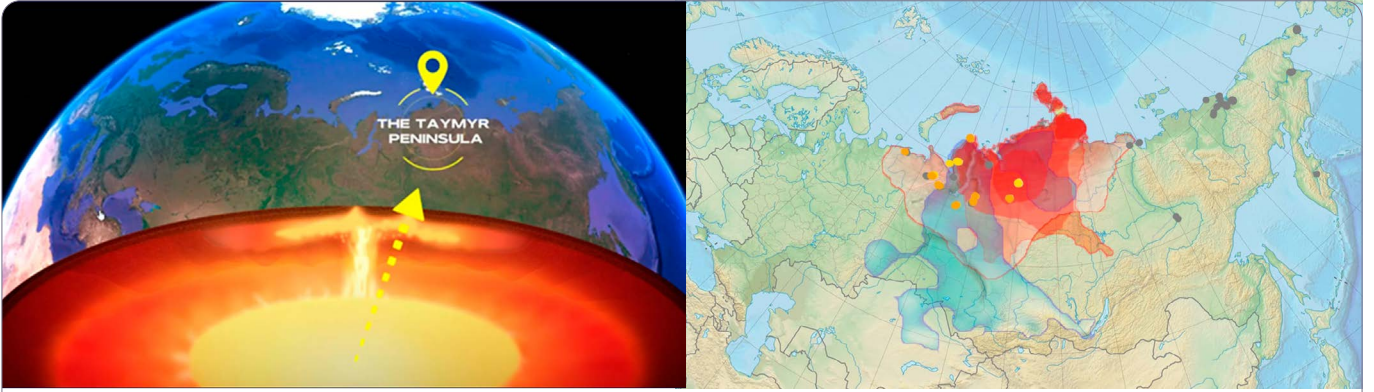
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Magmatik süreçlerden kaynaklanan jeotermal ısının okyanusların ısınmasına nasıl katkıda bulunduğunun bir başka dikkat çekici örneği, Sibirya kıyıları boyunca Arktik denizlerin anormal ısınmasıdır. 2022 yılında yapılan araştırmaya göre, Sibirya Arktik bölgesi küresel ortalamadan neredeyse dört kat daha hızlı ısınmaktadır. Bu oran, iklim modellerinde daha önce hesaplanan oranlardan önemli ölçüde yüksektir ve bilim insanları için büyük bir sürpriz olmuştur (Şekil 134).³⁵⁵



Dünyanın bu özel bölgesinde, Taymyr Yarımadası yakınlarında, 250 milyon yıl önce Sibirya Kapanlarının patladığı aynı bölgede hızla yükselen Sibirya magmatik gaz sütununun harekete geçtiğine tanık oluyoruz. Mevcut kanıtlar, gaz sütununun başının Doğu Sibirya Kratonunu aktif olarak aşındırdığı ve magmanın tüm genişliği altında yayıldığına işaret ediyor (Şekil 135). Ön tahminlere göre, Sibirya'nın altındaki magma yayılma alanı 2.500 ila 3.000 kilometre çapında olabilir; bu, Avustralya'nın büyüklüğüne eşdeğer bir alandır.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. Kuzey Kutbu, 1979'dan bu yana küresel ısınmanın neredeyse dört katı hızla ısındı. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>



Şekil 135: Çeşitli bilimsel araştırmaların sonuçlarına göre gaz sütununun konumunun yerelleştirilmesi.

Arktik denizlerinde bu kadar yoğun bir ısınmanın özellikle Taymyr Yarımadası çevresindeki bölgede meydana geldiğine dikkat etmek önemlidir. Bu anomali, özellikle Sibirya'nın okyanus bölgesinde, ısıyı daha verimli ileten daha ince okyanus kabuğu ve atmosfere kıyasla suyun daha yüksek ısı kapasitesi ile açıklanabilir. Bu nedenle, okyanus suyu, yükselen magma gaz sütunundan gelen ısıyı yoğun bir şekilde emer ve tutar, bu gaz sütunu kıyı şeridinden nispeten uzak bir mesafede kıta kabuğunun altında yükseliyor olsa bile.



Sibirya magma gaz sütunu, iklim sistemi üzerindeki etkisi, ilgili riskler ve olası çözümler hakkında daha ayrıntılı bir analiz için raporu inceleyin:

**“SİBİRYA'DA MAGMA GAZ SÜTUNU
PATLAMASI TEHDİDİ VE BU SORUNUN
ÇÖZÜMÜ İÇİN STRATEJİLER”**

Birleşik kanıtlar, okyanus tabanındaki jeolojik süreçlerin küresel ısınmada önemli bir faktör olduğunu güçlü bir şekilde göstermektedir. Deniz tabanındaki sismik ve volkanik faaliyetlerin artışı, küresel sıcaklıkların artmasıyla bağlantılıdır ve bu da olası bir neden-sonuç ilişkisini akla getirmektedir. Denizaltı patlamaları, özellikle patlayıcı nitelikte olanlar, hem yerel hem de küresel ısı dengesini bozan güçlü termal dalgalanmalar oluşturabilir.

Hidrotermal sistemler ve volkanik faaliyetler, deniz ekosistemleri ve iklim üzerinde belirgin bir etkiye sahip olan “bloblar” gibi büyük ölçekli anomaliler üretirken, magmatik süreçler Kuzey Kutbu denizlerinin anormal ısınmasından sorumludur.

Böylece, okyanus sadece atmosferin etkisiyle üstten değil, aynı zamanda Dünya'nın iç kısmındaki dinamik süreçler nedeniyle alttan da ısınmaktadır. Bu durum, mevcut iklim modellerinin yeniden değerlendirilmesini ve gezegenin genel ısı dengesinin önemli bir bileşeni olarak su altı jeolojik faaliyetlerinin daha derinlemesine incelenmesini gerektirmektedir.

Ancak, çok önemli bir soru vardır: Neden şu anda Dünya'da magmatik ve tektonik faaliyetlerde artış var?

Mevcut Dönemde Dünya'daki İklim Değişikliğinin Jeodinamik Modelinin Kısa Açıklaması

Son 30 yılda, Dünya sadece iklim değişikliğinde değil, gezegenin tüm katmanlarında ve jeofiziksel parametrelerinde de benzeri görülmemiş ve eşzamanlı bir artış yaşadı. Bu değişiklikler katlanarak artıyor. Bilimsel verilerin kapsamlı bir analizi, bunun temel nedeninin 12.000 yılda bir tekrarlanan astronomik döngülerde yattığını gösteriyor.

Kozmik etki hipotezi, Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenlerde ve uydularda eşzamanlı olarak meydana gelen benzer değişikliklerle desteklenmektedir. Örneğin, Uranüs,³⁵⁶ Jüpiter ve³⁵⁷ Venüs'te rüzgar hızları artmakta ve kasırga bölgeleri genişlemektedir.³⁵⁸ Mars'ta kutup buz örtüsü eriyor,³⁵⁹ Venüs³⁶⁰ ve Mars'ta volkanik aktivite artıyor.³⁶¹ Ayrıca, jeolojik olarak “ölü” bir gezegen olan Mars'ta sismik aktivite yoğunlaşıyor³⁶² ve bu da anormal iç süreçlere işaret ediyor.

Dünya'nın jeosisteminde kritik değişiklikler 1995 civarında ortaya çıkmaya başladı ve gezegenin dönüşünün keskin bir şekilde hızlanması, Dünya'nın ekseninde bir kayma ve Kuzey Manyetik Kutup'un hızlı bir şekilde kaymaya başlaması gibi önemli jeofiziksel anomalilerle kendini gösterdi (Şekil 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. 2014 yılında Uranüs'te rekor kıran fırtına aktivitesi. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. HST/WFC3 Haritalarından Jüpiter'in Büyük Kırmızı Lekesindeki Yatay Rüzgarların Evrimi. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

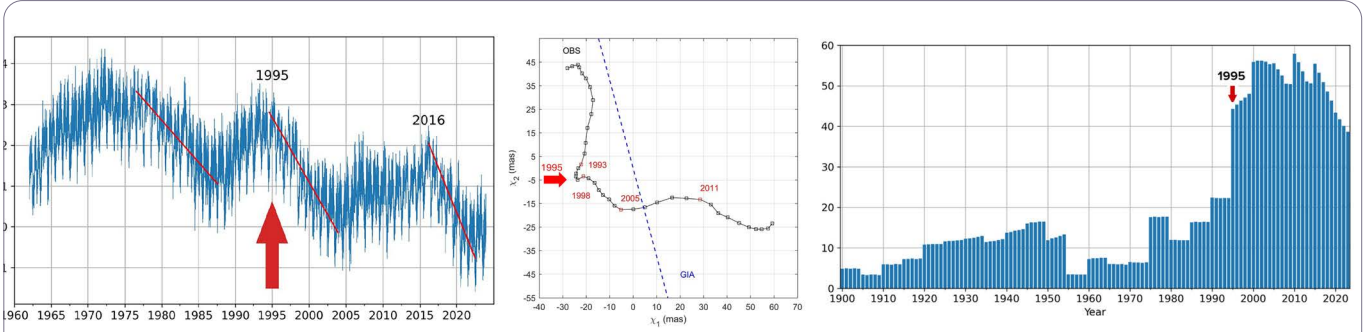
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Venus Express İzleme Kamerası görüntülerinden bulut seviyesindeki rüzgarlar. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Mars'ta Su, Bir Tutam Tuzla: Günümüzde Güney Kutbu'nda Buzun Bazal Erimesi için Yerel Isı Anomalileri Gerekli. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. Venüs'te HDO ve SO₂ termal haritalama - IV. SO₂ bulutlarının istatistiksel analizi. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Mars'taki Elysium Planitia'nın altında aktif bir manto bulutu olduğuna dair jeofizik kanıtlar. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. InSight tarafından gözlemlenen en büyük Mars depreminin tektonik kökeni. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Paris Gözlemevi Dünya Yönelim Merkezi tarafından kaydedilen gezegenin dönüşünde ani ve keskin hızlanma

Veri kaynağı: IERS Paris Gözlemevi Dünya Yönelim Merkezi. Günün uzunluğu – Dünya yönelim parametreleri. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Dünya'nın dönme ekseninde anormal kaymalar: kutup sapmasının yönünde keskin bir değişiklik ve hızında 17 kat artış.

Kaynak: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. 1990'larda Kutup Kayması Karasal Su Depolama Değişiklikleriyle Açıklanıyor. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Kuzey Manyetik Kutupun Hareketi: Daha önce yılda 10 km hızla kayan Kuzey Manyetik Kutup, aniden hızını artırarak yılda 55 km'ye çıktı ve rotasını Sibirya'daki Taymur Yarımadası'na doğru değiştirdi.

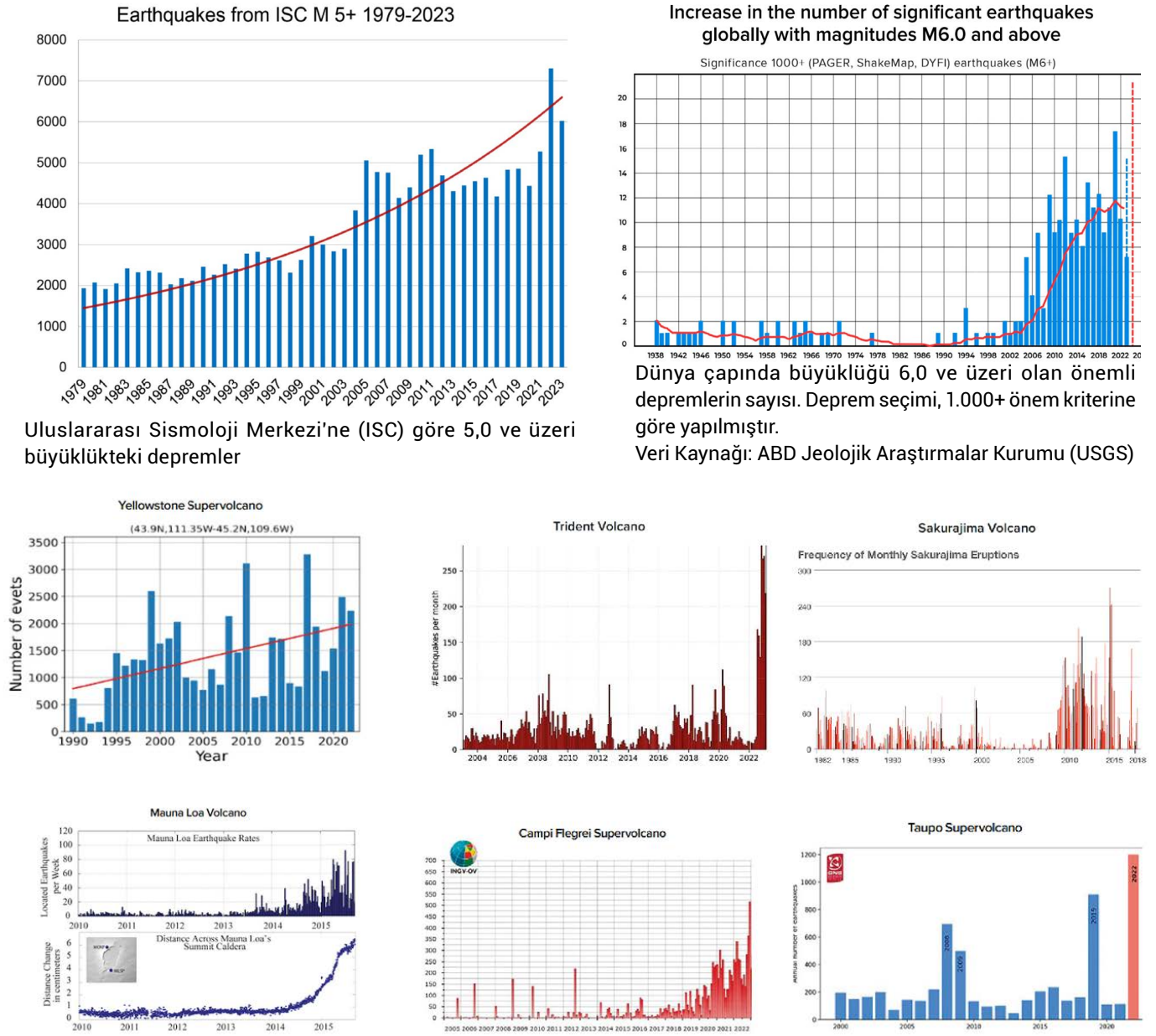
Veri kaynağı: NOAA'nın Kuzey Manyetik Kutbu'nun konumu hakkındaki verileri <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Şekil 136: 1995 yılında Dünya'nın jeofiziksel parametrelerindeki değişiklikler

Bu anomaliler, insanlığın tüm medeniyet tarihi boyunca ürettiği enerjinin katrilyonlarca katı enerji gerektiren, Dünya'nın çekirdeğinde meydana gelen derin değişiklikleri işaret etmektedir. Bunun nedeni, Güneş Sistemi'ndeki diğer gezegenlerin çekirdeklerini de etkileyen, Dünya'nın çekirdeğine etki eden dış kozmik etkidir. Bu dış kuvvet, manto erimesini güçlendirerek yüzeye daha yakın bir noktaya yükselmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, bir zincirleme reaksiyon tetiklenir: volkanik ve sismik aktivite yoğunlaşır, Dünya'nın içinden gelen ısı artar ve doğal afetlerin sıklığı dünya çapında artar.

1995 yılından bu yana, depremlerin sıklığı, büyüklüğü ve enerjisi ile karakterize edilen sismik aktivitede belirgin bir artış olmuştur. Bu eğilim, daha önce sismik aktivitenin neredeyse hiç görülmediği bölgeler de dahil olmak üzere, hem karada hem de okyanuslarda gözlemlenmektedir. Tüm bunlar, bu değişikliklerin küresel ölçekte olduğunu göstermektedir. Büyüklüğü 5,0 ve üzeri depremlerin artmasının, sensör ağlarının veya hassasiyetinin artmasıyla ilgili olmadığı, ama Dünya'nın jeodinamik değişikliklerini gerçekten yansıttığına dikkat etmek önemlidir. Uluslararası Sismoloji Merkezi'nin verilerine göre, son 25 yılda bu tür depremlerin sayısı önemli ölçüde artmış ve artmaya devam etmektedir (Şekil 137).

Bundan başka, ABD'deki Yellowstone, İtalya'daki Phlegraean Fields³⁶³ ve Yeni Zelanda'daki Taupō³⁶⁴ gibi süper volkanlar da dahil olmak üzere volkanların yakınında sismik aktivite artmaktadır - ayrıca, önceki 12.000 yıllık döngülerde patlamış diğer volkanlar da bulunmaktadır (Şekil 137).



Şekil 137: Dünya genelinde ve volkanlar ile süper volkanların yakınlarında sismik aktivitede artış

Her yıl artan sayıda gün, volkanik patlamalarla geçmektedir. Fıskıran lavlar genellikle aşırı ısınma ve gezegenin daha derin mantosu katmanlarından kaynaklanan magmaya özgü benzersiz kimyasal bileşim gibi anormal özellikler sergilemektedir.

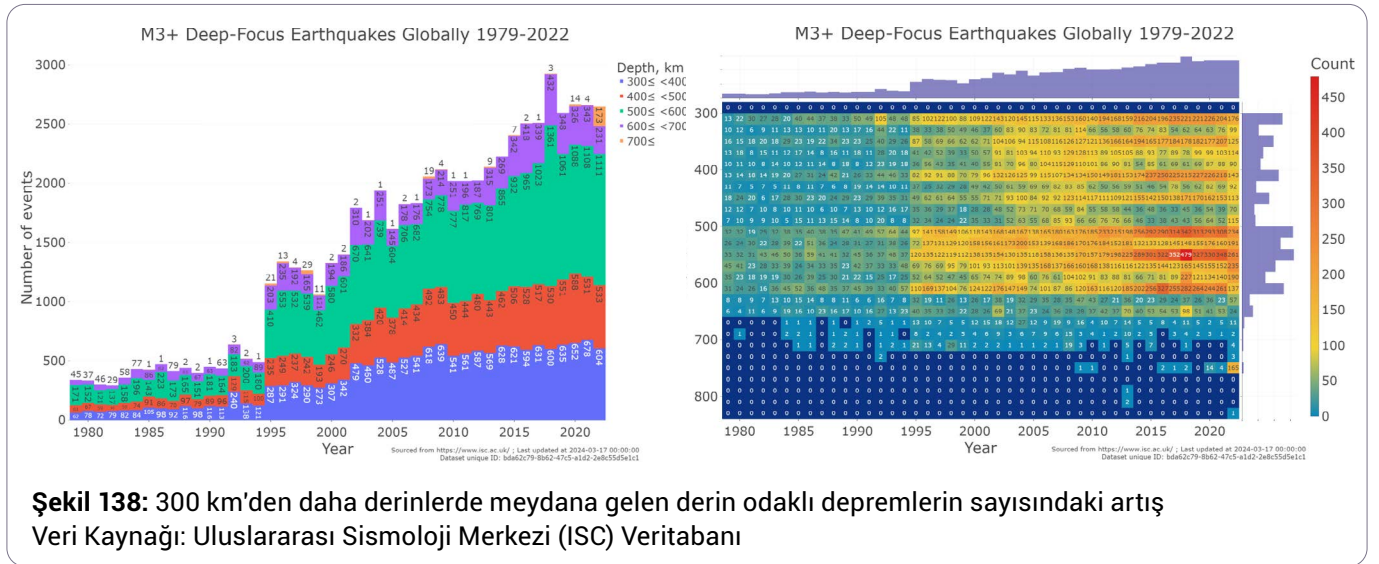
³⁶³Fanpage.it. Campi Flegrei'de Nisan 2023'te 675 deprem: Son 20 yılın en fazla sarsıntısının yaşandığı ay. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (1 Mayıs 2025 tarihinde erişildi).

³⁶⁴GeoNet. Taupō'da devam eden küçük volkanik hareketlerle uyumlu, M5,6 büyüklüğünde şiddetli deprem. Volkanik Alarm Seviyesi 1'de kalmaya devam ediyor. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDQ0LYSgl> (erişim tarihi: 1 Mayıs 2025).

Özellikle endişe verici bir gelişme, 300 kilometreden daha derinlerde, bazen Dünya'nın yüzeyinin 750 kilometre altına kadar uzanan derin odaklı depremlerin sıklığının artmasıdır. Yerkabuğunda meydana gelen tipik depremlerin aksine, bu fenomenler genellikle plastik gibi deforme olan ve kırılmayan mantoda meydana gelir. Bu, bu depremlerin doğasını oldukça sıra dışı kılar.

Bu derin odaklı depremlerin aşırı basınç ve sıcaklık koşullarında meydana geldiği göz önüne alındığında, bunların güçlü manto patlamalarının sonucu olduğu düşünülmektedir. Enerjileri, Dünya'nın mantosunda aynı anda patlayan çok sayıda nükleer bomba ile karşılaştırılabilir. Ek olarak, derin odaklı depremler genellikle Dünya'nın kabuğunda güçlü sismik olayları tetikleyerek yıkıcı etkilerini artırabilir.

1995 yılından bu yana, aynı dönemde başlayan diğer jeodinamik anomalilerle eşzamanlı olarak, bu tür derin depremlerin sayısında keskin bir artış olmuştur (Şekil 138). Manto içi patlamaların sıklığındaki artış, Dünya'nın iç kısmındaki enerji aktivitesinin arttığını ve manto erimesinin hızlandığını göstermektedir. Bu durum, büyük ölçekli volkanik patlamalara yol açabilir.



1995 yılından bu yana, merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle, Dünya'nın mantosundaki erimiş magma yüzeye doğru daha aktif bir şekilde yükselmeye başlamış ve litosferi normalden daha yoğun bir şekilde içten aşındırarak ısıtmaktadır. Magmanın bu yukarı doğru hareketi, Dünya'nın içinden gelen jeotermal ısı akışını artırmakta ve Batı Antarktika, Orta Grönland ve Sibiry'a'daki buzulların altındaki magma gaz sütunlarını harekete geçirmektedir. Sonuç olarak, buzullar ve permafrost tabakası alttan yukarıya doğru hızla erimektedir.^{365, 366, 367}

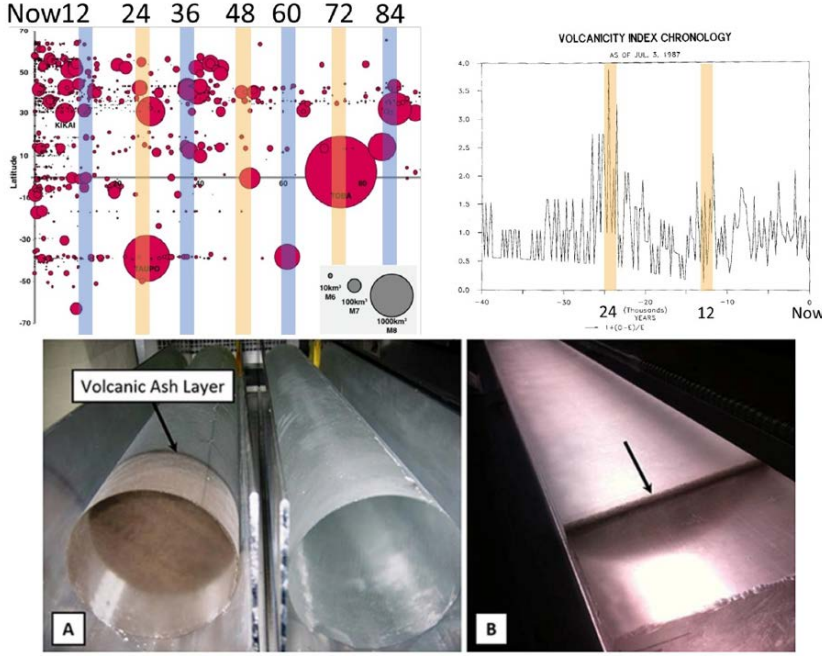
Böylece, okyanusların ısınmasının temel nedenlerinden biri, özellikle kıtasal kabuktan daha ince ve daha hassas olan okyanus kabuğunu alttan ısıtan magmanın yükselmesi olmaktadır.

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. İzlanda sıcak nokta tarihçesi ile açıklanan Grönland buz tabakasının tabanındaki erime. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016).
<https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Buzul altı topografya ve jeotermal ısı akışı: Grönland buz tabakasının drenajı ile olası etkileşimler. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. Batı Antarktika'daki Thwaites Buzulu'nun altında aëromanyetik verilerden çıkarılan yüksek jeotermal ısı akışı. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

Jeolojik tabakalardan ve buz çekirdeklerinden elde edilen tarihsel kayıtlar, Dünya'nın yaklaşık her 12.000 yılda bir benzer felaket döngülerinden geçtiğini göstermektedir. Dahası, her ikinci döngüde, yani yaklaşık her 24.000 yılda bir, bu gezegensel felaketler daha da şiddetli olmuştur (Şekil 139).



Şekil 139: Grafikler, her 12.000 yılda bir meydana gelen felaket niteliğindeki volkanik faaliyetleri ve her 24.000 yılda bir meydana gelen daha şiddetli olayları göstermektedir.

Kaynaklar:

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Karbonat Kaynaklı Volkanik Aktivite: Karbonat Kaynaklı Volkanik Aktivite Kaynakları ve Karbonat Kaynaklı Volkanik Aktivite Kaynakları. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Bryson, R. A.. Milankovitch iklim Zorlamasının Geç Kuaterner Volkanik Modülasyonu. *Teorik ve Uygulamalı Klimatoloji*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Dünya şu anda bu döngülerden birine giriyor. Ancak bu sefer, mikro ve nanoplastiklerle okyanusların insan kaynaklı kirliliği nedeniyle, mantodaki termal dengesizlik yoğunlaştı. Bu durum, derin odaklı depremlerin sayısında artışa, yeni magma odalarının oluşumuna ve gezegenin genel olarak istikrarsızlaşmasına yol açtı. Sonuç olarak, felaketler önceki döngülere göre çok daha hızlı ve şiddetli bir şekilde hızlanıyor.

Aslında, okyanus kirliliği, Dünya'nın bu döngüye dayanamamasının başlıca nedenlerinden biri haline gelmiştir. Mikro ve nanoplastiklerle okyanus kirliliğinin ele alınmasının bu felaketlerin ilerlemesini yavaşlatabileceğini, ama durduramayacağını anlamak önemlidir.



Dünya'nın iç kısmındaki mevcut jeodinamik hareketlilik 12.000 yıllık felaket döngüsü ve bu soruna olası çözümler hakkında daha ayrıntılı bilgi,

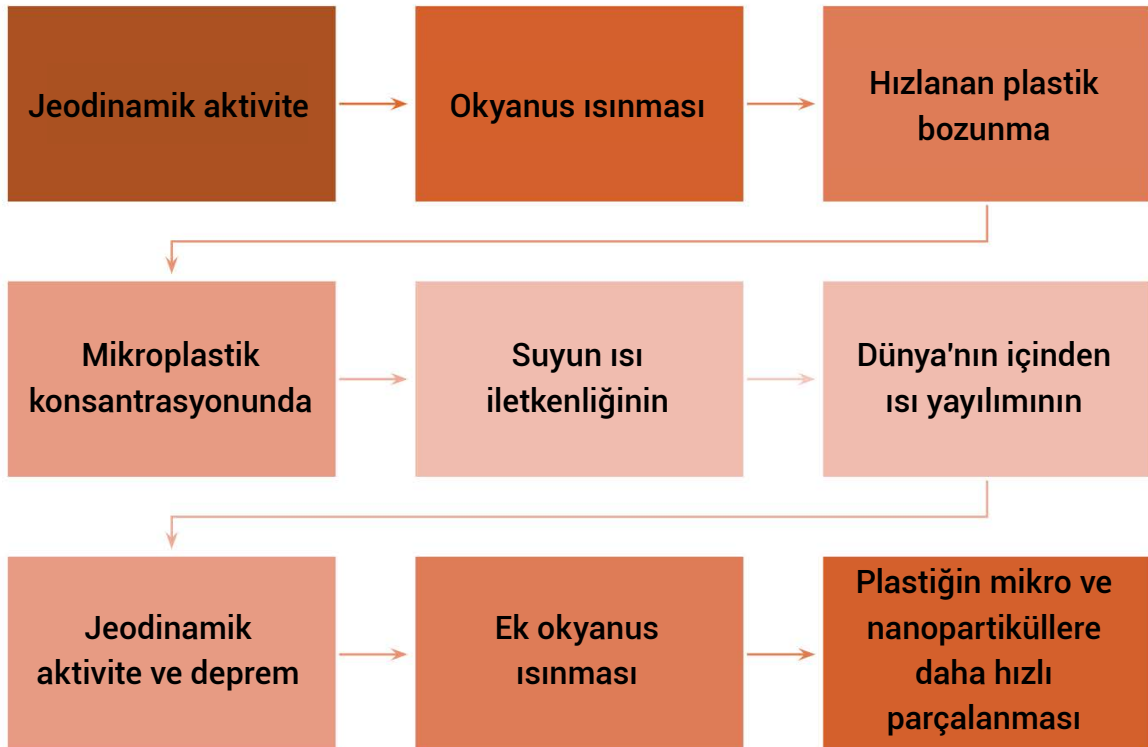
“DÜNYADA İKLİM FELAKETLERİNİN İLERLEMESİ VE FELAKET SONUÇLARI”

başlıklı raporda bulunabilir.

12.000 yıllık döngü boyunca jeodinamik değişiklikler üzerine yapılan yıllarca süren disiplinler arası araştırmaların gösterdiği gibi, okyanus ısınmasının başlıca nedeni, kıtasal kabuğa kıyasla daha ince ve daha hassas yapısı nedeniyle okyanus kabuğuna özellikle güçlü bir etki yapan yükselen magmadır. Dünya okyanuslarının plastikle kirlenmesi ve mikro ve nanoplastik parçacıkların birikmesi, okyanusun termofiziksel özelliklerini değiştiren kritik bir faktör haline gelmiştir. Bu sentetik parçacıkların okyanus suyunda bulunması, suyun ısı iletimini önemli ölçüde azaltarak derin okyanus katmanları ile yüzey arasındaki doğal ısı değişim süreçlerini bozmaktadır. Daha da önemlisi, litosferik plakalardan ısı yayılımını engellemektedir. 12.000 yıllık döngü boyunca artan jeodinamik aktivite koşullarında, okyanus suyunun ısı iletkenlik işlevindeki bu kritik bozulma, sadece okyanus ve atmosferin ısınmasını yoğunlaştırmakla kalmaz, aynı zamanda yeraltı ısınmasını da artırır. Sonuç olarak, manto erimesi hızlanır ve jeodinamik aktiviteyi daha da güçlendirir.

Bu, Dünya'nın iç kısmında aşırı enerji birikmesine yol açarak derin odaklı depremlerin artmasına ve yeni magma odalarının oluşumunun hızlanmasına neden olur. Bu süreçler ise gezegenin dengesizliğini daha da artırarak okyanusların ısınmasını hızlandırır.

Tehlikeli bir geri besleme döngüsü oluşmaya başlar: jeodinamik aktivite okyanusları ısıtır → ısı plastiklerin bozulmasını hızlandırır → mikroplastiklerin konsantrasyonunun artması deniz suyunun ısı iletkenliğini azaltır → bu da Dünya'nın içinden ısı yayılımını bozar → bu da jeodinamik aktiviteyi daha da yoğunlaştırır ve deprem sıklığını artırır → bu da okyanusların daha da ısınmasına yol açar, bu da plastiklerin mikro ve nanopartiküllere ayrışmasını hızlandırır.



Bu durum, sel, kasırga ve tropikal siklonlar gibi aşırı hava olaylarının ve doğal afetlerin sıklığını ve şiddetini artırarak, bunların şimdiye kadar hiç görülmemiş bir yoğunlukta meydana gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Böylece, okyanusların mikro ve nanoplastik kirliliği, okyanus ısınmasını yoğunlaştırarak insan sağlığı, ekosistemler, biyosfer ve iklim sistemi üzerinde yıkıcı bir etki yaratmakla kalmaz, aynı zamanda Dünya'nın şu anda girdiği 24.000 yıllık döngüyle ilişkili halen aşırı felaketleri daha da şiddetlendiren bir faktör olarak da işlev görür. Bu, sadece insanlığın hayatta kalması için değil, gezegenin kendisi için de benzeri görülmemiş riskler yaratır.

Küresel çevre, iklim ve jeodinamik krizin ele alınması, çok disiplinli bilim insanları arasında uluslararası işbirliği ile kapsamlı çözümlerin acilen geliştirilmesi ve uygulanmasını gerektirmektedir. Bunlar, mikro ve nanoplastiklerden okyanusların arındırılması, bunların insan bedeni üzerindeki zararlı etkilerinin azaltılması ve jeodinamik tehditlere karşı temel önlemleri içermelidir.

Önerilen çözümler ilgili raporlarda bulunabilir:



RAPOR

**"DÜNYADA İKLİM DEĞİŞİKLİKLERİNİN
İLERLEMESİ VE FELAKETLE
SONUÇLANAN ETKİLERİ"**



RAPOR

**"SİBİRYA'DA MAGMA GAZ SÜTUNU
PATLAMASI TEHDİDİ VE BU SORUNUN
ÇÖZÜMÜ İÇİN STRATEJİLER"**

SONUÇLAR: NANOPLASTİKLER GÖZ ARDI EDİLMEMESİ GEREKEN BİR SORUNDUR

Plastik kirliliği sorunu, özellikle mikro ve nanoplastikler (MNP'ler) ile ilgili olarak, yerel çevre hasarının ötesine geçerek karmaşık bir küresel tehdide dönüşmüştür. Son araştırmalar, MNP'lerin iklim sistemi, ekosistem direnci ve insan sağlığı üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkilerini doğrulamaktadır. Mikroplastik parçacıklar, canlı organizmalara nüfuz ederek iltihaplanma tepkilerini tetikleyebilir, hormonal dengeyi bozabilir, bağışıklık ve üreme fonksiyonlarını bozabilir ve okyanus suyundan atmosfere kadar çevrenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir.

On yıldan fazla bir süre önce, ALLATRA uluslararası bilim topluluğunun temsilcileri, plastik kirliliğinin iklim anomalileri üzerinde giderek daha önemli bir etki yaratacağı ve halk sağlığı sorunlarını daha da kötüleştireceği hipotezini ortaya attılar. Bugün, bu hipotezler önde gelen bilimsel kurumlar tarafından yürütülen bağımsız çalışmalarla doğrulanmaktadır. MNP'lerin çevresel ve biyolojik etkileriyle ilgili verilerin hızla birikmesi, iklim modellerinin dönüşümü, hidrosferdeki değişiklikler ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik sistemik risklerin artması dahil olmak üzere yeni analiz yolları açmaktadır.

Özellikle endişe verici olan, mikroskobik konsantrasyonlarda bile nanoplastiklerin biyosfer ve iklim sistemi genelinde zincirleme etkiler başlatabileceğinin keşfedilmesidir. Plastik artık sadece katı atık değildir; hem çevreye hem de insan bedenine etki eden aktif bir dönüşüm ajanı haline gelmiştir. Sonuçları şimdiden ortaya çıkmaya başlamıştır. MNP krizi ekoloji ve tıbbın ötesine uzanmaktadır; ulusal güvenlik, makroekonomi ve uluslararası ilişkiler bağlamında da anlaşılmalıdır.

Bu tehdide karşı koyma stratejisinin bir parçası olarak, ALLATRA Hareketi, hem pratik uygulamaları hem de öngörü potansiyeli olan iki temel yön önermiştir. İlki, tatlı su kıtlığını aynı anda çözebilir ve atmosfer ve okyanuslardan mikroplastik parçacıkların uzaklaştırılmasına katkıda bulunabilir olan atmosferik su üretimi (AWG) teknolojilerinin geniş çaplı uygulanmasını içermektedir. Ancak, AWG teknolojilerinin kullanımı, potansiyel riskleri de dikkate almalıdır: özellikle, havadaki MNP konsantrasyonunun artması ve bunun sonucunda insanlarda solunum yoluyla maruziyetin yoğunlaşması. Bu durum, son derece etkili filtreleme ve koruma sistemlerinin paralel olarak geliştirilmesinin acil ihtiyacını vurgulamaktadır.

ALLATRA tarafından önerilen ikinci stratejik yön, nanoplastiklerin toksisitesine katkıda bulunan başlıca faktörlerden biri olan elektrostatik yükü nötralize etmek veya korumak için yöntemlerin geliştirilmesini içermektedir. Yüklü nanoplastik parçacıklar, hücre zarları, proteinler ve genetik materyalle aktif olarak etkileşime girerek kararlı moleküler bağlar oluşturur. Bu parçacıklar, kan-beyin bariyeri dahil olmak üzere biyolojik bariyerleri geçerek dokularda birikir ve oksidatif stresten apoptoza kadar bir dizi hücresel bozukluğu tetikleyebilir. Mikro ve nanoplastiklerin elektrostatik aktivitesinin azaltılması, bunların zararlı etkilerini önemli ölçüde azaltabilir ve insan bedenindeki birikimini yavaşlatabilir.

Raporu hazırlayanlara göre, MNP'lerin elektrostatik yükünü korumak veya nötralize etmek, potansiyel tehlikelerini en az %50 oranında azaltabilir ve bu da bu araştırma alanını kritik öneme sahip hale getirir. Bu tür önlemler, MNP'leri teşhis etmek, önlemek ve insan bedeninden uzaklaştırmak için daha kapsamlı

stratejiler geliştirmek ve biyosferi temizlemek için gerekli zamanı sağlayacaktır. Bu bağlamda, biyofizik, nanoteknoloji ve moleküler toksikoloji alanlarındaki araştırmalar özellikle önem kazanmaktadır.

Bu nedenle, MNP'lerin oluşturduğu tehdide etkili bir şekilde yanıt vermek için tekil önlemler değil, küresel ve disiplinler arası bir yaklaşım gereklidir. Bilimsel araştırma, teknolojik yenilik, düzenleyici çerçeveler ve uluslararası işbirliği alanlarında koordineli çabalar gereklidir. Plastik kirliliği dar bir çevre sorunu olarak değil, halk sağlığı, güvenliği, kaynak güvenliği ve sosyal altyapının dayanıklılığını etkileyen sistemik bir sorun olarak görülmelidir.

Bu raporu benzersiz kılan, fizik, kimya, biyoloji ve tıp alanlarından elde edilen verileri bir araya getiren kapsamlı ve disiplinler arası yaklaşımıdır. Bu sentez, MNP'lerin bir medeniyet sorunu olarak ele alınmasını ve çok düzeyli çözümler gerektiren bir sorun olarak görölmesini sağlamaktadır. Küresel topluluk, bu tehdidin gerçek boyutunu henüz kavramaya başlamıştır. şu anda evrensel bir çözüm bulunmamakla birlikte, bu tür bir çözümün arayışı ve bilimsel işbirliğinin ilerlemesi, krizin üstesinden gelinmesinin yolunu açabilir. Asıl zorluk, bir çözümün olmaması değil, kritik bir dönüm noktasına ulaşmadan önce bir çözüm bulabilmektir.

Referanslar

- Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Accessed May 1, 2025).
- Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>
- Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>
- Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Accessed May 1, 2025)
- Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>
- AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).
- Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).
- Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Accessed May 1, 2025).

Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Accessed May 1, 2025).

Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).

Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2 cells involves clathrin dependent and clathrin independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>
- Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>
- Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).
- Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.
- Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>
- Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>
- Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1–425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).
- Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025).

- Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>
- Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Accessed May 1, 2025).
- Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>
- Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>
- Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Accessed May 1, 2025)
- European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 2025).
- Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).
- Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).
- Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. *Birth Defects Research* 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>
- Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>
- Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).
- Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Accessed May 1, 2025)

Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Accessed May 1, 2025).
- Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>
- Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Accessed May 1, 2025)
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>
- Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>
- How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Accessed May 1, 2025)
- Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>
- Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>
- Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Accessed May 1, 2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025).

IPCC. *Global Warming of 1.5°C*. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025).

Irigoiien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8y-jNFxkALjIC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768–771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Accessed May 1, 2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kat/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Accessed May 1, 2025)

Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10
- Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>
- Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>
- Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>
- Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>
- Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
- Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

- Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>
- NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025).
- NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).
- National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Accessed May 1, 2025).
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Accessed May 1, 2025).
- Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>
- NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 10, 2025).
- NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 1, 2025).
- New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).
- News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).
- Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
- Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>
- [Nippon.com](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Accessed May 1, 2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Accessed May 1, 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

- Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>
- Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>
- Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>
- Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>
- Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>
- Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>
- Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
- Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Accessed May 1, 2025).
- Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>
- Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Accessed May 10, 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Accessed May 1, 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Accessed May 1, 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? *Science* 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

- Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>
- Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>
- U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).
- United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025).
- United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Accessed May 1, 2025).
- University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025)
- University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUF.pdf> (Accessed May 1, 2025)
- Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>
- Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>
- Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

- Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>
- Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>
- Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>
- Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>
- Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
- Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>
- Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Accessed May 1, 2025).
- World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).
- World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025).

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025).

Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. *Science of The Total Environment* 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *Nanomaterials* 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. *Cambridge Prisms: Plastics* 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>