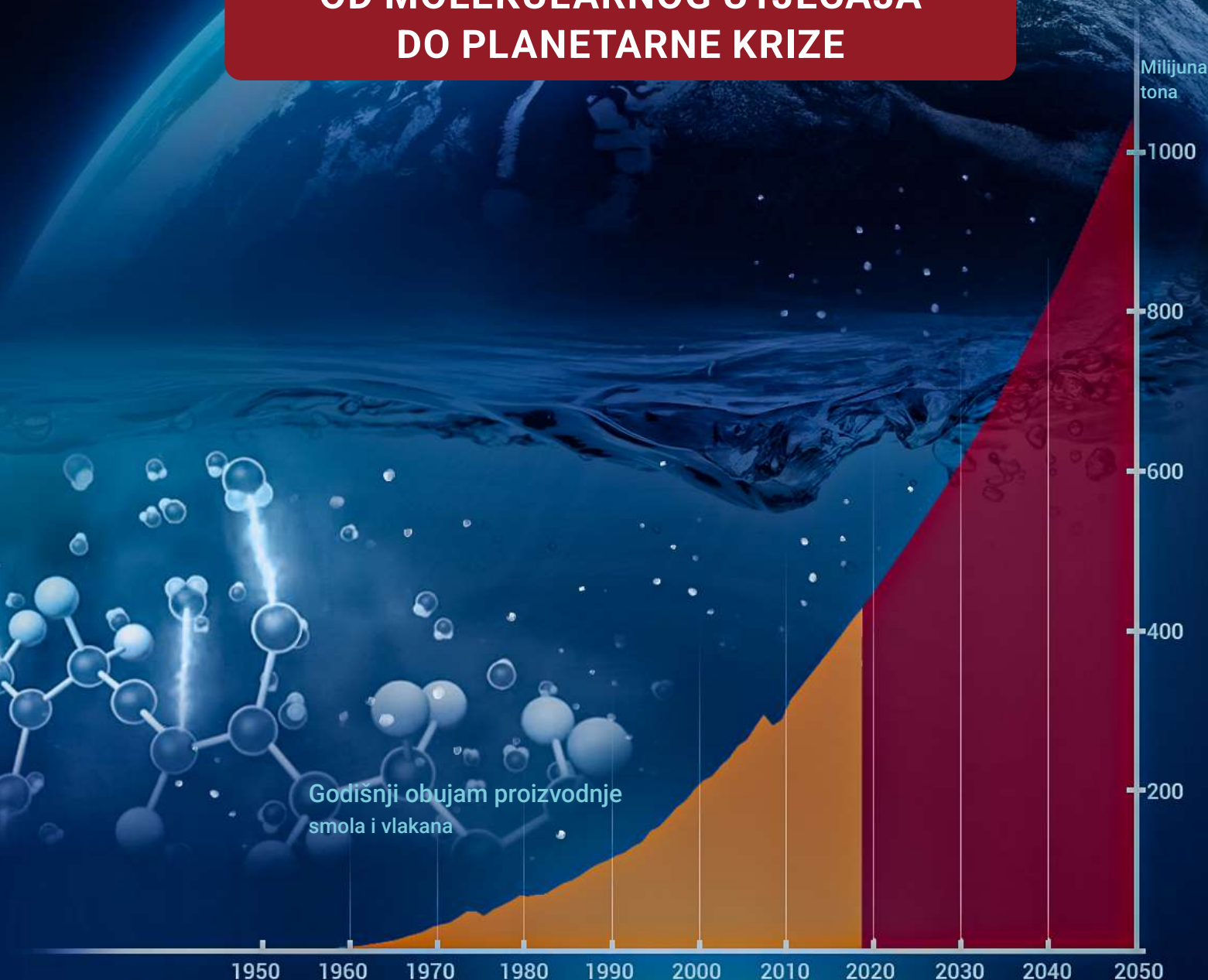


IZVJEŠĆE

MIKROPLASTIKA
I NANOPLASTIKA

NANOPLASTIKA U BIOSFERI

OD MOLEKULARNOG UTJECAJA
DO PLANETARNE KRIZE



IZVJEŠĆE

NANOPLASTIKA U BIOSFERI

OD MOLEKULARNOG UTJECA
DO PLANETARNE KRIZE

AUTORI



Međunarodni javni pokret ALLATRA

INSTITUCIONALNI PREGLED Akademska suradnja



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Bolivijsko katoličko sveučilište "San Pablo" - UCB
Fakultet za inženjerstvo i istraživanje okoliša



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Autonomno sveučilište Juan Misael Saracho - UAJMS
Odjel za istraživanje, znanost i tehnologiju

ZNANSTVENI SURADNIK



CREATIVE
SOCIETY

Međunarodni projekt "Kreativno društvo"

Sažetak.....5

Posljedice onečišćenja plastikom: Mikro- i nanoplastika (MNP) kao novi pokretač planetarne krize.....7

 Kvantitativne procjene i trendovi u globalnoj proizvodnji plastičnog otpada.....7

 Velika pacifički kontinent smeća.....12

 Kako se formiraju mikro- i nanoplastične čestice.....12

 Širenje MNP u okolišu18

Okolišne i klimatske posljedice onečišćenja mikro- i nanoplastikom.....23

 Kako MNP narušava ekosustave na molekularnoj razini.....23

Utjecaj mikro- i nanoplastike na klimu.....46

Utjecaj mikro- i nanoplastike na ljudsko zdravlje.....71

 Mikro- i nanoplastika kao novi čimbenici rizika u epidemijama 21. stoljeća.....71

 Molekularni mehanizmi toksičnosti MNP: Razaranje DNA, mitohondrija i staničnih membrana.....72

 Uloga MNP u preuranjenom starenju i razvoju raka.....84

 Poremećaji hormonalnog sustava izazvani MNP-om.....87

 Elektrostatički naboj nanoplastike kao ključni pokretač njezine visoke toksičnosti za ljudski organizam.....93

 Sustavni učinci MNP na ljudske organe i funkcionalne sustave.....100

 Oštećenje dišnog sustava od udahnute MNP.....101

 Neurotoksični učinci MNP: Oštećenje središnjeg i perifernog živčanog sustava.....102

 Uloga MNP u patogenezi kardiovaskularnih bolesti.....114

 Gastrointestinalna disfunkcija zbog izloženosti MNP.....116

 Utjecaji MNP na imunološki sustav.....117

 Kancerogena svojstva MNP: Mutacijski putevi i metastatska progresija.....120

 Učinci MNP na metabolizam kalcija i strukturu kostiju.....121

 Reproduktivni poremećaji povezani s izloženosti MNP: Neplodnost i erektilna disfunkcija.....122

 Prodiranje MNP kroz placentnu barijeru i njegovi učinci na tijelo u razvoju.....126

 Učinci izloženosti MNP i njezina povezanost s urođenim abnormalnostima.....130

 Zaključci i izgledi. Je li moguće smanjiti utjecaj MNP na ljudsko zdravlje?.....133

Analiza modernih strategija za smanjenje onečišćenja plastikom.....134

 Tehnologije za uklanjanje krupnog plastičnog otpada iz vodenih ekosustava.....134

 Trenutne metode za uklanjanje mikro- i nanoplastike.....139

Pristup znanstvene zajednice ALLATRA u borbi protiv epidemije mikro- i nanoplastike.....142

 Tehnologije generatora atmosferske vode (AWG) za čišćenje oceana od MNP.....142

 Inovativni znanstveni pristup smanjenju toksičnosti mikro- i nanoplastike.....148

X Faktor: Uloga mikro- i nanoplastike u dinamici prirodnih katastrofa.....151

Zaključci: Nanoplastika je izazov koji se ne smije ignorirati.....171

Literatura.....173

SAŽETAK

“Kad bi Zemlja vodila dnevnik, posljednje bi stoljeće bilo zapisano crnom tintom s naslovom: ‘Plastično doba.’” Od mikroskopskih čestica koje prodiru u stanice živih organizama do kolosalnih nakupina smeća koje plutaju u oceanima, plastika se urezala u geološki zapis planeta. Ali po koju cijenu?

Svake godine svijet generira više od 400 milijuna tona plastičnog otpada, s procijenjenih 11 milijuna tona koje ulazi u svjetske oceane. Do danas se više od 200 milijuna tona nakupilo u morskim okolišima. Uzorci površinske vode otkrivaju da plastika sada nadmašuje zooplankton omjerom šest prema jedan. Ako se trenutačni trendovi nastave, do 2050. godine masa plastike u oceanima nadmašit će masu svih riba.

Iako je za razgradnju plastike potrebno stotine, pa čak i tisuće godina, ona se pod utjecajem valova, slane vode i ultraljubičastog zračenja raspada na sitne fragmente poznate kao mikro- i nanoplastika. Te čestice mogu putovati tisućama milja kroz morski zrak i oborine, prelazeći granice, kontinente i oceane. Akumuliraju se u šumama i nalaze se u našoj hrani i pitkoj vodi. Mikroplastika je otkrivena na nekim od najudaljenijih lokacija na Zemlji, od Marijanske brazde do vrha Mount Everesta.

Ovo izvješće predstavlja sveobuhvatnu analitičku procjenu utjecaja onečišćenja plastikom na okoliš, zdravlje ljudi i otpornost kritičnih društvenih sustava. Istražuje ponašanje mikro- i nanoplastike koja nosi statičke naboje i toksične kemijske spojeve te njihove učinke na ekosustave. Posebna pozornost posvećena je njihovoj ulozi u zakiseljavanju oceana, destabilizaciji prehrambenih lanaca i prijetnjama bioraznolikosti. Izvješće sugerira hipotezu koja povezuje mikro- i nanoplastiku s promjenama u svojstvima vode, što može ubrzati zagrijavanje oceana i pojačati prirodne katastrofe.

Jedno od najhitnijih i najproblematičnijih pitanja o kojima se raspravlja u ovom izvješću jest utjecaj mikro- i nanoplastike (MNP) na zdravlje ljudi. Zbog svoje minorne veličine, te čestice mogu zaobići biološke barijere, izazivajući oksidativni stres, oštećenje DNA, upalne reakcije i staničnu disfunkciju. Izvješće naglašava moguću korelaciju između izloženosti MNP i rastuće prevalencije neurodegenerativnih i neuropsihijatrijskih poremećaja. Pokazuje da izloženost MNP tijekom prenatalnog i postnatalnog razvoja može narušiti kognitivnu funkciju i mentalno zdravlje kod djece, predstavljajući ozbiljnu prijetnju budućim generacijama.

Rastuća incidencija bolesti povezanih s MNP već smanjuje kvalitetu života, posebno u regijama s visokom razinom plastičnog onečišćenja.

Izvješće identificira regije koje su trenutačno suočene s povećanim rizikom, kao i one koje su do sada ostale relativno netaknute. Ako se situacija nastavi pogoršavati i učinkovite zaštitne mjere ostanu nedostupne, stanovništvo bi moglo biti prisiljeno migrirati u potrazi za sigurnijim životnim uvjetima. To može dovesti do valova nekontrolirane migracije, povećanja socijalne napetosti, opterećenja urbane infrastrukture i destabilizacije gospodarstava.

Na taj će se način ekološki izazov plastičnog onečišćenja postupno razviti u makroekonomski i geopolitički izazov.

Izvješće naglašava hitnu potrebu za rješavanjem onečišćenja MNP, nudeći novu perspektivu o distribuciji, utjecaju i učincima MNP. Izvješće je jedinstveno jer se temelji na interdisciplinarnom pristupu koji integrira fizičke, kemijske i biološke podatke o onečišćenju plastikom. To čini izvješće relevantnim za znanstvenike iz širokog spektra područja, koji su posvećeni razvoju održivih rješenja za sigurniju budućnost planeta i čovječanstva.

POSLEDICE ONEČIŠĆENJA PLASTIKOM: MIKRO- I NANOPLASTIKA (MNP) KAO NOVI POKRETAČ PLANETARNE KRIZE

Plastika je postala neraskidivi dio svakodnevnog života. Ambalaža i posuđe, odjeća i obuća, higijenski proizvodi i lijekovi, prijevoz i komunikacija – većina svakodnevnih predmeta izrađena je od plastike. Međutim, plastika ne postoji samo u obliku velikih vidljivih objekata: ona se također razgrađuje na mikroskopske čestice poznate kao mikroplastika i nanoplastika. Mikroplastika se definira kao čestice manje od 5 mm, često vidljive golim okom. Nanoplastika, s druge strane, mjeri manje od jednog mikrometra (jedna milijuntina metra), a većina ih je nevidljiva čak i pod standardnim mikroskopom.

Plastični materijali dolaze u različitim vrstama, ali svi su sastavljeni od polimera – prirodnih ili sintetičkih tvari izgrađenih od dugih molekularnih lanaca. Polimeri posjeduju jedinstvena kemijska svojstva koja ih čine vrlo izdržljivima i otpornima na razgradnju u okolišu.

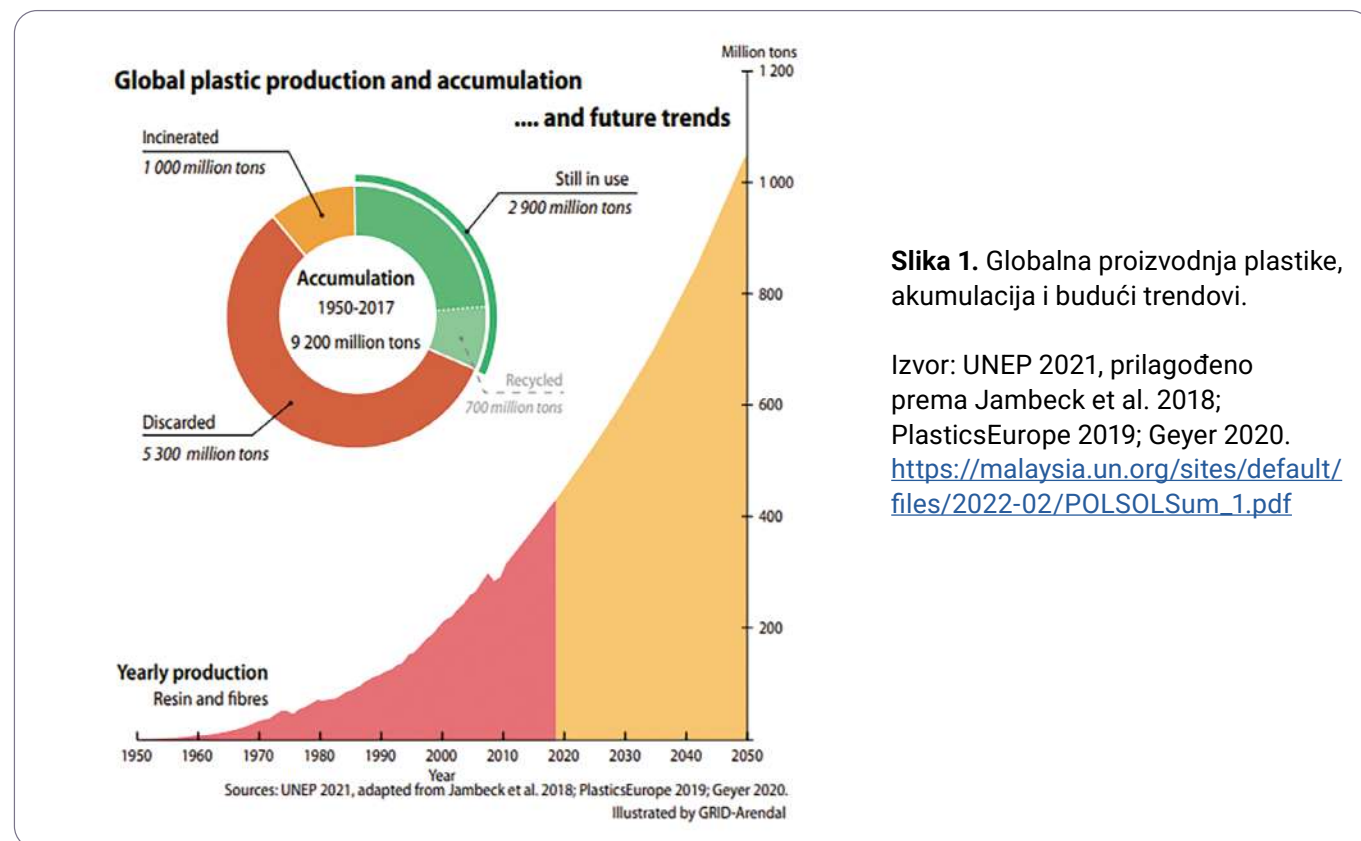
Tako je, zahvaljujući svojoj trajnosti, svestranosti i niskim troškovima proizvodnje, plastika postala glavni materijal izbora za masovnu proizvodnju, posebno za jednokratne predmete¹. Međutim, nepravilno gospodarenje otpadom pretvorilo je plastiku u najvoluminozniji zagađivač na svijetu po masi.

Kvantitativne procjene i trendovi u globalnoj proizvodnji plastičnog otpada

Od 1950-ih, svijet je proizveo približno 9200 milijuna metričkih tona plastike. Od toga je oko 2900 milijuna tona još uvijek u upotrebi danas, uključujući 2700 milijuna tona nove (virgin) plastike i otprilike 200 milijuna tona recikliranih materijala. Oko 5300 milijuna tona završilo je na odlagalištima otpada, dok je 1000 milijuna tona spaljeno. Dodatnih 1750 do 2500 milijuna tona klasificirano je kao “loše zbrinuto”, što znači da su možda dospjeli u okoliš nekontroliranim kanalima (vidi sliku 1).

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php

Do danas je u plastične proizvode ugrađeno gotovo 640 milijuna tona kemijskih aditiva². Prema Programu Ujedinjenih naroda za okoliš (UNEP)³, svijet sada proizvodi više od 400 milijuna tona plastičnog otpada godišnje.



Slika 1. Globalna proizvodnja plastike, akumulacija i budući trendovi.

Izvor: UNEP 2021, prilagođeno prema Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Samo oko 9% plastičnog otpada se reciklira, 19% se spaljuje, a ostatak ostaje u okolišu, uključujući odlagališta otpada i oceane⁴ (vidi sliku 2).

Način zbrinjavanja	Udio (Globalno, 2023.)
Reciklirano	9%
Spaljeno	19%
Loše zbrinuto	22%
Odloženo na odlagališta	49%

Slika 2. Godišnji plastični otpad po metodi odlaganja, Svijet, 2000. do 2023.
Izvor: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Svake godine otprilike 11 milijuna tona plastike ulazi u svjetske oceane⁵, što je ekvivalentno odlaganju više od jednog kamiona smeća punog plastike u ocean svake minute.

²Schmidt, 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>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Accessed: 1 May 2025)

⁴How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled>

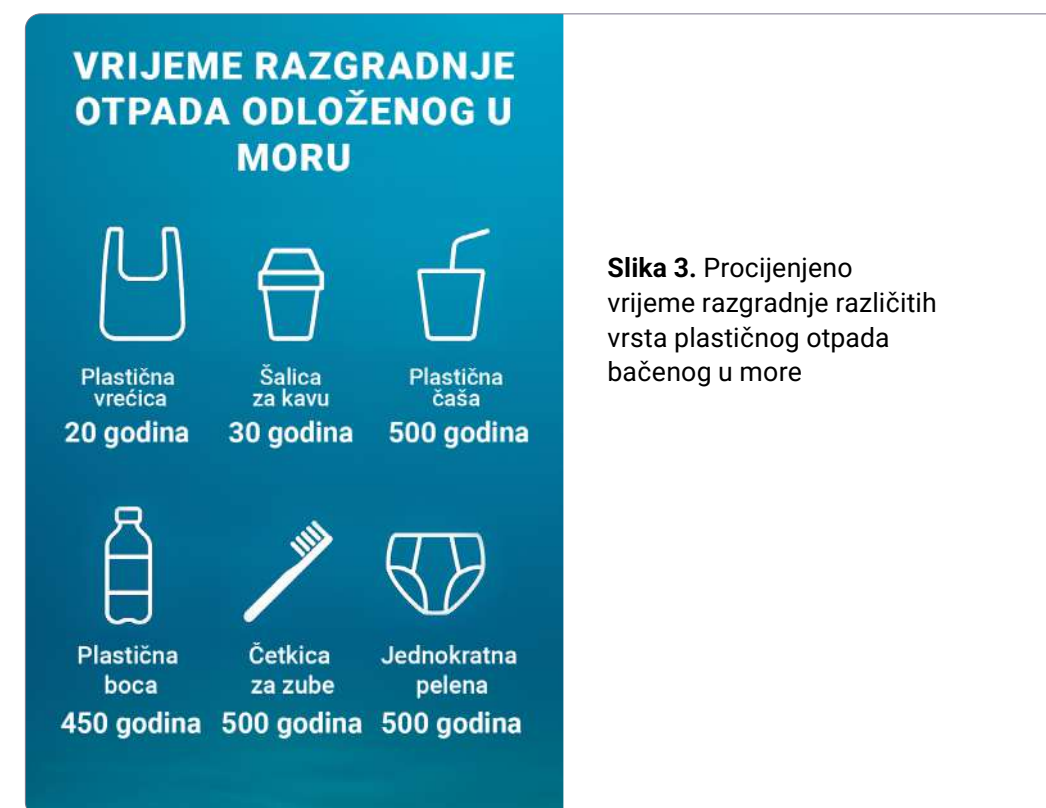
⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Trenutačno se u oceanima nakupilo preko 200 milijuna tona krupnog plastičnog otpada (makroplastike) i približno 35 540 tona mikroplastike⁶. Procjene godišnje količine plastičnog otpada koji ulazi u vodene ekosustave iz kopnenih izvora razlikuju se ovisno o analitičkim metodama. Prema scenariju "nastavka poslovanja kao i obično" (BAU) bez ikakve intervencije, te se razine mogu gotovo utrostručiti — s 9–14 milijuna tona u 2016. na 23–37 milijuna tona godišnje do 2040. godine.

Druga metodologija predviđa gotovo udvostručenje plastičnog otpada koji završava u oceanu — s 19–23 milijuna tona u 2016. na 53 milijuna tona do 2030. godine⁷.

Kako pokazuju istraživanja, ako se trenutačni trendovi nastave, do 2050. godine ocean će sadržavati čak 12 000 milijuna tona plastike⁸, što će parirati ukupnoj biomasi morskih riba procijenjenoj na otprilike 10 000 milijuna tona⁹.

Ovisno o vrsti, za razgradnju plastike potrebno je između 100 i 1000 godina (vidi sliku 3). U morskim okolišima, posebno u hladnim i tamnim dubinama oceana, plastika se razgrađuje još sporije¹⁰.



⁶Eriksen, 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>

⁷United 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>

⁸Geyer, 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>

⁹Irgoien, 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>

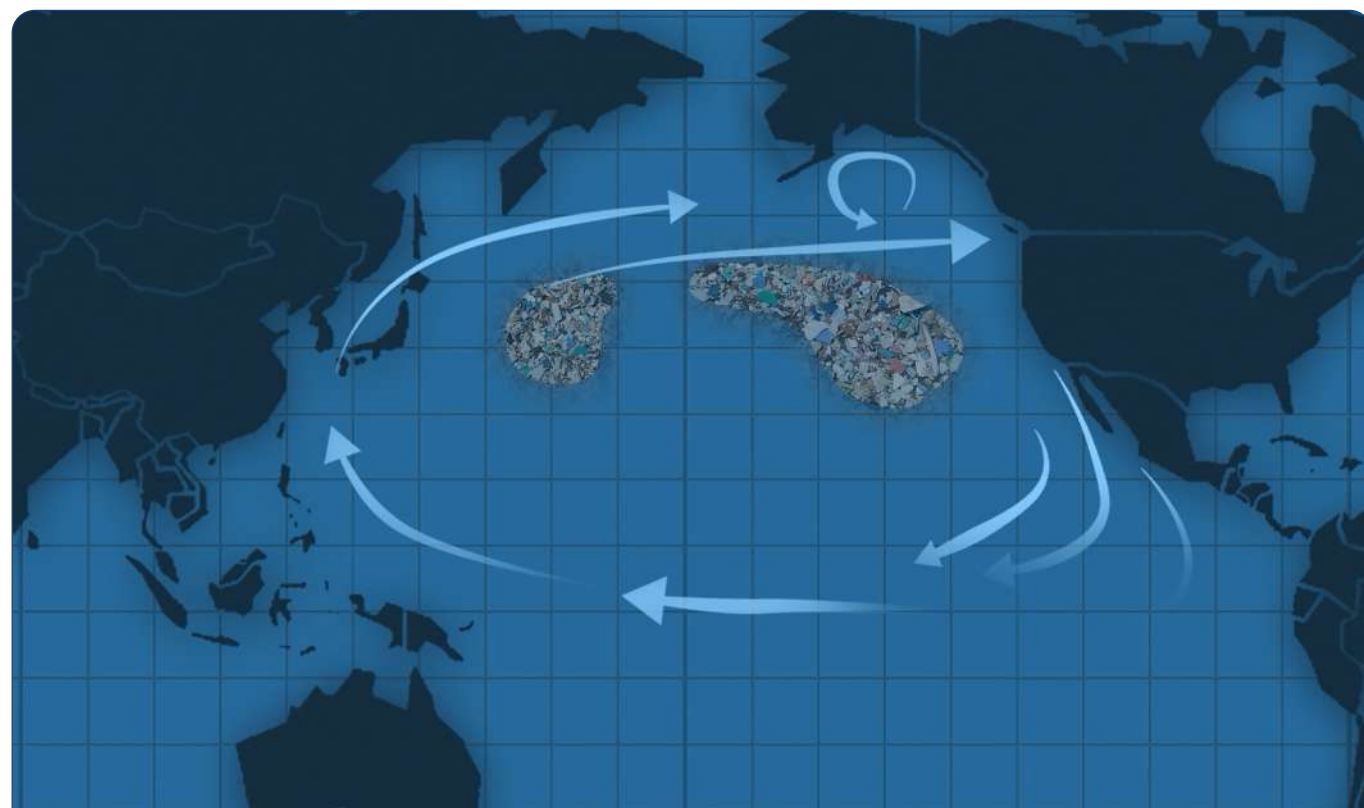
¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Osim dijela koji je spaljen, praktično sva plastika ikada unesena u okoliš i dalje postoji danas, bilo kao netaknuti predmeti ili u fragmentiranom obliku¹¹. Taj otpad ne nestaje i nastavlja se akumulirati. Situacija je slična kanti za smeće koja se stalno puni, ali nikad ne prazni. Pitanje kako bi ta kanta mogla izgledati nakon mjesec dana pokazuje razmjjer problema globalnog nakupljanja plastičnog otpada.

Veliki pacifički kontinent smeća

Plastični otpad nakupljen u oceanskoj vodi i plutajući na njezinoj površini zahvaćaju oceanske struje i nosi se u središnje vrtloge, tvoreći masivne nakupine poznate kao "kontinenti smeća".

Veliki pacifički kontinent smeća najveća je koncentracija plastike na planetu i pokazuje stalan rast (vidi sliku 4). Kontinent smeća proteže se na ogromnom području između Sjeverne Amerike i Japana. Promatranja pokazuju da je 2018. godine njegova površina iznosila oko 1,6 milijuna kvadratnih kilometara¹², iako je ta brojka podložna fluktuacijama zbog oceanskih struja i sezonske varijabilnosti.



Slika 4. Dijagram nakupljanja plastike u Tihom oceanu

¹¹Barnes, 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>

¹²Lebreton, 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>

Studije pokazuju da do 80 %¹³ materijala u nakupinama smeća čine plastične mase¹⁴. Nakupina sadrži najmanje 80.000 tona plastičnog otpada¹⁵. Ipak, to je samo vidljivi dio problema. Procjenjuje se da 94 % oceanske plastike tone na morsko dno¹⁶ gdje ogromne količine otpada mogu ostati skrivene i nastaviti se nakupljati.

Puni opseg Velikog pacifičkog kontinenta smeća još uvijek je nepoznat, djelomično zbog toga što je sjevernopacifički suptropski vrtlog toliko golem da prkosi sveobuhvatnom znanstvenom kartiranju s trenutačnom tehnologijom.

Dinamika akumulacije plastike u oceanu

Mjerenja instrumentima pokazuju eksponencijalno povećanje veličine Velikog pacifičkog kontinenta smeća. Između 2015. i 2022. godine, prosječna masa plastičnog otpada u ovoj regiji porasla je pet puta¹⁷. Posebno zabrinjava deseterostruko povećanje malih plastičnih fragmenata u istom razdoblju, što dokazuje brzu razgradnju krupnih plastičnih ostataka.

Velika pacifička nakupina smeća učinkovito je formirala sedmi "kontinent" na Zemlji. Međutim, važno je napomenuti da ova pojava nije jedinstvena. Do danas su znanstvenici identificirali pet glavnih nakupina smeća u svjetskim oceanima¹⁸: dvije u Atlantskom oceanu, dvije u Tihom oceanu i jedna u Indijskom oceanu¹⁹ (Slika 5).

¹³Derraik, 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)

¹⁴Morishige, 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>

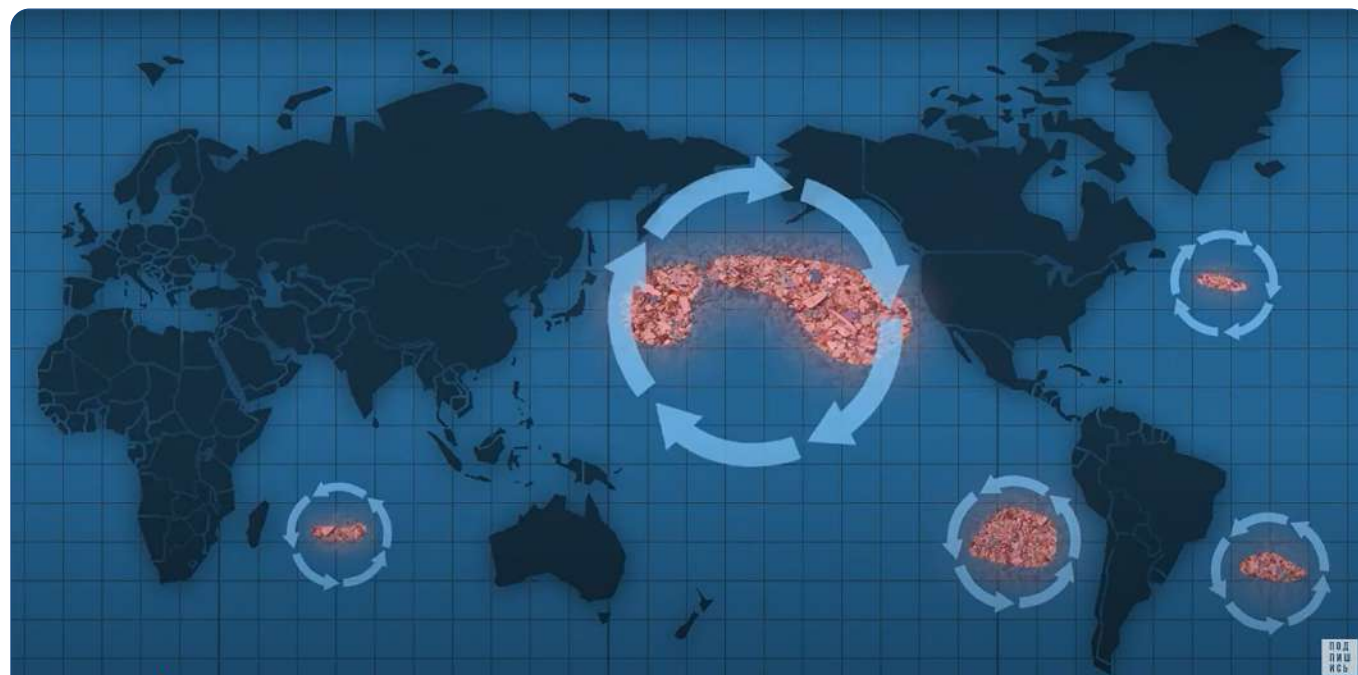
¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, 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>

¹⁸Van 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>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>



Slika 5. Shematski prikaz pet glavnih nakupina smeća u svjetskim oceanima: dvije u Atlantiku, dvije u Pacifiku i jedna u Indijskom oceanu. Milijuni tona plastike i drugog otpada koji je stvorio čovjek kruže oceanima. Ove nakupine smeća rastu alarmantnom brzinom.

Kako se formiraju mikro- i nanoplastične čestice

Plastični otpad je vrlo otporan na biorazgradnju, no pod utjecajem valova, slane vode i sunčeve svjetlosti, postupno se razlaže na manje čestice – mikro- i nanoplastiku²⁰ koje su često nevidljive golom oku. Te čestice zadržavaju svoju polimernu strukturu²¹, a proces razgradnje nastavlja se sve do nanorazmjera (Slike 6–7). Kao rezultat toga, zaobilazeći prirodne mehanizme razgradnje, plastični otpad postaje trajna komponenta planetarnih ekosustava.

Štoviše, mikro- i nanoplastika sadrže opasne kemikalije koje se dodaju tijekom proizvodnje plastike.

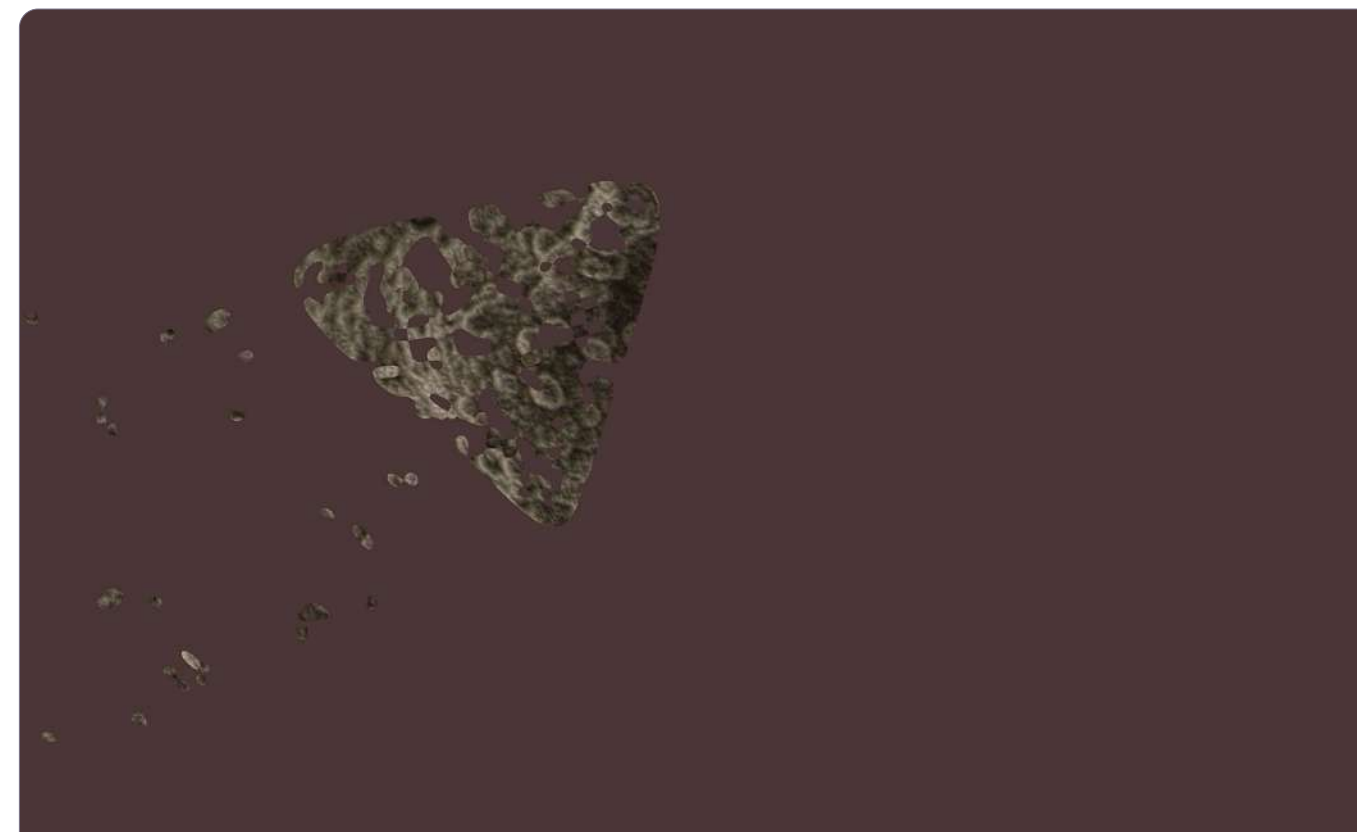


“Sada znamo da plastika sadrži otprilike 16 000 kemikalija. Od toga je poznato da je preko 4200 postojano u okolišu, akumulira se u živim organizmima, transportira se na velike udaljenosti ili predstavlja potencijalnu opasnost”, kaže Annika Jahnke, autorica i kemičarka za okoliš iz Helmholtz centra za istraživanje okoliša²².

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, 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>

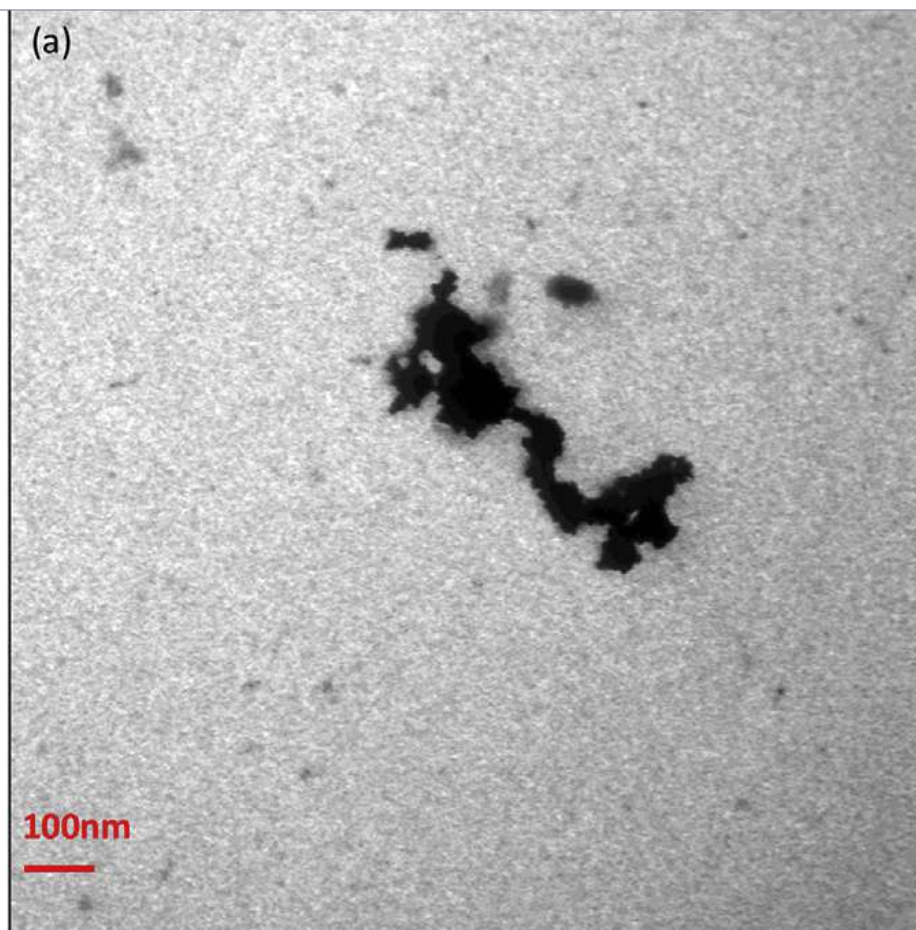
²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



Slika 6. Fragmentacija plastičnih čestica do nanočestica uz zadržavanje njihove polimerne strukture

Slika 7. Transmisijaska elektronska mikroskopija ekološki relevantnih nanoplastika polietilena degradiranih UV zračenjem iz starih mikroplastika uzorkovanih u sjevernom Atlantskom oceanu.

Izvor: 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>



Širenje mikro- i nanoplastike u oceanu

Najveće koncentracije plastike nalaze se u područjima nakupina smeća. Te oceanske “deponije” funkcioniraju poput industrijskih postrojenja gdje se mikro- i nanoplastika kontinuirano generiraju. Baš kao što se virus širi tijelom putem krvotoka, mikroplastika se transportira oceanskim strujama diljem svjetskih oceana, što naglašava globalni razmjer problema.

Unatoč tehničkim izazovima u otkrivanju mikroplastike, koji kompliciraju njezinu točnu kvantifikaciju u oceanima, teorijski modeli omogućuju procjenu razmjera problema.

Mikroplastika se nalazi u gotovo svakom uzorku oceanske vode, dok su u nekim regijama koncentracije desetke puta veće od globalnog prosjeka.

Oceanski vrtlozi doprinose širokoj rasprostranjenosti mikroplastike, dosežući čak i udaljene regije poput Arktika. Studije uzoraka leda pokazale su da su razine onečišćenja mikroplastikom u Arktičkom oceanu 100 puta veće od onih u vodama sjeverno od Škotske ili Sjevernopacifičkom suptropskom vrtlogu.²³ Ovi nalazi ukazuju na ozbiljnost i prekograničnu prirodu problema.

Većina globalnih studija o onečišćenju plastikom u morskim okolišima fokusira se na površinski sloj oceana. Po procjenama, 2019. godine površinski sloj oceana sadržavao je između 82 i 358 bilijuna plastičnih čestica.²⁴

Međutim, sve je više dokaza da u zonama dubokog mora i pridnenim sedimentima broj mikroplastičnih čestica može doseći nebrojive bilijune.²⁵

Lagana plastika teži plutati, dok gušća plastika ili ona kolonizirana morskim organizmima tone na oceansko dno.²⁶ Procjene sugeriraju da je oko 50% urbanog plastičnog otpada gušće od morske vode, što mu omogućuje brzo taloženje. Jednom na morskom dnu, transportiraju ga dubokomorske struje i akumulira se u brazdama i depresijama. Mikroplastika je čak pronađena na dnu Marijanske brazde – najdublje poznate točke u oceanu²⁷ (vidi Slike 8–9).

²³Obbard, 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>

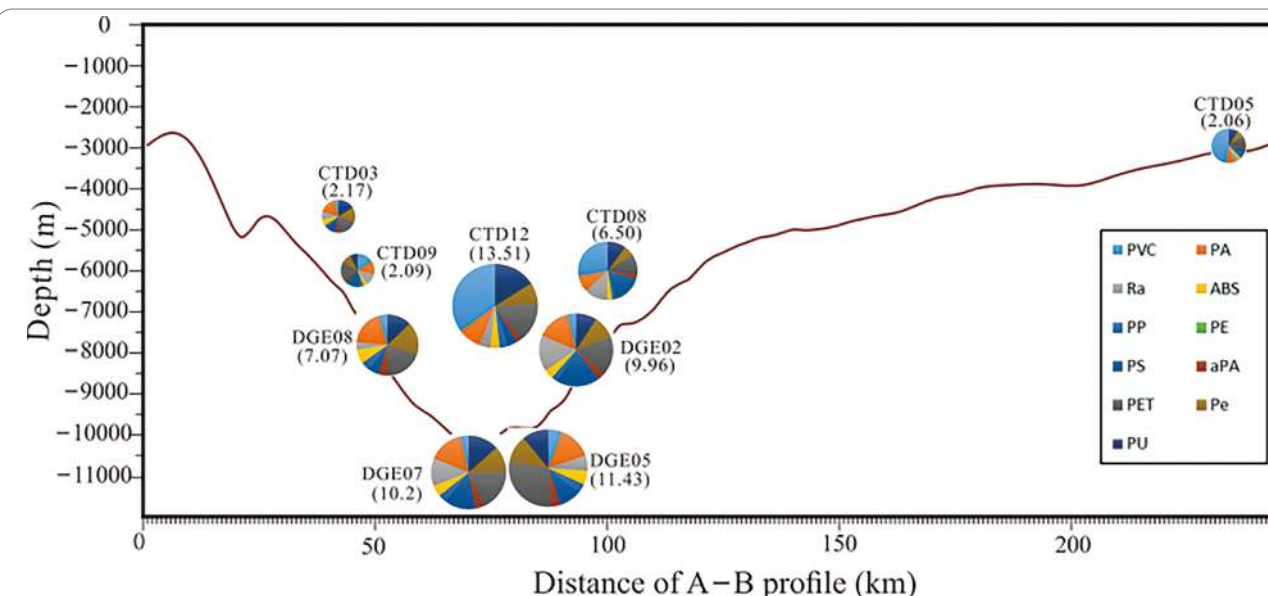
²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

²⁶Lusher, 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

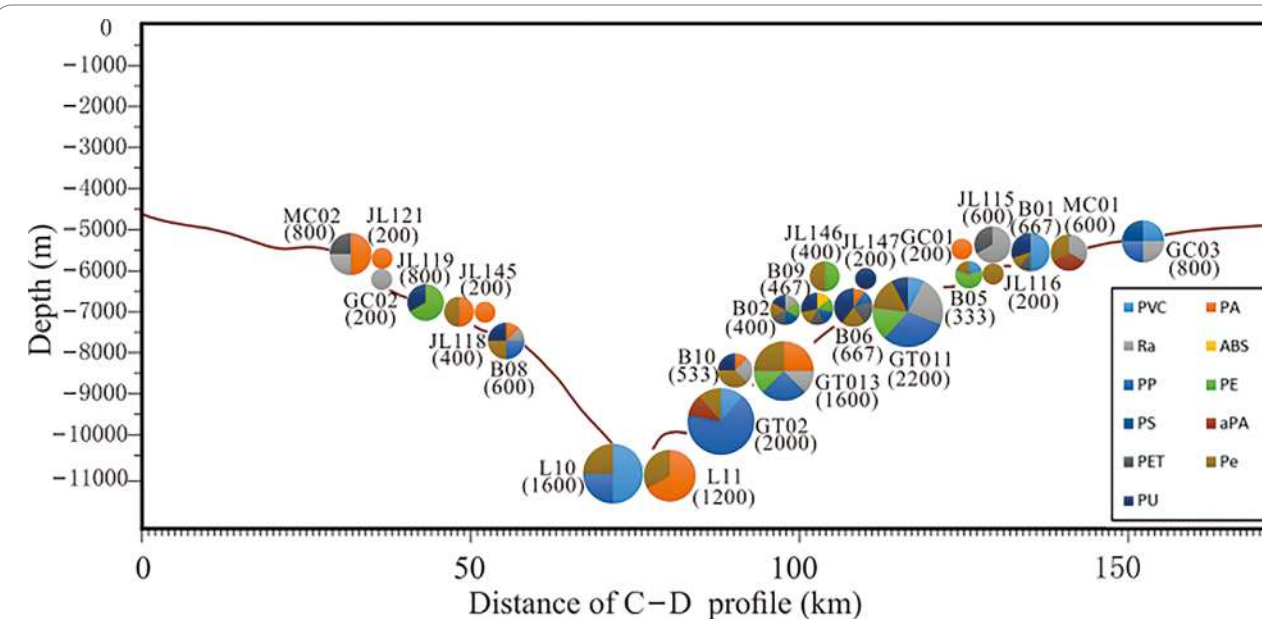
²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018).

<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



Slika 8. Profil zastupljenosti i sastava mikroplastike u uzorcima vode iz Marijanske brazde. Kružni dijagrami predstavljaju sastav mikroplastike, a brojevi u zagradama su zastupljenosti mikroplastike s jedinicama komada po litri. PVC-polivinil klorid, PA-poliamid, Ra-rajon, ABS-akrilonitril butadien stiren, PP-polipropilen, PE-polietilen, PS-polistiren, aPA-aromatični poliamid, PET-polietilen tereftalat, Pe-poliester, PU-poliuretan. X-os odgovara poprečnoj liniji od točke A (12 °N, 142.5 °E) do točke B (9.8 °N, 141.43 °E).

Izvor: 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>

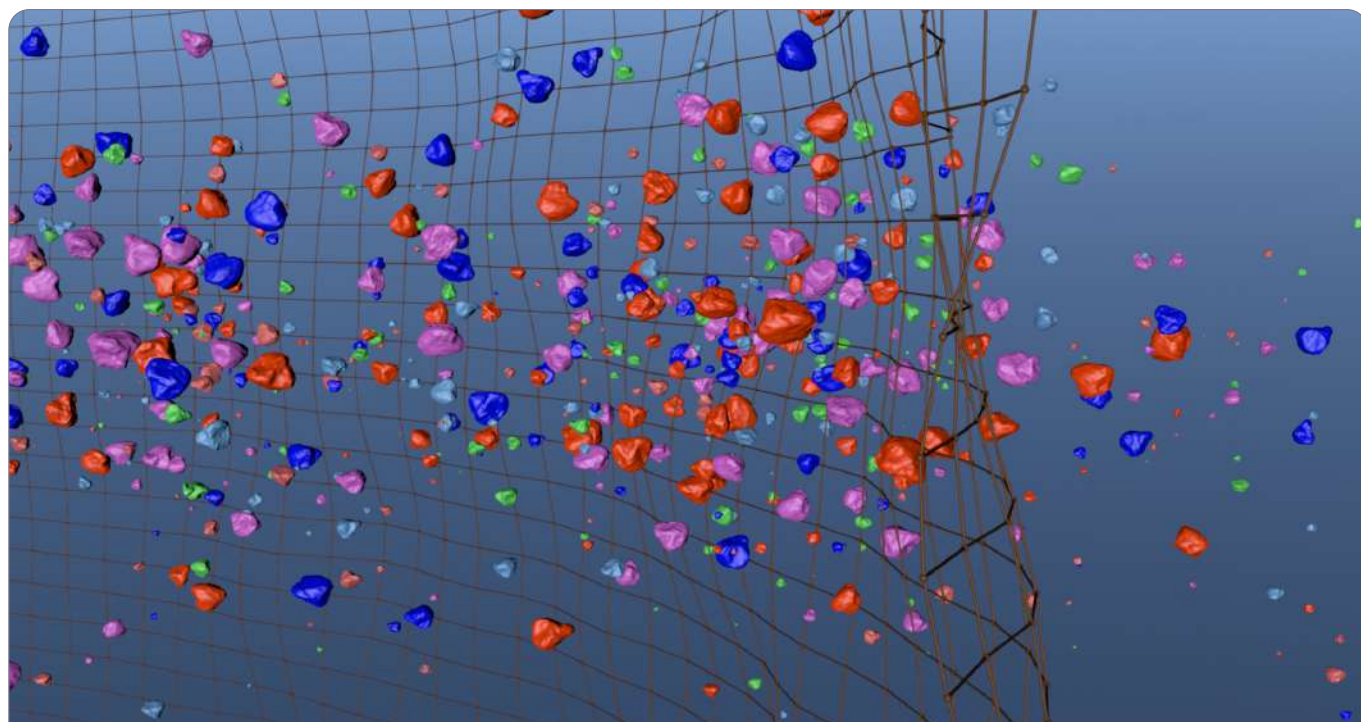


Slika 9. Profil zastupljenosti i sastava mikroplastike u uzorcima sedimenta iz Marijanske brazde. Kružni dijagrami predstavljaju sastav mikroplastike, a brojevi u zagradama su zastupljenosti mikroplastike s jedinicama komada po litri. PVC-polivinil klorid, PA-poliamid, Ra-rajon, ABS-akrilonitril butadien stiren, PP-polipropilen, PE-polietilen, PS-polistiren, aPA-aromatični poliamid, PET-polietilen tereftalat, Pe-poliester, PU-poliuretan. X-os odgovara poprečnoj liniji od točke C (12 °N, 141.9 °E) do točke D (10.5 °N, 141.3 °E).

Izvor: 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>

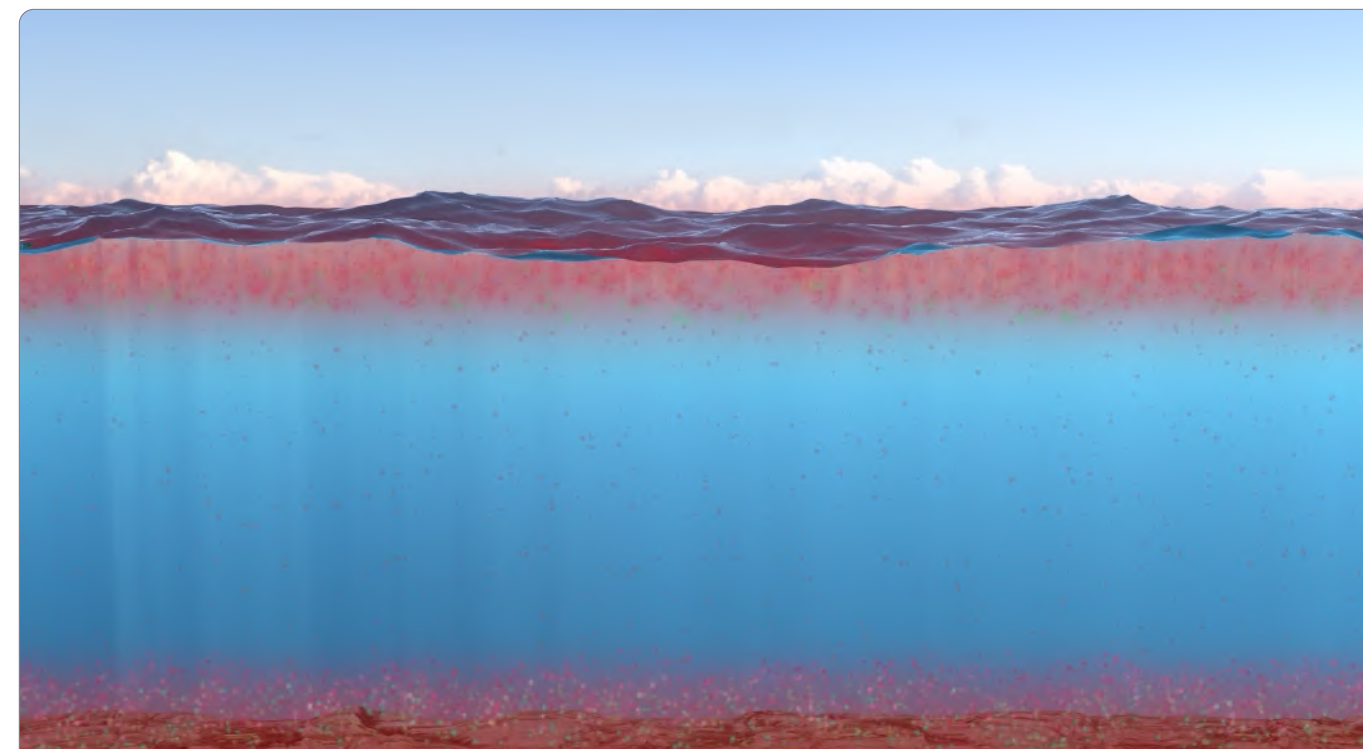
Zapravo, primarno mjesto akumulacije mikroplastike nije površina oceana, već duboko morsko dno. Postupno, cijelo oceansko dno biva prekriveno slojem plastike. Međutim, podaci o onečišćenju mikroplastikom u oceanu vjerojatno su podcijenjeni, a stvarna situacija mogla bi biti znatno gora.

“Nemaju svi pristup vrlo sofisticiranim i skupim instrumentima i alatima za uzorkovanje,” objašnjava Melanie Bergmann, biologinja s Alfred Wegener Instituta u Njemačkoj. Ona kaže da bi čak 80-90% morskih mikroplastičnih čestica moglo biti promašeno standardnim tehnikama uzorkovanja jer su premale da bi se detektirale (Slika 10).²⁸

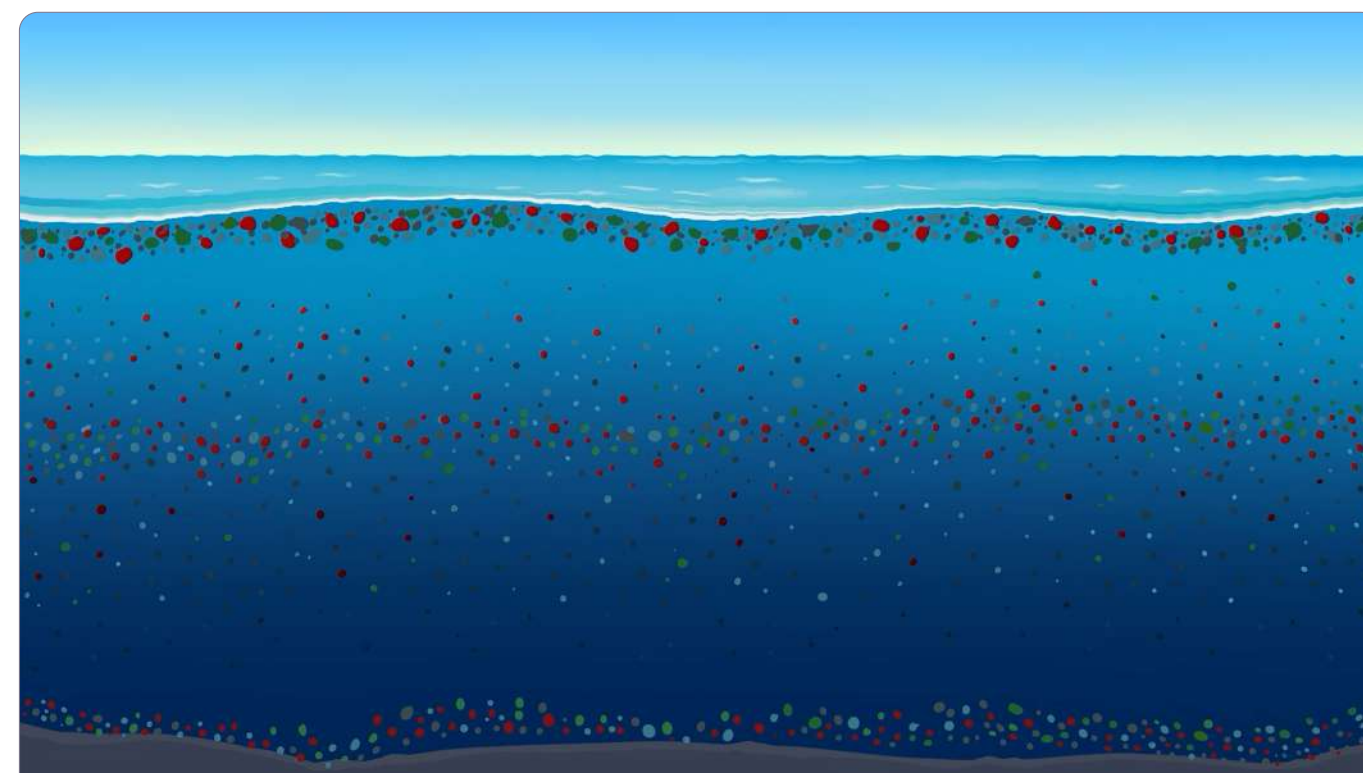


Slika 10. Shematski prikaz nesavršenih analitičkih metoda hvatanja mikro- i nanoplastike

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>



Slika 11. Shematski prikaz površinskih i pridnenih slojeva onečišćenja mikro- i nanoplastikom

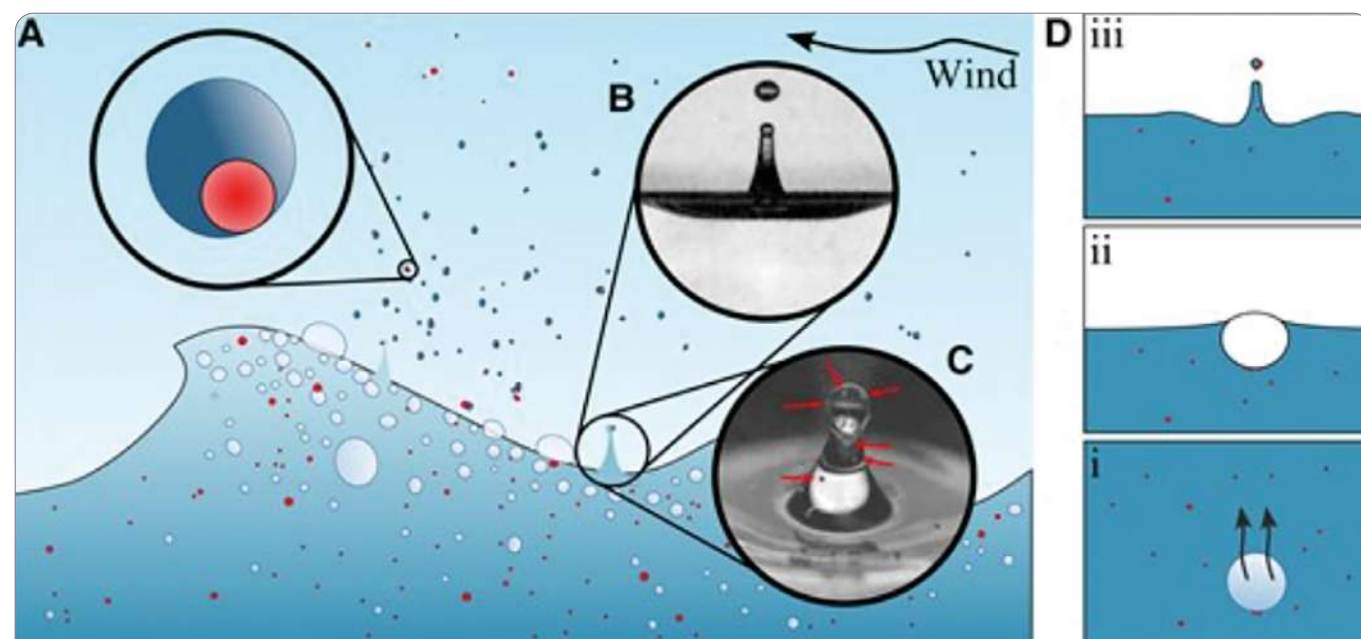


Slika 12. Shematski prikaz lokacije mikro- i nanoplastike u površinskim, pridnenim i termoklinskim slojevima

Osim onečišćenja površinskog i pridnenog sloja (vidi Sliku 11), koncentracije mikro- i nanoplastike značajno se povećavaju u termoklinskoj zoni²⁹ (Slika 12) – sloju vode karakteriziranom oštrom promjenom temperature. Strmi gradijent gustoće u ovom sloju uzrokuje da plastične čestice budu zarobljene na dulja razdoblja. Ocean se može vizualizirati kao slojevita torta, gdje svaki sloj ima jedinstvenu temperaturu i gustoću, a mikroplastika se akumulira na granicama između tih slojeva.

Nadalje, mikroplastika se raspršuje diljem oceana putem živih organizama koji je unose, probavljaju i izlučuju.³⁰

Širenje MNP u okolišu



Slika 13. Skica relevantnih procesa izbacivanja mikroplastike iz oceana. A) Mikroplastika (crvena/tamnija boja) u oceanu transportira se u atmosferu kapljicama morske izmaglice. B) Pucanje mjehurića stvara male kapljice ili aerosole poput mlaznih kapljica. C) Mikroplastika prisutna u tekućini može biti ponesena u stvorene mlazne kapljice. Strelice pokazuju na komadiće mikroplastike od 100 µm. Stvorene kapljice vjetar može podići i odnijeti mikroplastični materijal u atmosferu. Tekućina na kraju isparava, ostavljajući za sobom komadiće mikroplastike. D) Relevantni fizikalni procesi za izbacivanje mikroplastike pucanjem mjehurića počinju skupljanjem čestica dok se mjehurić diže (Di). Nakon dolaska na površinu (Dii), mjehurić se na kraju smjesti u svoj ravnotežni oblik koji – nakon pucanja – fokusira kapilarne valove na svojoj bazi kako bi stvorio mlazne kapljice (Diii) koje nose mikroplastični materijal.

Izvor: 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>

²⁹Tikhonova, 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>

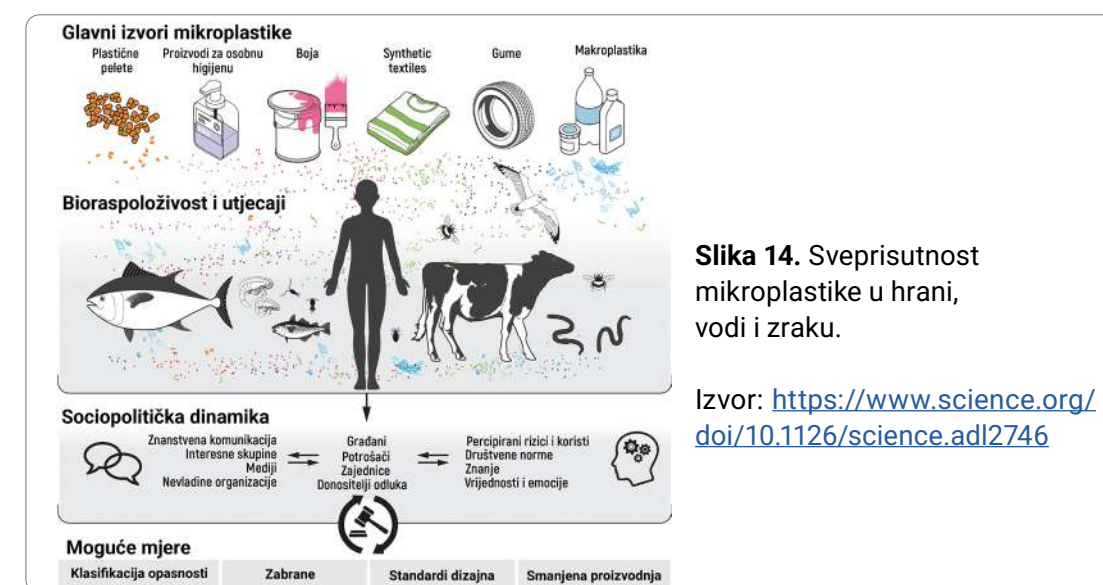
³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. Nat Commun 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Kada voda isparava³¹, mikroplastika se izdiže u atmosferu s površine oceana³². Dodatno, kombinacija morskog prskanja, vjetra i valova stvara mjehuriće zraka u vodi koji sadrže mikroplastiku. Kada mjehurići puknu, čestice se oslobađaju u atmosferu (Slika 13). Svake godine oko 136.000 tona mikroplastike³³ transportira se do obalnih područja samo morskim povjetarcem. Do 25 milijuna metričkih tona mikro- i nanoplastike godišnje se transportira tisućama kilometara morskim zrakom, prskanjem, snijegom i maglom, prelazeći države, kontinente i oceane.

66

“Zrak je mnogo dinamičniji medij od vode,” kaže koautorica dr. Melanie Bergmann, biologinja s Instituta Alfred Wegener u Njemačkoj. **“Kao rezultat toga, mikro- i nanoplastika može mnogo brže prodrijeti u ona područja našeg planeta koja su najudaljenija i još uvijek uglavnom netaknuta.”** Jednom tamo, čestice mogu utjecati na površinsku klimu i zdravlje lokalnih ekosustava³⁴.

Mikroplastika je pronađena na raznim mjestima – od površine mora do dubokomorskih sedimenata, od poljoprivrednih zemljišta do naših najviših planina, kao i u morskom ledu, jezerima i rijekama. Otkrivena je u 1300 vodenih i kopnenih vrsta, od beskralježnjaka u bazi prehranbenog lanca do vrhunskih predatora, s dokazima utjecaja na svim razinama biološke organizacije – od stanične do razine ekosustava. Mikroplastika je široko rasprostranjena u hrani koju jedemo, vodi koju pijemo i zraku koji udišemo (Slika 14). Pronađena je u mnogim tkivima i organima ljudskog tijela, a dokazi o njezinim potencijalnim učincima počinju se pojavljivati³⁵.



Slika 14. Sveprisutnost mikroplastike u hrani, vodi i zraku.

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

³¹Shaw, 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>

³²Deike, 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>

³³Allen, 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>

³⁴Alfred 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>

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, ead12746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Dakle, kretanje mikroplastike u udaljene, pa čak i polarne regije može biti posljedica kombinacije atmosferskih i morskih putova. Stoga je važno razumjeti interakcije između atmosfere i oceana kako bi se utvrdilo koje se veličine čestice transportiraju i u kojim količinama.

Na primjer, skupina istraživača nedavno je otkrila plastične granule s hidrofilnim (koje privlače vodu) površinama³⁶ u oblacima na vrhovima planina u Japanu. Zatim su analizirali uzorke i zaključili da oblaci na nižim nadmorskim visinama i gušći oblaci sadrže veće količine mikroplastike. Prisutnost polimera koji djeluju kao jezgre kondenzacije **igra ključnu ulogu u brzom stvaranju oblaka**, što u konačnici može utjecati na ukupnu klimu³⁶.

Plastične čestice u oblacima pomažu zadržati više vode, odgađajući padaline. Kada kiša konačno padne, postaje intenzivnija, jer se više vode nakupilo u oblacima. Štoviše, mikroplastika izložena ultraljubičastom svjetlu i filtriranoj vodi iz oblaka ima grublju površinu, što potiče nakupljanje više olova, žive i skupina koje sadrže kisik³⁷ na njihovoj površini.

Atmosfera prvenstveno transportira male čestice mikroplastike, čineći je mnogo bržim putem transporta koji može dovesti do značajne depozicije u širokom rasponu ekosustava. Podaci istraživanja pokazuju da šume djeluju kao barijere za mikroplastiku koju nosi vjetar. Lišće, grane i debla zadržavaju čestice mikroplastike koje se talože na njihovim površinama. To uzrokuje da čestice mikroplastike nošene vjetrom i oborinama ostanu na biljkama ili se talože na tlu.

Ograničeni protok zraka ispod guste krošnje šume potiče stalnu akumulaciju tih čestica unutar šumskih područja. Lišće krošnje služi kao dugoročni spremnik za mikroplastiku u zraku³⁸. Studije su pokazale da je od jeseni 2017. do ljeta 2019. godine više od 1000 tona plastičnih čestica palo s oborinama diljem 11 nacionalnih parkova i rezervata na zapadu Sjedinjenih Država. Ova količina dovoljna je za proizvodnju 120 milijuna plastičnih boca³⁹. Slična situacija opažena je i u drugim regijama svijeta. Na primjer, šume hrasta *Quercus serrata* u Japanu, koje pokrivaju površinu od oko 32.500 km², godišnje zarobe otprilike 420 milijuna čestica mikroplastike iz zraka⁴⁰ u svojim krošnjama.

Za razliku od šuma, u gradovima je bolja depozicija mikro- i nanoplastike zbog bolje ventilacije i prisutnosti težih čestica iz ispušnih plinova vozila i industrijskog smoga. Danas je zrak u šumama zasićeniji nanoplastikom nego u megagradovima.

³⁶Wang, 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>

³⁷Busse, 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>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. 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>

³⁹Brahney, 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>

⁴⁰Sunaga, 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>

Svijet se promijenio! Sada, kada se ljudi kupaju u oceanu, sunčaju na plaži, trče duž morske obale ili u parku, ili šetaju šumom radi zdravlja, zapravo izlažu svoja tijela dodatnoj kontaminaciji mikroplastikom. Mikroplastika iz Afrike i Sjeverne Amerike pronađena je u udaljenim i naizgled netaknutim mjestima, poput francuskih Pireneja. To ukazuje na globalnu distribuciju mikroplastike koju zračne struje i oborine prenose na velike udaljenosti.

Mikro- i nanoplastika ulaze u urbana vodena tijela putem oborinskih otjecanja, industrijskih ispuštanja i kišnice koja skuplja čestice iz atmosfere. Na primjer, jedno pranje sintetičkih tkanina može otpustiti do 1,5 milijuna čestica mikroplastike⁴¹ u otpadnu vodu. Jednom u otpadnim vodama, te čestice na kraju ulaze u rijeke i oceane gdje ih unose ribe i drugi vodeni organizmi. Analizirajući otpad pronađen u rijekama i okolnim krajolicima, istraživači su procijenili da samo 10 riječnih sustava transportira između 88 % i 95 % plastike koja iz rijeka teče u ocean⁴².

U drugoj studiji, istraživači su ponovno procijenili općeprihvaćene pretpostavke o plastici koja se transportira rijekama i zaključili da stvarna količina plastičnog otpada u rijekama može biti 90 % veća nego što se ranije mislilo⁴³.

Plastika je također prisutna u većini velikih svjetskih jezera. Zapravo, gustoća plastičnog otpada u jezerima može čak premašiti onu u najvećim oceanskim nakupinama smeća, pa čak i jezera smještena u netaknutim područjima sadrže značajne količine plastičnog otpada. To je potvrdila velika međunarodna studija koju su vodile Barbara Leoni i Veronica Nava sa Sveučilišta Milano-Bicocca⁴⁴.

Prema izvješću Programa Ujedinjenih naroda za okoliš (UNEP) iz 2021. godine, mikroplastika je pronađena u svim proučavanim slatkovodnim tijelima, uključujući rijeke, jezera i rezervoare⁴⁵. Na primjer, istraživači su otkrili da gotovo 10.000 metričkih tona, ili 22 milijuna funti, plastičnog otpada ulazi u Velika jezera iz Sjedinjenih Država i Kanade svake godine⁴⁶.

Naposljetku, mikroplastika se vraća ljudima konzumacijom ribe i morskih plodova.

Talijanski znanstvenici također su otkrili da voće i povrće sadrže milijune čestica mikroplastike. Visoke koncentracije pronađene su u jabukama, kruškama, mrkvi, krumpiru, salati i brokuli. Značajno je da voće sadrži 2–3 puta više čestica mikroplastike od povrća, u rasponu od 52.000 čestica po gramu u salati do 223.000 čestica po gramu u jabukama⁴⁷.

⁴¹De 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>

⁴²Schmidt, 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>

⁴³Valero, 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>

⁴⁴Nava, 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>

⁴⁵United 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>

⁴⁶Hoffman, 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>

⁴⁷Oliveri 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>

Studija je otkrila da 81 posto od 159 uzoraka vode iz slavine diljem svijeta sadrži mikroplastiku⁴⁸. Druga istraživanja podržavaju ove nalaze, također detektirajući čestice mikroplastike u flaširanoj mineralnoj vodi. Zanimljivo je da je broj čestica bio otprilike isti u staklenim i polietilen tereftalat (PET) bocama, s koncentracijama koje su dosezale 6.292 čestice po litri^{49, 50, 51}.

Istraživači sa Sveučilišta Newcastle u Australiji proveli su studiju⁵² kako bi procijenili koliko plastike prosječan čovjek konzumira. Rezultati studije pokazali su da čovjek godišnje unese oko 250 grama plastike, što je ekvivalentno 50 plastičnih vrećica⁵³.

⁴⁸Kosuth, 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>

⁴⁹Schymanski, 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>

⁵⁰Oßmann, 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>

⁵¹Winiarska, 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>

⁵²University 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>

⁵³Senathirajah, 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>

OKOLIŠNE I KLIMATSKE POSLJEDICE ONEČIŠĆENJA MIKRO- I NANOPLASTIKOM

Kako MNP narušava ekosustave na molekularnoj razini

Plastični otpad pronađen je posvuda — od oceana i rijeka do tla, zraka, pa čak i ledenjaka.⁵⁴ Dugoročna promatranja potvrđuju da se, za razliku od organske biljne i životinjske tvari, plastika ne podvrgava aktivnoj prirodnoj razgradnji. Ona opstaje u okolišu bez sudjelovanja u prirodnim ciklusima biorazgradnje.⁵⁵ Dizajnirana da se odupre razgradnji, plastika je postala trajni dio globalnog ekosustava. Ono što je nekada hvaljeno kao tehnološki trijumf, sada je postalo izvor značajnih poremećaja u okolišu.

U proizvodnji plastike koristi se više od 13 000 kemijskih tvari. Od toga, preko 3200, uključujući monomere, aditive i pomoćna sredstva za obradu, potencijalno su opasne zbog svojih toksičnih svojstava.⁵⁶

Utjecaj MNP na svojstva tla i degradaciju ekosustava

Studije pokazuju da zagađenje mikroplastikom u kopnenim ekosustavima, posebno u poljoprivrednim tlima, može premašiti razine u oceanskim okolišima 4 do 23 puta,⁵⁷ što ukazuje na značajnu akumulaciju plastike u tlu. Plastika ulazi u tlo različitim putovima, uključujući postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, prakse malčiranja, atmosfersku depoziciju i svakodnevne potrošačke proizvode. Široka uporaba plastičnih predmeta za jednokratnu upotrebu usko je povezana s ozbiljnom kontaminacijom tla mikroplastikom (MP) i nanoplastikom (NP). I prirodni i ljudski čimbenici omogućuju⁵⁸ tim sitnim plastičnim česticama da se infiltriraju u slojeve tla, narušavajući kritične okolišne procese.⁵⁹

Promatranja potvrđuju štetne učinke mikroplastike na ekosustave, utječući na strukturu i funkciju mikroorganizama, biljaka i tla (Slika 15).

⁵⁴Hale, 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>

⁵⁵Huang, 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>

⁵⁶United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023).

<https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

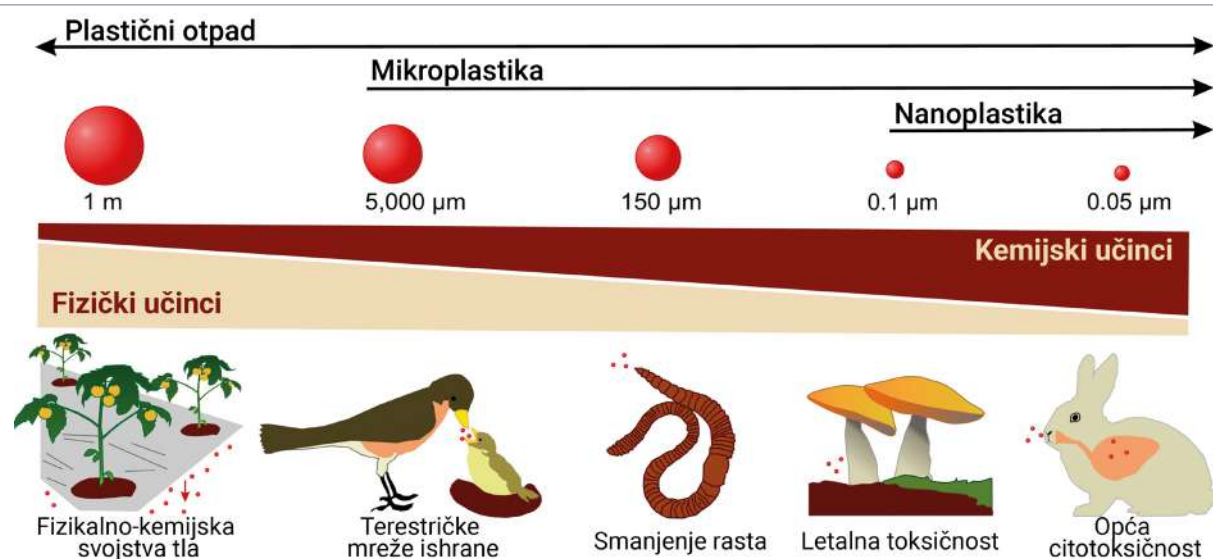
⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingrassia, 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>

⁵⁹Shafea, 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>

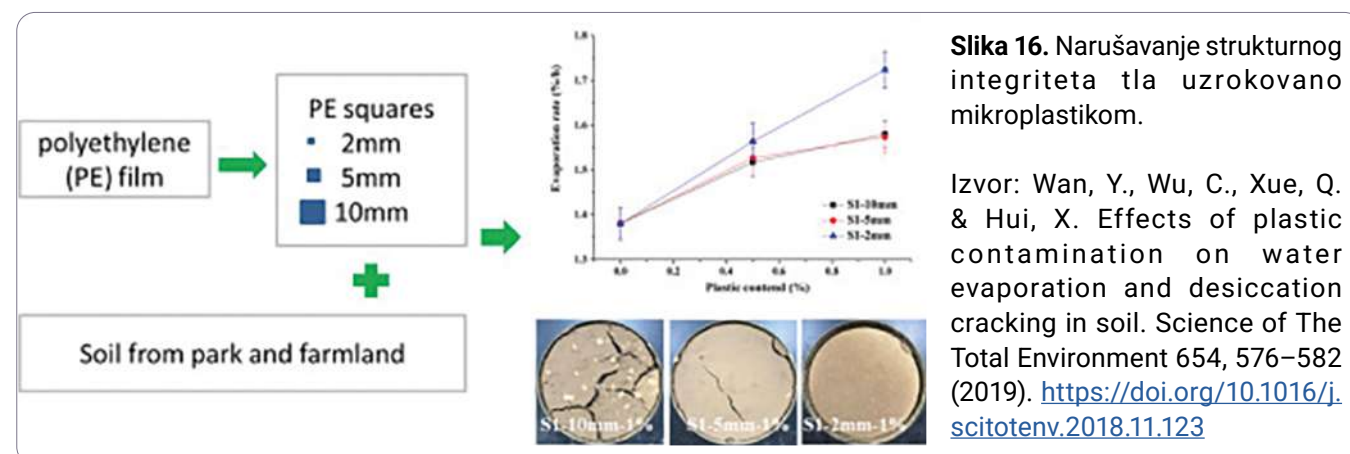


Slika 15. Mikroplastika kao okidač za kombinirane fizičke i kemijske učinke.

Biogeokemija tla povezana je s poljoprivrednim malčiranjem (Steinmetz et al., 2016), unosom kod kopnenih i kontinentalnih ptica (Gil-Delgado et al., 2017; Holland et al., 2016; Zhao et al., 2016), smanjenjem rasta gujavica (Lwanga et al., 2016), letalnom toksičnošću za gljive (Miyazaki et al., 2014, 2015; Nomura et al., 2016), upalom pluća sisavaca (Hamoir et al., 2003; Oberdorster, 2000; Schmid & Stoeger, 2016) i širokom citotoksičnošću (Forte et al., 2016; Kato et al., 2003) nanoplastike.

Prilagođeno iz: de Souza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig MC. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Change Biol.* 2018; 24: 1405–1416). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

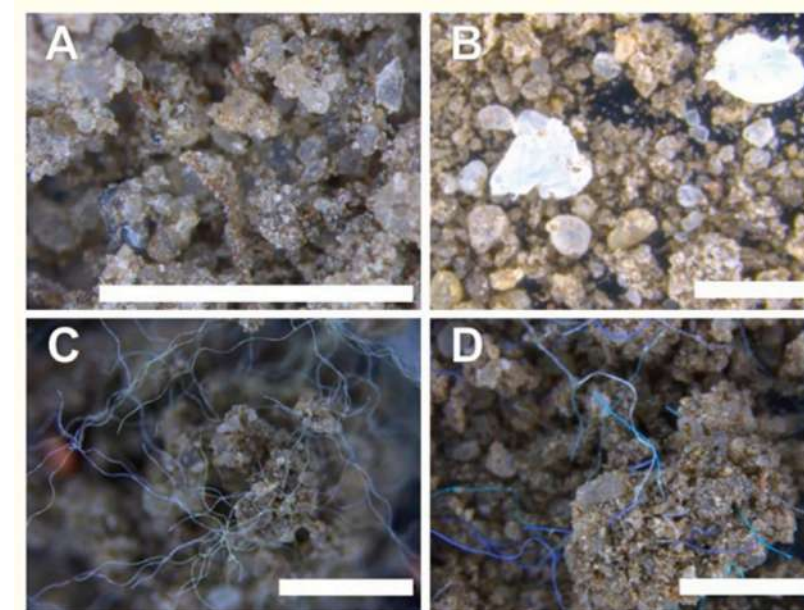
Istraživanje koje je provela Kineska akademija znanosti otkrilo je da prisutnost čestica plastične folije različitih veličina u tlu značajno povećava brzinu isparavanja vode. Učinak je posebno izražen s dodatkom čestica od 2 milimetra. Veći plastični fragmenti (5–10 mm) uzrokuju pucanje tla, narušavajući njegovu strukturnu cjelovitost. Ovi nalazi sugeriraju da zagađenje plastikom ometa vodeni ciklus u tlima, što može pogoršati nedostatak vode u tlu i utjecati na vertikalni transport zagađivača⁶⁰ (Slike 16–17).



Slika 16. Narušavanje strukturnog integriteta tla uzrokovano mikroplastikom.

Izvor: 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>

⁶⁰Wan, 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>



Slika 17. Integracija mikroplastičnih čestica u biofizičko okruženje tla.

Struktura kontrolnog tla (A) nije se vizualno razlikovala pod stereomikroskopom od tla kontaminiranog poliamidnim zrcima (SI S1D). Polietilenski fragmenti (B) te poliesterska (C) ili poliakrilna vlakna (D) rezultirali su vizualno očitim značajkama tla. Bijela traka na svakoj ploči predstavlja veličinu od 1 mm.

Izvor: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environmental Science & Technology*, 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Studije također potvrđuju štetne učinke plastike na biotu tla – raznoliku zajednicu koja uključuje mikroorganizme (kao što su bakterije i gljive) i faunu (i mikroskopske i makroskopske životinje). Ti organizmi djeluju međusobno, s korijenjem biljaka i s okolnim okolišem kako bi formirali hranidbene lance tla (Slika 18), koji su ključni za kruženje hranjivih tvari i zdravlje biljaka.

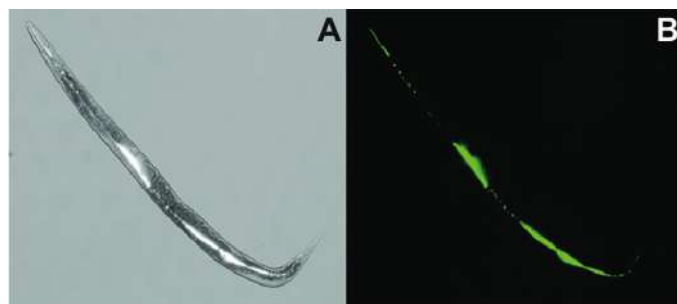


Slika 18. Shematski prikaz formiranja hranidbenog lanca tla.

Источник: 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>

Različite vrste kopnene biote služe kao bioindikatori onečišćenja mikroplastikom. Svi analizirani uzorci sadržavali su čestice mikroplastike i potencijalno toksične elemente (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) u različitim koncentracijama, što ukazuje⁶¹ na moguću toksičnost mikroplastike.⁶²

Istraživanja su pokazala da polistirenske kuglice mogu unijeti u tlo nematode *Caenorhabditis elegans* (Slika 19); to također sugerira da se polistirenske čestice mogu akumulirati unutar hranidbenog lanca tla.⁶³



Slika 19. Slike odraslog crva *Caenorhabditis elegans* pod svjetlim poljem (A) i fluorescencijom (B) koji je akumulirao mikrosfere žuto-zelene fluorescencije od 0,5 µm tijekom 15 minuta na 20°. Fotografije su snimljene pri povećanju od ×100.

Izvor: 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>

Biota tla je više od samo “biološkog motora Zemlje”: to je multifunkcionalni sustav o kojem ovise svi kopneni ekosustavi. Njegova uloga u održavanju života na planetu usporediva je s ulogom oceana i atmosfere, što potvrđuju istraživanja u znanosti o tlu, ekologiji i klimatskim studijama. Bilo kakav poremećaj uzrokovan toksičnošću stoga može utjecati na brojne kritične procese unutar tla i njegovog hranidbenog lanca, što dovodi do ekološke neravnoteže.⁶⁴

Nalazi pokazuju da se mikroplastika može brzo adsorbirati na površine tla zbog svoje male veličine, velike specifične površine, jake hidrofnosti i otpornosti na biorazgradnju.⁶⁵ Ova svojstva olakšavaju lagan unos i akumulaciju u organizmima, predstavljajući potencijalnu prijetnju zdravlju ljudi. Ovaj proces nije ograničen na sloj tla: proteže se na biljke gdje mikroplastika nastavlja iskazivati štetne učinke.

MNP u prehrambenim proizvodima

Antropogeni zagađivači mogu značajno utjecati na ekosustave, posebno kada uđu u biljne sustave. Potvrđeno je da se mikroplastika apsorbira i translocira u različite dijelove biljaka.

Istraživanja pokazuju da se mikroplastika akumulira u biljnim sustavima putem višestrukih putova, vršeći štetne učinke na vegetaciju, poljoprivredne usjeve i prehrambene proizvode.

⁶¹Ng, 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>

⁶²Al 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>

⁶³Kiyama, 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>

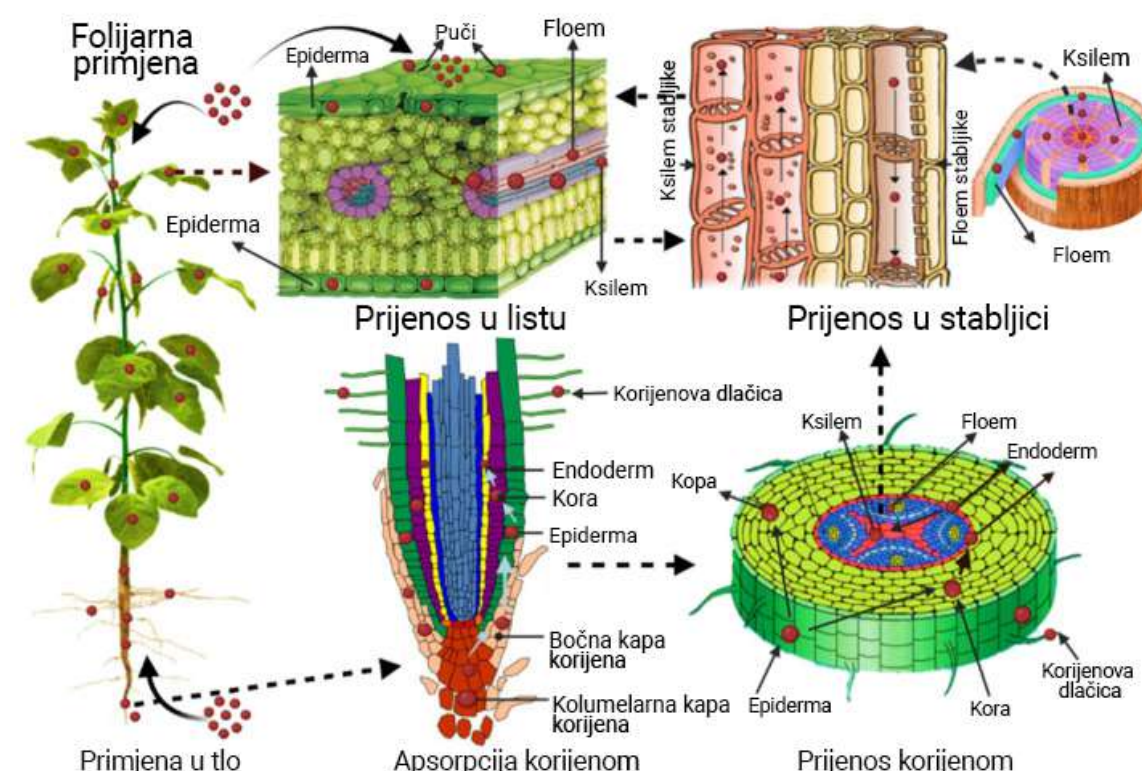
⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, 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>

Zbog svoje iznimno sitne veličine, nanoplastika može izravno prodirati u biljno tkivo.⁶⁶ Biljke apsorbiraju nanoplastiku iz hranjivog medija, nakon čega se ona transportira u nadzemne dijelove putem ksilema – vaskularnog sustava odgovornog za transport vode i hranjivih tvari od korijena do stabljike i lišća.

Mikroplastika koja se taloži na lišću može ući kroz stome i zatim se može kretati prema dolje do korijena putem vaskularnih snopova. I mikro- i nanoplastika pokazuju toksične učinke na fiziološke procese i enzimsku aktivnost poljoprivrednih biljaka (Slika 20).⁶⁷



Slika 20. Mehhanizmi unosa mikro- i nanoplastike u biljkama.

Mehanizam apsorpcije plastike od strane biljaka kada uđe u tlo putem apsorpcije korijenjem; transportni putovi od korijena do stabljike i transport od stabljike do lišća i plodova. Folijarna primjena otkriva ulazak plastike u lisne stome i kasniji prijenos na druge dijelove biljke. Zakrivljena strelica označava dostupnost plastike biljci, a isprekidana strelica označava transport unutar biljke.

Izvor: 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>

⁶⁶Hasan, 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>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Biljni sustav za transport vode može brzo prenijeti nanoplastiku u stabljike, lišće i moguće plodove. Istraživanja na biljkama duhana (*Nicotiana tabacum*) pokazuju da, iako nanoplastika veličine 100 nanometara ne ulazi u biljne stanice, manje čestice – veličine 20 do 40 nanometara – uspješno se apsorbiraju.⁶⁸

Dodatno, neke plastične čestice nose površinske naboje, što može pojačati njihovu adsorpciju (pripijanje) na korijene biljaka putem elektrostatičke privlačnosti. Ta interakcija može utjecati na imobilizaciju hranjivih tvari ili ometati fotosintezu.⁶⁹ Negativno nabijene mikroplastike s velikom vjerojatnošću će ući u koru korijena.⁷⁰

U agroekosustavima jako kontaminiranim tim česticama, studije izvješćuju o zaustavljenom rastu biljaka,⁷¹ kao i o kratkoročnim i prolaznim učincima na klijavost sjemena i razvoj korijena.⁷²

Studije potvrđuju prisutnost mikroplastike u komercijalno dostupnom medu, proizvedenom i industrijski i lokalno. Daljnja analiza otkrila je široku prisutnost mikroplastike u cvatovima različitih biljnih vrsta.^{73, 74}

Posljednjih godina stanje globalne populacije pčela bilježi oštar pad. Istraživanja sugeriraju da jedan od podcijenjenih uzročnika može biti kontaminacija okoliša mikro- i nanoplastikom. Studije pokazuju da pčele "skupljaju" mikroplastiku iz zraka, vode, biljaka i tla, a zatim je prenose natrag u svoje košnice. Pčele skupljaju nektar i pelud s cvijeća, te vodu iz prirodnih izvora – od kojih svi već sadrže čestice mikroplastike. Fine dlačice koje prekrivaju tijelo pčela djeluju kao prirodne "zamke" za te čestice. Plastične čestice se također nakupljaju na njihovim nogama, posebno u zglobovima i između segmenata, jer dolaze u kontakt s površinama biljaka, tlom, vodom, pa čak i sa samom košnicom.



"Pčela medarica vrlo je dobar biološki indikator kontaminacije okoliša jer je sveprisutna, prekrivena dlačicama koje hvataju zagađivače i čestice prisutne u zraku, osjetljiva na zagađivače te ima veliku pokretljivost i širok raspon leta, među ostalim".⁷⁵

⁶⁸Bandmann, 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>

⁶⁹Lian, 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>

⁷⁰Li, 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>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

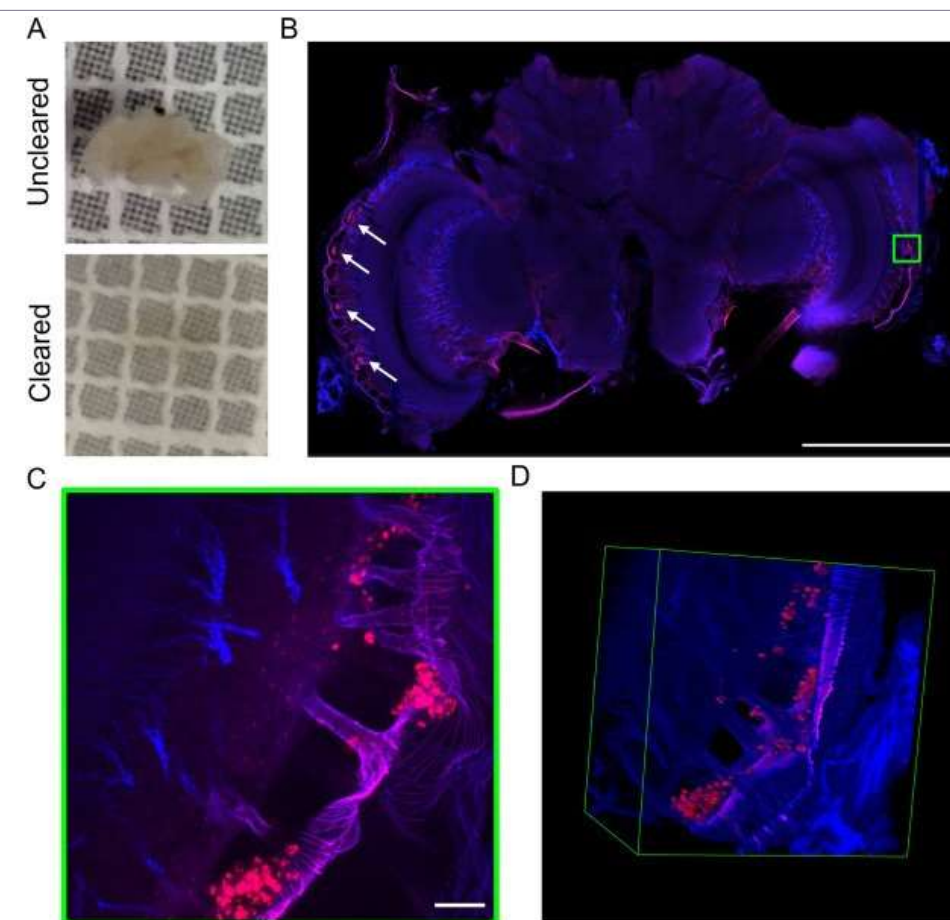
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, 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>

⁷⁴Basaran, 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>

⁷⁵Alma, 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>

Mikro- i nanoplastika također ulaze u tijelo pčele kroz kutikulu – vanjski sloj njenog egzoskeleta. Jednom unutra, plastične čestice stižu do mozga za samo tri dana, uzrokujući oštećenja pamćenja, prostorne orijentacije i kognitivnih funkcija koje su ključne za traženje hrane i navigaciju⁷⁶. Utjecaj mikroplastike na mozak također smanjuje sposobnost pčele da obnovi pamćenje. To je posebno zabrinjavajuće, jer se pčele kreću koristeći poznate orijentire u okolišu. Nanoplastika u mozgu pčele dodatno narušava njihovu sposobnost pamćenja izvora nektara, smanjuje osjetljivost na cvjetne mirise i narušava njihovu sposobnost povratka u košnicu. Takve kognitivne disfunkcije izravno smanjuju učinkovitost oprašivanja i mogu destabilizirati cijelu koloniju⁷⁶.



Slika 21. Detekcija značajnih količina mikroplastike u mozgu pčele medarice.

A) Fotografije seciranog mozga prije i poslije čišćenja iDISCO metodom.

B) Pojedinačna ravnina (dubina ~ 200 μm) 3D rekonstrukcije dobivene TPFM metodom (dvofotonska fluorescentna mikroskopija) cijelog mozga s objektivom 10 $\times$, rezolucije 0,51 $\times$ 0,51 $\times$ 2 μm^3 . Plavo = autofluorescentni signal tkiva; crveno = crvena fluorescentna mikroplastika (označena bijelim strelicama). Skala = 1000 μm .

C) Inset visoke rezolucije zelene regije interesa u B snimljen objektivom 63 $\times$. Slika je projekcija maksimalnog intenziteta snopa dubine 150 μm snimljenog s rezolucijom od 0,17 $\times$ 0,17 $\times$ 1 μm^3 . Skala = 20 μm .

D) 3D prikaz snopa u C. Dimenzije = 170 $\times$ 170 $\times$ 150 μm^3 .

Izvor: 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>

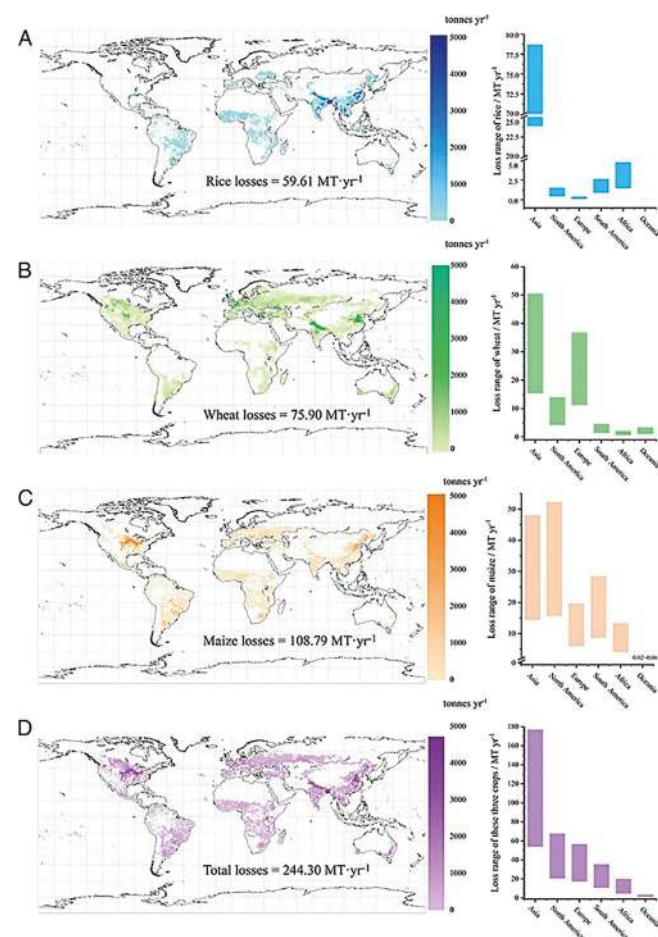
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Jednom unutar tijela pčele, nanoplastika također uzrokuje oštećenje crijeva, slabi imunološki sustav i povećava osjetljivost na virusne infekcije — čimbenike koji mogu dovesti do smrtnosti pčela čak i u odsutnosti akutne toksičnosti plastike^{75,77}. Osim toga, plastični fragmenti akumuliraju se ne samo u samim pčelama, već i u medu, vosku i ličinkama, stvarajući zatvoreni ciklus plastične kontaminacije unutar košnice.⁷⁵

Ovo nosi potencijalno ozbiljne implikacije ne samo za populacije pčela, već i za globalnu sigurnost hrane. Pčele su ključni oparašivači, a njihov pad izravno utječe na poljoprivredne prinose.

Oštećenje mozga, smanjena tjelesna masa i potisnuti imunitet dovode do smanjenja aktivnosti oparašivanja, što upozoravaju istraživači, može pogoršati krizu u globalnoj proizvodnji hrane⁷⁷. Pčele funkcioniraju kao aktivni bioindikator zagađenja okoliša, a mikroplastika je već otkrivena u značajnim količinama u medu, bez obzira na zemlju porijekla.⁷⁸

Izloženost mikroplastici smanjuje ukupni sadržaj klorofila za 5,63–17,42 %, što dovodi do globalnih gubitaka u proizvodnji riže, pšenice i kukuruza. Ti gubici čine 4,11–13,52 % ukupnog godišnjeg globalnog prinosa ovih osnovnih usjeva — utjecaj sa ozbiljnim implikacijama za sigurnost hrane (Slika 22).⁷⁹



Slika 22. Globalne karte godišnjih gubitaka proizvodnje za tri glavne prehrambene kulture: (A) riža; (B) pšenica; (C) kukuruz; (D) sve tri kulture zajedno.

Karte na lijevoj strani prikazuju medijan predviđenih godišnjih gubitaka prinosa zbog onečišćenja mikroplastikom, dok stupčasti grafikoni na desnoj strani ilustriraju raspon godišnjih gubitaka proizvodnje za svaku odgovarajuću kulturu. Podaci o proizvodnji usjeva (verzija 2020.) preuzeti su iz baze podataka Spatial Production Allocation Model (SPAM).

Izvor: Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *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. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Šume kao akumulatori MNP

Analize su otkrile prisutnost nanoplastike u korijenju, stabljikama, lišću i iglicama pri svim ispitanim koncentracijama i vremenskim intervalima. Koncentracije nanoplastike u korijenju premašile su one u nadzemnim dijelovima za najmanje faktor 10.

Onečišćenje plastikom negativno utječe na funkcioniranje i zim zelenih četinjača i listopadnih vrsta drveća inducirajući oksidativni stres i smanjujući fotosintetsku učinkovitost, što potencijalno dovodi do inhibicije rasta ili čak smrti biljke. Studije ukazuju da poremećaji u fotosintetskim fazama uzrokuju akumulaciju viška svjetlosne energije. Kada se ta energija ne pretvori u kemijsku energiju, to dovodi do foto-oksidativnog stresa i oštećenja tkiva. Kako bi se to ublažilo, biljke aktiviraju fotoprotektivne mehanizme, u kojima karotenoidi rasipaju višak energije kao toplinu.⁸⁰

Narušavanjem fotosinteze, induciranjem oksidativnog stresa i smanjenjem fiziološke aktivnosti biljaka, onečišćenje plastikom povećava ranjivost ekosustava na klimatske promjene. Ovi nalazi naglašavaju širok utjecaj plastične kontaminacije na biljne zajednice i, posljedično, izazivaju zabrinutost zbog njezinih posljedica za kopnene životinje koje ovise o tim ekosustavima.

Kako nanoplastika uništava faunu

Brojne studije pokazuju da akumulacija mikro- i nanoplastike u okolišu, uključujući i bilje, utječe na stočarsku proizvodnju⁸¹ narušavajući hranidbene lance i utječući na zdravlje životinja. Promatranja s mliječne farme u Italiji pokazala su da su svi uzorci sijena ljulja sadržavali mikroplastiku⁸². Studija provedena u Indiji otkrila je kontaminaciju mikroplastikom polietilen tereftalata u 100% uzoraka stočne hrane mliječnih goveda, s koncentracijama u rasponu od 89 do 326 g/kg.⁸³

⁸⁰Murazzi, 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>

⁸¹Borreani, 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>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzoniti, 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>

⁸³Maganti, 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>

Analiza je potvrdila prisutnost mikroplastike u folikularnoj tekućini goveda,⁸⁴ u mlijeku,⁸⁵ izmetu ovaca,⁸⁶ govedini i krvi,⁸⁷ ukazujući na značajne utjecaje na preživače. Prema dostupnim podacima, 50–60 % stranih predmeta pronađenih u zaklanim životinjama,⁸⁸ - uključujući male preživače poput koza i ovaca — sastojalo se od plastičnih materijala. Osim toga, mikroplastika je otkrivena u unutarnjim tkivima gradskih pasa i mačaka,⁸⁹ u crijevima domaćih pataka,⁹⁰ i u plućnom tkivu svinja.⁹¹

Istraživački nalazi potvrđuju da mikroplastika šteti životinjama ne samo izravno, već i putem aditiva korištenih u njihovoj proizvodnji te onečišćujućih tvari koje apsorbiraju iz okolnog okoliša, uzrokujući štetu različite težine.⁹² Promatranja ukazuju da mikroplastika izaziva toksične učinke kod životinja, uključujući oksidativni stres, oštećenje crijeva, imunotoksičnost, kao i reproduktivnu i neurotoksičnost (Slika 23).⁹³ Štoviše, mikroplastika djeluje kao prijenosnik za zagađivače poput teških metala, antibiotika, postojanih organskih spojeva i pesticida, dodatno pojačavajući potencijalne rizike za ekosustave, zdravlje životinja i zdravlje ljudi.⁹⁴

⁸⁴Grechi, 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>

⁸⁵Da 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>

⁸⁶Beriot, 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>

⁸⁷van 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/VOF-2022-JUL-PLASTICSUP.pdf>

⁸⁸Galyon, 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>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

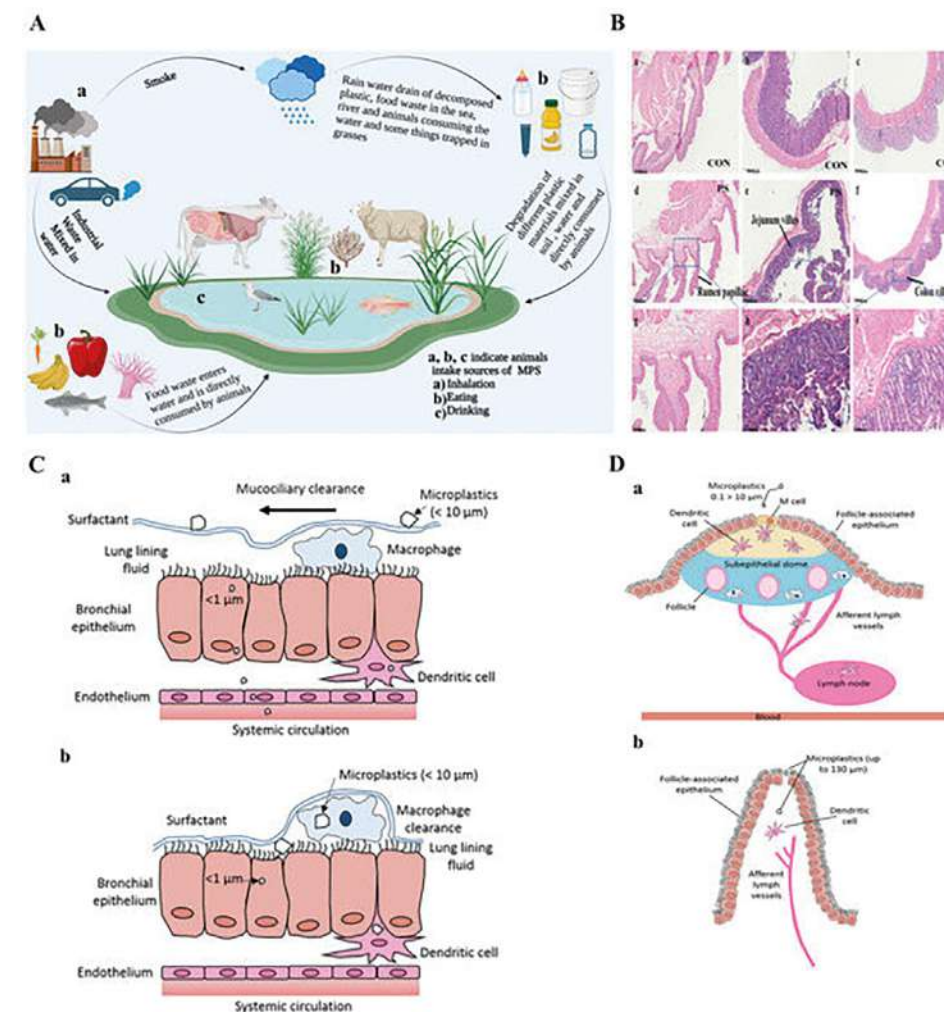
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, 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>

⁹²Brennecke, 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>

⁹³Su, 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>

⁹⁴Campanale, 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>



Slika 23. Shematski prikaz putova unosa mikroplastike kod životinja i učinaka mikroplastike na gastrointestinalni trakt.

(A) Putovi unosa mikroplastike kod životinja.

(B) Status gastrointestinalnog trakta nakon izlaganja česticama polistirena (PS) prije i poslije izlaganja:

Slike buraga (a), jejunuma (b) i debelog crijeva (c) obojene hematoksilinom i eozinom (H&E) u kontrolnoj skupini (CG);

(d) H&E slika buraga s česticama polistirena male veličine (mali PS);

(e) H&E slika jejunuma s česticama polistirena velike veličine (veliki PS);

(f) H&E slika debelog crijeva s česticama polistirena velike veličine (veliki PS);

i (g–i) su lokalno uvećane slike koje odgovaraju (d–f).

(C) Potencijalni mehanizmi unosa i eliminacije mikroplastike ($0,1 > 10 \mu\text{m}$) u plućima:

(a) Postoji smanjena mogućnost da plućne tekućine (surfaktanti i sluz) uzrokuju pomicanje mikroplastike u gornjim dišnim putovima (središnje pluće) gdje je plućna membrana deblja. Cilirana sluznica s česticama $>1 \mu\text{m}$ je pročišćena. Čestice $<1 \mu\text{m}$ mogu se unijeti kroz epitel.

(b) Ako aerodinamički promjer mikroplastike dopušta taloženje duboko u plućima, ona može prodrijeti kroz tanju plućnu tekućinu i doći u kontakt s epitelom, metastazirajući difuzijom ili aktivnim staničnim unosom.

(D) Predviđeni putovi unosa mikroplastike iz gastrointestinalnog trakta (GIT):

(a) nos mikroplastike iz lumena GIT-a pomoću M stanica Peyerovih limfnih čvorova putem endocitoze ($0,1 > 10 \mu\text{m}$). M stanice uzorkuju i transportiraju čestice iz lumena crijeva u limfoidno tkivo sluznice.

(b) Mikroplastika se apsorbira iz lumena GIT-a paracelularnom apsorpcijom. Ne-razgradive čestice, kao što je mikroplastika, mogu se mehanički utisnuti u temeljno tkivo kroz labave veze u jednoslojnom gornjem sloju. Dendritične stanice su sposobne proždirati te čestice, transportirajući ih u limfne žile i vene ispod njih. Mogu se distribuirati u sekundarna tkiva, uključujući jetru, mišiće i mozak.

Izvor: 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>

Promatranja pokazuju da divlje životinje često zamjenjuju plastični otpad za hranu, što dovodi do njegove akumulacije u njihovim crijevima. U Zimbabveu⁹⁵ i Šri Lanki⁹⁶, slonovi koji su se hranili na otvorenim smetlištima uginuli su od unosa neprobavljive plastike. U japanskom Nara Parku, divlji jeleni su uginuli zbog komplikacija uzrokovanih gutanjem plastičnog otpada koji su ostavili turisti⁹⁷. Studija na preko 30.000 deva u blizini Dubajja u Ujedinjenim Arapskim Emiratima otkrila je da je približno 1 % životinja vjerojatno uginulo zbog plastike nakupljene u njihovim probavnim sustavima.⁹⁸ Znanstvenici su uveli pojam "polibezoar" kako bi definirali čvrsto zbijenu nakupinu neprobavljivih materijala, koja može uključivati plastiku, užad, drugi otpad i naslage soli, a koja je zarobljena u želucu ili probavnom traktu, tvoreći veliku kamenu masu. Prefiks "poli" odnosi se na sintetičku tvar, a "bezoar" na malu kamenu nakupinu koja se može formirati u želucima određenih životinja, posebno preživača. Promatranja potvrđuju da polibezoari uzrokuju gastrointestinalne blokade, sepsu zbog povećane populacije crijevnih bakterija, dehidraciju i pothranjenost (Slika 24).



Polibezoar, nastao od čvrsto zbijenih plastičnih vrećica i užadi pronađenih u crijevima, uzrokuje regionalnu stopu smrtnosti od 1% kod deva.

Slika 24. Polibezoari pronađeni u uginulim devama u pustinji blizu Dubajja. Najveći analizirani u novoj studiji težio je gotovo 64 kg (141 funtu).

Izvor: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. (2021). The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments*, 185, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, 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>

⁹⁶Animal 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>

⁹⁷Agence 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>

⁹⁸Eriksen, 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>

Prijenos MNP putem hranidbenih lanaca od planktona do ljudi

Akumulacija plastike u oceanu ima značajan negativan utjecaj na morske ekosustave. Znanstvena promatranja tijekom posljednja četiri desetljeća otkrila su mikroplastiku u gotovo svim morskim staništima diljem svijeta⁹⁹. Studije potvrđuju da plastični otpad utječe na morsku biološku raznolikost u širokom spektru staništa. Najmanje 690 morskih vrsta diljem svijeta pogođeno je plastičnim zagađenjem, uključujući kitove, tuljane, morske ptice, kornjače, ribe i rakove¹⁰⁰. Gutanje plastičnog otpada također može izložiti životinju dodatnom izvoru toksina. Kemijske komponente mogu se isprati u tijelo nakon gutanja, pri čemu se zagađivači prenose s plijena na grabežljivca unutar hranidbenih lanaca. Učinci zapletanja ili gutanja mogu biti smrtonosni ili subletalni, te dovode do niza problema kao što su ugrožena sposobnost hranjenja i probavni problemi koji rezultiraju pothranjenošću, bolestima, smanjenim reproduktivnim ishodom, smanjenim stopama rasta i kraćim životnim vijekom.¹⁰¹ Zbog svoje male veličine, mikroplastiku unosi plankton – ključna komponenta morskih hranidbenih lanaca. Plankton konzumiraju mnoge morske vrste, a one koje se njime ne hrane izravno, jedu organizme koji su ga već unijeli. Na taj način mikroplastika se integrira u hranidbene lance (Slike 25–26).

Godine 1999. analiza uzoraka površinske vode u sjevernopacifičkom suptropskom vrtlogu otkrila je da je masa plastike premašila masu zooplanktona – primarnog izvora hrane ekosustava – šest puta¹⁰², naglašavajući dominaciju plastike nad živim organizmima u oceanu.

Procjene temeljene na promatračkim podacima pokazuju da se koncentracija mikroplastike povećava s veličinom ribe. Podaci pokazuju da najveća životinja – kit – dnevno unese do 43,6 kg plastike, pri čemu 98,5 % tog volumena dolazi iz plijena, a ne izravno iz vode, budući da je mikroplastika već prisutna u hrani koju konzumira.¹⁰³

⁹⁹Ivar 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>

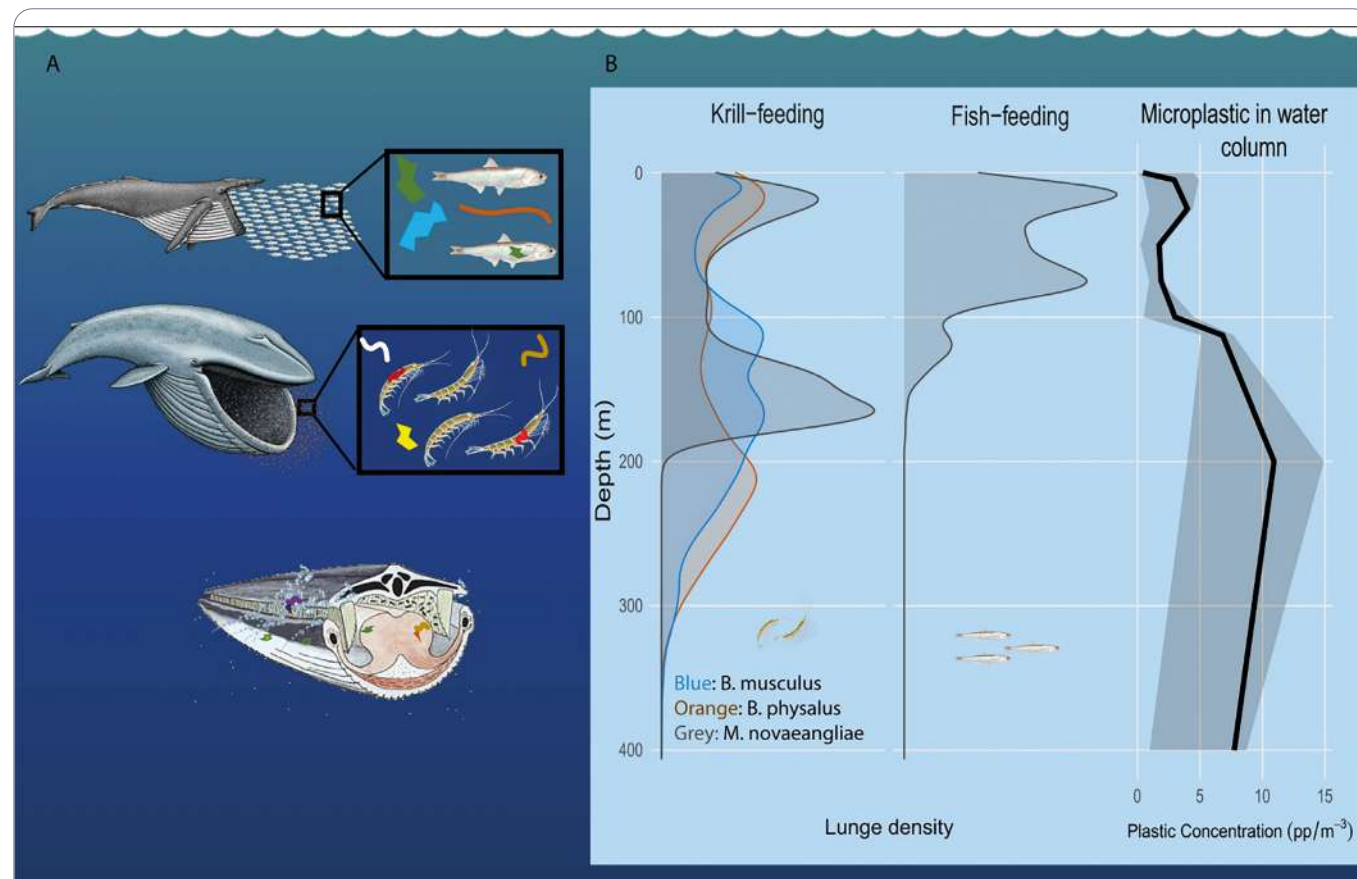
¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean 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>

¹⁰²Moore, 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)

¹⁰³Kahane-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>



Slika 25. Dubina hranidbenog ponašanja prugastih kitova kao funkcija koncentracije mikroplastike u vodenom stupcu.

a – Plastika koju kitovi unose dnevno, modelirana kao zbroj (i) plastike filtrirane iz vode dnevno i (ii) plastike konzumirane u plijenu dnevno. Stvorili smo tri scenarija kako bismo obuhvatili raspon mogućeg rizika izloženosti unosu plastike: niski, srednji i visoki, budući da neki podaci o varijablama nedostaju;

b - Dubine zarona iz rasporeda u zaljevu Monterey usklađene s dubinskim profilom koncentracije plastike u zaljevu Monterey. Kitove i plijen ilustrirao je Alex Boersma, a dijagram filtracije s presjekom ilustrirao je Scott Landry iz Centra za obalne studije. Izvorni podaci dostavljeni su kao datoteka izvornih podataka.

Izvor: 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>

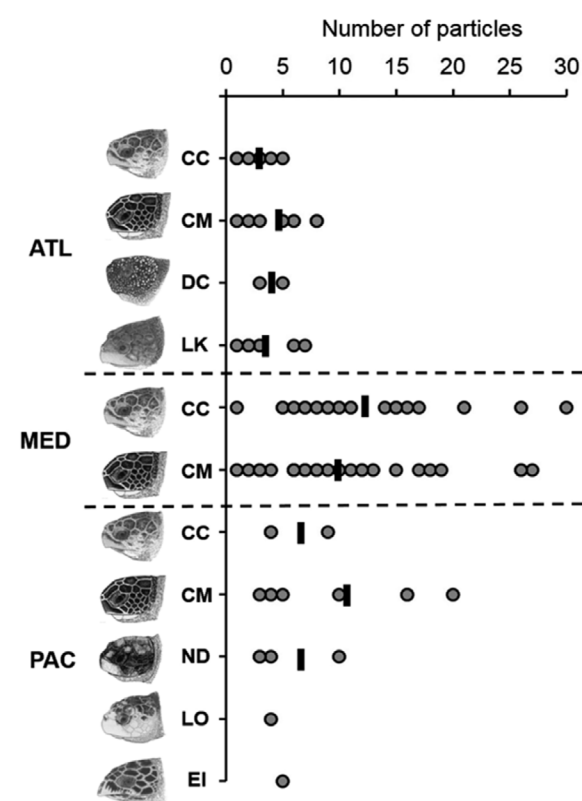


Slika 26. Shematski prikaz prodiranja plastike u hranidbene lance

Plastika ubija morske organizme

Svake godine oko milijun morskih ptica i 100.000 morskih sisavaca uginu zbog zagađenja.¹⁰⁴ Promatranja potvrđuju povezanost između progutanog otpada i smrtnosti morskih ptica. Studija na 1.733 morske ptice iz 51 vrste pokazala je da je njih 557 (32,1 %) progutalo morski otpad, u rasponu od 1 do 40 predmeta, s maksimalnom težinom od 3.440 mg i volumenom od 3.621 mm³.¹⁰⁵

Neki podaci također pokazuju da određene plastične mase ispuštaju dimetil sulfid – kemijski spoj koji oponaša olfaktorni signal koji morske ptice koriste za prepoznavanje hrane¹⁰⁶. Novo istraživanje također je utvrdilo da gutanje plastike uzrokuje oštećenje bubrega, jetre i želuca kod ptica, kao i lezije mozga slične Alzheimerovoj bolesti. To naglašava destruktivni utjecaj plastičnog zagađenja na morsku faunu¹⁰⁷. Plastične čestice pronađene su u svakom pojedinom primjerku svih sedam vrsta kornjača u tri oceanska bazena (Slika 27).¹⁰⁸



Slika 27. Gutanje sintetičkih mikročestica kod svih vrsta morskih kornjača iz tri oceanska bazena. Ukupan broj čestica identificiranih u svakom poduzorku od 100 ml po vrsti po oceanskom bazenu. Crna crta = prosječan broj čestica. Slike lubanja morskih kornjača korištene uz dopuštenje WIDECAST-a; originalno djelo Toma McFarlanda.

Izvor: 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>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://www.wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

¹⁰⁵Roman, 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>

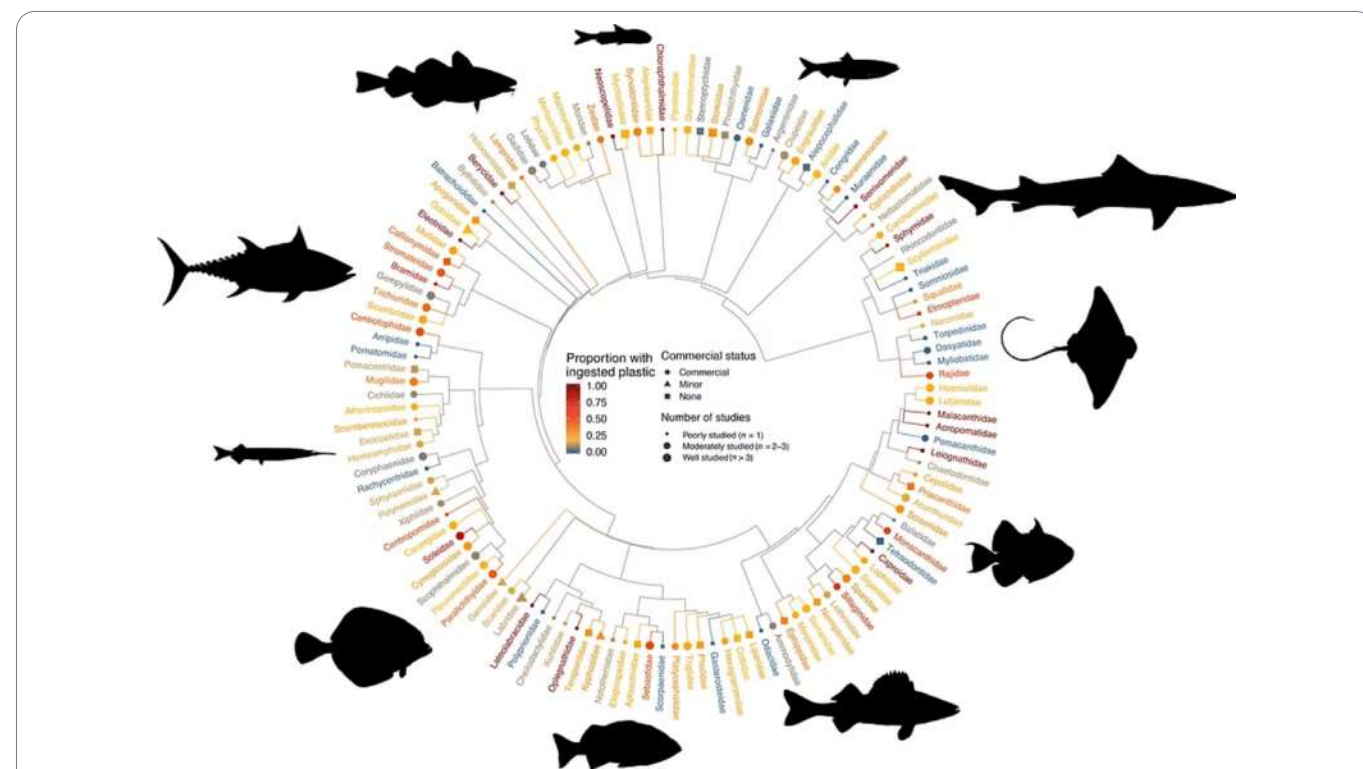
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. Sci. Adv. 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De 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>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. Global Change Biology 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Studije na 171,774 jedinke od 555 vrsta morskih riba pokazuju da 386 vrsta, uključujući 210 komercijalno važnih vrsta, konzumira plastični otpad.¹⁰⁹ Stopa učestalosti gutanja plastike kod riba iznosila je 26 %, udvostručivši se tijekom posljednjeg desetljeća (Slika 28). Analiza je otkrila pozitivnu korelaciju između obilja plastike u površinskim vodama (Slika 29) i njezine konzumacije od strane morskih organizama (Slika 30).

Laboratorijske studije pokazuju da spojevi iz plastike, kada se apsorbiraju u tkiva riba, smanjuju aktivnost, narušavaju funkciju jetre, oštećuju mozak te također usporavaju rast i pogoršavaju reproduktivnu sposobnost.^{109, 110, 111}



Slika 28. Porodice riba i gutanje plastike.

Filogenetski odnosi porodica morskih riba ($n = 131$) obojani prema učestalosti gutanja plastike. Oblici svakog vrha označavaju udio vrsta unutar porodice u skupu podataka koje se komercijalno love (0 = nijedna vrsta nije komercijalno ciljani; minor = 0%–25% vrsta komercijalno ciljanih; commercial = >25% vrsta komercijalno ciljanih). Veličina točke vrha označava broj studija provedenih na vrstama iz te porodice. Ovo ističe 15 porodica koje su dobro uzorkovane ($n > 10$ jedinki, >2 vrste) s visokom učestalošću gutanja plastike (FO plastike $> 0,25$); 67 od ovih porodica s evidencijom gutanja plastike također su komercijalne.

Izvor: 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>

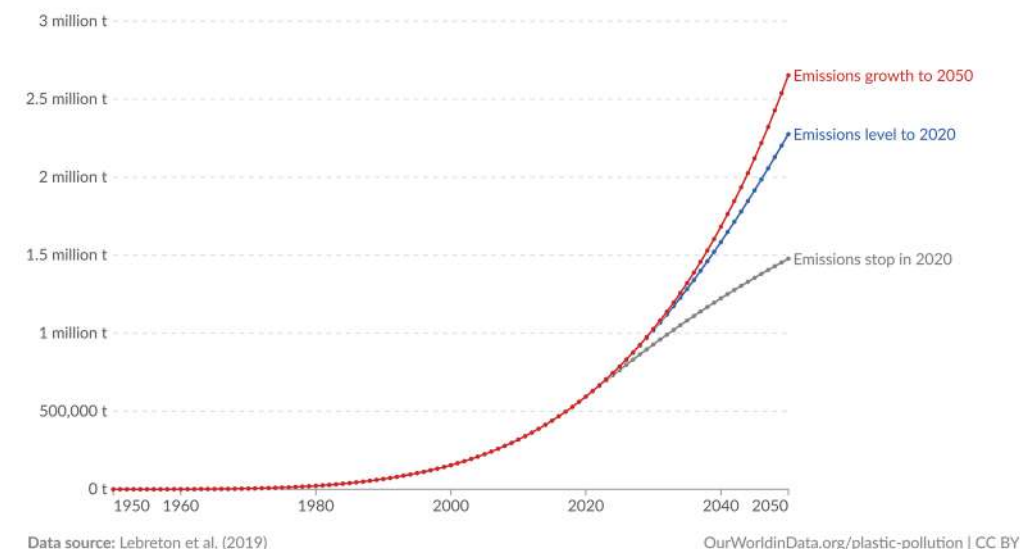
¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹¹⁰Nanthini 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>

¹¹¹Avio, 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>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

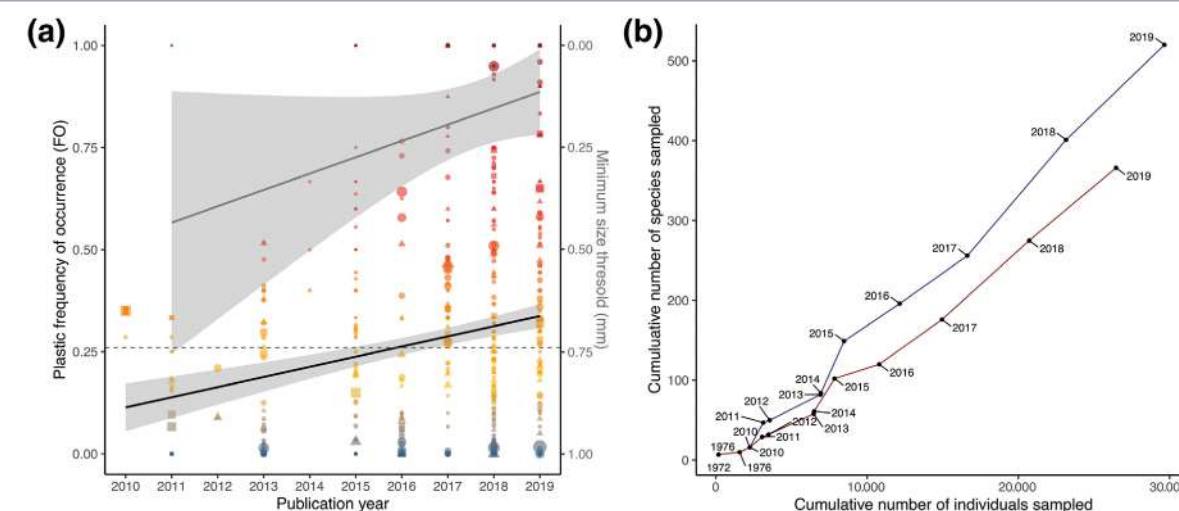
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with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



Slika 29. Mikroplastika u površinskom oceanu, 1950. do 2050.

Izvor: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.)

Izvor: 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>



Slika 30. Vremenski trendovi gutanja plastike kod riba.

(a) Gornja siva linija pokazuje da od 2011. godine postoji trend otkrivanja sve manjih čestica. Donja crna linija prikazuje povećanu učestalost pojave (FO) plastike kod svih vrsta riba od 2010. do 2019. godine. Tijekom tog razdoblja, učestalost gutanja plastike značajno se povećala po stopi od 2,4% godišnje. Horizontalna isprekidana linija predstavlja FO od 0,26, što je prosječna učestalost gutanja plastike kod riba globalno.

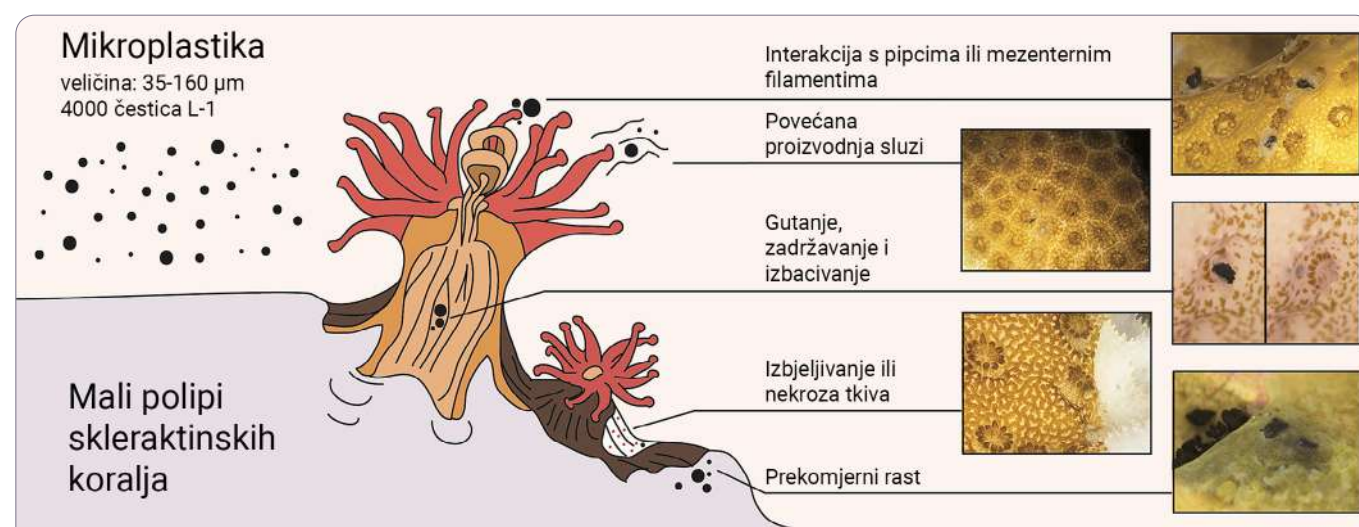
(b) Krivulja akumulacije vrsta gdje plava linija označava kumulativni broj proučavanih vrsta tijekom vremena, uključujući vrste kod kojih je pronađena i kod kojih nije pronađena progutana plastika, a crvena linija prikazuje samo vrste s progutanom plastikom. Nedostatak asimptote na crvenoj liniji ukazuje na visoku vjerojatnost da će se u nadolazećim godinama i dalje pronalaziti dodatne vrste koje gutaju plastiku.

Izvor: 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>

Koralji na udaru: mikro prijetnja globalnih razmjera

Plastično onečišćenje predstavlja sve veću prijetnju koraljnim grebenima ulaskom u njihove hranidbene lance, pogoršavajući širenje bolesti i pridonoseći degradaciji grebenskih zajednica. Analiza je identificirala antropogeni otpad na 77 od 84 anketirana grebena, uključujući izolirane atole u središnjem Tihom oceanu.¹¹² Negativni zdravstveni utjecaji, poput izbjeljivanja i nekroze tkiva,¹¹³ zabilježeni su kod pet od šest proučavanih vrsta¹¹⁴ (Slika 31).

Veći fragmenti plastike olakšavaju prijenos bolesti i fizička oštećenja, povećavajući ranjivost koralja na patogene.¹¹⁵ Ti učinci također utječu na skeletni mikrobiom, koji igra ključnu ulogu u održavanju zdravlja koraljnih kolonija¹¹⁶ (Slika 32). Istraživanja dalje otkrivaju da biofilmovi na mikroplastici, poznati kao "plastisfere",¹¹⁴ mogu izazvati disbiozu mikrobioma kod koralja.¹¹⁷ U dodiru s plastikom, rizik od bolesti koralja povećava se sa 4 % na 89 % (Slika 33). Smrt koraljnih grebena značajno utječe na gubitak bioraznolikosti, budući da grebeni pružaju stanište četvrtini morskih vrsta.¹¹⁵



Slika 31. Utjecaj plastike na zdravlje koraljnih grebena.

Koralji mogu reagirati raznim mehanizmima čišćenja (npr. cilijarnom akcijom, proizvodnjom sluzi ili ekspanzijom tkiva), zadržavanjem čestica prerastanjem ili izbacivanjem pogrešno progutanih čestica.

Izvor: 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>

¹¹²Pinheiro, 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>

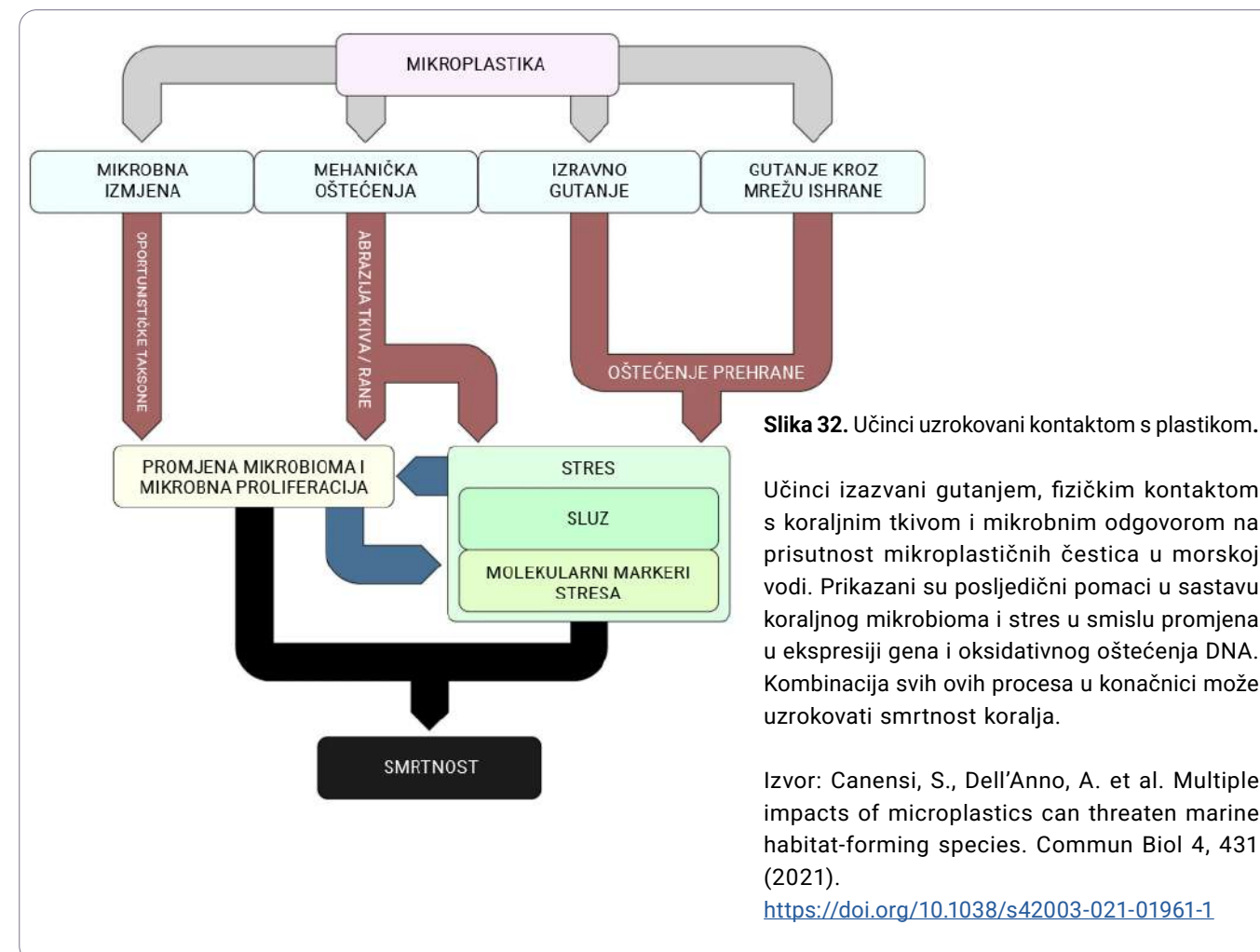
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, 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>

¹¹⁷Lear, 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>

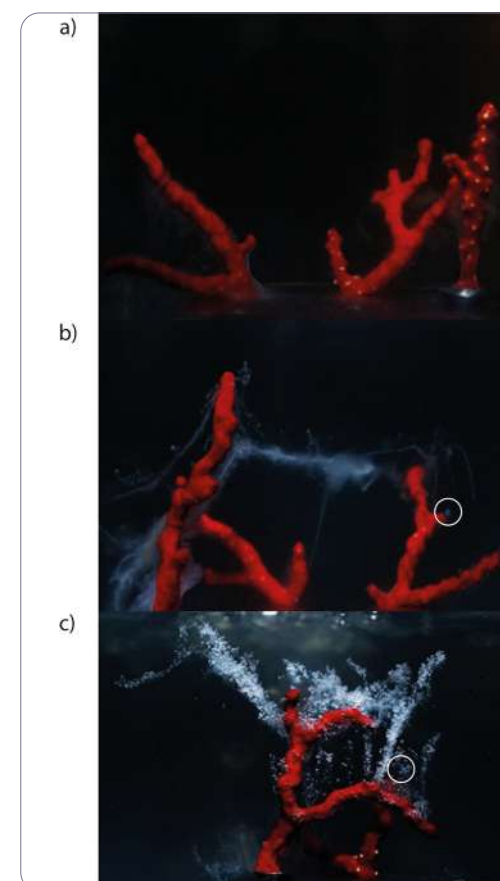


Slika 32. Učinci uzrokovani kontaktom s plastikom.

Učinci izazvani gutanjem, fizičkim kontaktom s koraljnim tkivom i mikrobnim odgovorom na prisutnost mikroplastičnih čestica u morskoj vodi. Prikazani su posljedični pomaci u sastavu koraljnog mikrobioma i stres u smislu promjena u ekspresiji gena i oksidativnog oštećenja DNA. Kombinacija svih ovih procesa u konačnici može uzrokovati smrtnost koralja.

Izvor: 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>



Slika 33. Oslobađanje sluzi povećava se s porastom koncentracije mikroplastičnih čestica.

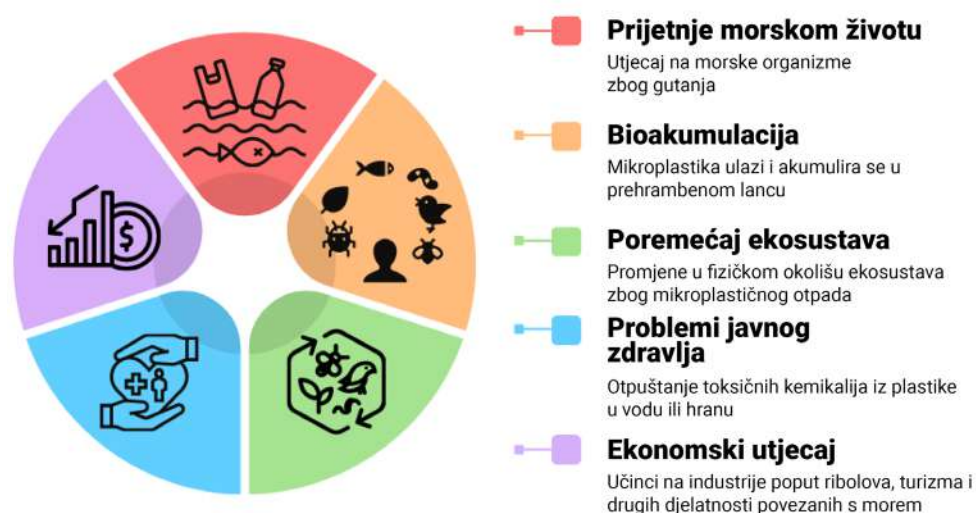
a – niske, b – srednje i c – visoke koncentracije mikroplastičnih čestica. Oslobađanje sluzi povećava se s porastom koncentracije mikroplastičnih čestica. Bijeli krugovi označavaju mikroplastične predmete zarobljene u sluzi (čestice polietilena).

Izvor: 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>

Utjecaj MNP na ravnotežu kisika u ekosustavima

Promatranja pokazuju da se plastika u okolišu prvenstveno razgrađuje zbog sunčevog zračenja. Taj proces mijenja njihov kemijski sastav i strukturu. Istraživanja potvrđuju da reakcije potaknute sunčevom svjetlošću pojačavaju ispiranje otopljenih organskih spojeva, što utječe na biogeokemiju morske vode i potiče rast heterotrofnih bakterija¹¹⁸ (Slika 34).

Prijetnje koju predstavlja mikroplastika u morskom okolišu



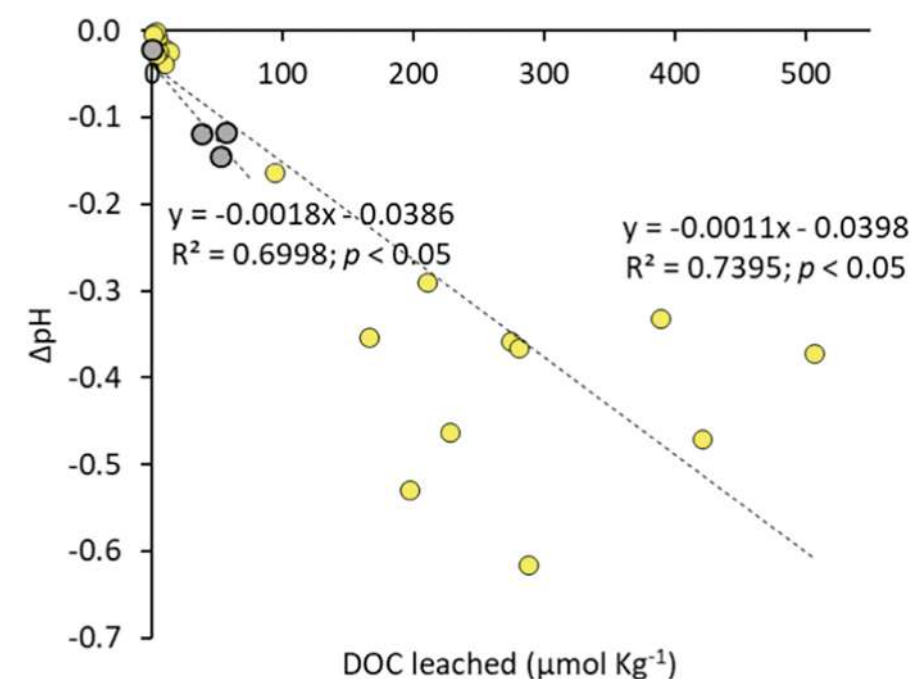
Slika 34. Prijetnje koje predstavlja morska mikroplastika.

Izvor: Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Dugoročne studije pokazuju da kemijski spojevi koje plastika ispušta u morsku vodu tijekom svoje degradacije potječu ili iz samog materijala ili iz aditiva korištenih za davanje boje ili stabilnosti polimeru. Neki od tih spojeva su organske kiseline, što objašnjava njihovu ulogu u smanjenju pH vrijednosti. Stoga, plastika pridonosi intenziviranju zakiseljavanja oceana (Slika 35), što, zauzvrat, može značajno poremetiti funkcioniranje Zemljinih prirodnih sustava.¹¹⁹

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-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>

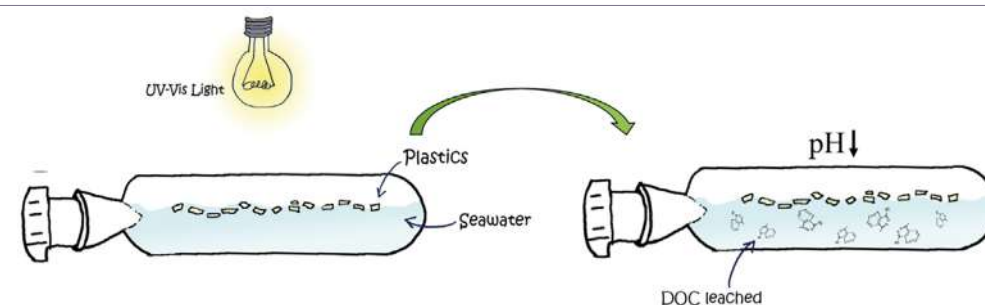


Slika 35. Odnosi između varijacije pH i DOC-a ispranog iz plastike prikazani za svaki pojedinačni ponovljeni uzorak svih eksperimenata. Uključeni su i kontrolni obrasci bez plastike za svaki eksperiment. Žute točkice odgovaraju ozračenim tretmanima, a sive točkice – tamnim tretmanima.

Izvor: 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>

66

“Zahvaljujući ovoj studiji uspjeli smo dokazati da će na visoko zagađenim područjima površine oceana razgradnja plastike dovesti do pada pH vrijednosti za čak 0,5 jedinica, što je usporedivo s padom pH procijenjenim u najgorim scenarijima antropogenih emisija do kraja 21. stoljeća”, ističe Cristina Romera-Castillo, znanstvena suradnica Instituta za morske znanosti (ICM-CSIC) i prva autorica studije koja je objavljena u časopisu Science of the Total Environment (Slika 36).¹²⁰



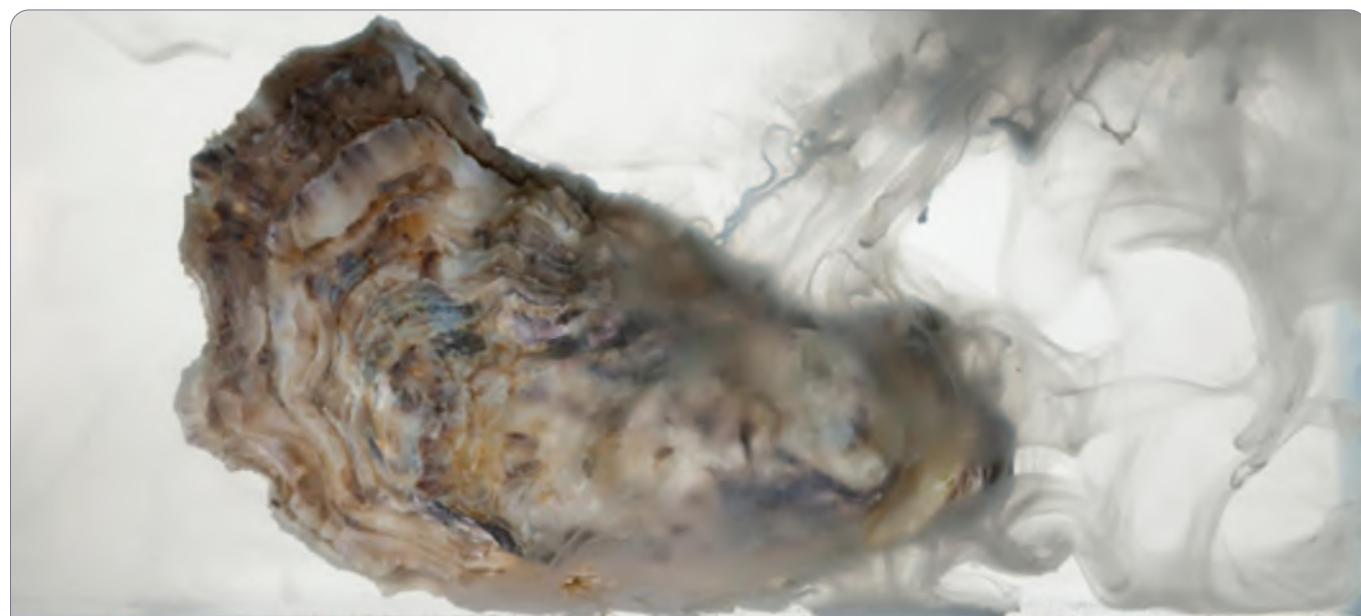
Slika 36. Ispiranje plastike može dovesti do smanjenja pH morske vode za čak 0,5 jedinica. Izvor: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute 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)

Zakiseljavanje oceana je poremećaj morskih uvjeta, stvarajući trajan i rastući ekološki pritisak.¹²¹ Posljedice za ekosustave razvijaju se tijekom desetljeća, stoljeća i dulje. Promatranja potvrđuju smanjenje bioraznolikosti u obalnim sustavima zbog smanjenja pH.^{122, 123} To smanjuje otpornost ekosustava i ugrožava esencijalne funkcije, uključujući pružanje staništa, kruženje hranjivih tvari i skladištenje ugljika.¹²³

Istraživanja pokazuju da se s zakiseljavanjem oceana dagnje (*Mytilus edulis*) sporije razvijaju i imaju smanjenu stopu preživljavanja (Slika 37). To smanjuje njihovu populaciju, što pak smanjuje njihovu sposobnost filtriranja vode i održavanja kvalitete obalnog ekosustava.¹²⁴

Trenutne razine pH površine oceana su bez presedana barem u posljednjih 26.000 godina.¹²⁵ Taj proces ima značajan utjecaj na koraljne grebene, dubokomorske ekosustave i ekosustave visokih širina, koji se oslanjaju na jedinstvene vrste. Te vrste igraju nezamjenjivu ulogu, a njihovo izumiranje poremećuje ključne funkcije ekosustava, jer nema ekvivalenata sposobnih da ih zamijene.¹²⁶



Slika 37. Sluz djeluje kao barijera, sprječavajući ulazak štetnih tvari, mikroorganizama ili parazita u organizam. Može uhvatiti i izbaciti potencijalno opasne čestice, uključujući mikroplastiku, iz škrge i probavnog sustava. Ostrige i dagnje pokazuju zamjetan pad populacije duž gradijenata smanjenja zasićenosti karbonatima. Zakiseljavanje oceana može dovesti do smanjenja populacije ostriga i ekosustavnih usluga koje pružaju u divljini; također može pogoršati njihovu kvalitetu kao morskih plodova.

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

¹²¹Scott 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>

¹²²Hall-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>

¹²³James 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=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, 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>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

¹²⁶James 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=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Istraživanja potvrđuju da mikroplastika ima znatne negativne učinke na biološke parametre poput rasta¹²⁷, sadržaja klorofila, aktivnosti fotosinteze i reaktivnih kisikovih vrsta (ROS) mikroalgi.^{128,129}

Podaci pokazuju i otkrivaju da utjecaj MP dovodi do globalnog smanjenja fotosinteze od 7,05 do 12,12% kod kopnenih biljaka, morskih algi i slatkovodnih algi.¹³⁰ Poznato je da je fotosinteza primarni proces na Zemlji koji proizvodi molekularni kisik (O₂), koji se oslobađa u atmosferu.

Mikroplastika u morskim sedimentima mijenja mikrobne zajednice i remeti kruženje dušika, potencijalno povećavajući probleme izazvane ljudima, poput toksičnih cvjetanja algi. Promjene u planktonskim zajednicama na površini oceana mogle bi pogoršati deoksigenaciju potaknutu klimatskim promjenama, uskraćujući kisik morskim organizmima.¹³¹

Podaci pokazuju da je od 1960. do 2010. godine ocean izgubio 2 % otopljenog kisika zbog porasta temperature vode i nakupljanja zagađivača, uključujući industrijske, kućanske i poljoprivredne otjecaje.¹³² Smanjenje kisika dovodi do stvaranja mrtvih zona — područja oceana gdje su morska flora i fauna gotovo potpuno nestale. Promatranja pokazuju da je 1960-ih godina u svjetskim oceanima bilo 45 mrtvih zona, dok se do 2011. njihov broj povećao na oko 700.¹³³ Prema podacima objavljenima na UNDP-ovoj web stranici, broj mrtvih zona udvostručuje se svakog desetljeća od 1960-ih. Na temelju ovog trenda, vrlo je vjerojatno da bi broj mogao doseći 1.500 do 2025. godine.¹³⁴

Plastično onečišćenje utječe na mnoge procese u Zemljinom sustavu. Prema istraživanjima, ono može pogoršati kritična ekološka pitanja poput gubitka bioraznolikosti i klimatskih promjena.¹³⁵

¹²⁷Nanthini 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>

¹²⁸Wu, 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>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathu 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>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. Proceedings of the National Academy of Sciences 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics 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 May 1, 2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen decline 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>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025)

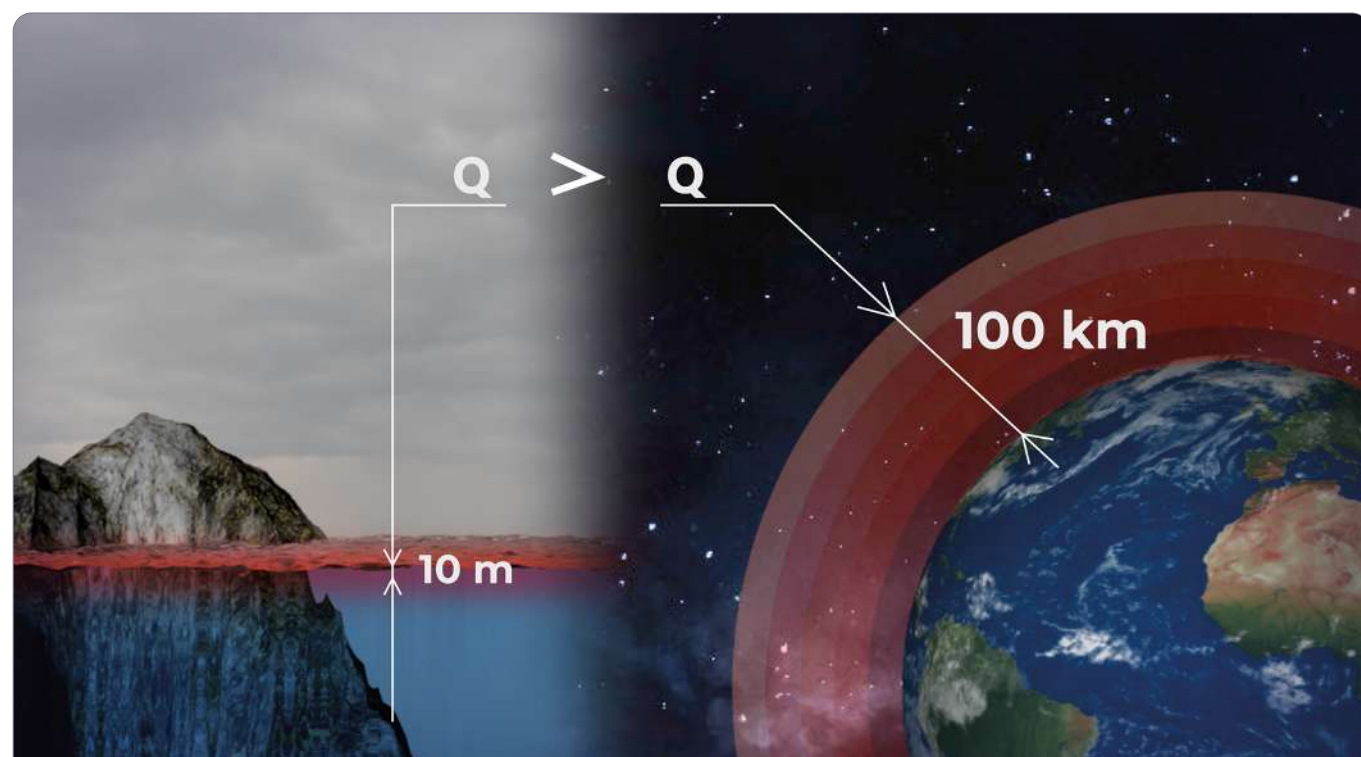
¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁵Villarrubia-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>

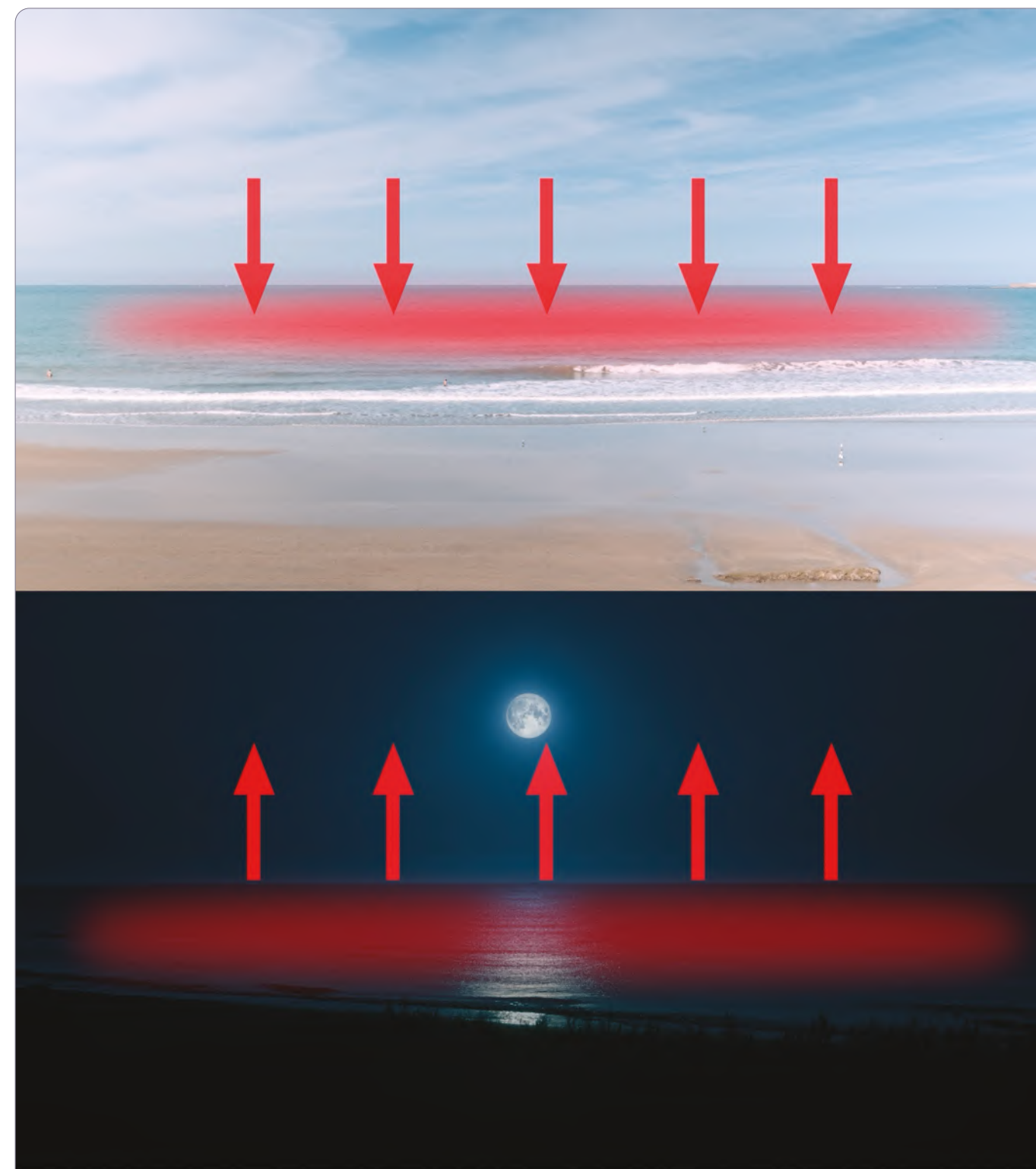
UTJECAJ MIKRO- I NANOPLASTIKE NA KLIMU

Funkcije oceana

Ocean igra ključnu ulogu u održavanju klimatske ravnoteže planeta, funkcionirajući kao prirodni "klima uređaj". Njegova jedinstvena sposobnost apsorpiranja i postupnog otpuštanja topline pomaže u ublažavanju temperaturnih fluktuacija na Zemlji. Sloj oceanske vode dubok samo deset metara može apsorbirati više topline nego cijela Zemljina atmosfera (Slika 38). To smanjuje temperaturne oscilacije kako tijekom dana i noći (Slika 39), tako i između godišnjih doba — ljeta i zime.



Slika 38. Usporedna toplinska sposobnost oceana i atmosfere: unatoč manjoj masi zraka, ocean je sposoban akumulirati i zadržati desetke puta više topline, igrajući ključnu ulogu u regulaciji Zemljine klime



Slika 39. Shematski prikaz dnevne izmjene topline: ocean apsorbira toplinu danju i otpušta je noću izgladjujući temperaturne fluktuacije

Oceanske struje prenose toplu vodu iz tropskih u hladnije regije poput sjevernih širina. To pomaže ublažavanju klime u obalnim područjima. Hladne struje, pak, vraćaju ohlađenu vodu natrag prema ekvatoru. Na taj način ocean regulira planetarnu klimu.

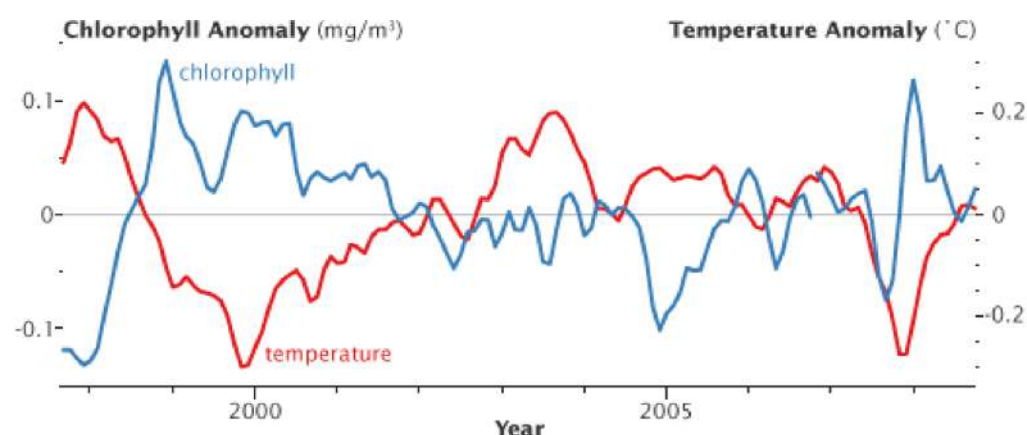
Ocean ima velik utjecaj na atmosferske procese i igra ključnu ulogu u formiranju oblaka i oborina. Svakodnevno, ogromna količina vode isparava s njegove površine, kasnije se kondenzirajući u oblake i padajući natrag na Zemlju kao kiša ili snijeg. Ovaj je proces vitalan za nadopunjavanje resursa slatke vode u rijekama, jezerima i tlu.

Mikroskopske alge u oceanu, poput fitoplanktona (Slika 40), proizvode više od 50% kisika.¹³⁶ Mnogi modeli kemije i biologije oceana predviđaju da će se, kako se površina oceana zagrijava kao odgovor na sve veći udio stakleničkih plinova u atmosferi, produktivnost fitoplanktona smanjiti (Slika 41).^{137, 138}



Slika 40. Fitoplankton je iznimno raznolik, varirajući od fotosintetizirajućih bakterija (cijanobakterija) do biljkama sličnih diatomeja, do kokolitofora s oklopom (crteži nisu u mjerilu). (Kolaž prilagođen iz crteža i mikrografija Sally Bensusen, NASA EOS Project Science Office.)

Izvor: NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>



Slika 41. Oko 70% oceana trajno je stratificirano u slojeve koji se ne miješaju dobro. Između kraja 1997. i sredine 2008. godine sateliti su primijetili da su temperature više od prosjeka (crvena linija) dovele do koncentracija klorofila ispod prosjeka (plava linija) na tim područjima. (Grafikon prilagođen iz Behrenfeld et al. 2009. Roberta Simmona.)

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

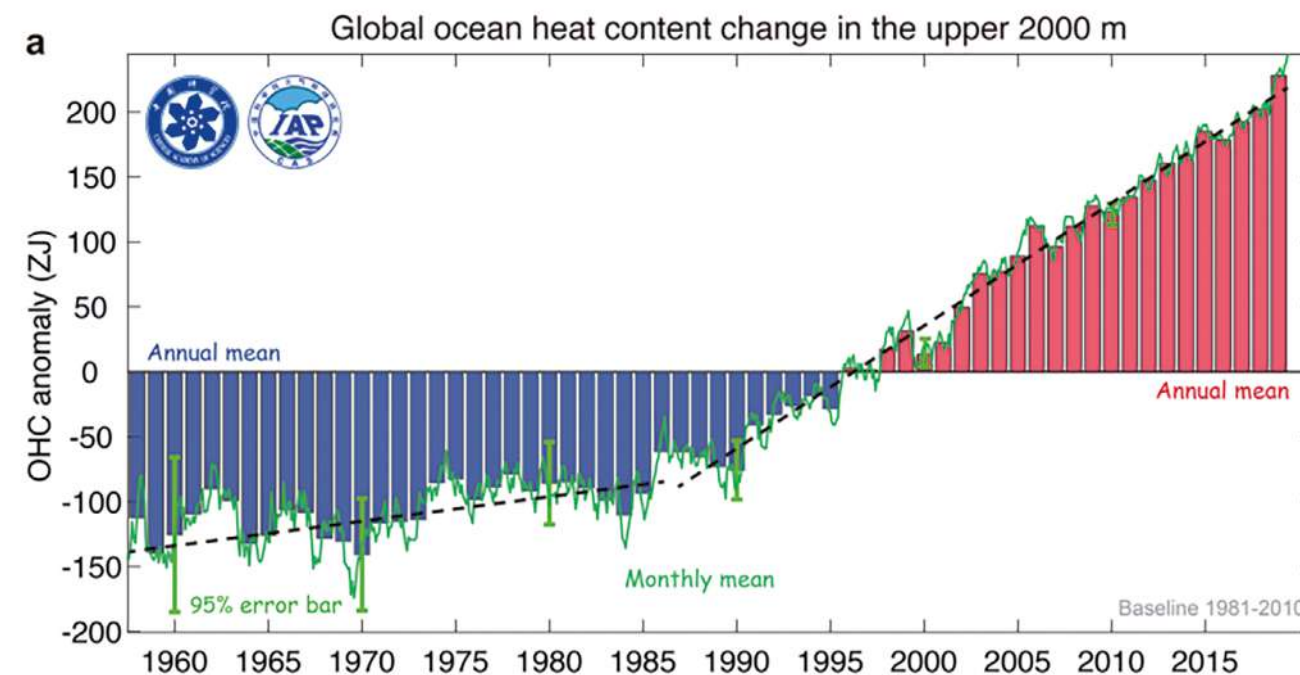
¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

¹³⁷Boyce, 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>

¹³⁸Bopp, 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>

Promjena temperaturnih obrazaca oceana

Izvešće "Stanje globalnog oceana 2024." prikazuje zabrinjavajuću sliku – trend zagrijavanja oceana bez presedana. Studije pokazuju da su između 1960. i 1986. temperature oceana rasle stabilnom brzinom. Međutim, u posljednjim desetljećima, taj se proces ubrzao dvostruko (Slika 42).¹³⁹



Slika 42. Promjena sadržaja topline u gornjem sloju Svjetskog oceana do 2000 metara.

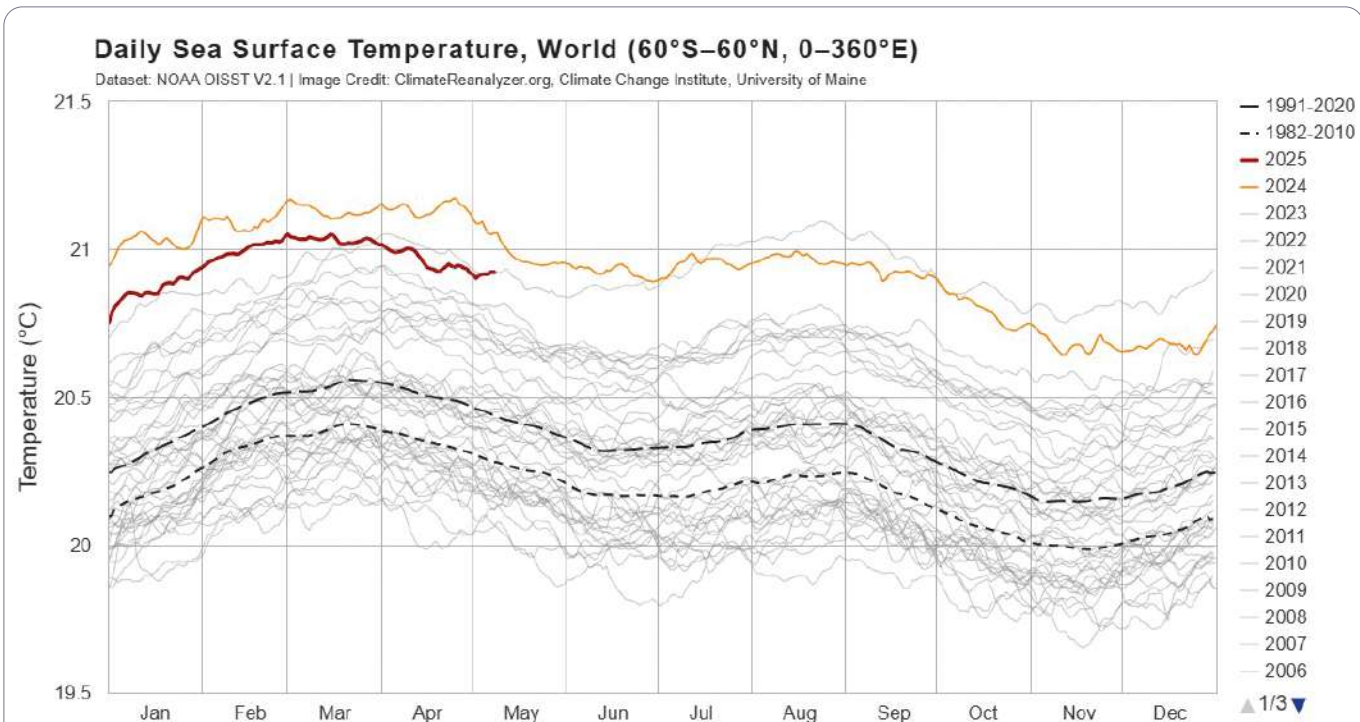
Izvor: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Godina 2023. postala je najtoplija godina u povijesti mjerenja, nadmašivši prethodni rekord postavljen 2016. godine. Zabilježen je i apsolutni rekord temperature površine mora (SST).¹⁴⁰ Ovaj se trend nastavio, a godina 2024. oborila je rekorde iz 2023. (Slika 43), čineći je najtoplijom godinom u zabilježenoj povijesti.¹⁴¹ Tijekom ovog razdoblja, temperature površine mora ostale su na rekordnim mjesečnim vrijednostima 15 uzastopnih mjeseci, naglašavajući postojanost trenda zagrijavanja.

¹³⁹Cheng, 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>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025)

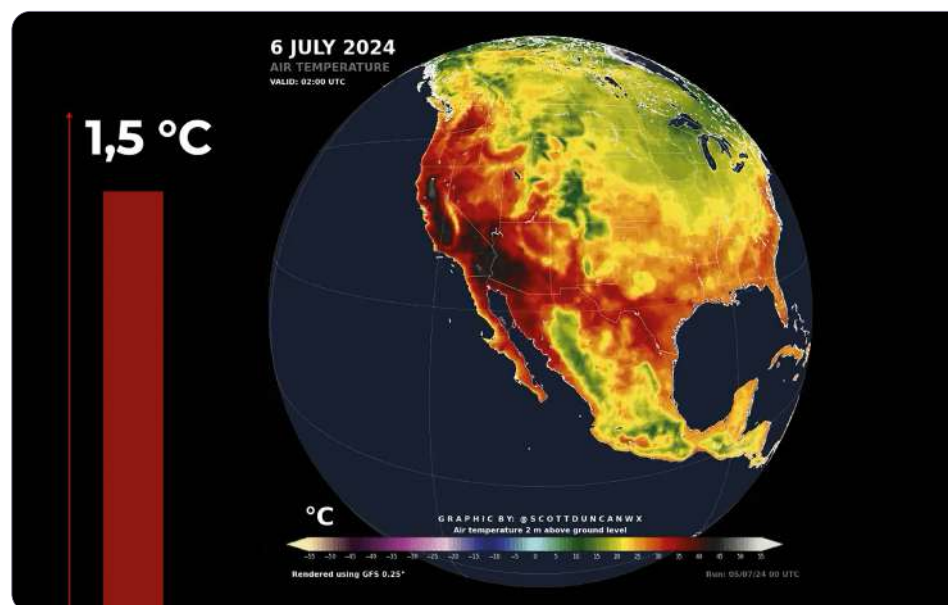
¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.



Slika 43. Dnevna temperatura površine mora: grafički prikaz promjena temperature gornjeg sloja oceana, koji odražava sezonske fluktuacije po godinama.

Izvor: NOAA OISST V2.11 Image Credit: Climate [Reanalyzer.org](https://climateranalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine https://climateranalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Po prvi put u povijesti mjerenja, globalna prosječna površinska temperatura bila je 1,5 °C iznad predindustrijske razine¹⁴² (Slika 44). Prema stručnjacima, ovo je kritičan prag: iznad njega, čovječanstvo će se suočiti s velikim klimatskim katastrofama.¹⁴³

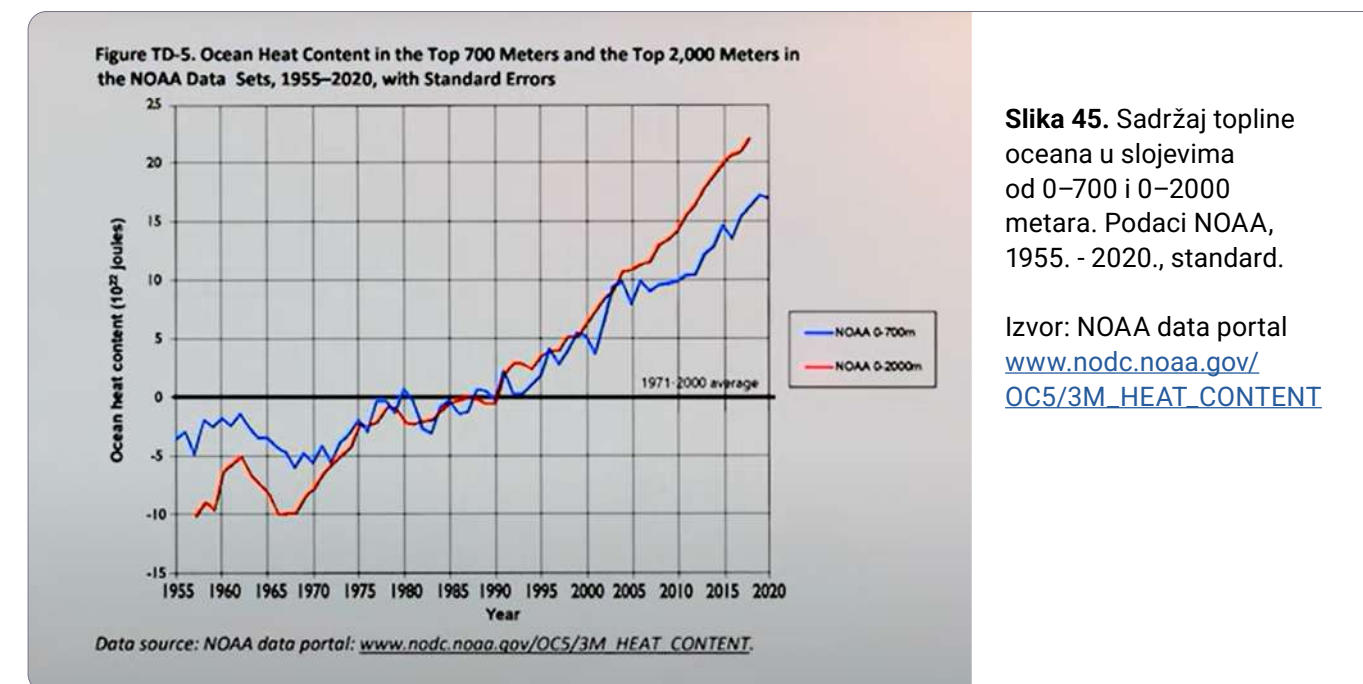


Slika 44. Shematski prikaz klimatske prekretnice: 2024. godine prosječna godišnja globalna temperatura po prvi put je premašila prag od 1,5 °C u usporedbi s predindustrijskim razinama

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025)

Takav porast temperature očekivao se sredinom 21. stoljeća¹⁴⁴, no taj je prag već prijeđen. Prema UN procjenama, ako se trenutni trendovi nastave, globalne bi temperature mogle porasti za gotovo 3°C u ovom stoljeću.¹⁴⁴



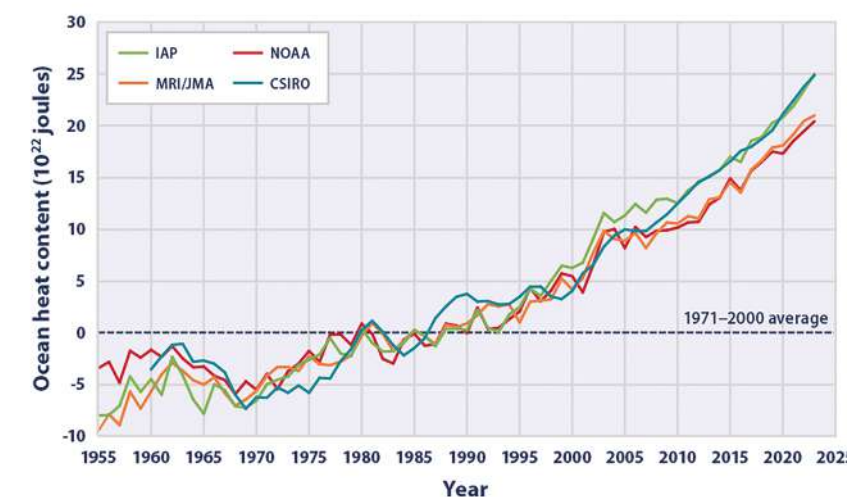
Slika 45. Sadržaj topline oceana u slojevima od 0–700 i 0–2000 metara. Podaci NOAA, 1955. - 2020., standard.

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

Slika 46.

Ova slika prikazuje promjene u sadržaju topline gornjih 700 metara svjetskih oceana između 1955. i 2023. godine. Sadržaj topline oceana mjeri se u džulima, jedinici energije, i uspoređuje se s prosjekom razdoblja 1971.–2000. godine, koji je postavljen na nulu za referencu. Odabir drugog referentnog razdoblja ne bi promijenio oblik podataka tijekom vremena. Linije su neovisno izračunale, koristeći različite metode, vladine organizacije iz četiri zemlje: američka Nacionalna oceanska i atmosfarska administracija (NOAA), australska Organizacija za znanstvena i industrijska istraživanja Commonwealtha (CSIRO), kineski Institut za atmosfersku fiziku (IAP) i Meteorološki istraživački institut Japanske meteorološke agencije (MRI/JMA).

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

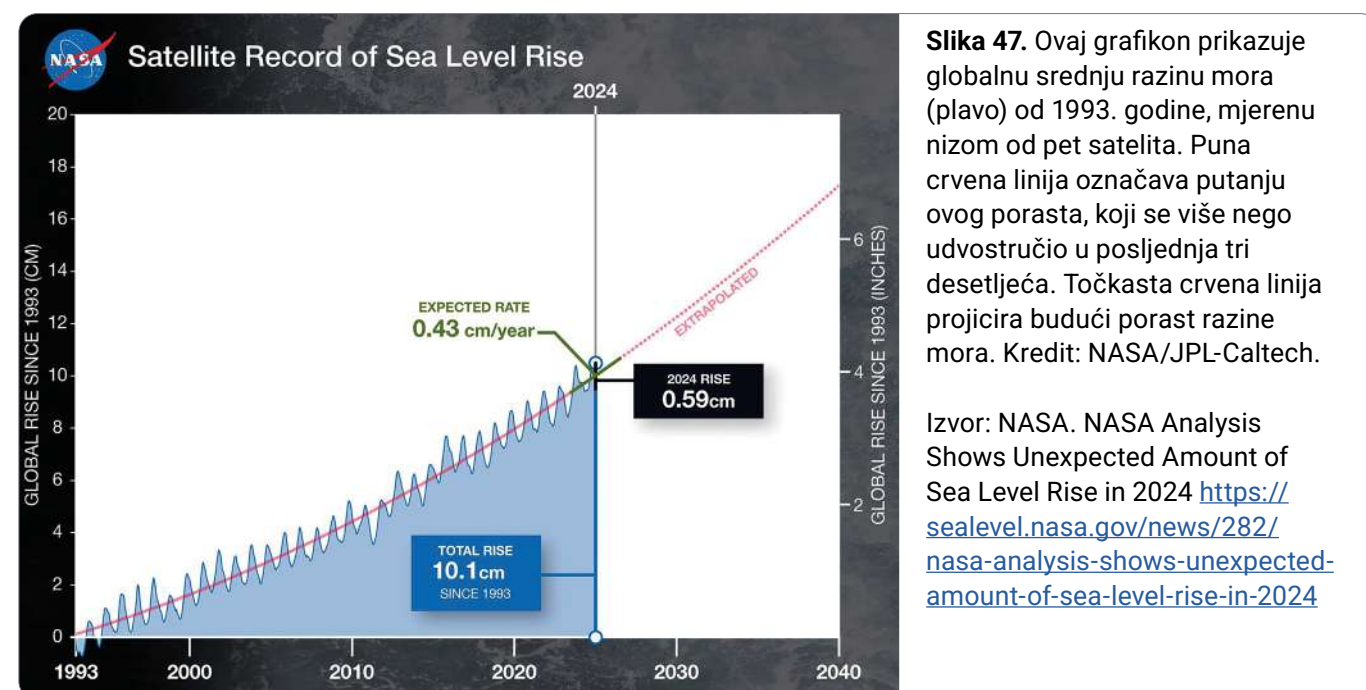


¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Srednje dubine jednog dijela Tihog oceana zagrijavale su se 15 puta brže u posljednjih 60 godina nego tijekom prethodnih 10 000 godina (Slike 45–46).¹⁴⁵ To ukazuje da procesi globalnog zatopljenja utječu ne samo na gornje slojeve oceana, već i na dublje regije gdje sunčeva svjetlost ne dopire. Zagrijavanje vode na takvim dubinama zahtijeva enormnu količinu energije, naglašavajući razmjere problema. Prema znanstvenicima, da bi se ocean zagrijavao trenutnom brzinom, bila bi potrebna količina energije ekvivalentna eksploziji 7 atomskih bombi svake sekunde tijekom cijele godine¹⁴⁶ — zapanjujuće brojke koje postavljaju pitanje: odakle dolazi ta energija?

Rastuće temperature oceana neizbježno dovode do porasta razine mora, prijeteci da progutaju cijele obale. Tijekom posljednja dva stoljeća, globalna prosječna razina mora porasla je za 21 centimetar (8,3 inča), a samo u posljednjih 30 godina — za 10,1 centimetar (3,98 inča).¹⁴⁷ Trenutna stopa porasta je 2,5 puta veća nego prije, a očekuje se da će se ovaj trend nastaviti. Ako se situacija ne promijeni, milijuni ljudi postat će klimatske izbjeglice, prisiljeni napustiti svoje domove i potražiti sklonište daleko od obala.

“Porast koji smo vidjeli 2024. godine bio je veći nego što smo očekivali”, rekao je Josh Willis, istraživač razine mora u NASA-inom Laboratoriju za mlazni pogon u Južnoj Kaliforniji. **“Svaka je godina malo drugačija, ali jasno je da razina oceana i dalje raste, a stopa porasta postaje sve brža i brža.”**¹⁴⁸ (Slika 47).



Zagrijavanje oceana također pridonosi učestalijim i intenzivnijim ekstremnim vremenskim pojavama, poput poplava, tajfuna i abnormalnih oborina. Te promjene ugrožavaju ekosustave planeta i živote milijardi ljudi, a sa svakom godinom njihov utjecaj postaje sve očitiji.

¹⁴⁵Rosenthal, 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)

¹⁴⁶Cheng, 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>.

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025)

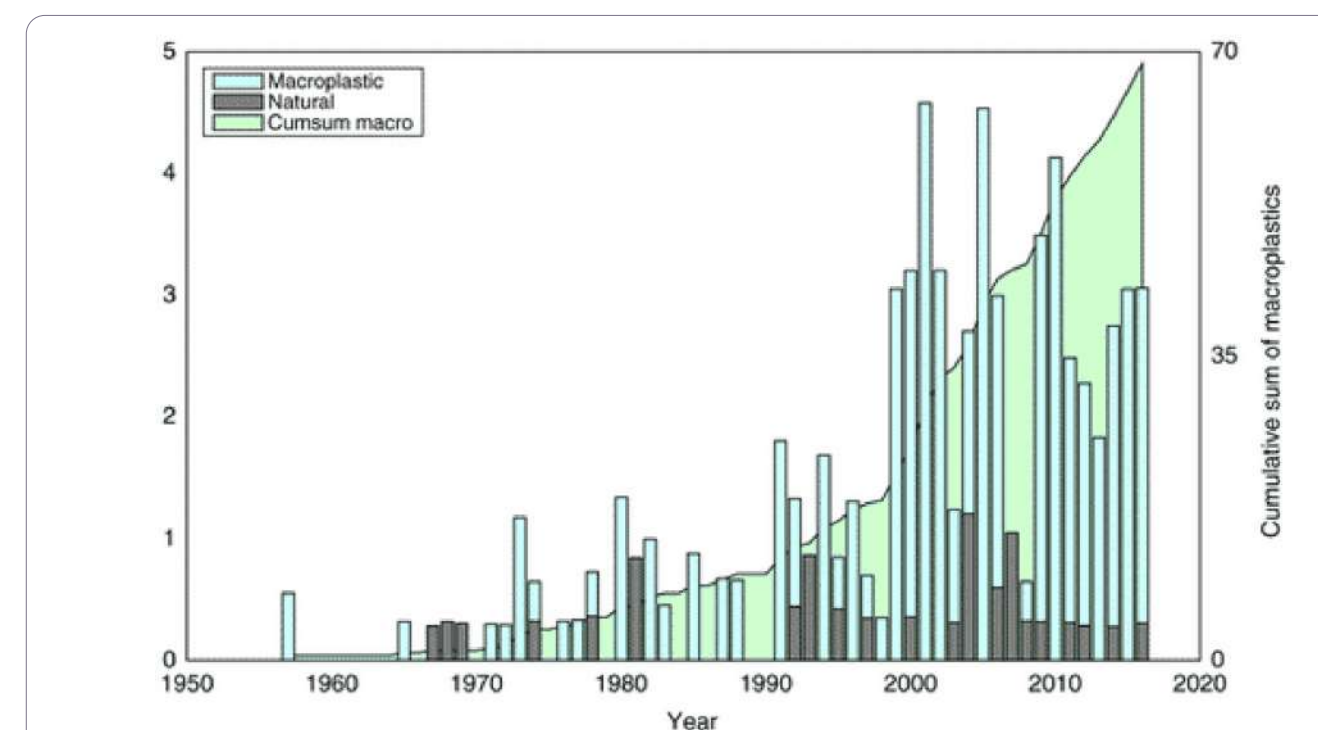
¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

Zašto se ocean zagrijava? Hipoteza

Glavni široko prepoznati čimbenici koji pridonose zagrijavanju oceana su staklenički plinovi, poput CO₂, koji zadržavaju toplinu u atmosferi i povećavaju temperaturu gornjih slojeva oceana. Međutim, postoje i drugi čimbenici koji također mogu imati značajan utjecaj na ovaj proces. Jedan dodatni čimbenik koji utječe na zagrijavanje oceana bit će raspravljen u poglavlju “X Faktor”.

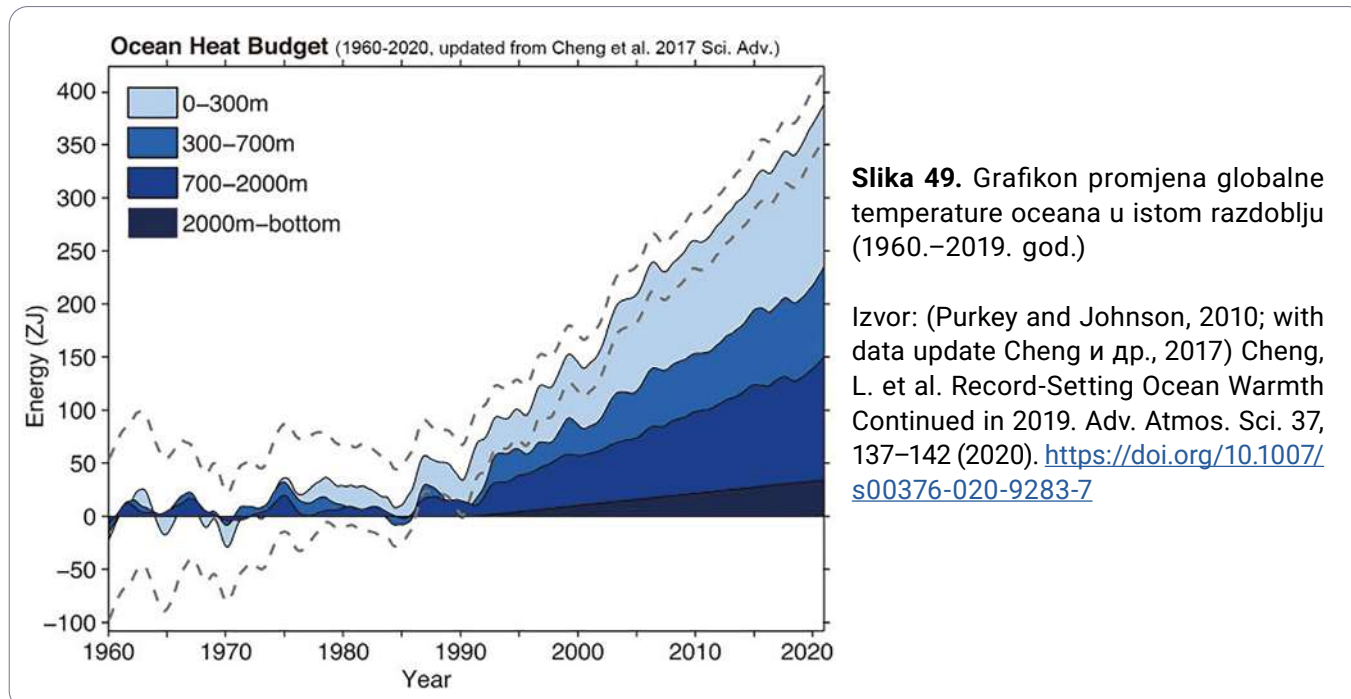
Od druge polovice 20. stoljeća, bilježi se oštar porast količine plastike u oceanima, što se podudara s razdobljem brzog industrijskog razvoja i masovne proizvodnje plastičnih proizvoda (Slika 48). Između 1960. i 2019. također je primijećena promjena u temperaturi oceana. Grafikon (Slika 49) prikazuje paralelan porast prosječne temperature površine mora, koja je također zabilježena od sredine 20. stoljeća.

Usporedbom dvaju grafikona (Slike 48–49), može se uočiti korelacija između porasta koncentracije plastike u oceanima i zagrijavanja oceanskih voda. To sugerira da plastično onečišćenje u oceanima može biti jedan od značajnih, ali nedovoljno proučenih čimbenika koji pridonose zagrijavanju oceanskih voda.



Slika 48. Grafik porasta koncentracije plastike u oceanima tijekom posljednjih desetljeća. Kumulativna količina makroplastike u oceanu i godišnje vrijednosti.

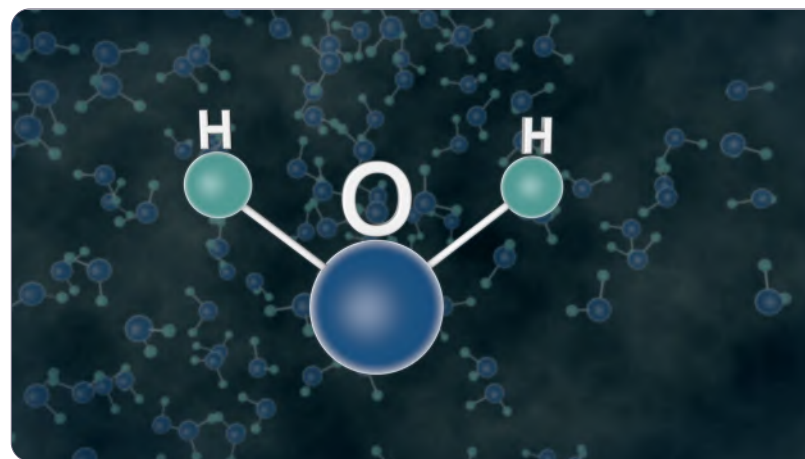
Izvor: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>



Kako bismo dalje istražili ovo pitanje, važno je razumjeti mogu li plastike utjecati na fizikalna svojstva oceanske vode, poput toplinske vodljivosti i toplinskog kapaciteta. I mogu li te promjene pridonijeti rastu temperature oceana? Da bismo bolje razumjeli te procese, promotrimo temeljna svojstva vode i kako ona stupa u interakciju s onečišćujućim tvarima.

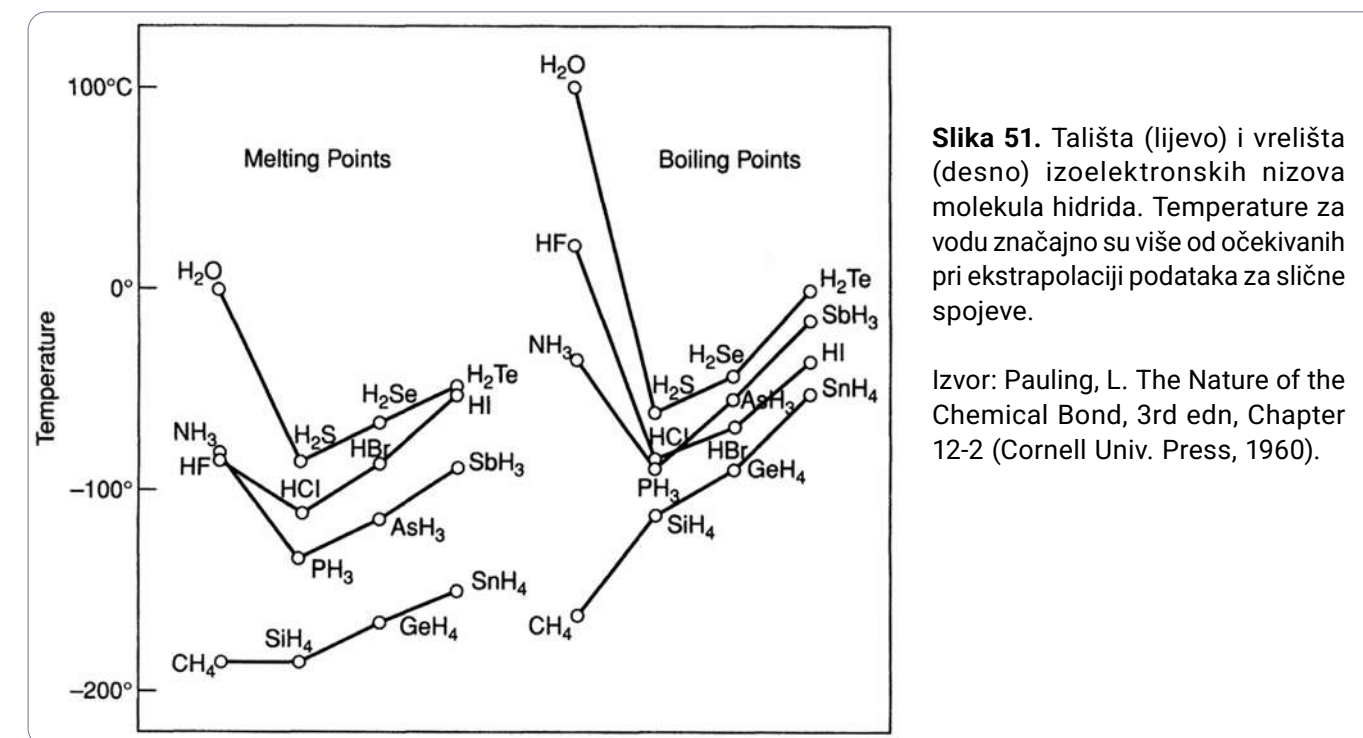
Temeljna svojstva vode

Molekula vode ima simetričan V-oblik, s dva atoma vodika smještena s jedne strane u odnosu na veći atom kisika (Slika 50).



Slika 50. Shematski prikaz molekule vode: dva atoma vodika (H) povezana su s jednim atomom kisika (O) pod kutom od $\sim 104,5^\circ$, tvoreći dipol s pozitivnim i negativnim nabojem

Ova se struktura razlikuje od linearnih molekula, poput CO_2 , gdje su svi atomi poredani u ravnoj liniji. Jedinstveni oblik molekule vode čini je vitalnom za brojne procese na Zemlji. Specifična svojstva molekula vode omogućuju vodi da ostane u tekućem stanju pri temperaturama koje bi tipično uzrokovale da druge troatomske molekule postanu plinovi (Slika 51).



To je zbog vodikovih veza¹⁴⁹ koje povezuju molekule vode, tvoreći snažnu i uređenu strukturu.

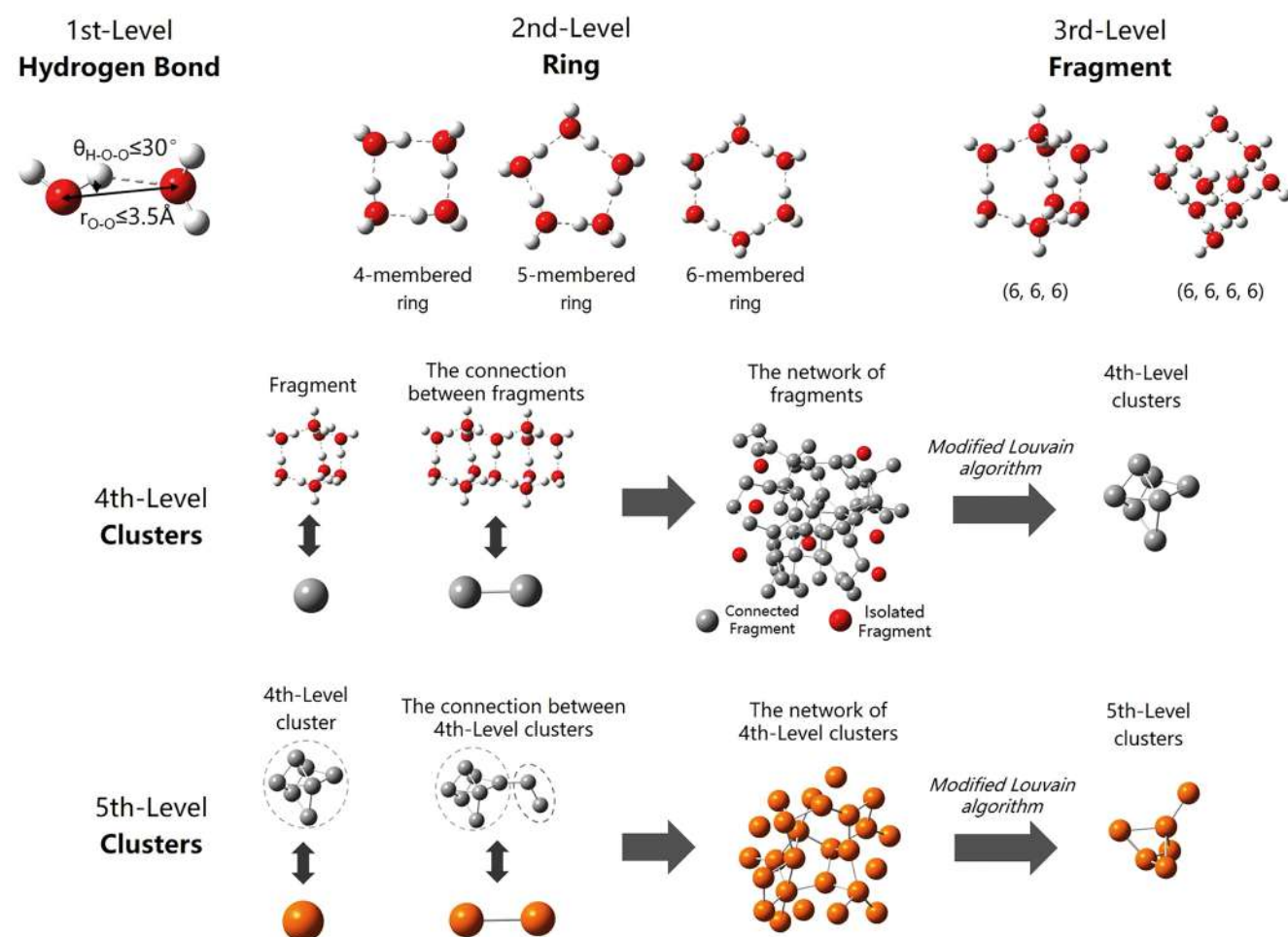
Većina vodikovih veza su slabe privlačnosti, s jačinom veze približno desetinom jačine tipične kovalentne veze. Ipak, iznimno su važne. Bez njih bi se sve drvene konstrukcije urušile, cement bi se raspao, oceani bi isparili, a sva živa tvar bi se raspala u neživu materiju.¹⁵⁰

Zbog toga voda ima sposobnost formiranja klastera, što objašnjava mnoga njezina anomalna svojstva (Slike 52–53). Klasteri vode mogu pokrivati preko 95% mreže vodikovih veza, među kojima neki klasteri maksimalno obuhvaćaju tisuće molekula protežući se izvan 3,0 nanometara.¹⁵¹

¹⁴⁹ Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

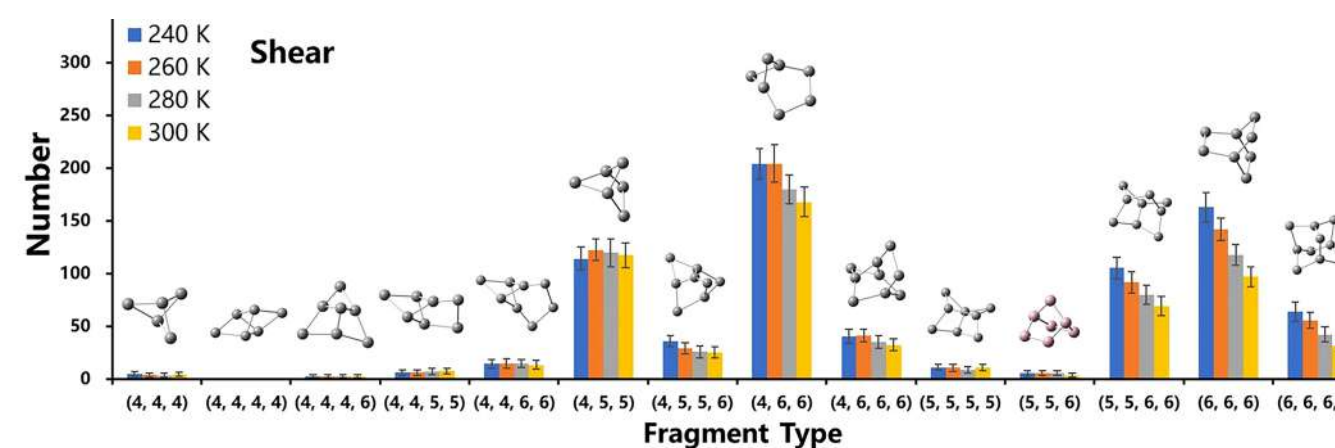
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ 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>



Slika 52. Shematski prikaz hijerarhijske metode klasteriranja predložene u ovoj studiji. Vodikove veze, prstenovi i fragmenti smatraju se strukturama 1., 2. i 3. razine koje su modeli s kuglicama i štapićima iz kemijske perspektive, a crvene i bijele kuglice označavaju atome kisika odnosno vodika. Pune i isprekidane crte označavaju O–H kovalentne veze odnosno vodikove veze. Klasteri 4. i 5. razine ilustrirani su topološkom perspektivom. Kuglice predstavljaju strukturu posljednjih razina. Imajte na umu da su strukture na slici samo odabrane među onima koje je algoritam klasteriranja razmatrao.

Izvor: 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>



Slika 53. Raspodjela hijerarhijskih struktura na 1., 2. i 3. razini u mreži u različitim slučajevima. (a) Raspodjela vodikovih veza (strukture 1. razine) pri različitim temperaturama. (b) Raspodjela prstenova (strukture 2. razine) pri različitim temperaturama. (c) Raspodjela fragmenata (strukture 3. razine) pri različitim temperaturama. Imajte na umu da (4, 4, 4) označava simbol fragmenta koji uključuje tri 4-člana prstena.

Izvor: 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>

Toplinski kapacitet, toplinska vodljivost i gustoća vode te njihov funkcionalni značaj

1. Visoki toplinski kapacitet vode

Voda ima najviši specifični toplinski kapacitet od svih tekućina ili krutina pod normalnim uvjetima, odmah iza samo nekoliko plinova poput vodika.¹⁵² To znači da voda može apsorbirati, zadržati i prenijeti velike količine toplinske energije uz samo relativno malu promjenu vlastite temperature.

Toplinski kapacitet vode izračunava se kao količina topline potrebna za podizanje temperature 1 grama vode za 1 stupanj Celzijusa i iznosi približno 4,18 J/(g·°C) pod standardnim uvjetima. Ovo svojstvo je jedan od ključnih čimbenika u regulaciji klime: oceanska voda akumulira toplinu danju i postupno je otpušta noću. Ljeti ocean apsorbira višak topline, dok je zimi polako otpušta, djelujući kao divovski termosta i smanjujući temperaturne fluktuacije diljem planeta.

2. Toplinska vodljivost vode

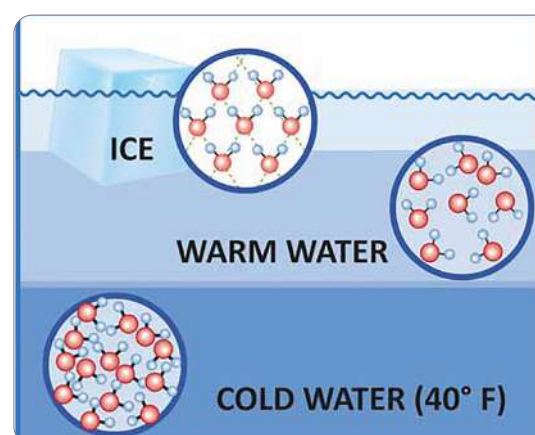
Voda ima relativno nisku toplinsku vodljivost u usporedbi s metalima, ali je viša od mnogih drugih tekućina. Toplinska vodljivost odražava sposobnost tvari da prenosi toplinu iz jednog svog dijela u drugi bez kretanja same tvari. Pod standardnim uvjetima (25 °C), toplinska vodljivost vode iznosi približno 0,6 W/(m·K), što je čini učinkovitim vodičem topline u prirodnim procesima poput distribucije topline u oceanima i drugim vodenim tijelima.

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

Studije pokazuju da se toplinska vodljivost vode povećava s porastom temperature, do određene točke.¹⁵² Osim toga, ova vrijednost može varirati u prisutnosti nečistoća ili otopljenih tvari.^{153, 154} Ove karakteristike utječu na način distribucije topline u vodi, što je ključno za razumijevanje interakcija između oceana i atmosfere.

3. Anomalno ponašanje gustoće vode

Za razliku od većine tvari, gustoća vode se neobično ponaša s promjenom temperature. Kada se voda ohladi na 4 °C, njezina gustoća se povećava, ali kada se dalje hladi (od 4 °C do 0 °C), njezina gustoća počinje opadati (Slika 54). Kada se voda smrzne, njezina gustoća pada za oko 8–9 %. To objašnjava zašto led pluta umjesto da tone. Ovaj je fenomen kritično važan za život u vodenim tijelima jer led štiti vodu i žive organizme od smrzavanja i sprječava potpuno smrzavanje vode do dna.



Slika 54. Shematski prikaz promjene gustoće vode tijekom hlađenja: Kako se voda hladi, molekule se približavaju jedna drugoj (povećavajući gustoću) do određene točke. Voda je najgušća na oko 4 °C. Kako se voda dalje hladi, vodici se međusobno odguruju, poravnavajući se na određeni način dok se formiraju kristali leda, šireći se i čineći led oko 10 posto manje gustim od tekuće vode.

Izvor: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Utjecaj svojstava vode na klimu i ekosustave

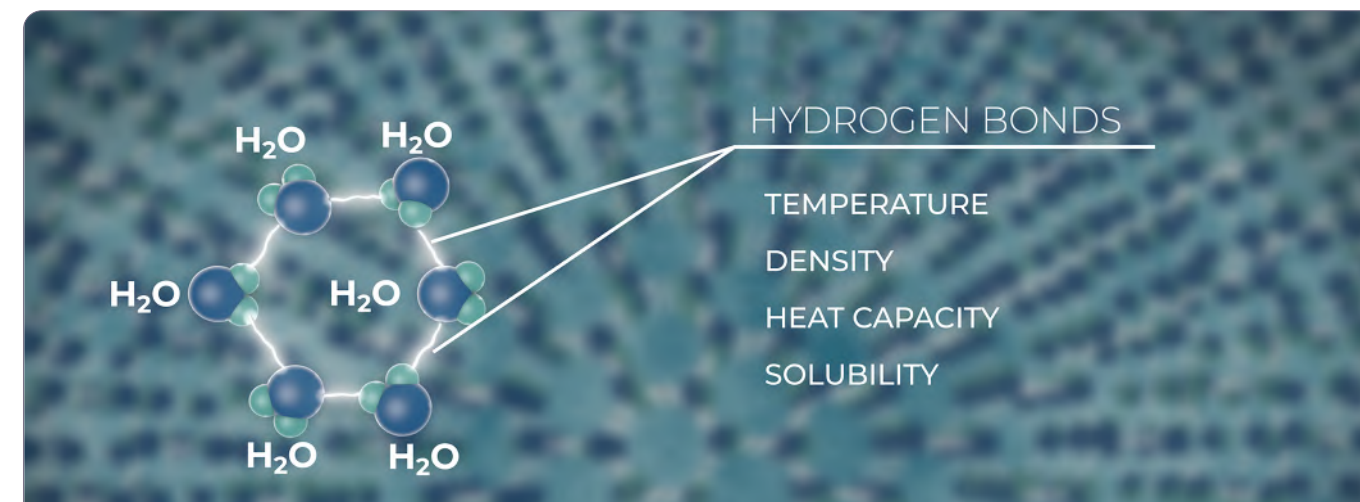
Promjene u temperaturi vode mogu značajno utjecati na toplinsku ravnotežu Svjetskog oceana te njegovu sposobnost zadržavanja i prijenosa topline. To će, pak, utjecati na klimatski sustav Zemlje.

Stoga, fizikalno-kemijska svojstva vode, posebno njezin toplinski kapacitet i toplinska vodljivost igraju vitalnu ulogu u održavanju ravnoteže okoliša na planetu i reguliranju klimatskih procesa (Slika 55).

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

¹⁵³Sharqawy, 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>

¹⁵⁴Jamieson, 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)

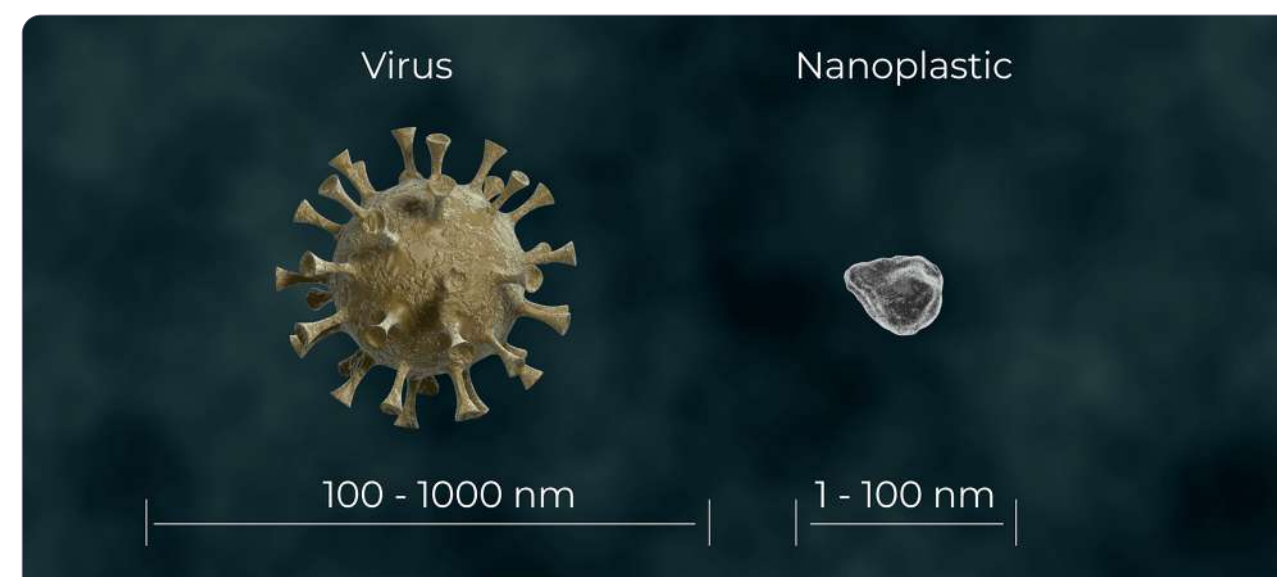


Slika 55. Shematski prikaz vodikovih veza u molekulama vode i njihov utjecaj na ključna svojstva vode: Vodikove veze pridonose visokom toplinskom kapacitetu vode, omogućujući joj učinkovito apsorbiranje i zadržavanje topline. Te veze također određuju gustoću vode – maksimalnu na 4°C – kao i njezinu sposobnost otapanja polarnih i ionskih tvari, čineći vodu univerzalnim otapalom

Uloga MNP u mijenjanju fizikalnih svojstava morske vode

Kao proizvodi petrokemijske industrije, plastika se ne razgrađuje biološki u prirodi. Umjesto toga, raspada se na manje čestice, kao što su mikroplastika i nanoplastika.¹⁵⁵ Te čestice, posebno nanoplastika, mogu značajno utjecati na fizikalna i kemijska svojstva vode, što pak može utjecati na ekosustave i klimatske procese.

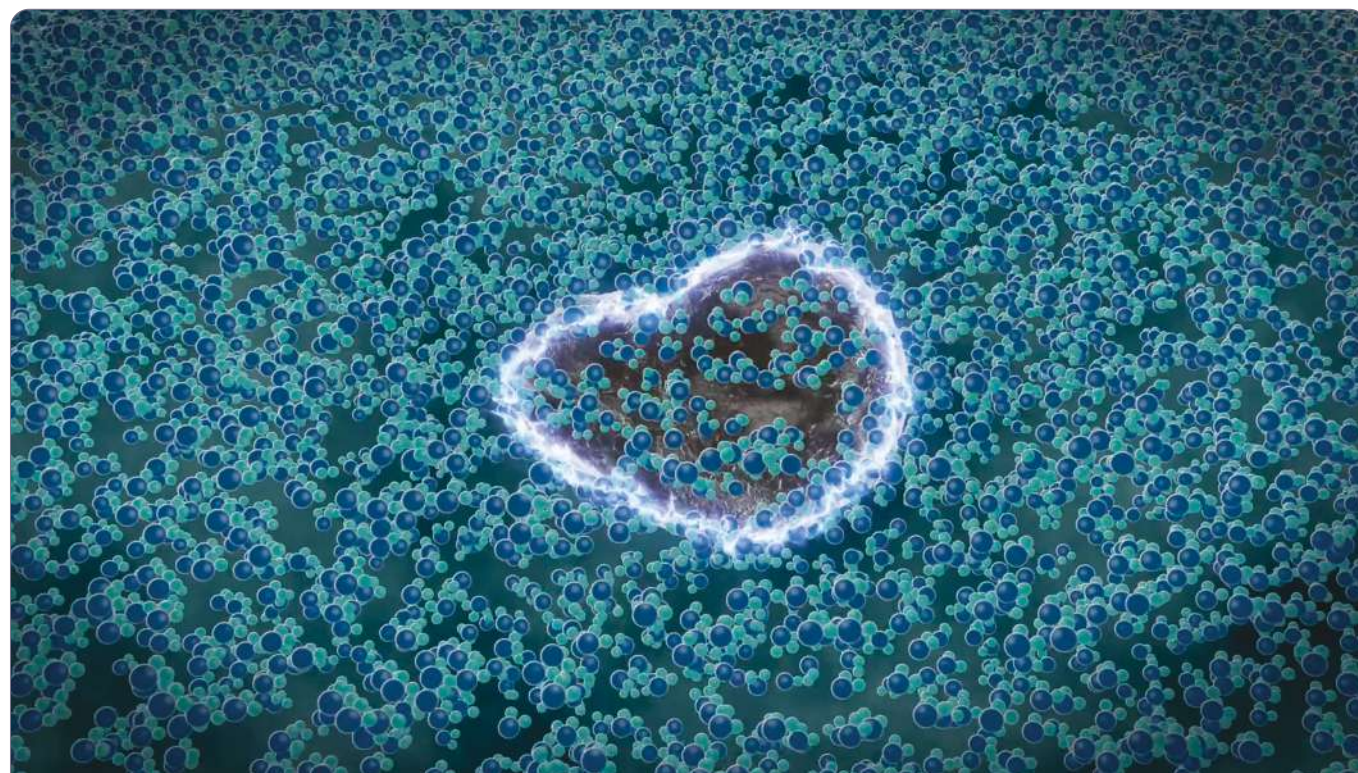
Nanoplastika su čestice mjerene u nanometrima, što znači da su manje od virusa (Slika 56).



Slika 56. Shematska usporedba veličina virusa i čestice nanoplastike

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

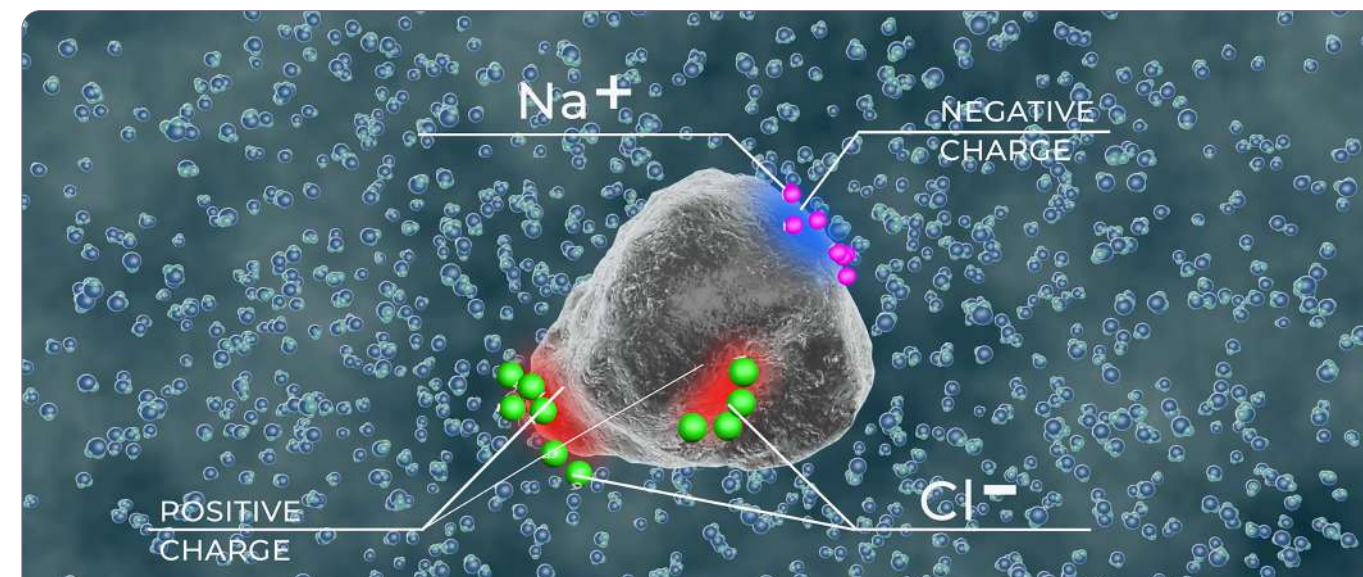
Na primjer, najlonske (poliamidne) nanoplastike, koje sadrže dušik i kisik, mogu tvoriti vodikove veze s vodom.¹⁵⁶ Kada čestice nanoplastike uđu u vodu, narušavaju uređenu strukturu vodikovih veza između molekula vode. To može promijeniti fizikalno-kemijska svojstva vode (Slika 57). Konkretno, smanjuje se pokretljivost molekula vode, što umanjuje njihovu sposobnost učinkovitog sudjelovanja u procesima izmjene topline. Štoviše, u vodenim otopinama koje sadrže razne tvari, plastične nanočestice mogu poprimiti električni naboj.¹⁵⁷



Slika 57. Shematski prikaz nabijenih plastičnih nanočestica u vodi: kada su izložene nestabilnim uvjetima vode, kao što je prisutnost organskih ili sintetičkih nečistoća, promjene pH-vrijednosti, temperature ili saliniteta, površina nanoplastike postaje potencijalno aktivna i sposobna generirati električne naboje u vodenom okolišu.

Izvor: Rahman, A. M. N. 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>

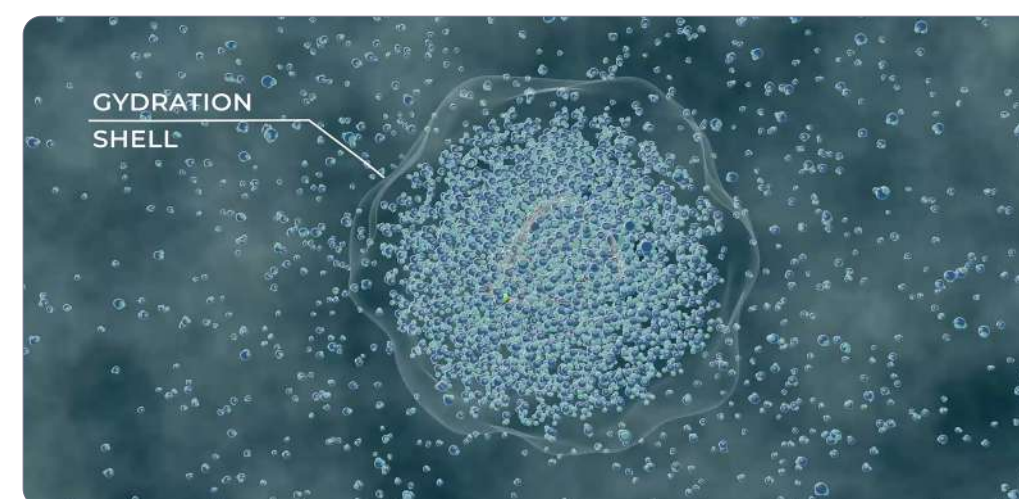
To je posljedica kemijskih promjena na njihovoj površini, poput oksidacije i adsorpcije iona, npr. natrija (Na^+) i klora (Cl^-), u morskoj vodi. Nabijene plastične nanočestice okružene ionima privlače molekule vode i tvore hidratnu ljusku oko sebe¹⁵⁸ (Slika 58).



Slika 58. Shematski prikaz formiranja hidratne ljuske oko nabijenih plastičnih nanočestica: u tom procesu, nabijene nanočestice privlače ione, pridonoseći stvaranju molekula vode oko sebe i stvarajući zaštitnu hidratnu ljusku.

Izvor: 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>

Istraživači s Politehničke škole u Lausanni (EPFL) odlučili su saznati veličinu ove hidratne ljuske iona, odnosno koliko molekula vode reagira na jedan ion. Pokazalo se da jedan ion može utjecati na oko milijun molekula vode oko sebe. Ovaj se učinak pojačava ako čestica ima veliko površinsko punjenje i visoku koncentraciju adsorbiranih iona. Stoga jedna nanočestica plastike može promijeniti svojstva milijuna molekula vode¹⁵⁸ (Slika 59). Molekule vezane u hidratnoj ljusci manje su pokretne.¹⁵⁹ Kao rezultat, ukupni toplinski kapacitet vode je smanjen.^{160, 161}



Slika 59. Shematski prikaz hidratne ljuske oko čestice nanoplastike

¹⁵⁶Ivleva, 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>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. 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>

¹⁵⁸Chen, 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>

¹⁵⁸Chen, 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>

¹⁵⁹Laage, 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>

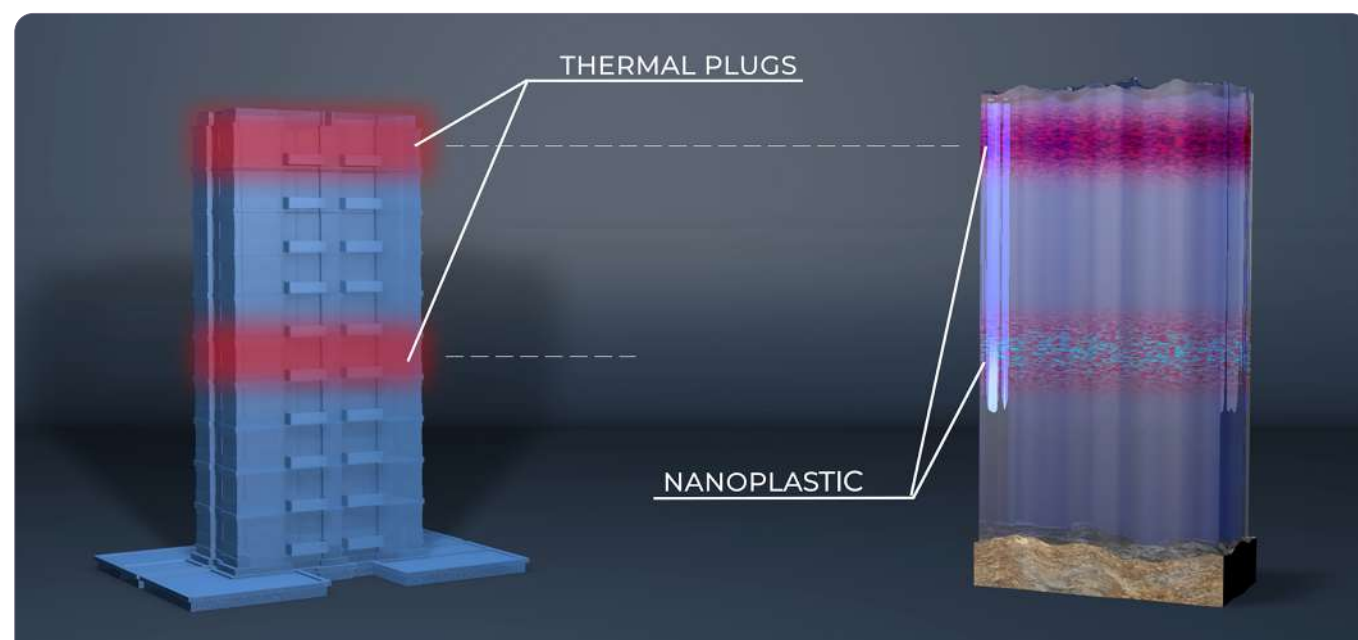
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, 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>

Narušavanje struktura vodikovih veza također dovodi do smanjenja toplinske vodljivosti.¹⁶² Posljedično, voda može ostati zagrijana u blizini nanoplastike, jer gubi sposobnost učinkovitog prijenosa topline.

Područja koncentracije mikro- i nanoplastike u oceanu

Mikro- i nanoplastika mogu se raspršiti oceanom strujama, dok se gušće čestice ili kontaminirana plastika mogu taložiti na oceanskom dnu. Akumulacija nanoplastike također se opaža u područjima termoklinova – prijelaznih slojeva između toplih površinskih voda i hladnijih dubokih voda¹⁶³ (Slika 60).

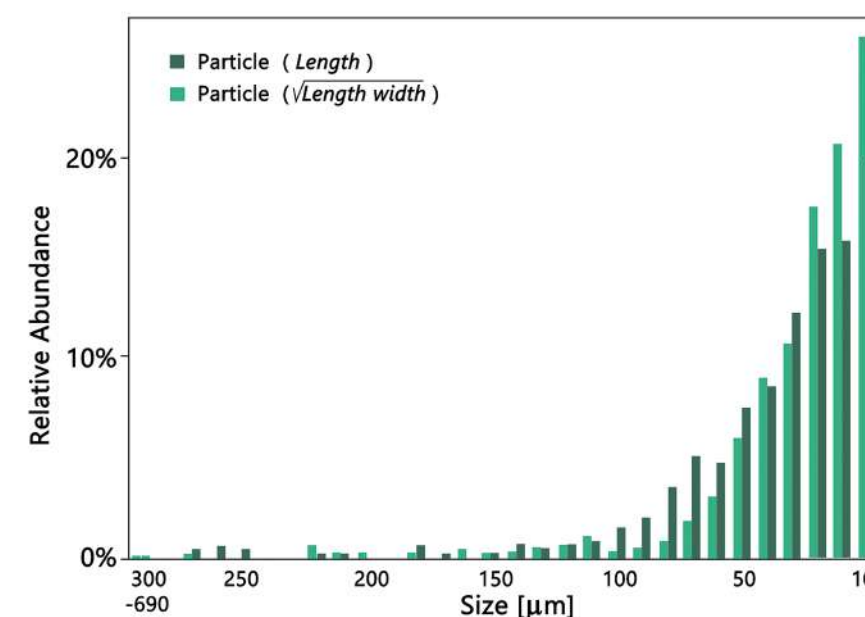


Slika 60. Slika prikazuje figurativnu usporedbu između područja koncentracije mikro- i nanoplastike u oceanu i višekratnice s toplinskim blokadama na 5. i 10. katu. Blokade otežavaju normalnu izmjenu topline, uzrokujući nakupljanje topline na tim katovima umjesto njezine ravnomjerne distribucije. Termalna kamera bi pokazala da je temperatura unutar zgrade znatno viša nego u sličnoj zgradi bez blokada. Slično tome, nanoplastika narušava prirodne mehanizme izmjene topline u vodi, stvarajući "toplinske blokade" u oceanu

Povećane koncentracije nanoplastike u oceanima mogu uzrokovati promjene u globalnoj toplinskoj ravnoteži. To može utjecati na porast temperature oceana, potencijalno uzrokujući klimatske promjene. Važno je napomenuti da čak i mala količina nanoplastike može imati značajan utjecaj na ekosustave. Porast temperature površine oceana ubrzava fragmentaciju plastičnog otpada u mikro- i nanoplastiku (Slika 61). Posljedično, broj tih čestica se povećava i one ulaze u atmosferu zajedno s vodenom parom. Prisutnost mikro- i nanoplastike u atmosferi pridonosi daljnjem zagrijavanju, što pak pojačava zagrijavanje oceana. Tako se stvara povratna sprega, gdje se procesi međusobno pojačavaju.

¹⁶²Berger 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>

¹⁶³Tikhonova, 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>



Slika 61. Relativna distribucija čestica mikroplastike po veličinama na svim analiziranim postajama (np = 543). Slike prikazuju najmanje (lijevo) i najveće (desno) pronađene čestice MP potvrđene Ramanovom spektroskopijom.

Izvor: 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>

Veza između elektrostatičkog naboja MNP i atmosferskih pojava

Mikro- i nanoplastika ulaze u atmosferu različitim putevima. Vodena para koja isparava s površine oceana i drugih vodenih tijela prenosi mikročestice u zrak.¹⁶⁴ Na kopnu, primarni izvori atmosferske plastike uključuju tvornice, spalionice otpada i odlagališta. Osim toga, mikroplastika se diže u zrak kada se poljoprivredna gnojiva i plastična folija osuše i rasprše vjetrom. Čestice mikroplastike oslobađaju se i trenjem automobilskih guma.

Ovi i mnogi drugi izvori značajno pridonose onečišćenju atmosfere. Ti procesi potiču nakupljanje i širenje mikroplastike u atmosferi, stvarajući ozbiljne ekološke i klimatske prijetnje. Jednom u atmosferi, mikro- i nanoplastične čestice mogu služiti kao jezgre kondenzacije za vodenu paru. Što je veći broj takvih jezgri, to se brže događa kondenzacija vodene pare u kapljice. Mikroplastika u zraku pronađena je u uzorcima oblačne vode prikupljenim s planinskih vrhova u Japanu¹⁶⁵ (Slika 62).

¹⁶⁴Shaw, 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>

¹⁶⁵Wang, 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>



Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation
Wang et al. (2023) | Environmental Chemistry Letters | DOI: 10.1007/s10311-023-01626-x



Slika 62. Zračna hidrofilna mikroplastika u oblačnoj vodi na velikim visinama i njezina uloga u stvaranju oblaka.

Izvor: Hiroshi Okochi from Waseda University

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



“U zagađenom okolišu s puno više aerosolnih čestica, poput mikroplastike, raspršujete dostupnu vodu među puno više aerosolnih čestica, tvoreći manje kapljice oko svake od tih čestica. Kada imate više kapljica, dobivate manje kiše, ali budući da kapljice padaju tek kada postanu dovoljno velike, prikupite više ukupne vode u oblaku prije nego što kapljice postanu dovoljno velike da padnu i, kao rezultat toga, dobivate jače padaline kada do njih dođe”, rekla je Miriam Friedman, profesorica kemije s Odsjeka za meteorologiju i atmosfersku znanost Penn Statea.¹⁶⁶

To objašnjava zašto su u raznim regijama primijećene anomalne padaline posljednjih godina.

¹⁶⁶The 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>

Električni naboji u oblacima

Atmosfera Zemlje je složen električni sustav u kojem molekule vode igraju vitalnu ulogu. Od 1752. godine, kada je Benjamin Franklin prvi put pokazao da je atmosfera naelektrizirana i da grmljavinske oluje imaju električnu prirodu, postalo je jasno da voda, u obliku pare, tekućine i leda, igra ključnu ulogu u tim procesima. Dok je čista voda električki neutralna, tijekom faznih promjena kao što su topljenje i smrzavanje, kao i tijekom sudara između molekula, može prenositi ione na druge čestice. To dovodi do nakupljanja električnih naboja i pridonosi atmosferskim električnim pojavama.

U atmosferi, sudari između kristala leda, pothlađenih kapljica vode i drugih čestica, posebno u prisutnosti prirodnih električnih polja, uzrokuju razdvajanje naboja. Taj proces igra ključnu ulogu u razvoju atmosferskog elektriciteta, uključujući stvaranje grmljavinskih oblaka. Također je bitan za stvaranje oblaka i oborina. Električki nabijene kapljice privlače se međusobno, ubrzavajući njihovo spajanje u veće kapi. To u konačnici dovodi do stvaranja oblaka sposobnih za proizvodnju oborina poput kiše, snijega ili tuče.



“Naboji su zaista važni, a u formiranju oblaka, naboji su praktički sve. I ono što smo otkrili jest da su naboji kritični”, rekao je Gerald H. Pollack, dr. sc., profesor bioinženjeringa na Sveučilištu u Washingtonu, glavni urednik i osnivač interdisciplinarnog istraživačkog časopisa WATER.¹⁶⁷

Godine 1843. Michael Faraday otkrio je da se električna energija može generirati kada se kapljice vode trljaju o metalne površine, učinkovito puneći vodu. Ovo otkriće potaknulo je daljnja istraživanja o tome kako voda postaje električki nabijena trenjem, faznim prijelazima i kontaktnom elektrifikacijom, pa čak i rezultiralo naporima da se taj učinak iskoristi za nove izvore energije.

Poznato je da vlažan zrak može neutralizirati površinske naboje stvaranjem tankog vodenog filma koji omogućuje ionima kretanje i raspršivanje nakupljenog naboja. Međutim, u nekim slučajevima, površine koje apsorbiraju vodu zapravo mogu akumulirati naboj iz vlažne atmosfere, što također utječe na okolno električno okruženje.¹⁶⁸ Istraživanja su također pokazala da se teški metali mogu lako vezati na mikroplastiku, a ova kombinacija može predstavljati ozbiljne rizike za globalne ekosustave.

¹⁶⁷AllatRa 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).

¹⁶⁸Lax, 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>

Štoviše, mikroplastika i mješavina tvari na njihovoj površini mogu se ne samo lijepiti za druge zagađivače, već i međusobno djelovati, mijenjajući njihova kemijska svojstva.¹⁶⁹ Kada mikro- i nanoplastične čestice uđu u atmosferu, mogu poremetiti delikatnu ravnotežu atmosferskih procesa. Plastične čestice mogu nositi naboj, pojačavajući privlačenje polarnih molekula vode, potičući stvaranje kapljica. Za razliku od tipičnih jezgri kondenzacije poput peludi, morske soli ili čađe, plastične čestice mogu skupljati kapljice učinkovitije od neutralnih čestica.¹⁷⁰

To znači da se vodene kapljice počinju brže formirati oko nabijenih čestica, što utječe na strukturu oblaka i može dovesti do stvaranja većih kapljica, pa čak i abnormalno velikih kristala leda.¹⁷¹ Na primjer, nedavna studija grupe istraživača pronašla je plastične pelete s površinama koje privlače vodu u oblacima na planinskim vrhovima u Japanu.¹⁷²

Utjecaj na stvaranje oblaka i oborine

Mikroplastika može utjecati na prirodu oborina, prognozu vremena, klimatsko modeliranje, pa čak i sigurnost letenja, utječući na to kako se atmosferski ledeni kristali formiraju u oblake.

Studija¹⁷³ je pokazala da se kapljice vode koje sadrže mikroplastiku smrzavaju na temperaturama 4–10 °C višim od kapljica bez njih, što znači da se smrzavaju na nižim nadmorskim visinama. Tipično, kapljica vode bez ikakvih nečistoća smrzava se na oko –38 °C. Međutim, u slučaju mikroplastike, 50 % kapljica smrznuo se na –18°C do –24°C, ovisno o vrsti plastike.

Kapljice vode koje sadrže mikroplastiku brže se smrzavaju, tvoreći veće čestice leda. Te čestice zračne struje nose prema gore, gdje se više puta oblažu slojevima leda, a zatim padaju na tlo. Ova vrsta pojave može dovesti do povećanja veličine tuče (Slike 63-64), pojačavajući njezin razorni udar i ubrzavajući stvaranje ledenih oblaka. Kao rezultat toga, može se promijeniti učestalost i intenzitet oborina, uključujući kišu i snijeg. To može pokrenuti kaskadne učinke koji utječu na klimu, hidrološki ciklus i ekosustave.

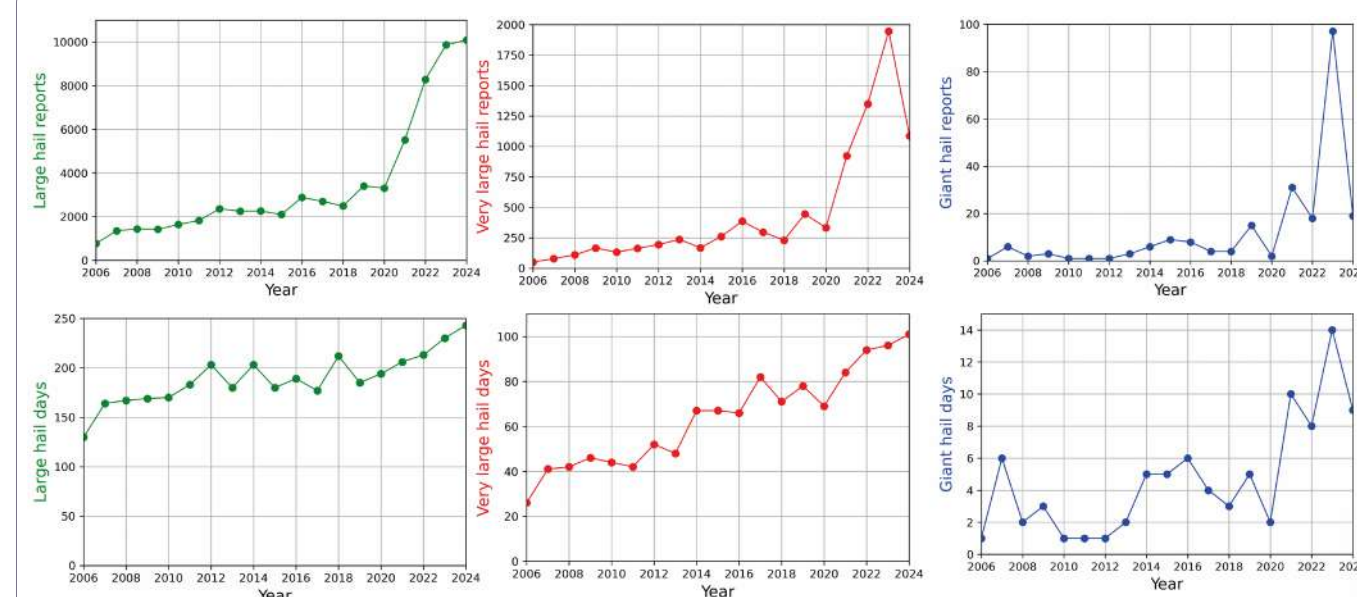
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. 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>

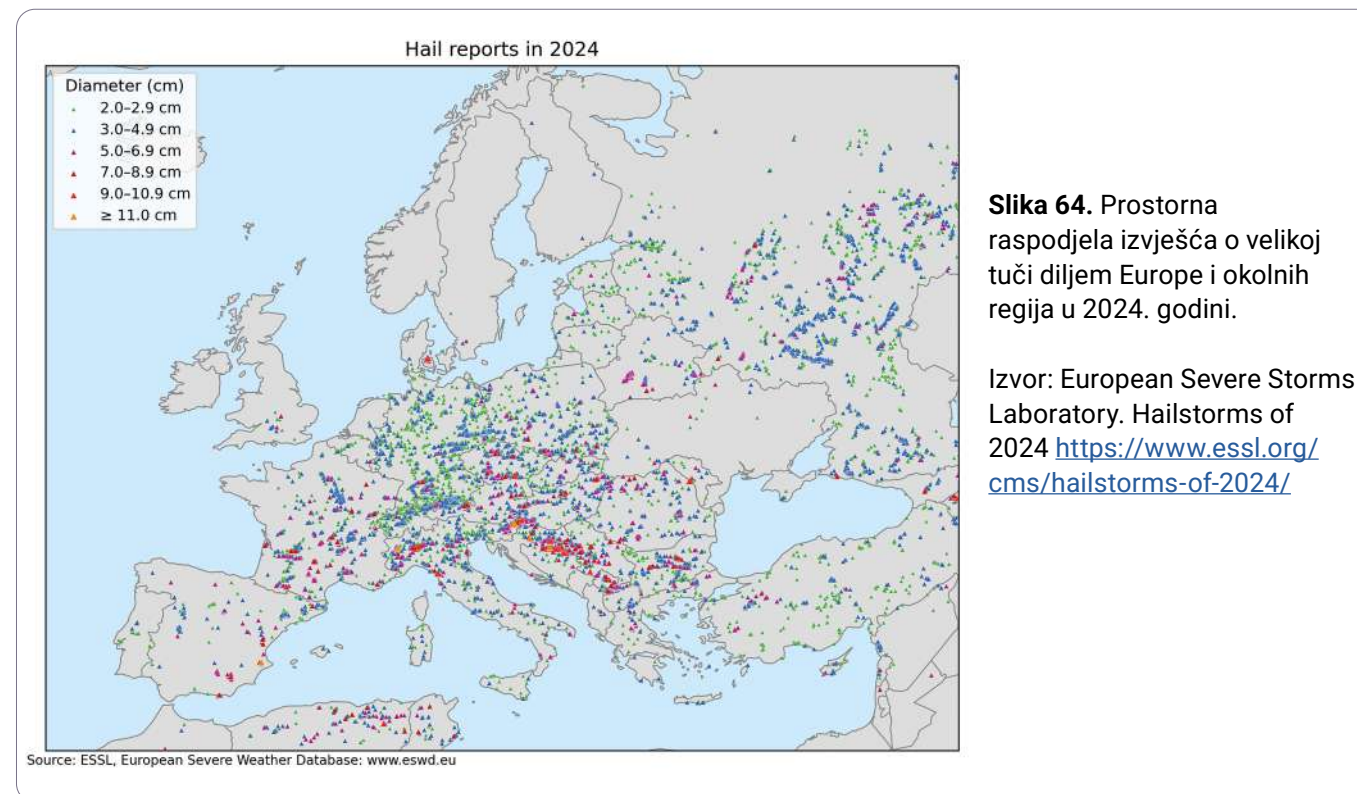
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. ACS ES&T Air 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>



Slika 63. Broj izvješća i dana s tučom veličine (0,8+ cm), vrlo velikom (5+ cm) i gigantskom (10+ cm) od 2006. do 2024. godine.

Izvor: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.esssl.org/cms/hailstorms-of-2024/>



Slika 64. Prostorna raspodjela izvješća o velikoj tuči diljem Europe i okolnih regija u 2024. godini.

Izvor: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.esssl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Kada su nanočestice plastike prisutne u atmosferi, oblaci se počinju formirati na nižim nadmorskim visinama – obično ispod 1980 metara. Zbog toga oblaci postaju manje pokretni, što remeti normalne obrasce padalina. Posljedično, neka područja mogu doživjeti sušu, dok druga primaju prekomjerne kišne padaline.

Uloga mikro i nano plastike (MNP) u narušavanju klimatske ravnoteže Zemlje

Gušći oblaci počinju zadržavati toplinu u nižim slojevima atmosfere, djelujući poput pokrivača apsorbirajući i ponovno zračeći toplinsku energiju natrag prema površini Zemlje. To smanjuje količinu topline koja odlazi u svemir i doprinosi zagrijavanju atmosfere. Porast temperatura dovodi do povećanog isparavanja iz oceana, dok više vlage u zraku dodatno pojačava zagrijavanje, stvarajući samoojačavajući ciklus. Značajno je da se za svaki porast temperature od 1 °C (1,8 °F) količina vlage u atmosferi povećava za približno 7%¹⁷⁴, a učestalost udara groma za oko 12 %.¹⁷⁵



Kao što je primijetio Kevin Trenberth, istaknuti klimatolog u Američkom nacionalnom centru za atmosferska istraživanja (NCAR) i vodeći autor IPCC izvješća, **“Ta dva sastojka, povećana temperatura i povećana vodena para, dovode do povećane nestabilnosti atmosfere. To pak dovodi do veće konvekcije, više oluja, od kojih neke, one teže, postaju grmljavinske oluje. Kao rezultat, postoji veći rizik od jakih grmljavinskih oluja.**

A ako se grmljavinske oluje udruže i surađuju, kao što to čine u tropskoj oluji, možete dobiti i jače uragane. Dakle, sve se te stvari zbrajaju. I postoji povećan rizik od nastanka oluja, jakih grmljavinskih oluja, posebno superćelijskih oluja koje proizvode tuču, a na nekim mjestima u pravim uvjetima mogu proizvesti i tornada.”

Stoga, ekstremno zagrijavanje oceana uz višak električne energije i topline u atmosferi pogoršava klimatsku situaciju, uzrokujući razornije vremenske događaje kao što su jake grmljavinske oluje, uragani, munje i sprajtovi.

U atmosferi plastika ne samo da zagađuje okoliš, već i remeti klimatske procese utječući na stvaranje oblaka i oborina. Ona pojačava elektrostatički naboj u atmosferi, ubrzava kondenzaciju vodene pare i utječe na gustoću oblaka – čimbenike koji mogu povećati intenzitet oluja, grmljavinskih nevremena i drugih ekstremnih vremenskih pojava. Na pragu smo potpunog razumijevanja razmjera ovog utjecaja na klimu, što naglašava hitnu potrebu za sveobuhvatnim djelovanjem kako bi se smanjilo zagađenje česticama plastike, kako u oceanima tako i u atmosferi.

¹⁷⁴NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

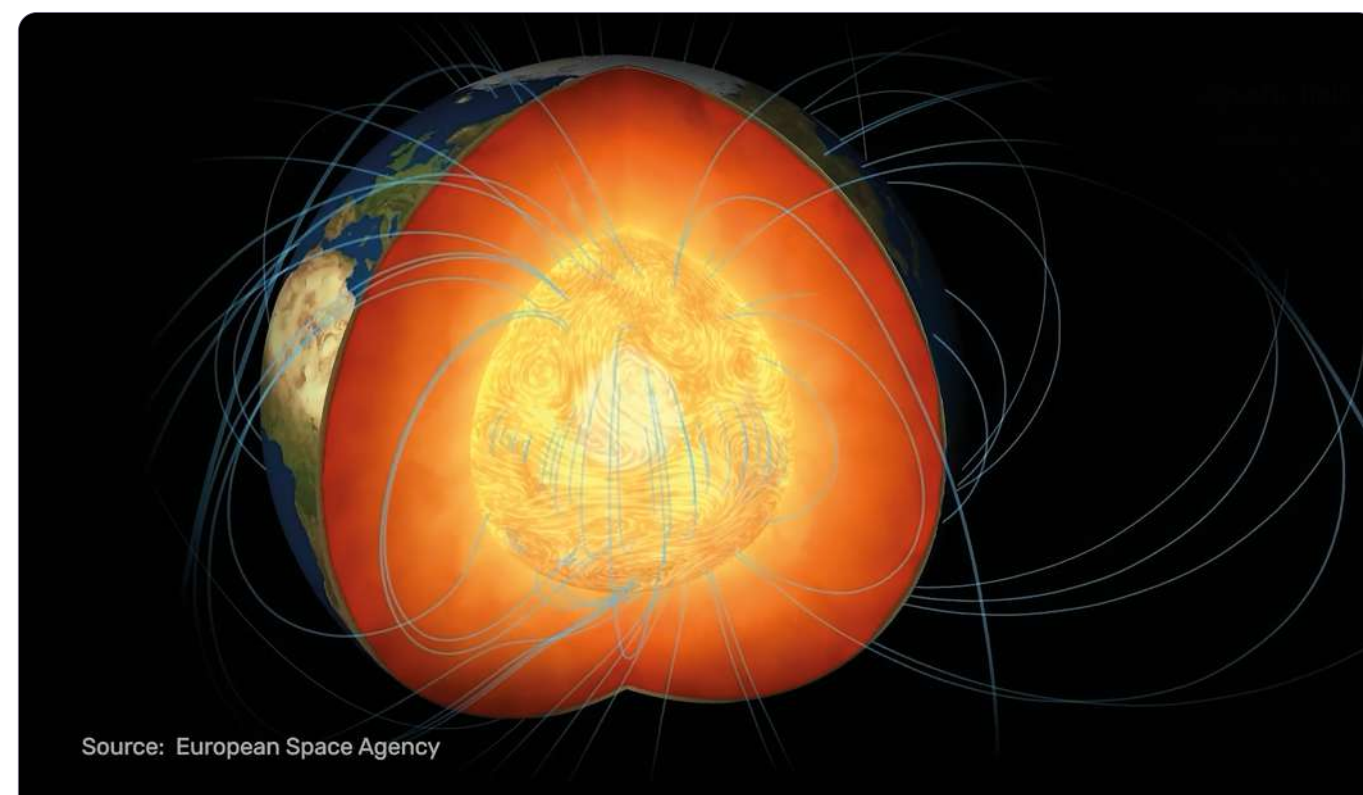
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵ 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>

Interakcija između oceana i Zemljinog magnetskog polja

Oceani pokrivaju oko 70 % Zemljine površine i mnogo su više od golemih rezervoara vode: oni igraju ključnu ulogu u složenim električnim sustavima planeta. Oni međusobno djeluju sa magnetskim poljem Zemlje i aktivno sudjeluju u njegovim elektromagnetskim procesima.

Magnetsko polje Zemlje djeluje kao prirodni štiti, štiteći površinu planeta od sunčevog vjetra i kozmičkog zračenja. Bez njega bi naša atmosfera bila uništena. Ovo geomagnetsko polje stvara se duboko unutar planeta, gdje se tekuća vanjska jezgra, sastavljena od metala, kreće oko čvrste unutarnje jezgre, stvarajući prirodni generator kroz proces poznat kao geodinamo (Slika 65).



Slika 65. Shematski prikaz procesa nastanka geomagnetskog polja: Zemljina tekuća vanjska jezgra vrti se oko svoje čvrste unutarnje jezgre, djelujući poput prirodnog generatora poznatog kao geodinamo, koji stvara magnetsko polje planeta.

Izvor: European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

Magnetsko polje Zemlje međusobno djeluje s električnim pojavama u oceanima i atmosferi. Morska voda, bogata solima i otopljenim ionima, visoko je provodljiva i sposobna prenositi električne struje. Te struje pak međusobno djeluju s magnetskim poljem planeta, stvarajući složene elektromagnetske procese koji utječu na dinamiku geomagnetskog sustava Zemlje.

Kao što je prethodno rečeno, onečišćenje oceana, posebno mikro- i nanoplastikom, može promijeniti kemijska i električna svojstva morske vode. Što je veća koncentracija zagađivača, to su prirodni elektromagnetski procesi više poremećeni. Kada zagađena voda isparava, sa sobom može nositi metale, mikroplastiku i druge tvari, potencijalno utječući na atmosferske procese.

Tijekom isparavanja, mikroskopske kapljice i aerosoli mogu transportirati mikro- i nanoplastiku, teške metale¹⁷⁶, i druge zagađivače u atmosferu, gdje isti mogu utjecati na lokalne elektromagnetske uvjete. Ovaj je proces donekle analogan postavljanju metalnog predmeta blizu magneta: on iskrivljuje magnetsko polje i slabi njegovu snagu na određenim područjima.

Utjecaj onečišćenja oceana na magnetsko polje Zemlje zahtijeva daljnja istraživanja, posebno u kontekstu globalnih klimatskih promjena. Dublje razumijevanje ovih procesa može pomoći znanstvenicima da procijene njihove potencijalne učinke na klimatski sustav planeta i ekosustave.

¹⁷⁶Ho, 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>

UTJECAJ MIKRO- I NANOPLASTIKE NA ZDRAVLJE LJUDI



“Nije da plastika samo zagađuje naše oceane i vodene putove te ubija morski svijet – ona je u svima nama i ne možemo izbjeći njezinu konzumaciju. Globalno djelovanje je hitno i neophodno za rješavanje ove krize.”

Marco Lambertini
Generalni direktor WWF International

Mikro- i nanoplastika kao novonastajući čimbenici rizika u epidemijama 21. stoljeća

Tijekom posljednjih 30 godina bilježi se stalan porast srčanih udara, moždanih udara, raka, dijabetesa, alergija i upalnih bolesti crijeva. Diljem svijeta primjećuje se pad imunološke funkcije kod djece i odraslih. Neplodnost postaje sve raširenija. Iako su podaci o broju neplodnih pojedinaca i parova i dalje ograničeni, Svjetska zdravstvena organizacija procjenjuje da oko 17,5 % odrasle populacije¹⁷⁷ – otprilike 1 od 6 u svijetu – doživljava neplodnost.

Od 2010. godine primijećen je pad intelektualnih sposobnosti. Čak i u razvijenim zemljama, 25 % odraslih ima poteškoća s osnovnim matematičkim problemima; u Sjedinjenim Američkim Državama ta brojka doseže 35 %. Raspon pažnje, logičko razmišljanje i sposobnost rješavanja jednostavnih zadataka se pogoršavaju. Raste prevalencija različitih oblika demencije i oštećenja kognitivnih sposobnosti.¹⁷⁸

Porast poremećaja mentalnog zdravlja nadmašio je rast fizičkih bolesti.¹⁷⁹ Anksiozni poremećaji, autizam, depresija, bipolarni poremećaj i poremećaj pažnje s hiperaktivnošću (ADHD) dostižu pandemijske razine.

Sve je više podataka da mikro- i nanoplastika igraju ulogu u razvoju ovih zdravstvenih stanja.

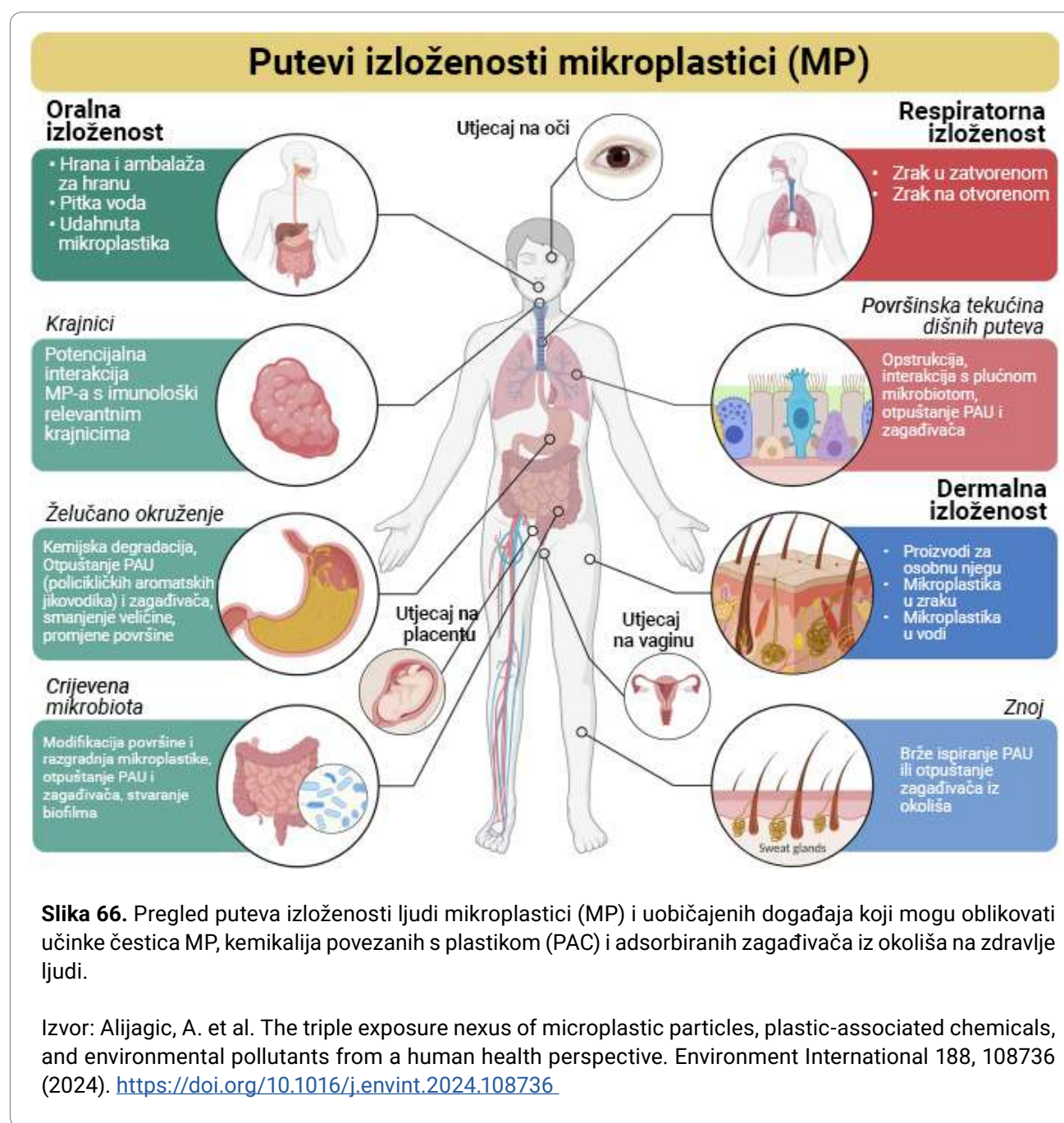
¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (accessed 1 May 2025).

Molekularni mehanizmi toksičnosti mikro- i nanoplastike (MNP): Razaranje DNK, mitohondrija i staničnih membrana

Mikro- i nanoplastika (MNP) spadaju među najraširenije oblike antropogenog zagađenja u okolišu. Zbog svojih fizičkih i kemijskih svojstava, plastične čestice mogu putovati na velike udaljenosti, prelazeći i geografske i ekološke barijere. Glavni putevi ulaska mikro- i nanoplastike u čovjekov organizam su gutanje (putem vode i hrane), udisanje iz zraka i apsorpcija kroz kožu¹⁸⁰ (Slika 66).



¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. Front. Cell. Infect. Microbiol. 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Kao što je spomenuto u 1. dijelu: **“Plastika u okolišu: Razmjeri problema”**, morski okoliš služi kao glavni izvor sekundarne mikroplastike. Prema procjenama, morski povjetarac prenosi oko 136 000 tona mikroplastike na obalna područja svake godine. Dodatno, otvorene vodene površine u urbanim područjima – uključujući sustave otpadnih i oborinskih voda – postale su značajna središta za akumulaciju i daljnje širenje plastičnih čestica, s koncentracijama koje mogu premašiti dosadašnje procjene za čak 90 %.

Prehrambeni proizvodi predstavljaju glavni put ulaska mikro- i nanoplastike (MNP) u čovjekov organizam. Biljke su sposobne akumulirati nanoplastiku kroz svoj korijenski sustav: tijekom navodnjavanja ili kiše čestice ulaze u tlo i apsorbiraju se s vodom, krećući se kroz ksilem i akumulirajući se u tkivima listova i plodova.¹⁸¹ Najveće koncentracije plastičnih čestica pronađene su u kulturama kao što su jabuke, kruške, mrkva i brokula.

Morski plodovi su još jedan put prijenosa mikro- i nanoplastike. Gutanje mikroplastike od strane morskih organizama zabilježeno je na svim trofičkim razinama. Prema istraživanju Sveučilišta Newcastle, prosječan čovjek može konzumirati do 250 grama mikroplastike godišnje – približno 5 grama tjedno, odnosno težinu jedne plastične kreditne kartice. Nadalje, kada se plastične posude – uključujući ambalažu za dječju hranu – zagrijavaju u mikrovalnim pećnicama, više od 2 milijarde nanočestica i 4 milijuna mikročestica plastike može se osloboditi u hranu po kvadratnom centimetru površine.

Mikroplastika je raširena u vodi za piće. Studije pokazuju da do 90 % uzoraka vode iz slavine u Sjedinjenim Američkim Državama sadrži MNP. Glavni izvori kontaminacije uključuju otpadne vode, industrijske emisije i atmosfersko taloženje plastike u zraku. Kada kontaminirana voda isparava, čestice plastike mogu se podići u atmosferu i kasnije pasti s kišom ili snijegom. Studija provedena u 11 nacionalnih parkova SAD-a zabilježila je više od 1000 tona plastičnih čestica koje su pale s oborinama u samo 14 mjeseci – što je dovoljno za proizvodnju 120 milijuna plastičnih boca.

Prijenos mikro- i nanoplastike putem aerosola smatra se jednim od najopasnijih puteva izloženosti za ljude. Čestice plastike podižu se s površina oceana i vodenih tijela, prenose se zračnim strujama i postaju dio atmosferskih aerosola. Procjene sugeriraju da u velikom gradu odrasli čovjek može udahnuti do 106 000 čestica mikroplastike tijekom dvosatne šetnje. U područjima blizu vodenih tijela, ta brojka može biti deset puta veća.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11122935>

Novo istraživanje predstavljeno na konferenciji Američkog kardiološkog koledža (ACC.25) otkrilo je da je veća izloženost mikroplastici — koja se može nenamjerno progutati ili udahnuti — povezana s povećanom učestalošću kroničnih nezaraznih bolesti. Istraživanje je pokazalo da zajednice smještene duž istočne i zapadne obale, obale Meksičkog zaljeva te određenih obala jezera u SAD-u imaju veće koncentracije mikroplastike u okolišu, što je koreliralo s višim stopama kroničnih stanja kao što su hipertenzija, dijabetes i moždani udar.

66

“Ova studija pruža početne dokaze da izloženost mikroplastici utječe na kardiovaskularno zdravlje, posebno na kronična, nezarazna stanja poput visokog krvnog tlaka, dijabetesa i moždanog udara”, rekao je Sai Rahul Ponnana, MA, znanstvenik za istraživačke podatke s Case Western Reserve School of Medicine u Ohiju i vodeći autor studije. **“Kada smo u našu analizu uključili 154 različita socioekonomska i okolišna čimbenika, nismo očekivali da će se mikroplastika svrstati među prvih 10 u predviđanju prevalencije kroničnih nezaraznih bolesti.”**¹⁸²

Mikro- i nanoplastika su, kako je utvrđeno, sposobne prodirati i prelaziti biološke barijere, uključujući one u crijevima, plućima, mozgu i posteljici.¹⁸³ Mikroplastika izložena slatkoj ili morskoj vodi lakše prodiere u stanice (Slika 67) zbog nakupljanja biomolekula na svojoj površini. Te biomolekule tvore premaz (eco-corona) koji pomaže mikroplastici da prođe kroz probavni trakt i integrira se u tkiva. Ovaj premaz djeluje kao mehanizam koji olakšava prodiranje plastike u stanice, slično “Trojanskom konju”.¹⁸⁴

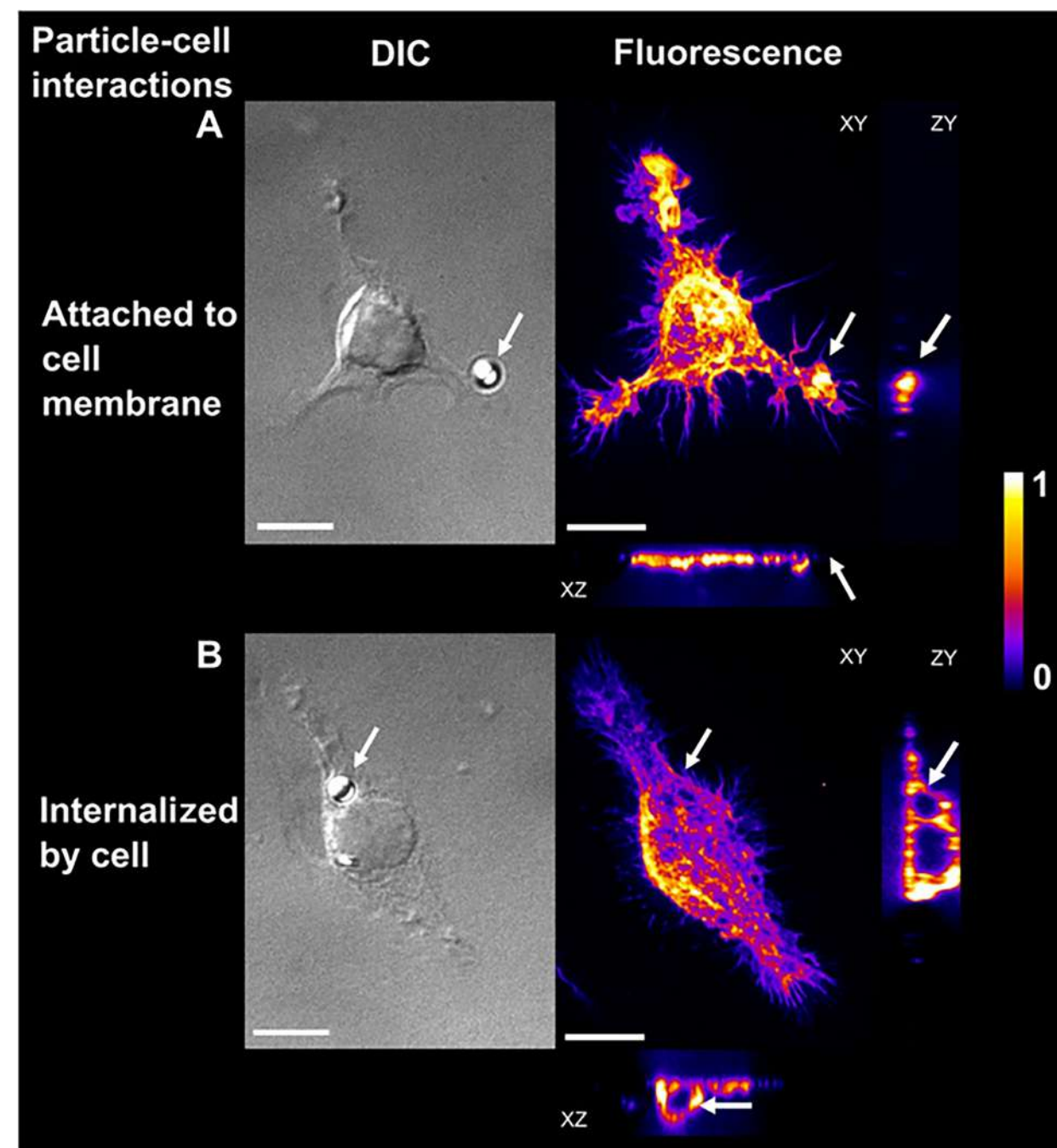
¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

¹⁸³ 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>

¹⁸⁴ 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>



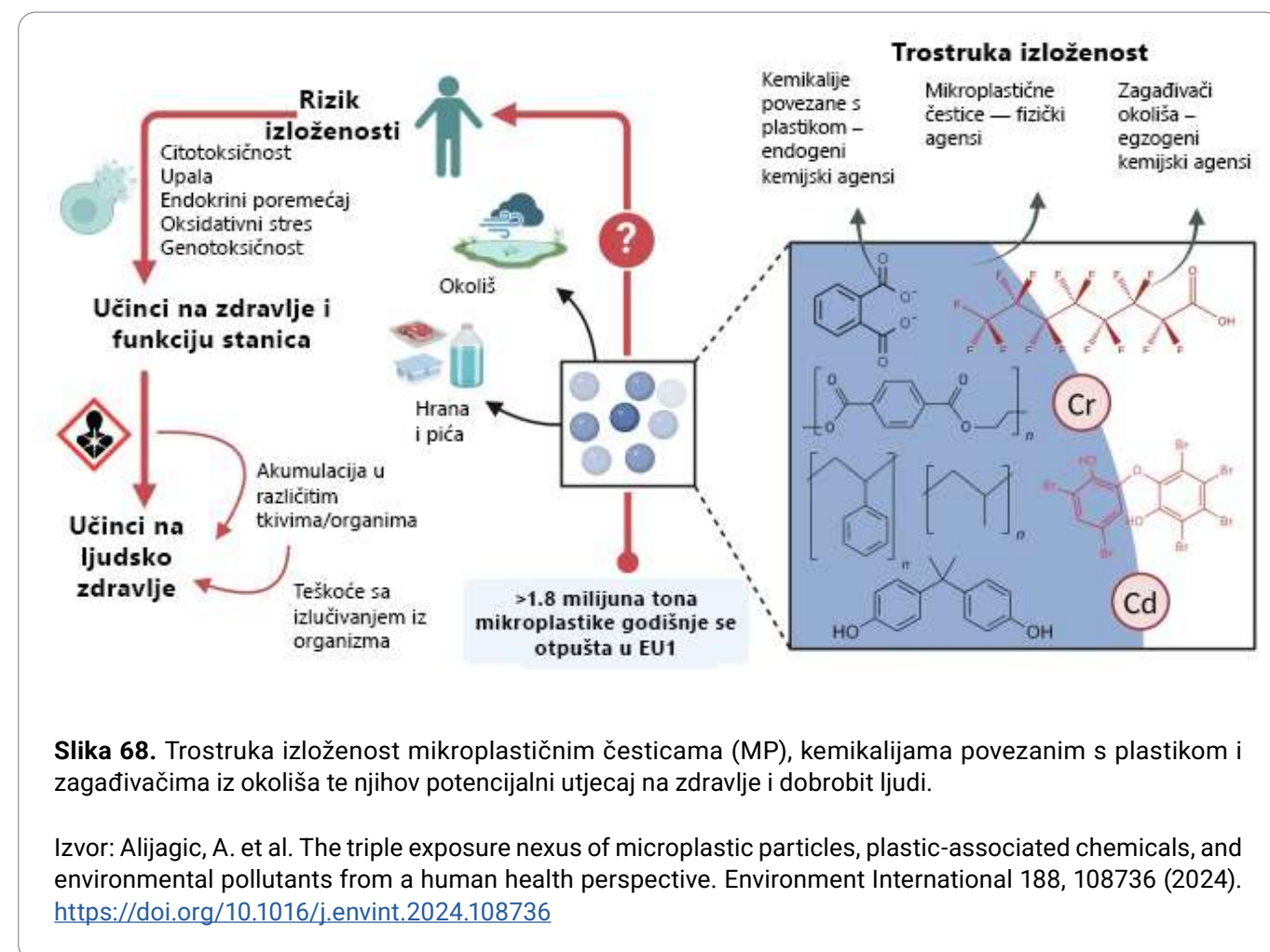
Slika 67. Slike interakcija čestica mikroplastike s eksponiranim slatkim vodama tijekom 2 tjedna.

DIC: Slike interakcija čestica i stanica dobivene mikroskopijom s diferencijalnim interferencijskim kontrastom. Fluorescence: Konfokalne slike stanica s rotirajućim diskom i fluorescentno označenim filamentoznim aktinom (slika lažne boje, projekcija maksimalnog intenziteta koja prikazuje proizvoljne jedinice). XY, YZ, i XZ trodimenzionalnih konfokalnih slika omogućuju razlikovanje mikroplastičnih čestica (A) pričvršćenih na stanične membrane ili (B) internaliziranih mikroplastičnih čestica. Strelice pokazuju položaj mikroplastičnih čestica. Mjerila, 10 μ m.

Izvor: 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>

Na toksičnost mikroplastike mogu utjecati mnogi čimbenici, uključujući veličinu, oblik, površinski naboj, proces trošenja/starenja, adsorpciju itd.¹⁸⁵ Manje čestice lakše prodiru u stanice i uzrokuju izraženiji oksidativni stres. Površinski naboj mikroplastike ključan je čimbenik u određivanju učinkovitosti staničnog unosa, budući da utječe na adheziju. Osim toga, mikroplastika se sastoji od polimera i raznih kemijskih aditiva, što dodatno pojačava njezine štetne učinke.¹⁸³

Mikro- i nanočestice plastike, kemijski spojevi korišteni u plastici te zagađivači iz okoliša koje plastika apsorbira — sve to djeluje zajedno na složen¹⁸⁶ i štetan način, predstavljajući značajnu prijetnju zdravlju ljudi (Slika 68).



¹⁸⁵Li, 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>

¹⁸⁶Alijagic, 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>

Samo jedan gram mikroplastike može sadržavati do 24 000 nanograma postojećih organskih zagađivača.¹⁸⁷ Te su tvari visoko toksične, akumuliraju se u organizmima i mogu uzrokovati štetu čak i u malim koncentracijama.

Mikroplastika također može učiniti druge zagađivače opasnijima,¹⁸⁸ budući da se i sama plastika i kemijska smjesa na njezinoj površini ne samo mogu zalijepiti za druge zagađivače, već i međusobno djelovati s njima, mijenjajući njihova kemijska svojstva.

Studije pokazuju da izloženost mikro- i nanoplastici uzrokuje tešku toksičnost za razne biološke organizme, uključujući:

- **Makromolekule:** Oštećenje DNK i gena, utjecaj na ekspresiju gena i promijenjena transkripcija proteina.
- **Organelne stanice:** Promijenjena dioba stanica, stanična toksičnost, apoptoza, reakcija oksidativnog stresa, metabolizam, povećani ioni kalcija.
- **Tkiva:** Upala, fibroza i osteoliza koštanog tkiva.
- **Organi:** Imunološki odgovori, disfunkcija organa, neurotoksičnost, karcinogeneza, promijenjeno hranjenje, promijenjena metabolička potražnja i preraspodjela energetske rezervi.
- **Životinjske i ljudske populacije:** Smanjena plodnost, sporiji rast i smanjena populacija.

Ti učinci naglašavaju višerazinski utjecaj mikro- i nanoplastike na biološke sustave.¹⁸⁹

1. Narušavanje staničnih funkcija

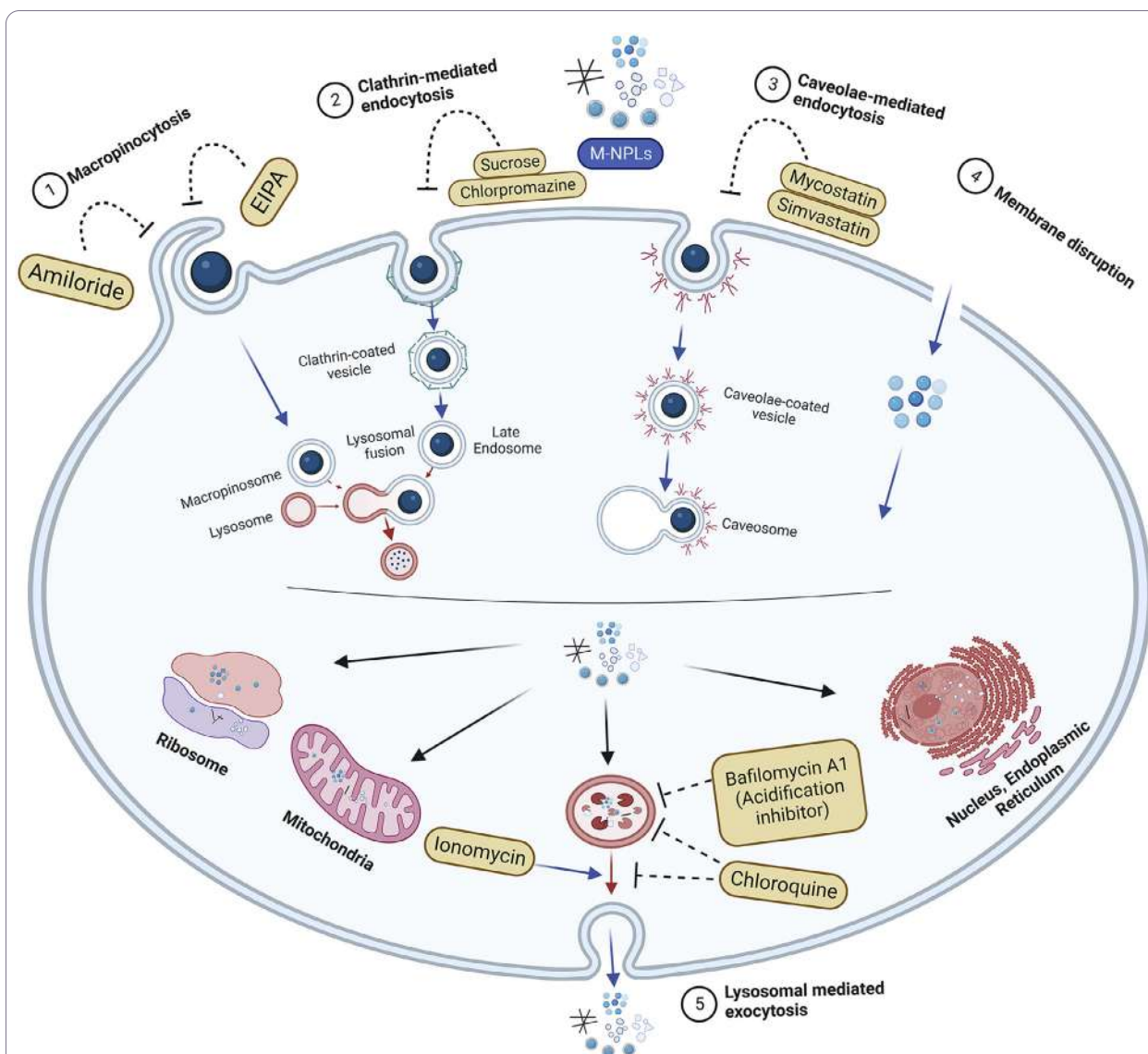
Razaranje organizma pod utjecajem mikro- i nanoplastike počinje na staničnoj razini.¹⁹⁰ Mikro- i nanoplastika međusobno djeluju sa staničnim membranama putem različitih veza (npr. vodikovih, halogenskih) ili hidrofobnih, van der Waalsovih i elektrostatičkih sila. Djelujući kao destabilizirajući čimbenik, mikro- i nanoplastika narušava integritet i funkciju staničnih membrana (Slika 69).

¹⁸⁷Shanwei 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).

¹⁸⁸Ho, 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>

¹⁸⁹Kaushik, 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>

¹⁹⁰Khan, 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>



Slika 69. Stanični unos i otpuštanje mikro- i nanoplastike (M-NPL). M-NPL koriste različite vrste endocitoze.

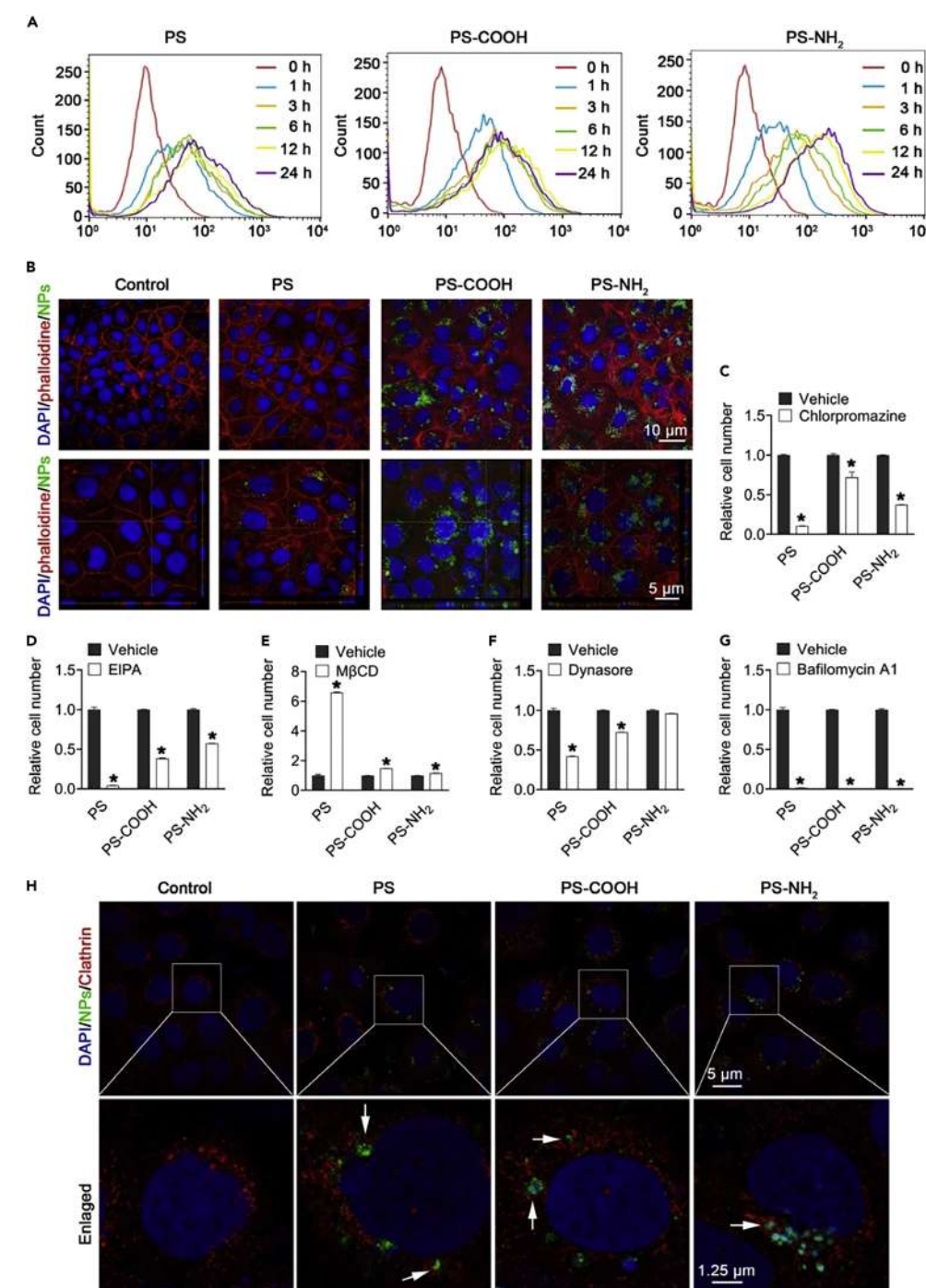
1) Makropinocitoza, (2) Endocitoza posredovana klatrinom, (3) Endocitoza posredovana kaveolama i narušavanje stanične membrane radi internalizacije. M-NPL se otpušta iz stanica putem 4) lizosomima posredovane endocitoze.

Izvor: 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>

Zbog svoje male veličine, MNP mogu lako prodrijeti u ljudske stanice (Slika 70). Njihove sitne dimenzije i akumulirani elektrostatički naboj omogućuju MNP da izvrši sustavni utjecaj na organizam.¹⁹¹

¹⁹¹Casella, 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>



Slika 70. Caco-2 stanice internaliziraju nanoplastiku (NPL).

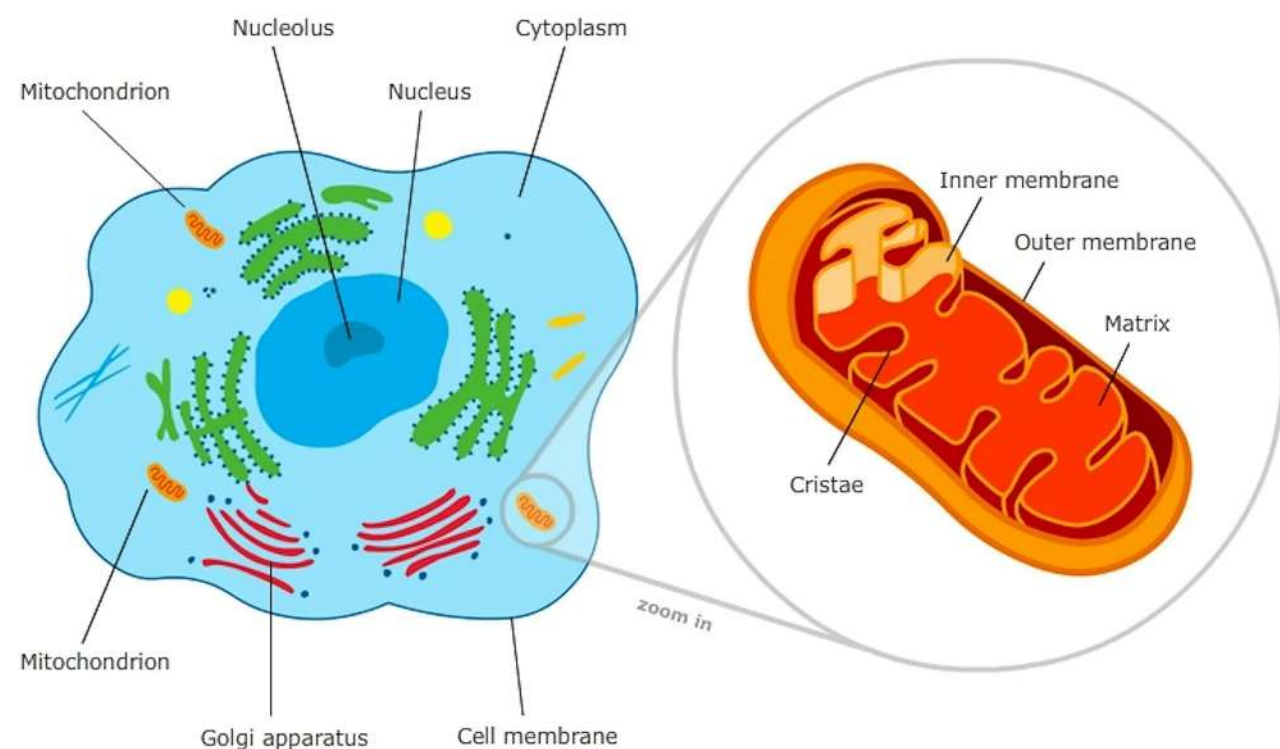
(A–G) Analiza internalizacije NPL u Caco-2 stanicama pomoću protočne citometrije (A) i konfokalne mikroskopije (B). Analiza protočnom citometrijom Caco-2 stanica prethodno tretiranih 1 sat klorpromazinom (C), EIPA-om (D), MβCD-om (E), dinasorom (F) i bafilomicinom A1 (G), nakon čega je uslijedio posttretman NPL-om tijekom 24 sata. Lokalizacija NPL u vezikulama posredovanim klatrinom ispitana konfokalnom mikroskopijom (H). Prilagođeno uz dopuštenje tvrtke Elsevier.

Izvor: 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>

Ključni aspekt njihovog destruktivnog djelovanja na staničnoj razini je oštećenje staničnih membrana, mitohondrija i razaranje DNK. Elektrostatički nabijene mikro- i nanočestice plastike mogu destabilizirati membranski potencijal stanica, posebno neurona, što dovodi do spontanih električnih signala, zatajenja u međustaničnoj komunikaciji ili stanične smrti.

Unutar stanice, glavna meta destruktivnog učinka nanoplastike su mitohondriji – bitne organele odgovorne za preživljavanje i oporavak stanice (Slika. 71). Osim što djeluju kao “elektrane” stanice, mitohondriji obavljaju višefunkcionalne uloge, utječući na cjelokupno zdravlje, otpornost na stres, razvoj kroničnih bolesti i proces starenja.



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

Slika 71. Shematski prikaz stanice i njezinih mitohondrija

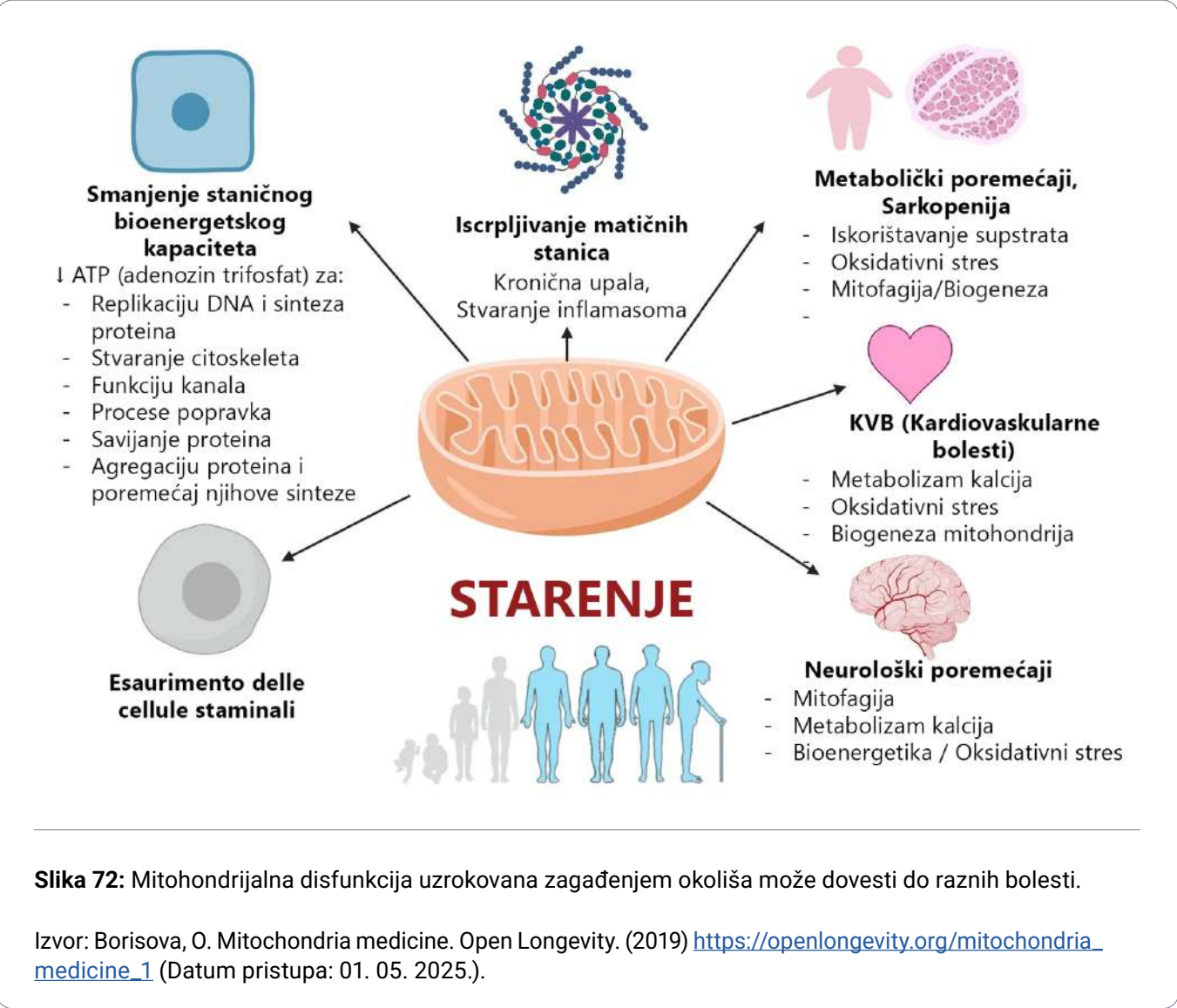
Pravilna funkcija mitohondrija ključna je za preživljavanje stanice, homeostazu i proizvodnju energije. Struktura i funkcionalnost mitohondrija održavaju se sustavom kontrole kvalitete mitohondrija, koji uključuje mitohondrijalnu biogenezu, dinamiku (fuziju i fisiju), mitofagiju i odgovor nesmotanih proteina mitohondrija (UPR^{mt}). Mitohondrijalna disfunkcija ili oštećenje povezani su s nastankom i progresijom brojnih bolesti kod ljudi, uključujući neurodegenerativne poremećaje, kardiovaskularna stanja, bolesti povezane sa starenjem, dijabetes i rak. Stres iz okoliša i zagađivači mogu povećati ranjivost mitohondrija, potičući mitohondrijalnu disfunkciju. Sve više dokaza ukazuje na utjecaj mikro- i nanoplastike na zdravlje mitohondrija. Pokazalo se da MNP induciraju oksidativni stres i povećavaju proizvodnju reaktivnih kisikovih tipova, što u konačnici narušava membranski potencijal mitohondrija. Ove čestice mogu prijeći biološke barijere u organizmu čovjeka i biti apsorbirane od strane stanica, potencijalno mijenjajući mitohondrijalnu dinamiku, bioenergetiku i signalne putove, čime utječu na stanični metabolizam i funkciju.

S obzirom na ključnu ulogu mitohondrija u staničnom i cjelokupnom zdravlju, MNP predstavljaju ozbiljnu prijetnju mitohondrijalnom integritetu. Trenutna otkrića naglašavaju hitnu potrebu rješavanja široko rasprostranjenog problema zagađenja MNP-om – ne samo radi zaštite okoliša već i radi očuvanja zdravlja ljudi.¹⁹²

Mitohondriji sintetiziraju ATP (adenozin trifosfat) – univerzalnu energetska molekulu koja pokreće sve biološke procese, od kontrakcije mišića i prijenosa živčanih impulsa do proizvodnje hormona i stanične diobe. Sudjeluju u metabolizmu ugljikohidrata, masti i aminokiselina, pomažući u održavanju metaboličke ravnoteže organizma.

Mitohondriji također reguliraju staničnu smrt, odnosno apoptozu – iznimno važan proces koji sprječava nakupljanje oštećenih ili potencijalno opasnih stanica. Poremećaji u ovom sustavu povezani su s razvojem raka, autoimunih poremećaja i neurodegenerativnih bolesti. Osim toga, mitohondriji igraju ključnu ulogu u antioksidativnoj obrani regulirajući razine reaktivnih kisikovih vrsta (ROS). Kada ovaj sustav zakaže, nakuplja se stanično oštećenje, starenje se ubrzava, a rizik od kroničnih upala i bolesti raste (Slika 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, 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>



Mitohondriji sadrže vlastitu DNK, koja se nasljeđuje majčinskom linijom, čineći ih jedinstvenim čimbenicima u genetskim bolestima. Reguliraju aktivnost nuklearnih gena i pomažu stanicama da se prilagode promjenama u vanjskom okruženju. Mitohondriji također igraju ulogu u sintezi steroidnih hormona, uključujući kortizol, estrogene i testosteron. Narušavanje funkcije mitohondrija zbog izloženosti nanoplastici leži u temelju kaskade patoloških procesa. To može dovesti do ozbiljnih i potencijalno nepovratnih posljedica — ne samo u pojedinim organima i sustavima, već i u organizmu u cjelini (vidjeti Tablicu 1).

Neurološke bolesti	Parkinsonova bolest, Alzheimerova bolest, Amiotrofična lateralna skleroza (ALS), Epilepsija, Migrene, Mitohondrijske encefalomiopatije (poput MELAS sindroma)
Kardiovaskularne bolesti	Kardiomiopatije, Zatajenje srca, Ateroskleroza (kroz oksidativni stres)
Imunološke i upalne bolesti	Autoimune bolesti (npr. sistemski eritemski lupus), Kronična upalna stanja (kroz disfunkciju ROS i signalizaciju citokina)
Metabolički poremećaji	Dijabetes tipa 2, Pretilost, Metabolički sindrom, Poremećaji metabolizma masnih kiselina i laktata
Onkološke bolesti	Mitohondrijska disfunkcija dovodi do povećanog rizika od mutacija i maligne transformacije stanica
Mišićni poremećaji	Mitohondrijske miopatije, Kronična mišićna slabost i umor
Bolesti osjetilnih organa	Retinitis pigmentosa, Leberova nasljedna optička neuropatija (nasljedna bolest koja uzrokuje gubitak vida)
Genetski mitohondrijski poremećaji	Leighov sindrom, Kearns–Sayreov sindrom, Barthov sindrom

Tablica 1. Pregled odabranih bolesti povezanih s mitohondrijskom disfunkcijom

Uloga mikro- i nanoplastike (MNP) u preuranjenom starenju i razvoju raka

Izloženost nanoplastici može pokrenuti preuranjeno starenje ometanjem funkcije mitohondrija i narušavanjem genetskih programa organizma. Oštećenje mitohondrija dovodi do prekomjerne proizvodnje reaktivnih kisikovih vrsta (ROS), uzrokujući oksidativni stres. To, zauzvrat, oštećuje DNK, narušava genetsku stabilnost, potiče upalu i ubrzava starenje tkiva. Dodatno, nanoplastika doprinosi skraćivanju telomera, ograničavajući sposobnost stanice da se dijeli.



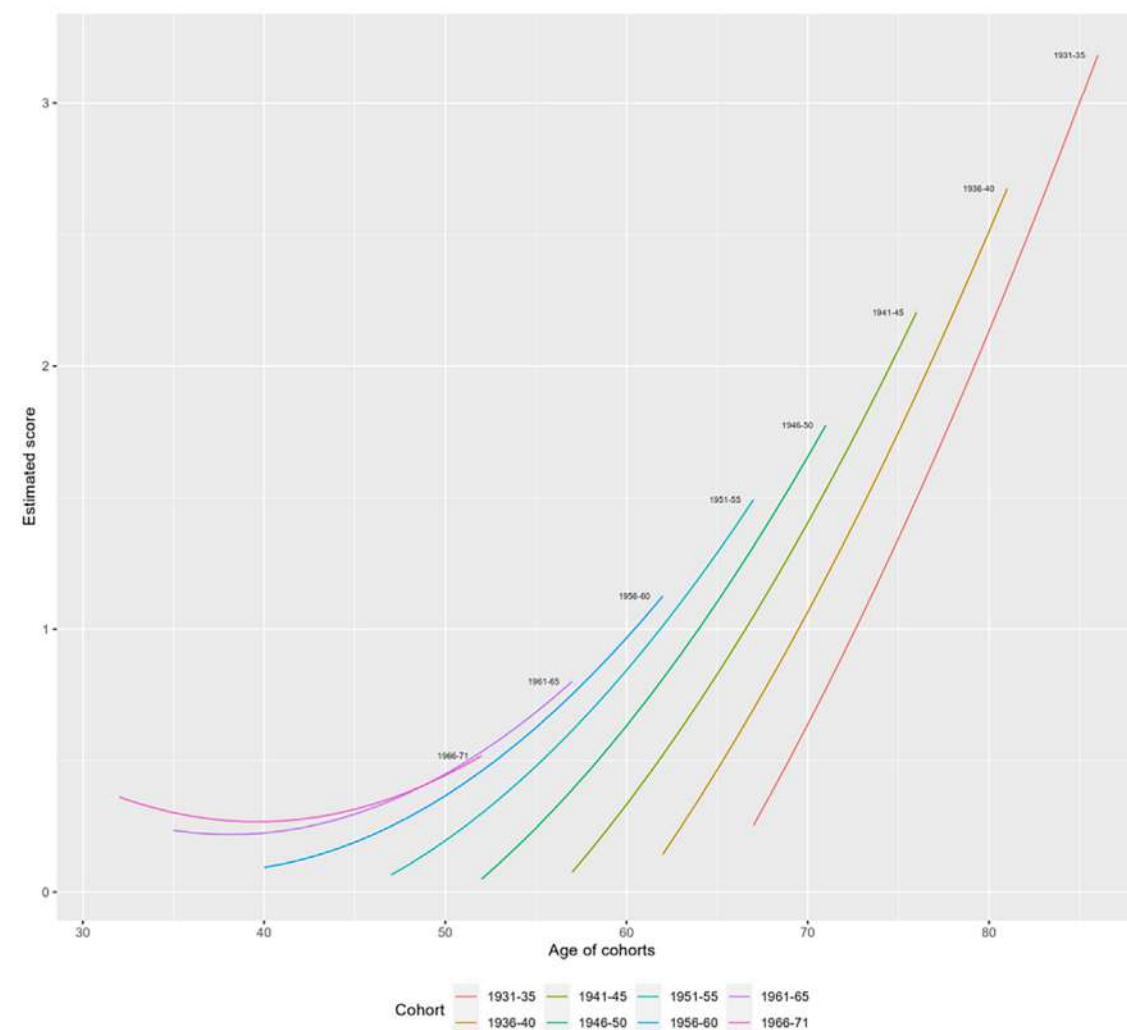
“Također smo uspješni pokazati kod ljudi kako promjena jednog nukleotida u mitohondrijskoj DNK, koja je specifično povezana sa slabom funkcijom mitohondrija i uzrokovanjem pedijatrijskih mitohondrijskih poremećaja, može ubrzati starenje”, rekao je Taosheng Huang, MD, PhD, profesor i voditelj genetike na Odjelu za pedijatriju Jacobs School of Medicine and Biomedical Sciences pri UB-u. **“Otkrili smo da reaktivne kisikove vrste, zbog loše funkcije mitohondrija, s vremenom dovode do povećanog oštećenja DNK.”**¹⁹³

Epigenetičko starenje odnosi se na promjene u regulaciji gena koje se događaju putem modifikacija na razini DNK (uključivanje ili isključivanje gena), bez mijenjanja same DNK. To je suptilni “molekularni sat” koji se može mjeriti, a može raditi brže ili sporije od kronološkog starenja. Visoka aktivnost mitohondrijske DNK povezana je s ubrzanim epigenetičkim starenjem. Kod nekih pojedinaca, čak i u 20-im i 30-im godinama, biološka dob stanica može značajno premašiti njihovu kronološku dob, što znači da njihova tijela stare brže od očekivanog.

Ljudi s mitohondrijskom disfunkcijom često razvijaju bolesti povezane sa starenjem u ranoj dobi, uključujući demenciju, kardiovaskularne bolesti, aritmije i zatajenje srca. Škotski istraživači otkrili su da što je čovjek kasnije rođen, to je veći rizik od bolesti do 50. godine života. Na primjer, oni rođeni između 1956. i 1960. godine imaju više rezultate bolesti od onih rođenih između 1951. i 1955. ili 1946. i 1950. godine u istoj dobi (Slika 73).¹⁹⁴

¹⁹³Medindia. 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).

¹⁹⁴Ribe, 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>



Slika 73. Prognozirani pokazatelji multimorbiditeta po kohortama i dobi.

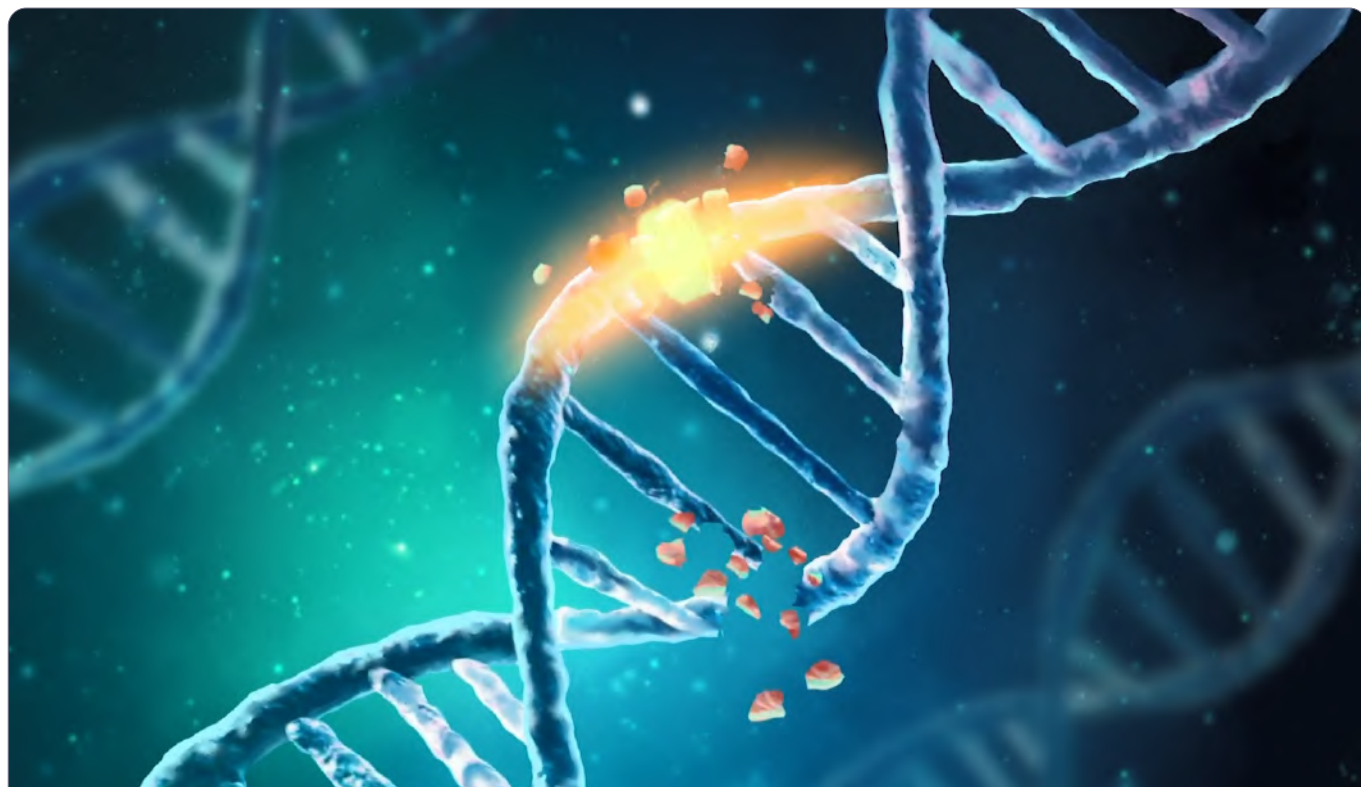
Izvor: Scottish Longitudinal Study. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Mutacije mitohondrijske DNK u starenju i raku

Ključni mehanizmi koji su u podlozi starenja i razvoja raka dijele mnoge zajedničke značajke. Središnji čimbenik u oba procesa je mitohondrijska disfunkcija — poremećaj staničnih organela odgovornih za proizvodnju energije. S godinama se u ljudskim tkivima nakupljaju mutacije u mitohondrijskoj DNK (mtDNK), a slične mutacije dugo su promatrane kod različitih oblika raka.¹⁹⁵

Kada dođe do mutacije u stanici, ona može promijeniti ponašanje stanice. Na primjer, mutirana stanica može početi rasti i dijeliti se brže, odupirati se staničnoj smrti čak i kada bi se trebala dogoditi, postati “nevidljiva” imunološkom sustavu ili učinkovitije podnositi nedostatak kisika ili hranjivih tvari.

Takve mutirane stanice stječu kompetitivnu prednost nad normalnim stanicama jer duže žive, češće se dijele, zauzimaju sve više prostora i na kraju dominiraju okolnim tkivima. Nakon što se te abnormalne stanice akumuliraju u dovoljnom broju, može započeti rast tumora.



Slika 74. Oštećenje DNK koje dovodi do mutacija

Postmitotičke stanice, poput neurona, kardiomiocita i određenih mišićnih stanica, posebno su osjetljive na mitohondrijska oštećenja. Budući da se te stanice ne dijele, mutacije nakupljene tijekom vremena, osobito one u mitohondrijskoj DNK (Slika 74), ostaju unutar stanice tijekom cijelog njezina životnog vijeka.

¹⁹⁵Smith, 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>

Postmitotičke stanice su iznimno metabolički aktivne: neuroni zahtijevaju značajnu energiju za prijenos signala, a srčane stanice neprestano pumpaju krv. Posljedično, njihovi mitohondriji funkcioniraju s maksimalnim kapacitetom, proizvodeći velike količine reaktivnih kisikovih vrsta (ROS). Te reaktivne kisikove vrste oštećuju mitohondrije, pokrećući ciklus povećane proizvodnje ROS-a i daljnjih oštećenja.

S vremenom, ovo kumulativno oštećenje može pokrenuti patološke procese kao što su neurodegenerativni poremećaji, kardiovaskularne bolesti, rak, pa čak i dovesti do smrti.

Ovaj mehanizam bi mogao objasniti zašto su kardiovaskularne bolesti, srčani udari, moždani udari i karcinomi vodeći uzroci smrti globalno. Nadalje, toksični utjecaj nanoplastike — koji se dramatično pojačao u posljednjih 10 do 20 godina — vjerojatno objašnjava zašto se ove bolesti javljaju u mlađoj dobi i dosegle su pandemijske razmjere, odnoseći desetke milijuna života godišnje. Nanoplastika prvenstveno narušava funkciju mitohondrija, potiče oksidativni stres i inducira mutacije u mitohondrijskoj i nuklearnoj DNK.

Poremećaj hormonalnog sustava izazvan mikro- i nanoplastikom (MNP)

Proizvodnja plastike uključuje kemikalije koje ometaju funkciju endokrinog sustava i narušavaju hormonalnu ravnotežu. Ove kemikalije mogu oponašati, blokirati ili mijenjati djelovanje prirodnih hormona, potencijalno dovodeći do raznih zdravstvenih problema.

Preko 3000 kemijskih tvari koje se koriste u pakiranju detektirano je u ljudskom tijelu.¹⁹⁶ Otprilike 100 tih kemikalija klasificirano je kao tvari “visoke opasnosti” za zdravlje ljudi.

Bisfenol A

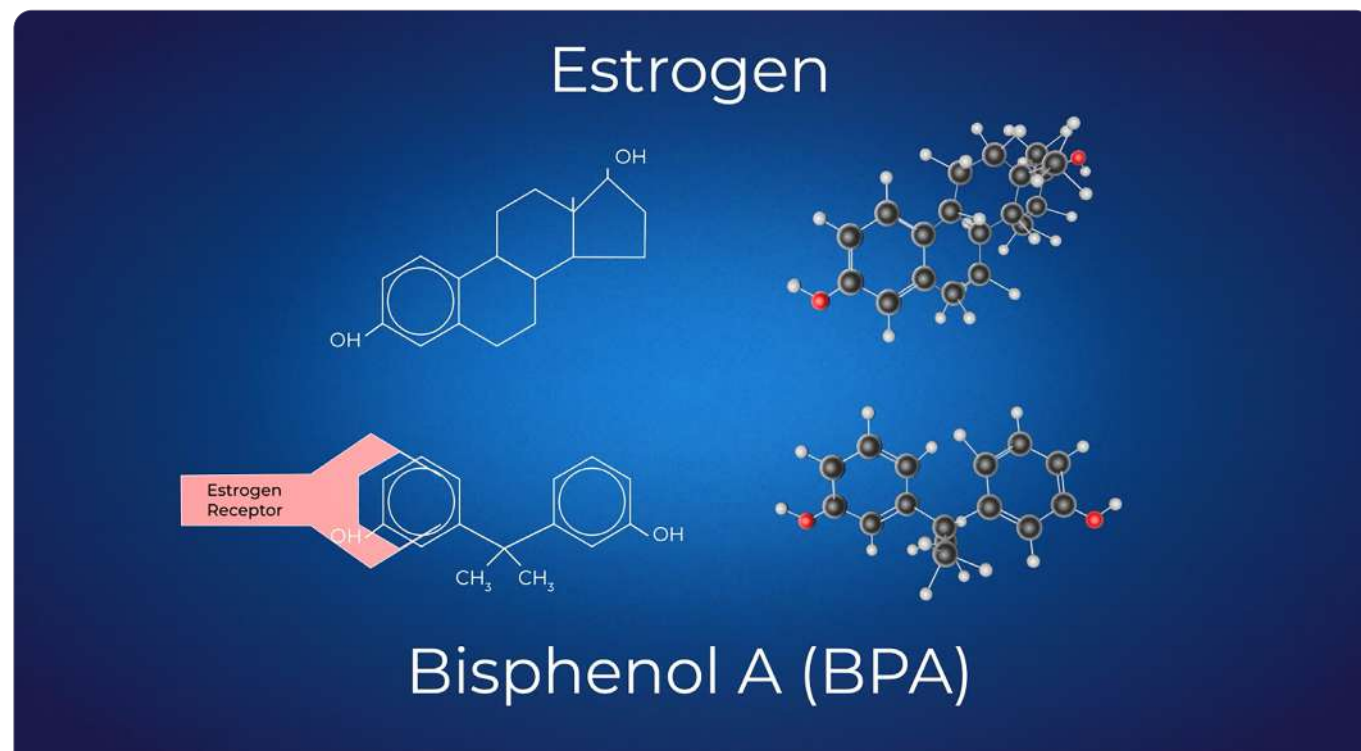
Bisfenol A (BPA) — sintetički plastifikator koji se široko koristi u polikarbonatnoj plastici (poput boca i spremnika), epoksidnim smolama (koriste se za premazivanje konzervirane hrane) i medicinskim proizvodima.

Pri zagrijavanju, BPA migrira u hranu i napitke.

¹⁹⁶Geueke, 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>

66

“BPA djeluje kao ‘odmetnuti’ hormon koji nadmašuje prirodni hormon koji je obično uključen u ovaj put”, rekao je profesor Ian Rae, stručnjak za kemikalije okoliša sa Škole za kemiju Sveučilišta u Melbourneu (Slika 75).¹⁹⁷



Slika 75. Bisfenol A ($C_{15}H_{16}O_2$) ispoljava endokrino-razarajuće učinke zbog svoje strukturne sličnosti s hormonom estrogenom

Više od 8 milijuna tona bisfenola A proizvede se globalno, a otprilike 100 tona se ispušta u atmosferu svake godine.¹⁹⁸

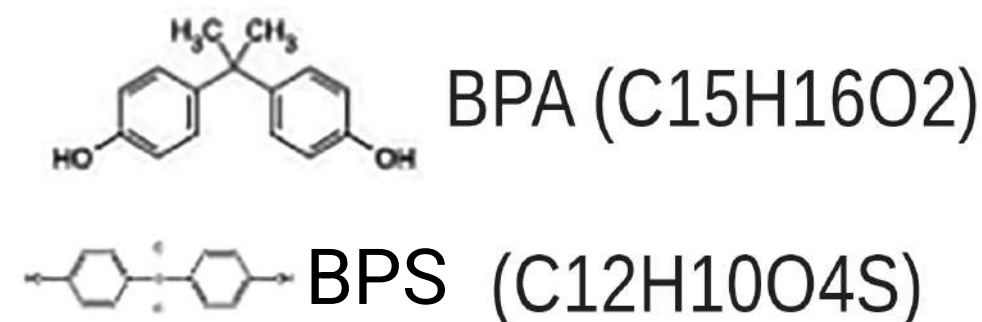
Istraživanja pokazuju da BPA i njegov nadomjestak – bisfenol S (BPS) – narušavaju koordinaciju ekscitacijskih i inhibicijskih signala u živčanom sustavu.¹⁹⁹ Oba spoja izazivaju slične patološke učinke pri visokim koncentracijama (Slika 76). Eksperimenti s moždanim stanicama otkrili su da čak i male količine BPA ili BPS, kada su im izložene tijekom mjesec dana, mijenjaju kemijski i električni prijenos signala kroz sinapse.²⁰⁰

¹⁹⁷New 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).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) <https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol-a-global-strategic-business-report> (accessed 1 May 2025).

¹⁹⁹Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-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).



Slika 76. Molekularne strukture i kemijske formule bisfenola A (BPA) i bisfenola S (BPS).

Godine 2023. studija je otkrila veću količinu bisfenola A (BPA) i ftalata kod djece s poremećajem pažnje s hiperaktivnošću (ADHD) u usporedbi s djecom bez tog stanja.²⁰¹

Istraživači s Florey Institute of Neuroscience and Mental Health u Melbourneu otkrili su da su dječaci imali 6 puta veću vjerojatnost da će do 11. godine života imati potvrđenu dijagnozu autizma od onih čije su majke imale niže razine BPA tijekom trudnoće.²⁰²

66

“BPA može poremetiti hormonalno kontroliran razvoj muškog fetalnog mozga na nekoliko načina, uključujući utišavanje ključnog enzima, aromataze, koji kontrolira neurohormone i posebno je važan u fetalnom muškom razvoju mozga”, rekao je profesor Ponsonby.

“Čini se da je to dio zagonetke autizma.” ¹⁹⁷

Suzbijanje enzima aromataze može objasniti rodnu razliku u dijagnozama autizma: 4 do 5 dječaka na svaku djevojčicu.²⁰³ Iako je autizam rjeđi kod djevojčica, one obično doživljavaju teže oblike stanja.²⁰⁴

Bisfenol A (BPA) također doprinosi razvoju dijabetesa tipa 2 uzrokujući hiperglikemiju i inzulinsku rezistenciju.²⁰⁵ Globalna smrtnost od dijabetesa nastavlja stalno rasti (Slika 77).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025)

²⁰²Symeonides, 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>

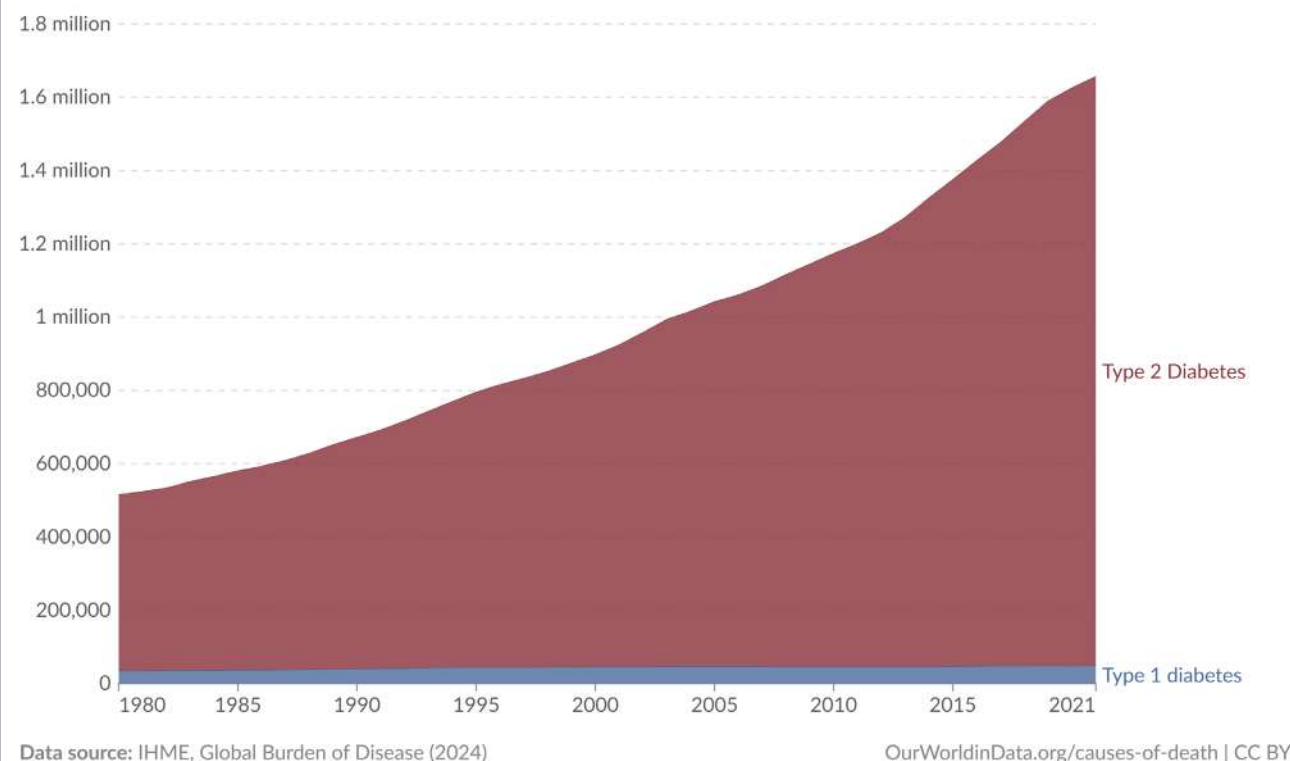
²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

²⁰⁴Frazier, 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>

²⁰⁵Sun, 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>

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

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.



Slika 77. Smrtni slučajevi od dijabetesa, po tipu, svijet, 1980. do 2021. god.

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

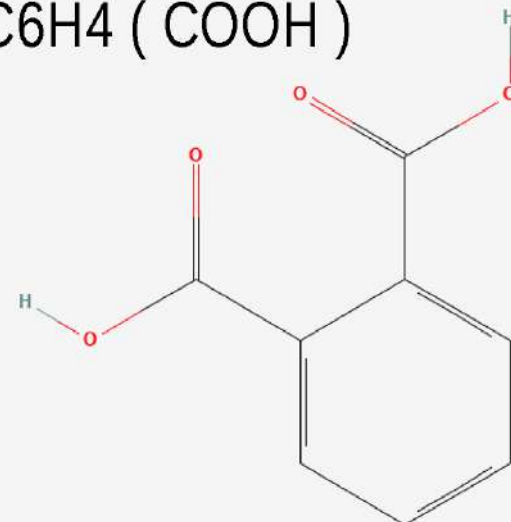
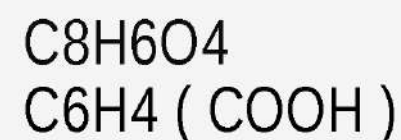
Ftalati

Ftalati – skupina kemijskih spojeva koji se prvenstveno koriste kao plastifikatori, tvari koje plastiku, poput polivinil klorida (PVC), čine fleksibilnijom, mekšom i trajnijom.

Ftalati se široko koriste u raznim industrijama i svakodnevnom životu, ali njihova sposobnost ometanja endokrinog sustava izaziva zabrinutost.²⁰⁶

Molekularna formula (Slika 78). Ftalati sami po sebi nisu hormoni, ali mogu potisnuti djelovanje androgena (kao što je testosteron), što je posebno kritično za razvoj muškaraca. Izloženost ftalatima povezana je sa smanjenom pokretljivošću spermija i abnormalnostima u razvoju reproduktivnih organa (npr. kriptorhizam kod novorođenčadi). Veće koncentracije ftalata pronađene su kod muškaraca s dijagnozom neplodnosti.

²⁰⁶Arrigo, 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>



Slika 78. Kemijski prikaz strukture.

Izvor: National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.)

Kod žena se narušava menstrualni ciklus, povećava se rizik od pobačaja i prijevremenih poroda. Izloženost fetusa tijekom trudnoće može dovesti do zastoja u razvoju mozga, smanjenja IQ-a i problema u ponašanju.²⁰⁷

Znanstvenici su dokazali uzročnu vezu između ftalata iz okoliša (otrovnih kemikalija koje se nalaze u svakodnevnim potrošačkim proizvodima) i povećanog rasta mioma maternice, najčešćih tumora kod žena.²⁰⁸

Izloženost ftalatima koji se nalaze u plastici povećava rizik od dječjih karcinoma za 20%, s trostrukim porastom slučajeva malignih tumora kostiju i dvostrukim povećanjem incidencije limfoma i leukemije.²⁰⁹

Studija koja je obuhvatila preko 5000 američkih majki otkrila je da su ftalati povezani s rizikom rađanja beba niske porođajne težine i prijevremeno rođene djece.²¹⁰ Autori napominju da ti čimbenici umjereno povećavaju vjerojatnost smrtnosti dojenčadi i mogu također utjecati na akademski uspjeh djece, kao i povećati rizik od srčanih bolesti, dijabetesa i mentalnih poremećaja, poput autizma i ADHD-a²¹¹ kod djece.

²⁰⁷ 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>

²⁰⁸Iizuka, 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>

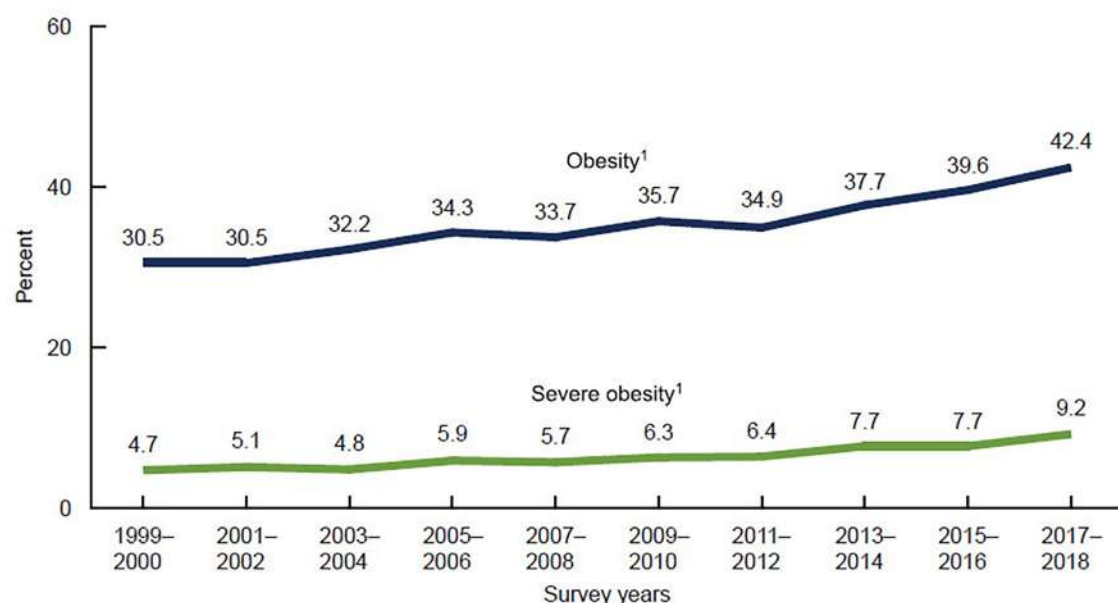
²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰Trasande, 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)

²¹¹Baker, 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>

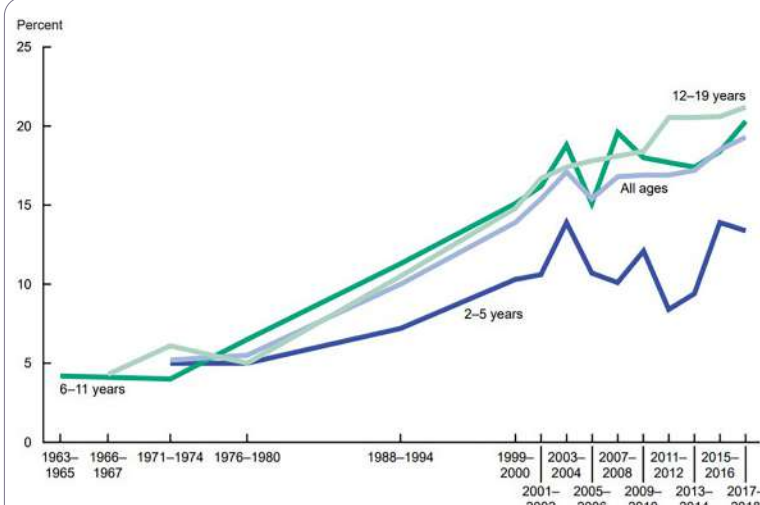
Kemijski aditivi u plastici doprinose razvoju pretilosti.²¹² Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), od 1990. do 2020. godine, globalna stopa pretilosti kod odraslih više se nego udvostručila, dok se kod adolescenata učetverostručila.²¹³

Trendovi pretilosti među odraslima i mladima u Sjedinjenim Državama (Slike 79–80)



Slika 79. Trendovi prevalencije pretilosti i teške pretilosti prilagođene dobi među odraslima u dobi od 20 i više godina: Sjedinjene Države, 1999. – 2000. do 2017. – 2018. god.

Izvor: 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> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.).



Slika 80. Trendovi pretilosti među djecom i adolescentima u dobi od 2 do 19 godina, prema dobi: Sjedinjene Države, 1963. – 1965. do 2017. – 2018. god.

Izvor: 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> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.).

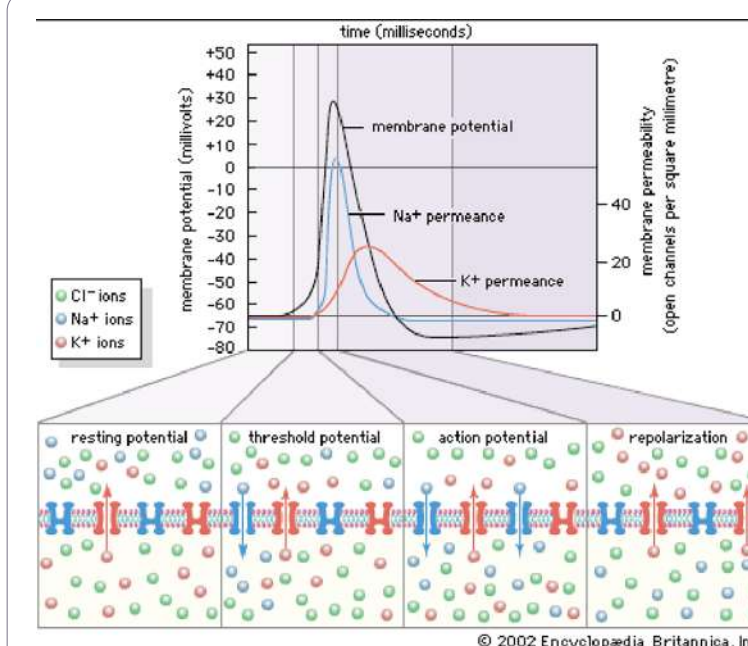
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World 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).

Elektrostatički naboj nanoplastike kao ključni pokretač njezine visoke toksičnosti za organizam čovjeka

Organizam čovjeka neprekidno stvara bioelektričnu energiju. Svi fiziološki procesi — od srčane aktivnosti i osjetilne percepcije do viših kognitivnih funkcija — uvjetovani su kemijskim reakcijama koje inicira kretanje električnih naboja. Unutarstanične i izvanstanične tekućine, koje sadrže proteine, prvenstveno su sastavljene od vode koja posjeduje elektropolarna svojstva. S tim u vezi, elektrostatičke interakcije, uključujući vodikove veze, ionske veze i hidrofobno pakiranje, igraju ključnu ulogu u formiranju struktura staničnih proteina, neophodnih za njihovu funkciju i, kao rezultat toga, za održavanje vitalnosti organizma.²¹⁴

Bioelektričnost izravno utječe na funkciju stanica kroz interakciju ionskih kanala i membranskih potencijala. Svaka stanica održava razliku u električnom potencijalu između svoje unutarnje i vanjske okoline — poznatu kao potencijal mirovanja membrane — što se postiže razlikom u koncentraciji iona unutar i izvan stanice (Slika 81). Glavni tipovi ionskih kanala prisutnih u organizmu čovjeka uključuju natrijeve, kalijeve, kalcijeve i kloridne kanale. Ovi kanali, zajedno s membranskim potencijalom, omogućuju ključne funkcije različitih tipova stanica (Slike 82–83).

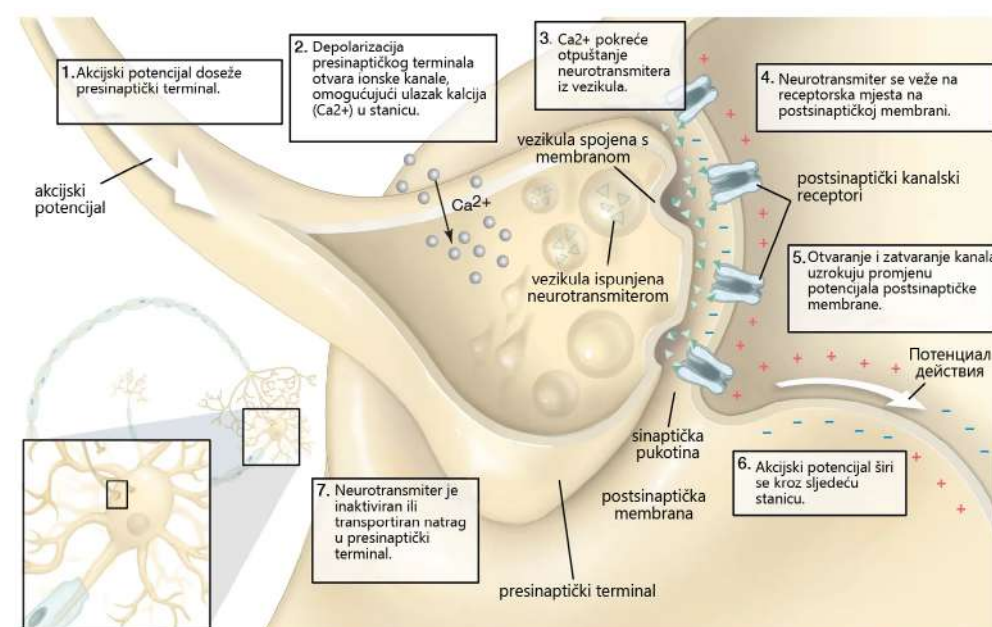


Slika 81. Propusnost iona i akcijski potencijal.

Promjene u propusnosti iona u osnovi su akcijskog potencijala. Električni potencijal je na lijevoj strani prikazan u milivoltima, propusnost iona na desnoj strani u otvorenim kanalima po kvadratnom milimetru. Kod potencijala mirovanja, membranski potencijal je blizu E_K , ravnotežnog potencijala K^+ . Kada se natrijevi kanali otvore, membrana se depolarizira. Kada depolarizacija dosegne prag potencijala, pokreće se akcijski potencijal. Generiranje akcijskog potencijala približava membranski potencijal E_{Na^+} ravnotežnom potencijalu Na^+ . Kada se natrijevi kanali zatvore (smanjujući propusnost Na^+) i kalijeve kanali otvore (povećavajući propusnost K^+), membrana se repolarizira.

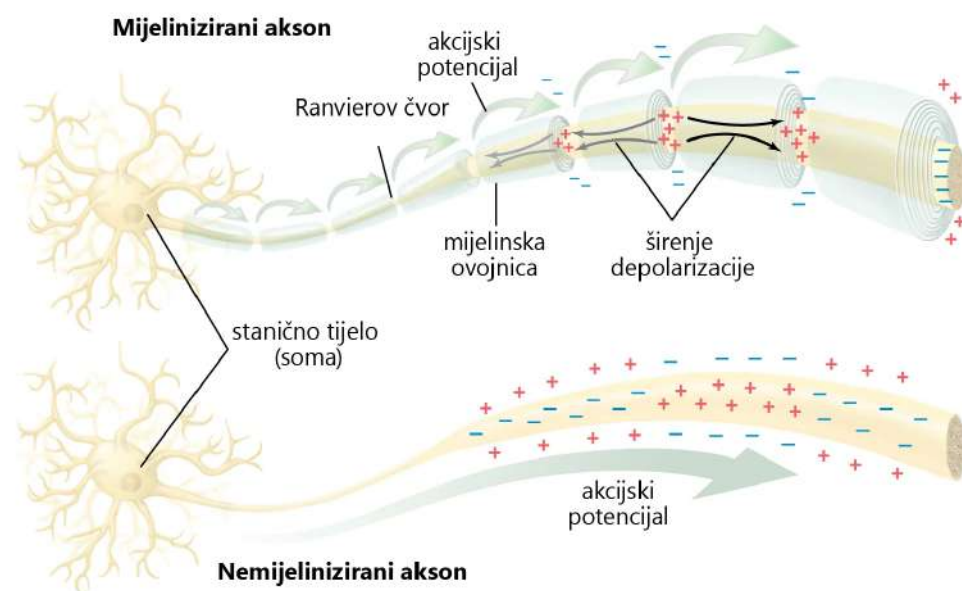
Izvor: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

²¹⁴Azim 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).



Slika 82. Sinapsa: Kemijski prijenos živčanog impulsa na sinapsi. Dolazak živčanog impulsa na presinaptički završetak stimulira otpuštanje neurotransmitera u sinaptičku pukotinu. Vezivanje neurotransmitera za receptore na postsinaptičkoj membrani stimulira regeneraciju akcijskog potencijala u postsinaptičkom neuronu.

Izvor: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>



Slika 83. Neuron: Provođenje akcijskog potencijala.

U mijeliniziranom aksonu, mijelinska ovojnica sprječava protok lokalne struje (male crne strelice) preko membrane. To prisiljava struju da putuje niz živčano vlakno do nemijeliniziranih Ranvierovih čvorova, koji imaju visoku koncentraciju ionskih kanala. Nakon stimulacije, ti ionski kanali propagiraju akcijski potencijal (velike zelene strelice) do sljedećeg čvora. Tako akcijski potencijal skače duž vlakna dok se regenerira u svakom čvoru, proces koji se naziva saltatorna provodljivost. U nemijeliniziranom aksonu, akcijski potencijal se propagira duž cijele membrane, blijedeći dok se difundira natrag kroz membranu do prvobitno depolarizirane regije.

Izvor: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

Bioelektricitet koji se stvara unutar organizma čovjeka, na primjer tijekom mišićnih kontrakcija ili prijenosa živčanih signala, potpuno je prirodan i bezopasan, budući da je temeljni dio fizioloških procesa. Međutim, kada mikro- i nanoplastika uđe u organizam, sa sobom nosi elektrostatički naboj koji može zadržati dulje vrijeme. Upravo taj naboj predstavlja potencijalni zdravstveni rizik ometanjem vitalnih bioloških funkcija.

Nanoplastika su čestice plastike manje od 1 mikrometra. Zbog svoje jedinstvene strukture, mogu akumulirati elektrostatičke naboje, što ih čini sve većom brigom za znanstvenike.

Kada mikro- ili nanoplastične čestice postanu elektrificirane *triboelektričnim učinkom* (kao rezultat kontakta i trenja s drugim površinama), one poprimaju ili pozitivan ili negativan naboj. Taj naboj značajno utječe na to kako se te čestice ponašaju u organizmu čovjeka i okolišu.

Jedinstvena struktura nanoplastičnih čestica omogućuje im adsorbiranje zagađivača, iona i organskih molekula, što pojačava njihovu ulogu nositelja toksina u ekosustavima.^{215, 216}

Kemijski sastav nanoplastike igra ključnu ulogu u određivanju njezinih elektrostatičkih svojstava: polimeri poput polistirena (PS), polietilena (PE) ili polipropilena (PP) često sadrže funkcionalne skupine – karboksilnu ($-\text{COOH}$), sulfatnu ($-\text{SO}_3\text{H}$), ili amino ($-\text{NH}_2$) – koje se mogu ionizirati ovisno o uvjetima okoline. Na primjer, studija objavljena u časopisu Langmuir pokazala je da polistirenske nanočestice s karboksilnim skupinama (PS-COOH) imaju negativan zeta potencijal, dok one s amino skupinama (PS-NH_2) imaju pozitivan – što potvrđuje utjecaj funkcionalnih skupina na naboj nanoplastike.²¹⁷

Proces akumulacije naboja nije ograničen samo na kemijska svojstva. Tijekom proizvodnje ili mehaničkih procesa, poput trenja, nanoplastika se može nabiti putem kontaktnog elektrificiranja. Studija provedena na plastičnim spremnicima otkrila je da je polistiren sposoban akumulirati naboj do -10 kV, koji se može zadržati dulje vrijeme i privlači suprotno nabijene čestice poput prašine ili bakterijskih spora²¹⁸. Nadalje, varijacije u polimernoj strukturi – na primjer, prisutnost polarnih skupina – omogućuju nanoplastici da pokaže ili pozitivan ili negativan naboj ovisno o pH vrijednosti okoline. U kiselim uvjetima, amino skupine mogu dati česticama pozitivan naboj, dok u alkalnim uvjetima dominiraju karboksilne skupine i daju negativan naboj – nalazi koji su potvrđeni u studijama koje uključuju biljke *Arabidopsis thaliana*.²¹⁹

²¹⁵Rai, 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>

²¹⁶Zhang, 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>

²¹⁷Perini, 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>

²¹⁸Baribo, 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>

²¹⁹Sun, 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>

Razumijevanje strukture nanoplastike i njezinih elektrostatičkih karakteristika ne samo da otkriva njihovu fizičku prirodu, već postavlja i temelj za analizu kako te čestice mogu utjecati na ekosustave i žive organizme. Ove teme bit će detaljnije istražene u kontekstu njihovih patogenih mehanizama.

Zahvaljujući visokoj dielektričnoj permitivnosti (sposobnosti zadržavanja električnog naboja), nanoplastika, jednom kada uđe u organizam, nastavlja akumulirati štetne naboje koji bi se u normalnim uvjetima neutralizirali ili raspršili kroz prirodne vodljive sustave organizma.

To narušava procese samoregulacije organizma, stvarajući rizike za stanične strukture zbog produljene izloženosti abnormalnoj elektrostatičkoj energiji.

Kako bismo shvatili razmjere prijetnje koju nanoplastika predstavlja ulaskom u organizam, možemo se ponovno osvrnuti na bioelektrične sustave organizma – složene mehanizme gdje električni impulsi služe kao jezik međustanične komunikacije.

Svaki pokret i misao omogućeni su nevidljivim signalima koji dostavljaju naredbe stanicama. Neuronu razmjenjuju informacije putem električnih impulsa, mišići se kontrahiraju kao odgovor na te signale, a mozak obrađuje informacije kombinacijom bioelektričnih i kemijskih interakcija. Čak i disanje, refleksi, vid i sluh ovise o sitnim električnim pražnjenjima koja reguliraju funkciju organa.

Ove nevidljive struje, usavršavane milijunima godina evolucije, prevode bioelektrične impulse u jezik života. Ali njihovu harmoniju narušavaju strani elementi: mikroskopske čestice nanoplastike.

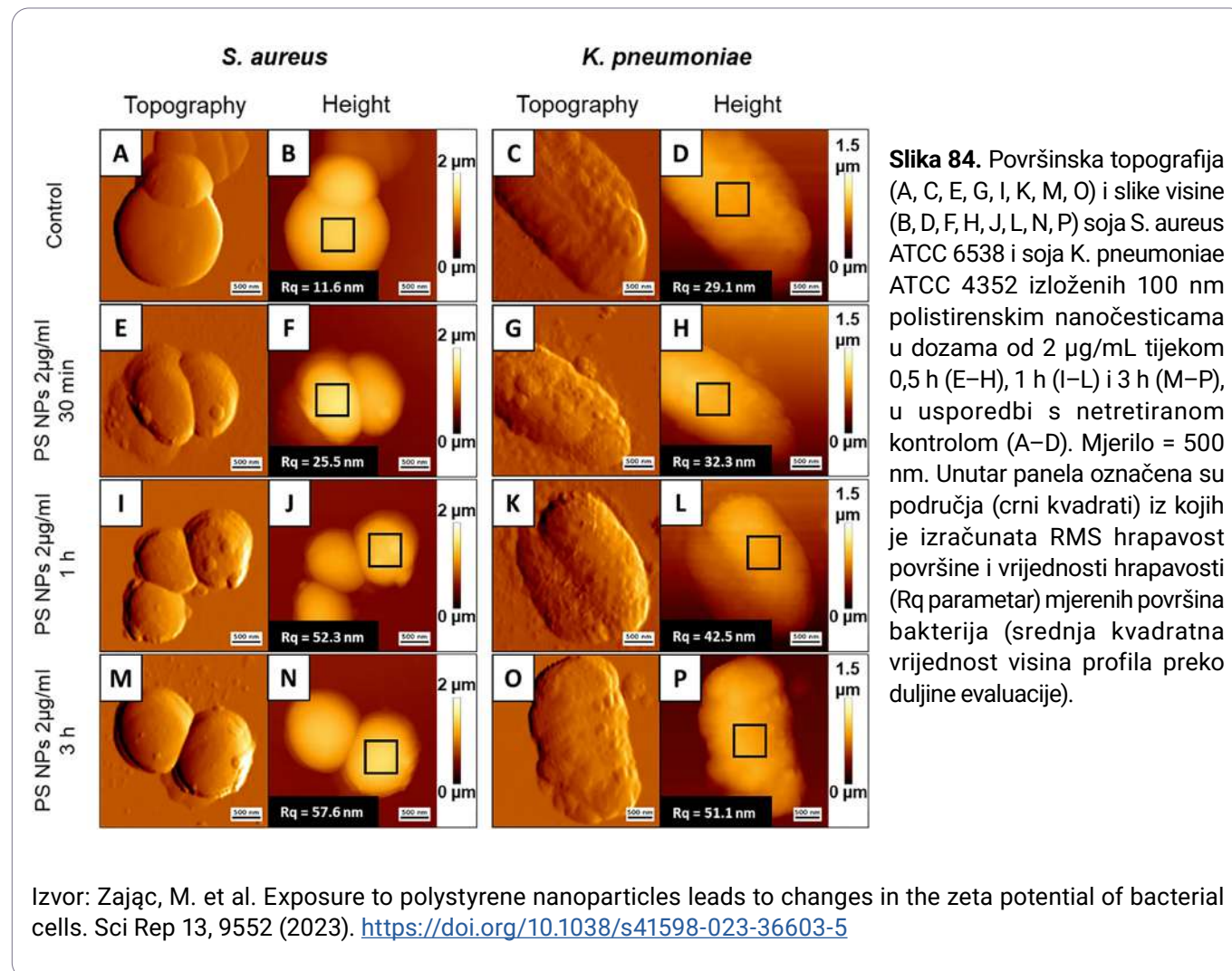
Jednom unutar organizma, nanoplastika može adsorbirati ione i stvarati zone abnormalne električne vodljivosti, narušavajući prirodnu ionsku ravnotežu i procese lokalne neutralizacije naboja koje reguliraju međustanične tekućine. Adsorpcija iona na površini nanoplastike dovodi do akumulacije elektrostatičkog naboja na tim česticama. Ovaj fenomen može pokrenuti oksidativni stres kroz stvaranje reaktivnih kisikovih vrsta (ROS) i ometati elektrokemijsku komunikaciju između stanica, narušavajući njihovu funkciju.

To potvrđuju istraživanja²²⁰ koja pokazuju da 100 nm polistirenske čestice, čak i u prisutnosti natrijevih iona (Na^+), ostaju stabilne i adsorbirane na bakterijskim površinama unatoč svom negativnom naboju. Na primjer, eksperimenti sa *Staphylococcus aureus* i *Klebsiella pneumoniae* pokazali su da nanoplastika značajno mijenja zeta potencijal stanica, čineći njihove površine negativnije nabijenima i time narušavajući prirodnu elektrostatičku ravnotežu.

²²⁰Zajac, 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>

Nabijene nanočestice plastike mogu utjecati na električna polja oko stanica, iskrivljujući prijenos signala. To je slično smetnjama u radio komunikaciji: umjesto jasnih naredbi, postoji kaotičan šum koji ometa razmjenu informacija među stanicama. Iako izravni učinci na živčane stanice nisu proučavani, a zaključci o utjecaju na ljude ostaju preliminarni i zahtijevaju daljnje istraživanje, opažene promjene u naboju površine bakterija sugeriraju da nanoplastika može mijenjati elektrokemijska svojstva staničnih membrana. Primjerice, pri koncentracijama iznad 64 mikrograma po mililitru, polistirenske čestice uzrokuju značajne promjene u zeta potencijalu, što bi potencijalno moglo narušiti funkciju ionskih kanala ili receptora ključnih za međustaničnu komunikaciju.

Sposobnost nanočestica da se "lijepe" za površine, kao što je prikazano slikama mikroskopije atomskih sila u spomenutoj studiji, (Slika 84), predstavlja rizik od dugotrajne izloženosti. Jednom kada se ugrade u tkiva, čestice mogu formirati trajne elektrostatičke anomalije koje natrijevi i kalijevi ioni ne mogu u potpunosti neutralizirati, pogotovo ako nanoplastika prodire unutar stanica, zaobilazeći zaštitne mehanizme međustanične tekućine.



Opasnost patogenog naboja akumuliranog na nanoplastici leži i u njegovoj sposobnosti stvaranja električnih smetnji oko imunoloških stanica. To potvrđuje studija²²¹ koja pokazuje da pozitivno nabijene nanoplastike (PS-NH₂) značajno smanjuju vitalnost imunoloških stanica i stabilnost lizosomskih membrana u usporedbi s negativno nabijenima (PS-COOH), ističući kritičnu ulogu površinskog naboja u njihovim interakcijama sa stanicama.

Elektrostatički nabijene MNP-čestice pokazuju povećanu sposobnost adsorpcije na stanične membrane, tkiva i druge biološke površine, doslovno se lijepeći za njih. Ovo prijanjanje povećava rizik od mehaničkog i kemijskog oštećenja stanica, narušavajući njihovu strukturu i funkciju.

Takvi naboji također mogu olakšati prodiranje MNP-čestica kroz složene biološke barijere poput krvno-moždane barijere ili krvno-placentarne barijere. Kao rezultat toga, toksini mogu doći do mozga ili fetusa u razvoju, povećavajući rizike od neurotoksičnih učinaka i poremećaja fetalnog razvoja.

Elektrostatički utjecaj nanoplastike može ometati strukturu i funkciju proteina, ionskih kanala i staničnih receptora, što zauzvrat narušava staničnu signalizaciju, pokreće oksidativni stres i slabi imunološku obranu.

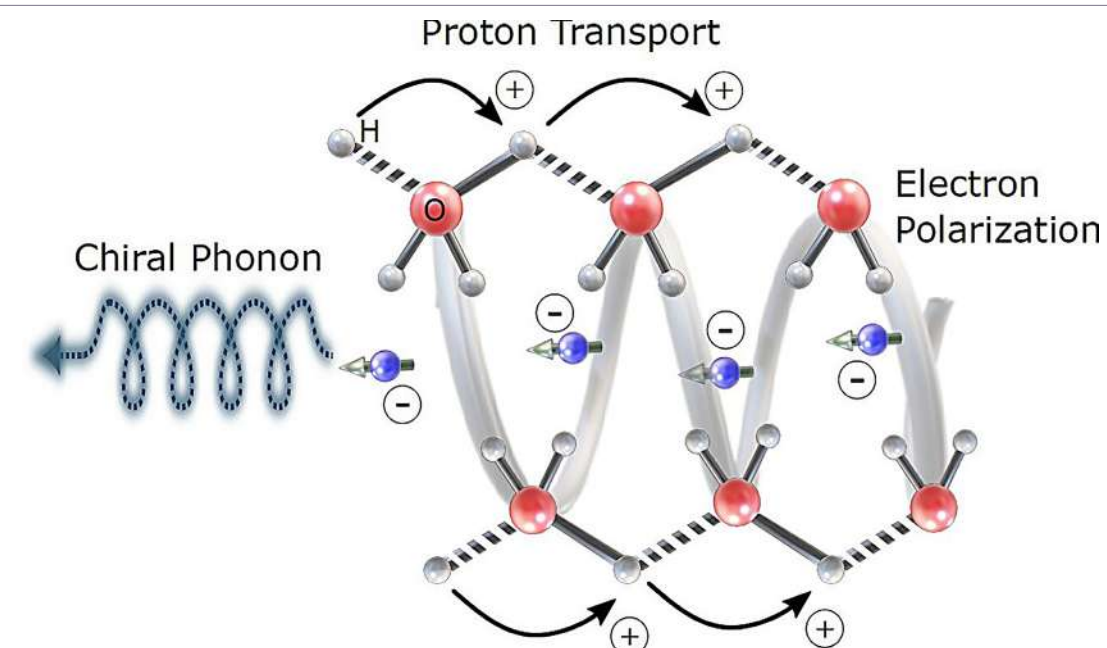
Ovi poremećaji mogu pokrenuti kaskadu patoloških procesa, uključujući kroničnu upalu, neurodegenerativne poremećaje, stvaranje malignih tumora i sistemsku disfunkciju, značajno povećavajući rizik od teških bolesti.

Dakle, akumulacija elektrostatičkog naboja na nanoplastici nije samo fizički fenomen — to je mehanizam koji pojačava opasnost mikro- i nanoplastike. Ovo je posebno kritično s obzirom na činjenicu da elektrostatički naboj može postojati na MNP dulje vrijeme, te da su te čestice iznimno otporne na eliminaciju iz ljudskog organizma.

Proučavanje ovog fenomena sada je od iznimne važnosti, jer dovodi do dubljeg razumijevanja kako se patogeni električni naboji akumulirani na nanoplastici mogu razviti u makroskopsku prijetnju opstanku same ljudske vrste.

Donedavno se smatralo da je temelj stanične energije — transport protona — vođen isključivo kemijom: mislilo se da protoni "skaču" s jedne molekule vode na drugu. Međutim, nova studija objavljena u časopisu *Proceedings of the National Academy of Sciences* radikalno mijenja ovo gledište. Pokazuje se da transport protona u živim organizmima ne ovisi samo o kemijskim svojstvima, već i o kvantnim faktorima — točnije, o spinu elektrona i kiralnosti bioloških molekula (Slika 85).

²²¹Murano, 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>



Slika 85. Shematski model igračke. Transport protona popraćen je polarizacijom elektrona u kiralnim medijima. Zbog CISS efekta, ova električna polarizacija proizvodi spin polarizaciju. Očuvanje kutnog momenta generira kiralne fonone koji pojačavaju prijenos protona.

Izvor: Goren, N. et al. Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals. *PNAS* 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Studija koju su proveli izraelski znanstvenici s Hebrejskog sveučilišta otkrila je da se kod proteina poput lizozima prijenos protona značajno ubrzava kada se uvedu elektroni s "pravim" spinom, a usporava kada je spin suprotan. To je zbog činjenice da protoni i elektroni u živim sustavima djeluju kao koordinirani kvantni mehanizam. Čak i minimalne promjene u njihovoj orijentaciji spina mogu utjecati na temeljne biološke procese — proizvodnju energije, metabolizam i unutarstaničnu regulaciju.

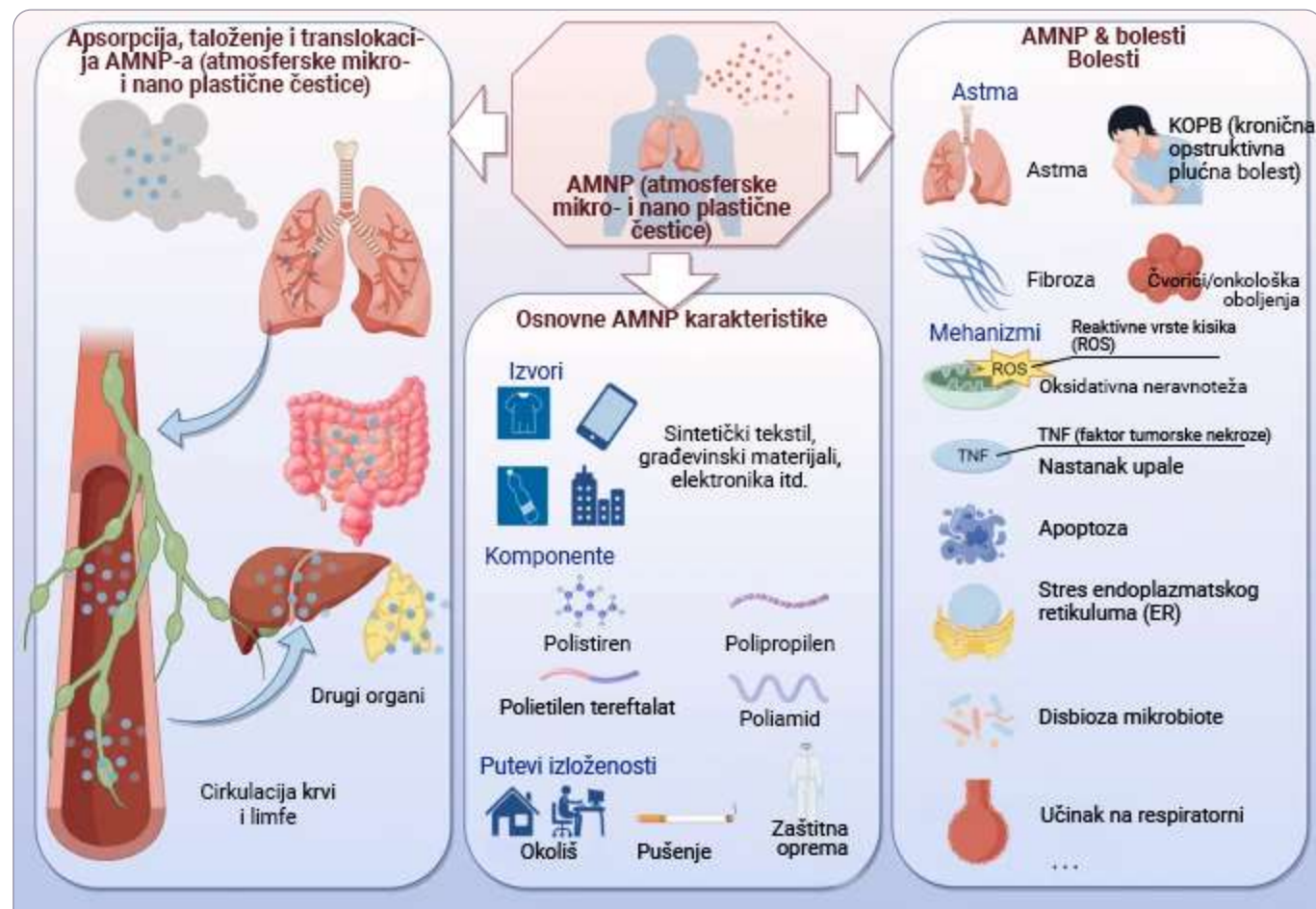


Kao što je primijetila vodeća istraživačica studije, Naama Goren, **"Naši nalazi pokazuju da način na koji se protoni kreću u biološkim sustavima nije samo stvar kemije — to je i kvantna fizika."** To sugerira da čak i najmanji poremećaji u električnom naboju ili magnetskoj orijentaciji mogu utjecati na stanični metabolizam, proizvodnju energije i cjelokupno stanje zdravlja.²²²

²²²[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).

Sistemijski učinci mikro- i nanoplastike (MNP) na ljudske organe i funkcionalne sustave

Jednom kada mikro- i nanoplastika (MNP) uđe u ljudsko tijelo, cirkulira kroz krvotok, dosežući sve organe i tkiva (Slika 86). Plastične čestice detektirane su u ljudskoj krvi, srčanom i koštanom tkivu, mozgu, posteljici, plućima, jetri i drugim organima.²²³



Slika 86. Udisanje mikro- i nanoplastike (MNP) i njihovi toksični učinci na organizam čovjeka.

Izvor: 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>

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>

Oštećenje dišnog sustava uslijed udisanja MNP

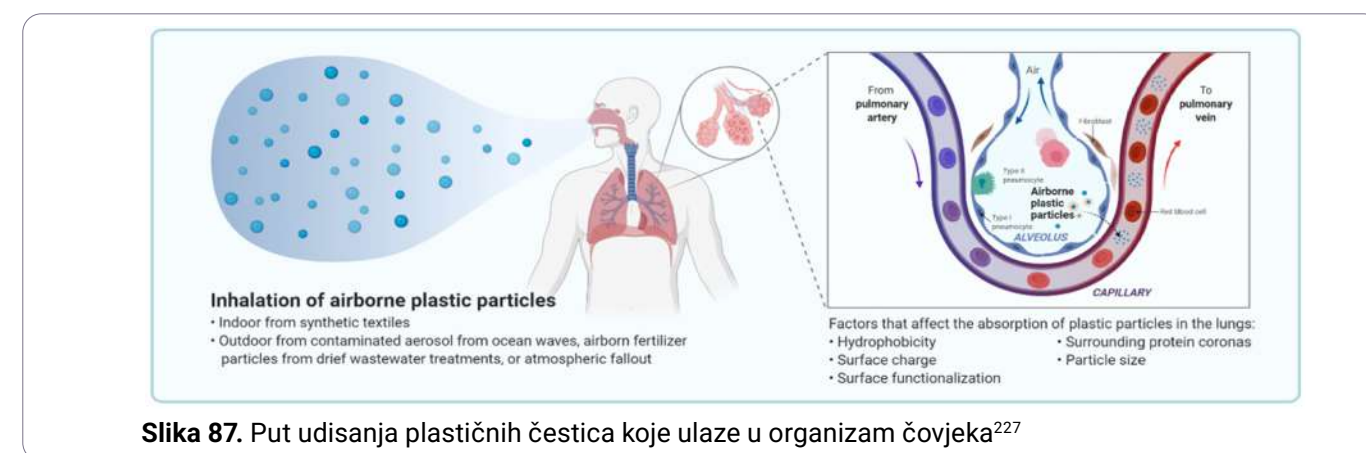
Jedan od primarnih putova ulaska mikro- i nanoplastike (MNP) u organizam čovjeka je putem udisanja.

Istraživanje koje su proveli kineski znanstvenici²²⁴ otkrilo je da tijekom dva sata aktivnog boravka na otvorenom odrasli udahnu približno 106 000 čestica mikroplastike, dok djeca udahnu oko 73,700.

Zbog svojih termodinamičkih svojstava, čestice manje od 0,1 mikrometra mogu se učinkovito taložiti duž cijelog dišnog sustava, od gornjih dišnih putova do alveola.²²⁵

Pluća imaju veliku površinu alveola (približno 150 m²) i tanku tkivnu barijeru (manje od 1 mikrometra), što omogućuje nanoplastici da lako uđe u krvotok (Slika 87).

Mikroplastika je otkrivena u 13 od 20 uzoraka plućnog tkiva kod ljudi.²²⁶



Slika 87. Put udisanja plastičnih čestica koje ulaze u organizam čovjeka²²⁷

Prema studiji koja je obuhvatila 22 pacijenta s respiratornim bolestima, mikroplastika je pronađena u svim uzorcima ispljuvka,²²⁸ u rasponu od 18,75 do 91,75 čestica na 10 ml.²²⁹ Veza između alergijskog rinitisa i mikroplastike također je utvrđena.²³⁰

Mikro- i nanoplastika (MNP) usko je povezana s početkom i napredovanjem različitih respiratornih stanja, uključujući astmu, plućnu fibrozu, kroničnu opstruktivnu plućnu bolest i tumore.²²⁹ Istraživanje je otkrilo da 97% uzoraka malignih pluća sadrži mikroplastična vlakna.²³¹

²²⁴Peking 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).

²²⁵Gou, 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>

²²⁶Amato-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>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, 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>

²²⁹Xu, 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>

²³⁰Tuna, 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>

²³¹Dris, 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>

Mogući mehanizmi uključuju oksidativni stres, upalu i poremećaj plućnog mikrobioma. Mikro- i nanoplastika može izazvati plućnu upalu.²³²

Prema izvješću Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), infekcije donjeg dišnog sustava ostaju najsmrtonosnije zarazne bolesti globalno, zauzimajući peto mjesto vodećih uzroka smrti u svijetu. Dodatno, smrtnost od karcinoma dušnika, bronha i pluća porasla je, sada zauzimajući šesto mjesto vodećih uzroka smrtnosti.²³³

Neurotoksični učinci mikro- i nanoplastike (MNP): Oštećenje središnjeg i perifernog živčanog sustava

Istraživanja potvrđuju da su neurološki poremećaji vodeći uzrok fizičke i kognitivne invalidnosti u svijetu, trenutačno pogađajući približno 3,4 milijarde ljudi. Apsolutni broj pacijenata značajno se povećao u posljednjih 30 godina.²³⁴ Štoviše, očekuje se da će se teret kroničnih neurodegenerativnih bolesti barem udvostručiti u sljedeća dva desetljeća. Prema podacima WHO-a, jedan od osam ljudi u svijetu pati od poremećaja mentalnog zdravlja.²³⁵

Prevalencija bipolarnog poremećaja među adolescentima i mladim odraslima globalno porasla je sa 79,21 na 100 000 ljudi 1990. godine na 84,97 na 100 000 u 2019. godini.²³⁶ Tijekom posljednja tri desetljeća, stope incidencije porasle su kako kod muškaraca, tako i kod žena (Slika 88). Nedavne studije ukazuju na porast poremećaja mentalnog zdravlja među djecom i adolescentima. Prema izvješću National Healthcare Quality and Disparities Report iz 2022. godine, od 2016. do 2019. godine, stope posjeta hitnoj službi (ED) s glavnom dijagnozom vezanom za mentalno zdravlje porasle su samo za dobnu skupinu od 0 do 17 godina, s 784,1 na 869,3 na 100.000 stanovnika. Dodatno, od 2008. do 2020. godine, stope smrti od samoubojstva među osobama starijim od 12 godina porasle su ukupno za 16%, s 14,0 na 16,3 na 100.000 stanovnika.²³⁷

Izvješće zdravstvenog osiguravajućeg društva Blue Cross Blue Shield otkriva da su dijagnoze kliničke depresije, poznate i kao velika depresija, porasle za 33% od 2013. godine. Neka literatura već predviđa da će do 2030. godine depresija biti glavni uzrok gubitka dugovječnosti ili života. Izvješće napominje da žene i muškarci s depresijom mogu u prosjeku izgubiti do 9,6 godina zdravog života.²³⁸

²³²Bengalli, 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>

²³³World 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).

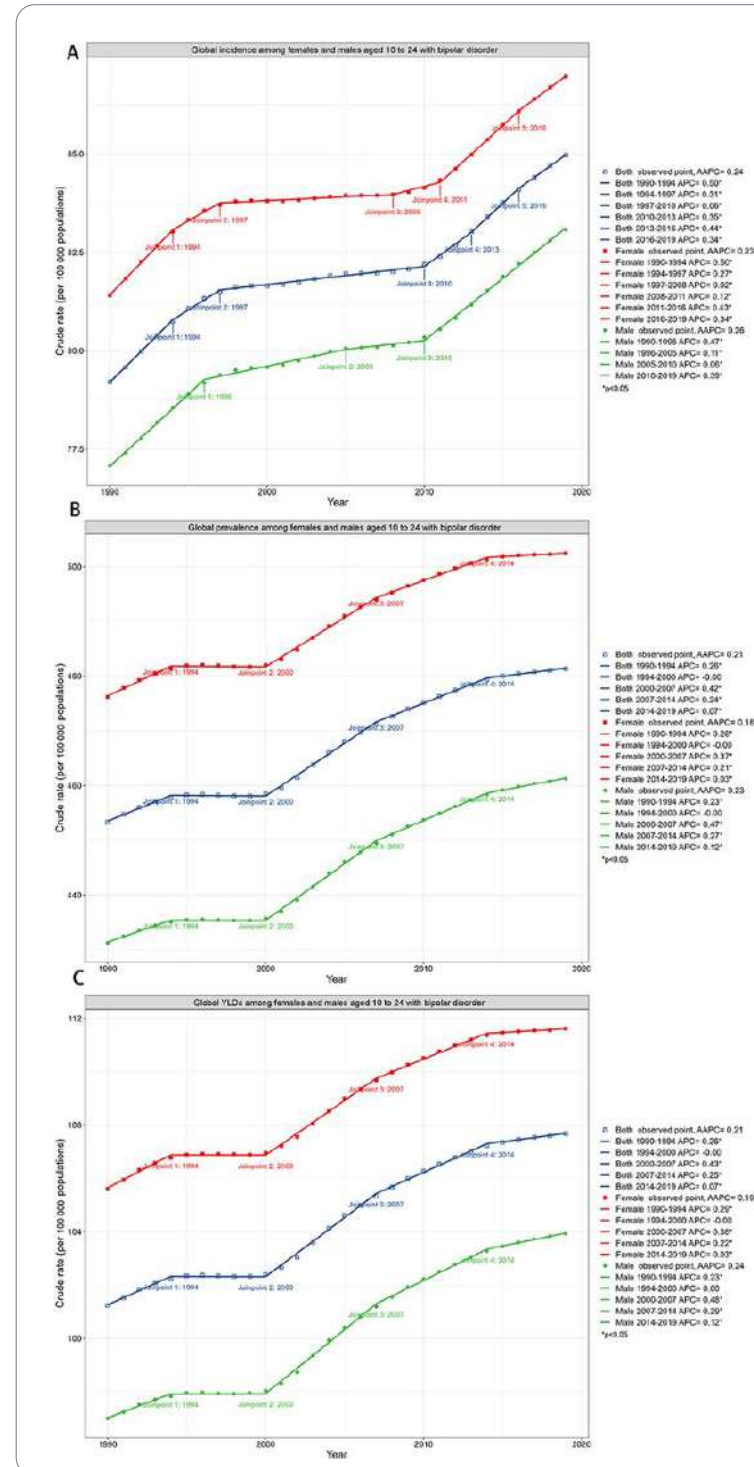
²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

²³⁶Zhong, 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>

²³⁷U.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).

²³⁸Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>



Slika 88. Regresijska analiza točaka spajanja globalne incidencije bipolarnog poremećaja, prevalencije i godina proživljenih s invalidnošću (YLDs) među svim adolescentima i mladim odraslim ljudima u dobi od 10 do 24 godine od 1990. do 2019. * $p < 0,05$; AAPC – prosječna godišnja postotna promjena; APC – godišnja postotna promjena; YLDs – godine proživljene s invalidnošću.

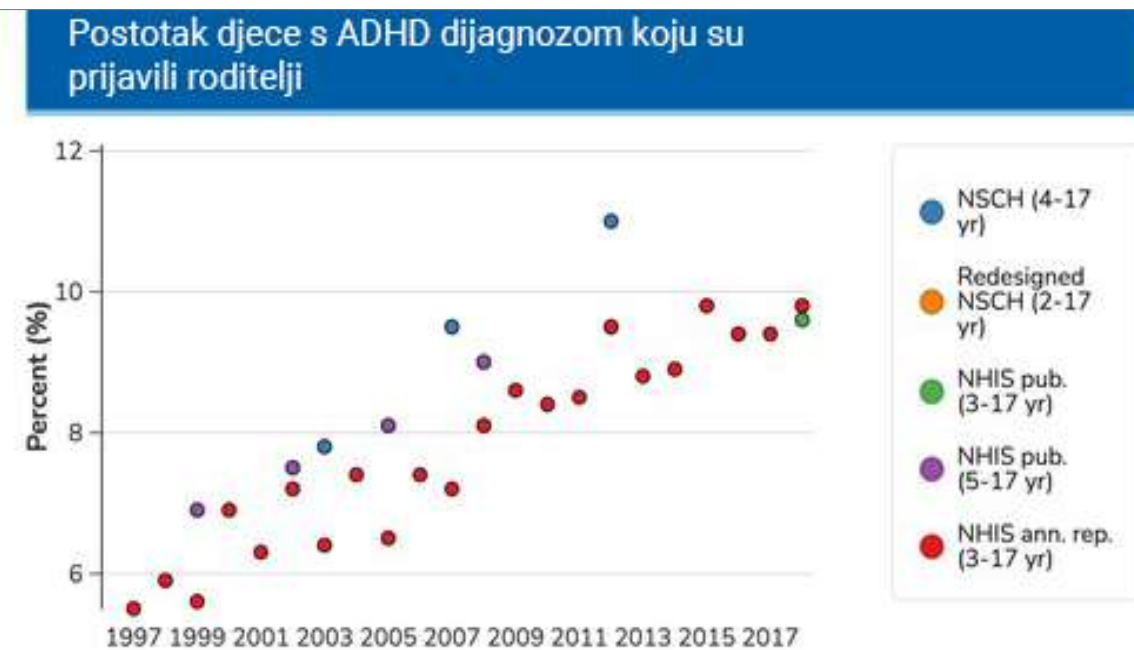
Izvor: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, dijagnoze poremećaja pažnje/hiperaktivnosti (ADHD) stalno su rasle. Nacionalna istraživanja u Sjedinjenim Državama pokazuju porast prevalencije sa 6,1% na 10,2% u razdoblju od 20 godina, od 1997. do 2016. godine (Slika 89).²³⁹

Pregled iz 2023. godine koji obuhvaća 31 zemlju otkrio je opadajuće vještine pismenosti i računanja (Slika 90).²⁴⁰

²³⁹Xu, 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>

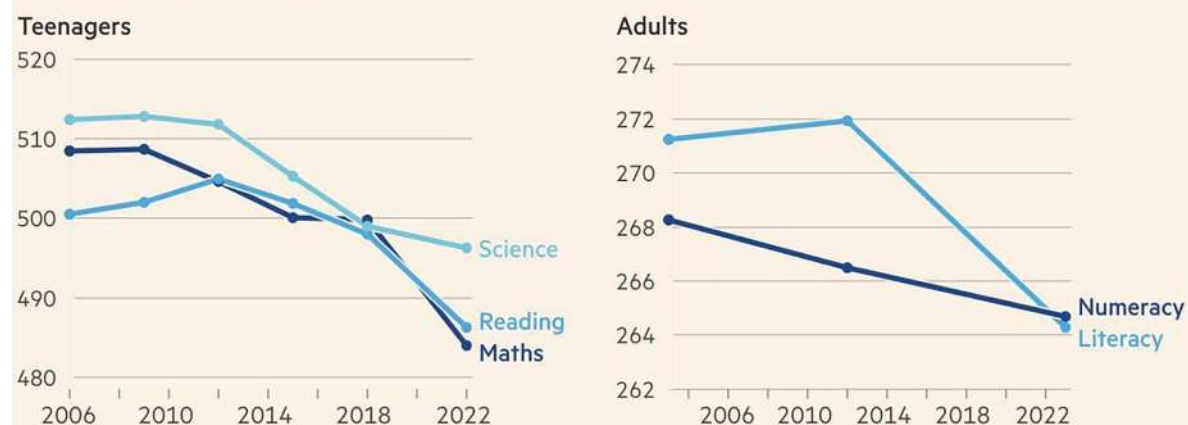
²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).



Slika 89. Grafikon trendova prevalencije ADHD-a od 1997. do 2016. god.
Izvor: 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>

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)



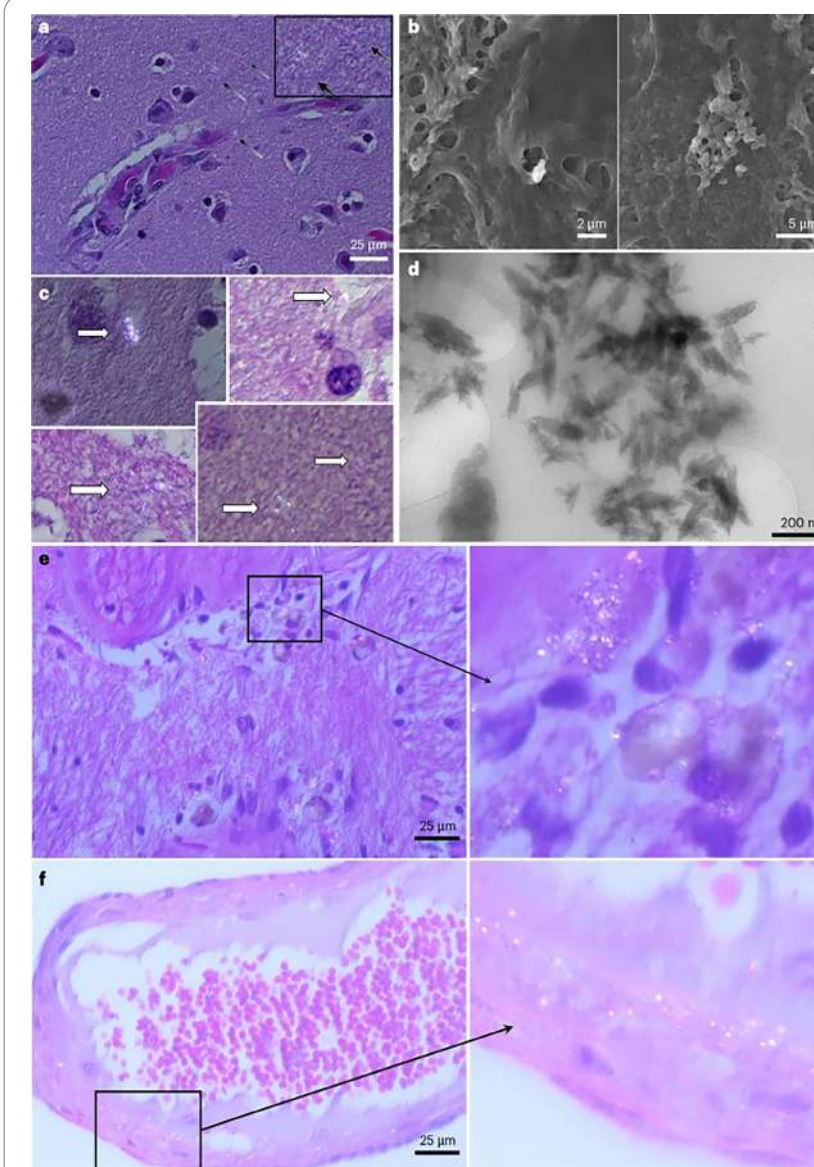
Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch
©FT

Slika 90. Performanse na testovima logike i rješavanja problema opadaju.
Izvor: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Trendovi porasta neurodegenerativnih i neuropsihijatrijskih poremećaja jasno koreliraju s povećanom prisutnošću plastike u okolišu (Slike 96-97).

Najviše koncentracije nanoplastike pronađene su u ljudskom moždanom tkivu – 7 do 30 puta više nego u jetri ili bubrezima. Uzorci moždanog tkiva ljudi s dijagnozom demencije pokazali su još veću prisutnost MNP – do 10 puta više – u usporedbi s moždanim tkivom ljudi bez demencije (Slika 91).²⁴¹

Preovladavajuće čestice u mozgu bili su sitni fragmenti ili ljuskice polietilena, jedne od najčešće korištenih vrsta plastike u pakiranju.



Izvor: 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>

²⁴¹Nihart, 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>

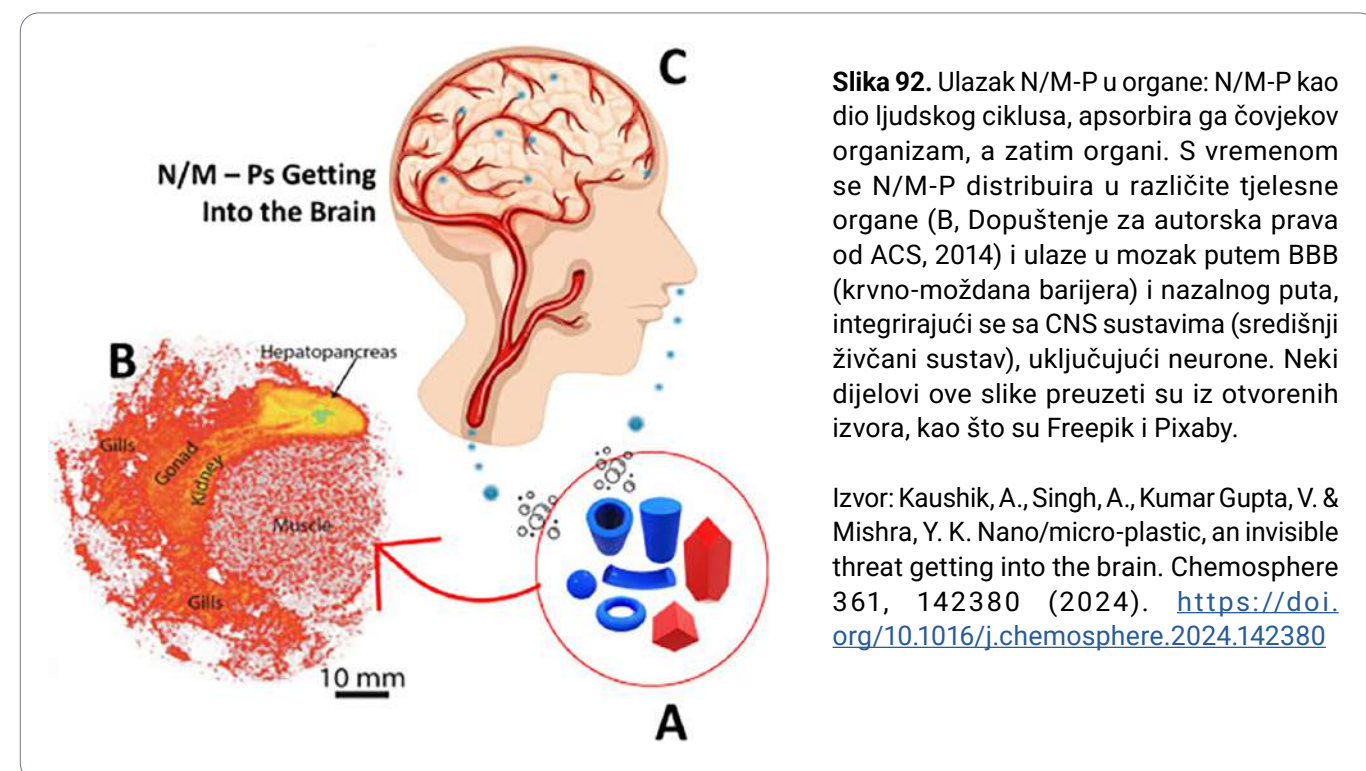
Novi podaci potvrđuju da se od 2016. do 2024., tijekom osam godina, količina plastike u ljudskom mozgu povećala za 50%.²⁴¹

66

“Kod zdravih ljudi u dobi od 45 do 50 godina, u prosjeku smo pronašli 4.900 mikrograma plastičnih čestica po gramu moždanog tkiva. (...) Cijela plastična žlica. Otprilike toliko mikroplastike nalazi se u našem mozgu. To znači da se naš mozak danas 99,5% sastoji od mozga, a ostalo je – plastika”, rekao je koautor studije Matthew Campen sa Sveučilišta New Mexico.²⁴²

S obzirom na rastuće razine plastičnih čestica u atmosferi, vodi i hrani, sigurno je da će se količina nanoplastike u našem organizmu nastaviti povećavati. Ako se ovaj trend nastavi, sadržaj plastike u mozgu mogao bi se povećati za dodatnih 50% unutar sljedeće četiri godine.

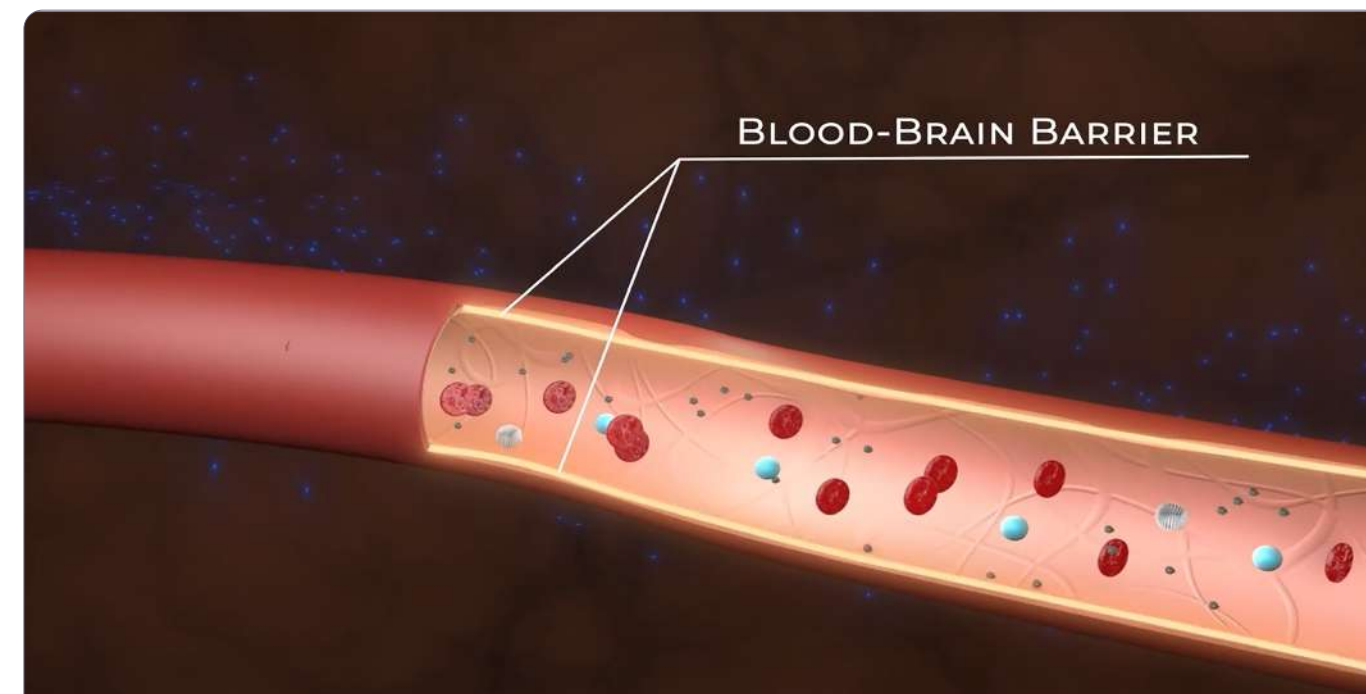
Mikro- i nanoplastika ulazi u mozak putem krvotoka, prelazeći krvno-moždanu barijeru (BBB), te putem udisanja kroz olfaktorni živac (Slika 92).



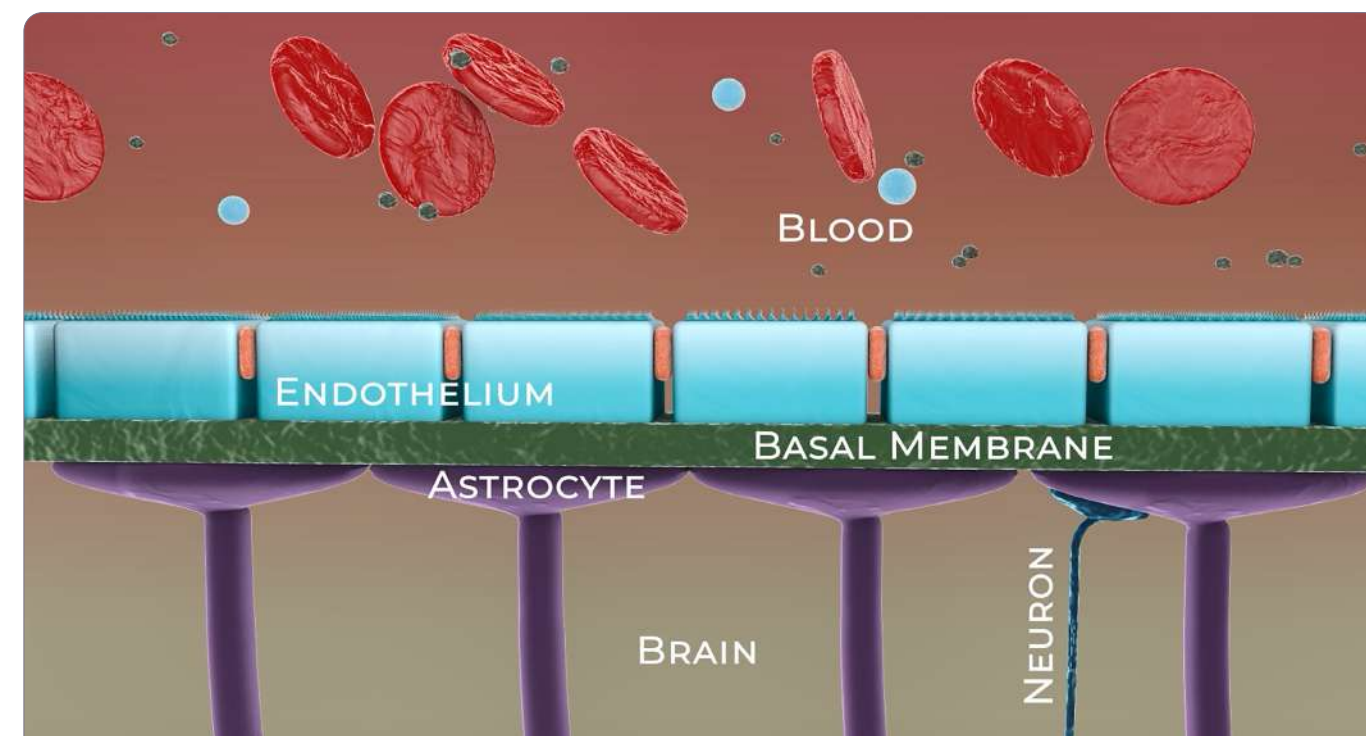
²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT 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).

Krvno-moždana barijera je specijalizirani fiziološki sustav koji regulira prijenos tvari iz krvotoka u središnji živčani sustav (Slika 93). Ona selektivno propušta hranjive tvari i kisik, dok blokira toksine i patogene (Slika 94). Ovaj mehanizam pruža ključnu zaštitu mozgu, održavajući homeostazu neuronskog okruženja.



Slika 93. Shematski prikaz krvne žile mozga



Slika 94. Shematski prikaz krvno-moždane barijere

Zbog svoje submikronske veličine i fizikalno-kemijskih svojstava, plastične nanočestice mogu prodrijeti u mozak unutar samo dva sata od ulaska u organizam.²⁴³

Kada se udahnu, plastične nanočestice putuju kroz olfaktorne živce izravno u područje mozga odgovorno za obradu mirisa (Slika 95).²⁴⁴ Kao rezultat, one idu kraćim i izravnijim putem do mozga nego do drugih organa.



Slika 95. Prodiranje nanočestica kroz olfaktorne živce u mozak

Jednom kada nanoplastika proдре u mozak, narušava funkciju moždanih stanica — neurona. Istraživanja su pokazala da površinska svojstva i električni naboj nanočestica značajno utječu na njihovu interakciju s neuronima i prijenos živčanih impulsa.

Elektrostatički naboj nanoplastike omogućuje joj da slobodno ometa funkciju svake stanice u čovjekovom organizmu, prodirući u stanice, uzrokujući oksidativni stres i kroničnu upalu, narušavajući funkciju mitohondrija i potencijalno dovodeći do njihovog uništenja i stanične smrti.

Studija²⁴⁵ je pokazala da negativno nabijene nanočestice mogu inducirati depolarizaciju neuronskih membrana, mijenjajući njihovu električnu aktivnost.

²⁴³Kopatz, 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>

²⁴⁴Amato-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>

²⁴⁵Dante, 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>

Eksperimenti su otkrili da se negativno nabijene nanoplastične čestice selektivno vežu za neurone koji su aktivno uključeni u prijenos živčanih impulsa. Te se čestice pridržavaju tijela neuronskih stanica, dendrita i sinaptičkih pukotina, dok se glija stanice, koje nemaju električnu aktivnost, ne vežu za njih.

Dakle, električna aktivnost neurona služi kao primarni okidač za vezivanje negativno nabijenih nanoplastika za stanične membrane.

Istraživanja pokazuju da se mikro- i nanoplastika teži akumulirati u mijelinskoj ovojnici mozga bogatoj lipidima, koja okružuje neurone i olakšava provođenje živčanih signala.²⁴⁶ Nanoplastika pokreće degradaciju mijelinske ovojnice oko aksona,^{247, 248} narušavajući prijenos živčanih impulsa između neurona.

Utjecaj nanoplastike na neurone

Nanoplastika može utjecati na neurone kroz sljedeće mehanizme:

1. Utjecaj na potencijal neuronske membrane

Neuroni funkcioniraju na temelju razlike u električnom potencijalu preko svojih membrana (oko -70 mV u mirovanju), održavanog ionskim gradijentima (Na⁺, K⁺, Cl⁻, itd.) i aktivnošću ionskih kanala. Kada je nabijena nanočestica plastike blizu neuronske membrane, može promijeniti električno polje i destabilizirati membranski potencijal. To može dovesti do depolarizacije ili hiperpolarizacije, a u težim slučajevima, do spontane neuronske aktivacije ili blokade signala.

2. Elektrostatička interakcija s ionskim kanalima

Ionski kanali u neuronskim membranama sadrže nabijene aminokiseline, posebno u područjima “vrata” kanala. Nanočestica plastike s jakim negativnim ili pozitivnim nabojem može elektrostatički interagirati s tim mjestima, mijenjajući konfiguraciju kanala. To može uzrokovati blokadu kanala ili nepravilnu aktivaciju, narušavajući normalnu neuronsku funkciju.

3. Poremećaj sinaptičke funkcije

Sinapse ovise o preciznoj aktivnosti Ca²⁺, Na⁺ iona, kao i neurotransmitera.²⁴⁹ Elektrostatički nabijene nanočestice plastike mogu ometati oslobađanje neurotransmitera ili generirati lažne signale, potencijalno narušavajući prijenos živčanih impulsa.

²⁴⁶Peking 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).

²⁴⁷Kim, 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>

²⁴⁸Zhang, 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>

²⁴⁹Moiniafshari, 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>

4. Oksidativni stres i upala

Nabijene nanoplastike mogu povećati razine reaktivnih kisikovih vrsta, što rezultira oksidativnim stresom. Oksidativni stres u neuronima nastaje kada reaktivne kisikove vrste premašuju sposobnost stanice da ih neutralizira. To oštećuje DNK i stanične strukture poput membrana, proteina i mitohondrija, narušavajući normalnu neuronsku funkciju. Kao rezultat, stanica gubi sposobnost učinkovitog prijenosa živčanih impulsa, što dovodi do njezine degradacije i konačne smrti. Budući da neuroni imaju ograničen regenerativni kapacitet, oštećenja uzrokovana oksidativnim stresom često su nepovratna i mogu rezultirati progresivnim smanjenjem pamćenja, pažnje i drugih kognitivnih funkcija.

5. Utjecaj na funkciju mitohondrija

Pozitivno nabijene nanoplastike mogu prodrijeti u stanice i akumulirati se u mitohondrijima, narušavajući njihov membranski potencijal. To narušava respiratorni lanac, uzrokujući curenje elektrona koji reagiraju s kisikom i stvaraju reaktivne kisikove vrste, posebno superoksidne anione. Njihova prekomjerna akumulacija pojačava oksidativni stres i može oštetiti stanične strukture.

6. Mitohondrijske mutacij

Nanočestice plastike mogu oštetiti mitohondrijsku DNK, narušavajući normalnu mitohondrijsku funkciju. To utječe na ključne stanične procese, uključujući proizvodnju energije, regulaciju oksidativnog stresa, programiranu staničnu smrt i metabolizam. Poremećaji u tim sustavima mogu stvoriti uvjete koji potiču razvoj bolesti.

7. Reaktivna svojstva površina nanoplastike

Velika specifična površina nanoplastike jedan je od ključnih faktora koji pokreću njezinu povišenu kemijsku reaktivnost i sposobnost stvaranja reaktivnih kisikovih vrsta. U usporedbi s mikroplastikom, nanočestice imaju površinu po jedinici mase koja je desetak ili čak stotinama puta veća, značajno poboljšavajući njihove interakcije s biomolekulama i okolnom sredinom.

Elektrostatički naboj na česticama plastike može narušiti neuronsku funkciju blokiranjem ili iskrivljavanjem prijenosa živčanih impulsa. To dovodi do kvarova u živčanom sustavu i može pokrenuti širok raspon patoloških stanja u organizmu. Ti se učinci manifestiraju kao različiti neurološki, autonomni, kognitivni i psihijatrijski poremećaji (Tablica 2).

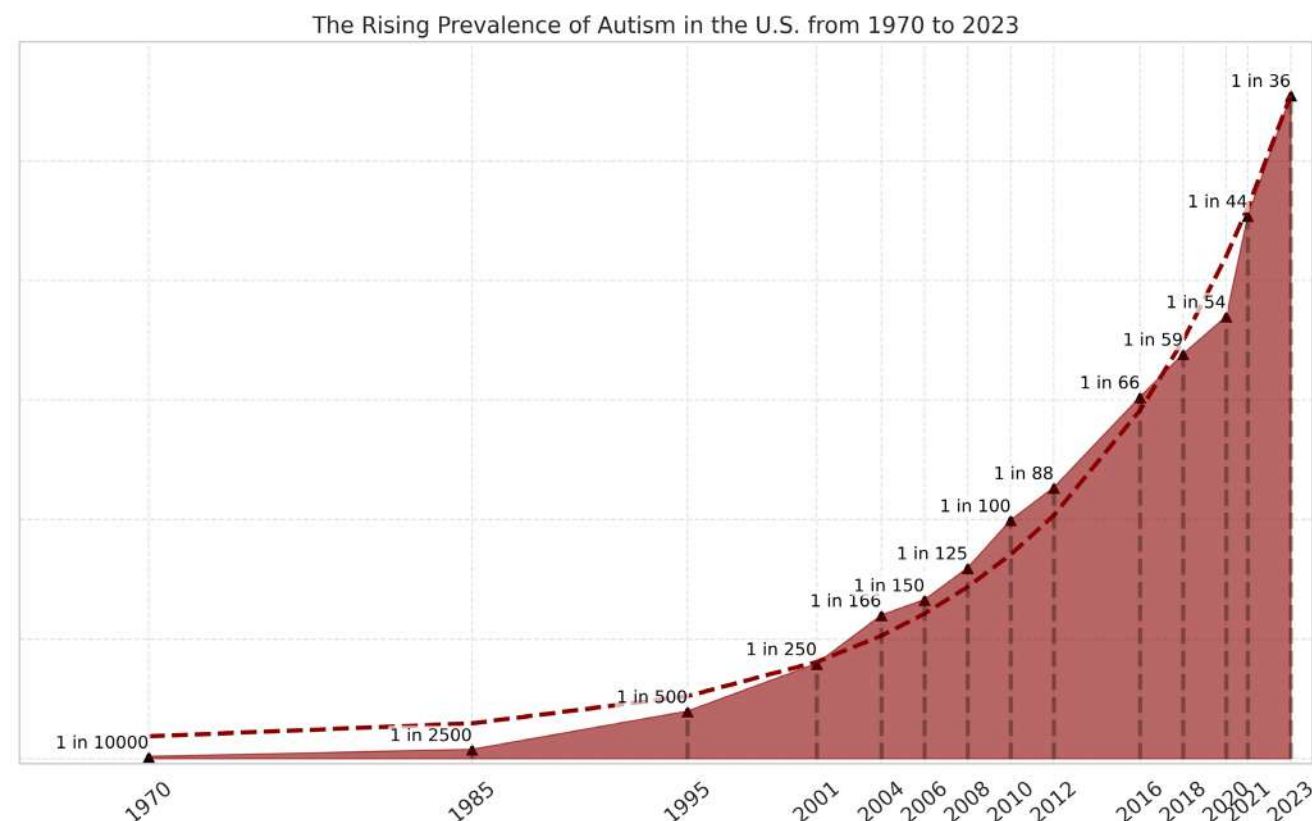
Učinci izloženosti nanoplastici na živčane stanice povezani su sa širokim rasponom poremećaja, uključujući multiplu sklerozu, amiotrofičnu lateralnu sklerozu, Alzheimerovu bolest, Parkinsonovu bolest, autoimune poremećaje, epilepsiju, ishemijski i hemoragijski moždani udar, depresiju, anksiozne i kognitivne poremećaje, shizofreniju, bipolarni poremećaj, autizam i drugo.

Kategorija	Manifestacija	Uzrok / Mehanizam
Motorički poremećaji	Paraliza	Poremećaj u prijenosu motoričkih impulsa iz središnjeg živčanog sustava u mišiće
	Konvulzivna stanja	Neravnoteža između ekscitacijskih i inhibicijskih neuralnih signala
	Gubitak osjeta	Poremećaj u senzornim neuralnim putovima koji prenose informacije od receptora do mozga
	Oštećena koordinacija	Oštećenje cerebelarnih ili spinalnih provodnih putova
Senzorni poremećaji	Poremećaji govora vida i sluha	Oštećenje neuralnih putova povezanih sa senzornim i motoričkim centrima u mozgu
Autonomne disfunkcije	Problemi s disanjem radom srca i probavom	Poremećaj autonomnog živčanog sustava
	Oštećena termoregulacija i disfunkcija organa	Disfunkcija u autonomnim regulatornim centrima
Kognitivna oštećenja	Deficiti pamćenja i pažnje	Strukturne ili funkcionalne promjene u moždanoj kori
	Izmijenjena svijest, koma	Oštećenje retikularne formacije mozga koja igra ključnu ulogu u regulaciji budnosti i svijesti
Psihološki i emocionalni poremećaji	Anksioznost depresija poremećaji raspoloženja	Neurotransmitterne neravnoteže; oštećenje emocionalnih centara u mozgu

Tablica 2. Spektr patoloških stanja uzrokovanih utjecajem nanoplastike na neurone

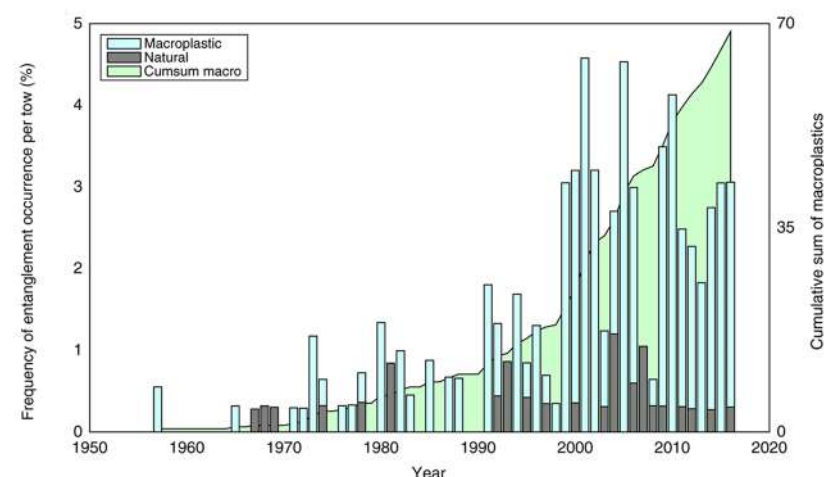
Mikro- i nanoplastika kao faktor rizika za poremećaje iz autističnog spektra

Uz porast zagađenja okoliša plastikom, primijećen je i porast prevalencije poremećaja iz autističnog spektra (PAS) (Slike 96–97).



Slika 96. Porast prevalencije autizma u Sjedinjenim Američkim Državama od 1970. do 2023. god.

Izvor: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.).



Slika 97. Porast količine plastike u oceanima od 1957. do 2020. god.

Izvor: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Prema CDC mreži za praćenje autizma i razvojnih poremećaja (ADDM), 1 od 36 djece u Sjedinjenim Državama dijagnosticiran je s PAS-om 2020. godine, što odražava povećanje slučajeva od 317% od 2000. godine.^{250, 251}

Živčani sustav čovjeka razvija se od embrionalne faze i kroz rano djetinjstvo. Studije sugeriraju potencijalnu vezu između izloženosti mikro- i nanoplastici (MNP) i razvoja PAS-a. Eksperimentalni podaci korejskih istraživača pokazuju da prenatalna i postnatalna izloženost MNP-u može pridonijeti neurorazvojnim poremećajima.²⁵²

Studija o molekularnim učincima polistirenskih nanoplastika na ljudske neuralne matične stanice pokazala je da izloženost nanoplastici može dovesti do oštećenja tkiva i neurorazvojnih bolesti.²⁵³

Istraživanje na glodavcima²⁵⁴ otkrilo je da majčina izloženost mikro- i nanoplastici tijekom trudnoće i laktacije može narušiti hipokampalnu neurogenezu kod potomaka i smanjiti volumen moždanih struktura, uključujući motorni korteks, hipokampus, hipotalamus, produženu moždinu i olfaktornu žarulju.

Dobro je utvrđeno da promjene u strukturi i funkciji proteina neuralnog tkiva igraju ključnu ulogu u razvoju brojnih poremećaja, uključujući autizam.²⁵⁵

Nedavne studije pokazuju da nanoplastika interagira s proteinima prvenstveno putem slabih interakcija, kao što su hidrofobne interakcije, vodikove veze, Van der Waalsove privlačne sile i elektrostatičke sile²⁵⁶. Te interakcije uzrokuju strukturne deformacije u molekulama proteina, narušavajući njihovu funkcionalnost. S obzirom na ulogu proteina u formiranju neuralnih mreža i sinaptičkom prijenosu, takve promjene mogu pridonijeti razvoju PAS-a.

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).

²⁵¹Centers 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).

²⁵²Zaheer, 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>

²⁵³Martin-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>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplatic 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>

²⁵⁵Panisi, 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>

²⁵⁶Windheim, 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>

Uloga mikro- i nanoplastike (MNP) u patogenezi kardiovaskularnih bolesti

Plastične čestice ne samo da cirkuliraju krvotokom već se mogu i taložiti na stijenkama krvnih žila, pokrećući kaskadu patoloških promjena. Posebno zabrinjava otkrivanje mikroplastike u aterosklerotskim plakovima.²⁵⁷ Nedavno istraživanje pokazalo je da su pacijenti s mikroplastikom u karotidnim arterijama imali 4,5 puta veći rizik od srčanog udara, moždanog udara i smrti. To ukazuje da plastični fragmenti aktivno doprinose stvaranju i destabilizaciji aterosklerotskih plakova, potičući njihovo pucanje i stvaranje tromba.²⁵⁸ MNP također narušavaju integritet endotela, kritičnog sloja stanica koje oblažu unutarnju površinu krvnih žila, a koji regulira vaskularni tonus, sprječava stvaranje tromba i ublažava upalne reakcije.

Oštećenje endotela uzrokovano plastičnim česticama dovodi do kronične upale i povećanog rizika od tromboze, što je posebno opasno u arterijama koje opskrbljuju srce i mozak.²⁵⁹ Mikroplastika interagira s komponentama krvi, poput trombocita i crvenih krvnih zrnaca, potičući agregaciju trombocita i inicirajući stvaranje ugrušaka. Dodatno, površina mikroplastike može uzrokovati mehaničko oštećenje stanica i aktivirati kaskade zgrušavanja krvi, potencijalno dovodeći do kronične hiperkoagulacije i mikrovaskularnih poremećaja tijekom vremena.

Imunološke stanice mogu progutati čestice mikroplastike, ali im nedostaju mehanizmi za njihovu potpunu razgradnju, što rezultira deformacijom stanica i povećanjem veličine. Akumulacija tih promijenjenih stanica u malim žilama mozga doprinosi stvaranju mikrotromba, narušavajući cerebralni protok krvi i povećavajući rizik od moždanog udara, uključujući i kod mlađih uzrasta.²⁶⁰ Kronično smanjenje opskrbe mozga kisikom (hipoksija) dovodi do odumiranja neurona i razvoja neurodegenerativnih promjena, uključujući atrofiju moždanog tkiva.²⁶¹ Dugotrajna izloženost tim procesima može smanjiti volumen specifičnih moždanih struktura.

Zbog svog elektrostatičkog naboja, MNP aktivno stupaju u interakciju sa staničnim membranama, narušavajući njihov električni potencijal. To pak utječe na kontraktilnost krvnih žila, prijenos signala u miocitima i srčani ritam. CSmrtnost od kardiovaskularnih bolesti i dalje stalno raste diljem svijeta (Slika 98). Posebnu pozornost treba posvetiti sindromu iznenadne srčane smrti među mladim odraslim osobama u dobi od 25 do 44 godine²⁶² (Slika. 99), koji je prepoznat kao vodeći uzrok smrti u Sjedinjenim Državama. Tijekom posljednja dva desetljeća, broj slučajeva dramatično je porastao. S obzirom na široku prisutnost MNP, njihova potencijalna uloga u ovim tragičnim događajima ne može se isključiti.

²⁵⁷Liu, 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>

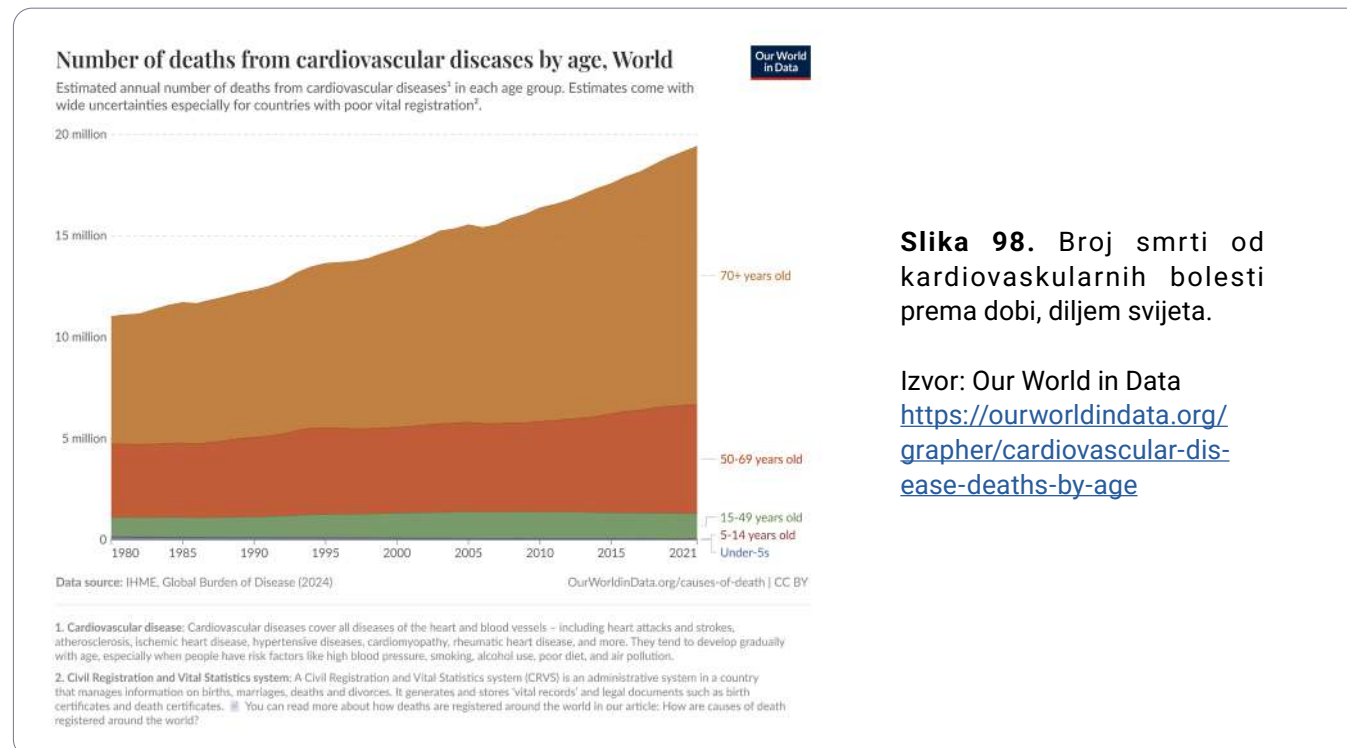
²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

²⁶⁰Huang, 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>

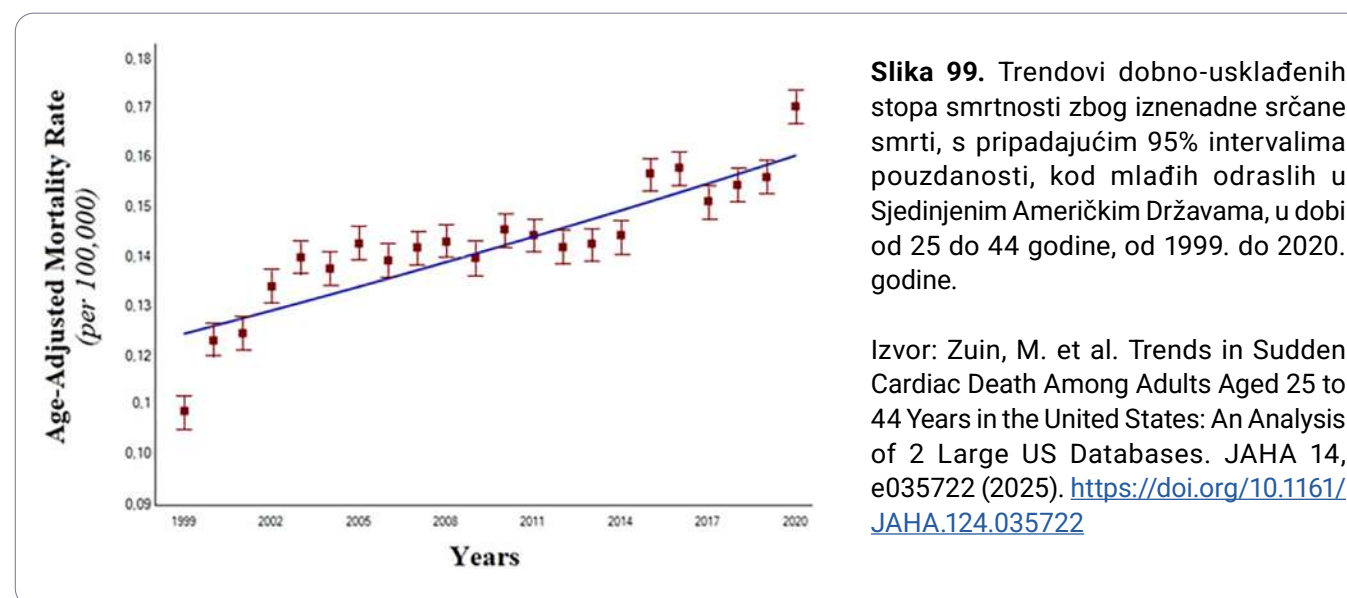
²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, 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>



Slika 98. Broj smrti od kardiovaskularnih bolesti prema dobi, diljem svijeta.

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



Slika 99. Trendovi dobno-usklađenih stopa smrtnosti zbog iznenadne srčane smrti, s pripadajućim 95% intervalima pouzdanosti, kod mlađih odraslih u Sjedinjenim Američkim Državama, u dobi od 25 do 44 godine, od 1999. do 2020. godine.

Izvor: 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>

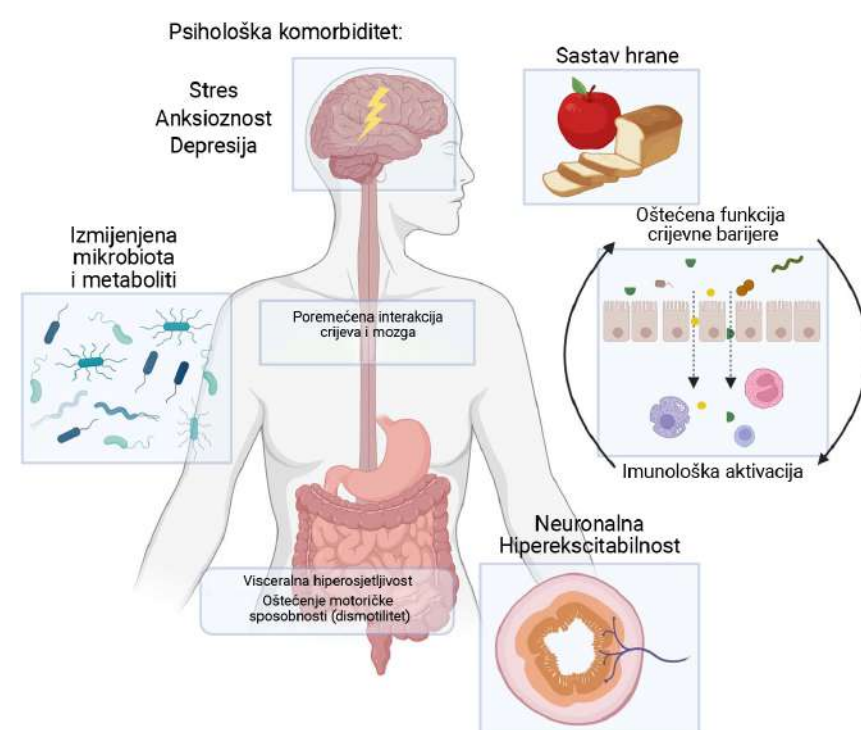
Još jedno kritično pitanje je porast sindroma iznenadne dojenačke smrti (SIDS). Samo u Sjedinjenim Američkim Državama, stopa SIDS-a porasla je za 15% od 2019. do 2020. godine, pomaknuvši se s četvrtog na treći vodeći uzrok smrtnosti dojenčadi.²⁶³ Iako točni uzroci SIDS-a ostaju nejasni, mnogi znanstvenici sugeriraju da faktori koji ometaju regulaciju srčanog ritma i vaskularnog tonusa kod dojenčadi mogu igrati ključnu ulogu. Nanoplastika, sposobna prijeći posteljicu i akumulirati se u tkivima fetusa u razvoju, smatra se vjerojatnim faktorom rizika. Istraživači se sve više slažu s mišljenjem da bi nanoplastika mogla biti ključni kandidat za ulogu "nevidljivog ubojice."

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Srce, jedan od organa u organizmu, a koji najviše troši energiju, kritično ovisi o učinkovitom funkcioniranju mitohondrija kako bi zadovoljilo svoje energetske potrebe. Izloženost mikroplastičnim česticama remeti mitohondrijske procese, što potencijalno dovodi do energetske deficita u miokardu i, posljedično, do oslabljene srčane funkcije.

Gastrointestinalna disfunkcija zbog izloženosti MNP

Crijeva su najveći imunološki organ u tijelu, sadrže približno 70% svih imunoloških stanica, oko 500 milijuna neurona i preko 100 bilijuna mikroorganizama.²⁶⁴ Crijevna mikrobiota igra vitalnu ulogu u održavanju imunološkog zdravlja, a njezina neravnoteža može oslabiti imunitet i pridonijeti raznim bolestima. Često se nazivaju "drugim mozgom" zbog svoje guste neuronske mreže i sposobnosti komunikacije sa središnjim živčanim sustavom,²⁶⁵ crijeva su uključena u složenu biokemijsku signalizaciju s mozgom putem "osi mozak-crijeva", što značajno utječe na fizičko i psiho-emocionalno zdravlje (Slika 100).



Slika 100. Patofiziološki mehanizmi u poremećajima interakcije crijeva i mozga.

Izvor: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckstaens, 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>

²⁶⁴ Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Vagal sensory neurons and gut-brain signaling. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020).

<https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁵ 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>

Zdrava crijevna barijera sprječava prolazak mikroba i stranih čestica iz crijevnog lumena u krvotok.²⁶⁵ Mikro i nanoplastika ugrožavaju ovu barijeru, povećavajući propusnost crijevne stijenke. To dovodi do upale u crijevima i drugim organima, slabeći imunitet. Istodobno, MNP mijenja sastav crijevne mikrobiote, uzrokujući neravnotežu između korisnih i patogenih mikroorganizama.²⁶⁶ To remeti probavu, smanjuje sposobnost organizma da razgrađuje alergene iz hrane i povećava rizik od alergija na hranu.²⁶⁷

To stvara začarani krug: plastika narušava crijevnu mikrobiotu, pojačava upalu i ugrožava integritet crijevne stijenke. Kao rezultat, toksini, bakterije i čestice plastike počinju ulaziti u krvotok. Njihova prisutnost u krvi pokreće imunološki odgovor koji dovodi do kronične upale u cijelom organizmu. Iz krvotoka, ti toksini, bakterije i nanoplastika mogu prijeći krvno-moždanu barijeru i doći do mozga, gdje izazivaju upalne reakcije. Zauzvrat, ovi procesi dodatno narušavaju imunološki odgovor, pojačavaju tjelesni odgovor na stres i mogu negativno utjecati na crijevnu mikrobiotu putem neuroendokrinih mehanizama — čime se zatvara začarani krug duž osi "crijeva-mozak."

Poremećaj interakcije između crijevnog mikrobioma i središnjeg živčanog sustava izravno je povezan s neurološkim poremećajima. Primjerice, djeca s poremećajima iz autističnog spektra pokazuju značajne neravnoteže mikrobiote, potvrđene mikrobiološkom analizom i procjenama funkcije probavnog sustava.²⁶⁸

Studije pacijenata s upalnom bolesti crijeva pokazuju pozitivnu korelaciju između ozbiljnosti bolesti i koncentracije mikroplastike u stolici. Pacijenti s upalnim bolestima crijeva imaju više razine mikroplastike (41.8 čestica/g) u usporedbi sa zdravim pojedincima (28.0 čestica/g). Osim toga, značajna akumulacija mikroplastike primijećena je u ulceroznim lezijama sluznice rektuma kod ovih pacijenata.²⁶⁹

Nadalje, mikroplastika koja ostaje u crijevima nastavlja ispoljavati štetne učinke dugo nakon početnog ulaska u organizam.

²⁶⁵ 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>

²⁶⁶ 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>

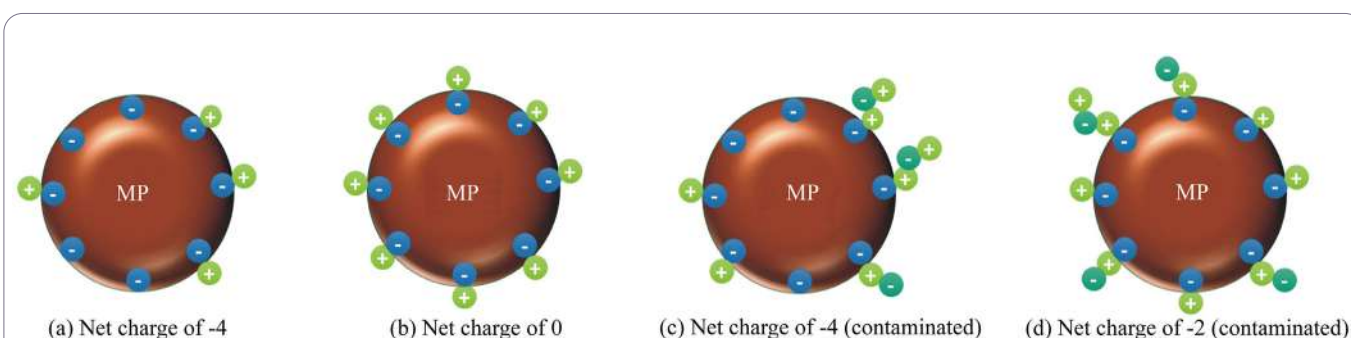
²⁶⁷ ScienceDirect. Food allergy. *ScienceDirect Topics*. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

²⁶⁸ Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹ ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. *ScienceDirect Topics*. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

Utjecaji MNP na imunološki sustav

MNP remeti imunološki odgovor u organizmu, stvarajući uvjete pogodne za proliferaciju patogena. Nabijena MNP lakše privlači druge molekule — kao što su toksini, soli teških metala, bakterije i virusi (vidi Sliku 101). To ih čini svojevrsnom “transportnom platformom” za toksične spojeve, pojačavajući biološku aktivnost i toksičnost tih tvari. Elektrostatički naboj na nanoplastici također djeluje kao izvor energije ili “baterija”, pomažući virusima i bakterijama da sačuvaju održivost na duži period.



Slika 101. Ilustracija učinka površinskih naboja mikroplastike uzrokovanih zagađivačima vode.

Izvor: 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>

Osim toga, nabijene mikro- i nanoplastične čestice mogu dugo ostati suspendirane u vodi i zraku. Lakše se dižu u aerosole i ulaze u dišni sustav, povećavajući vjerojatnost njihove apsorpcije u čovjekov organizam.

Kumulativni učinci MNP na mikrobiom, patogene i imunološki sustav predstavljaju složene zdravstvene rizike.

Imunološke stanice koje dođu u kontakt s mikroplastikom umiru otprilike tri puta brže od onih koje se s njima ne susreću.²⁷⁰

Mikroplastične čestice sposobne su adsorbirati viruse na svoje površine zbog elektrostatskih i hidrofobnih interakcija, čime se produljuje njihova održivost.²⁷¹

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

²⁷¹Moresco, 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>

Virusi na površini mikroplastike mogu ostati aktivni do tri dana — dovoljno vremena za putovanje od postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda do, primjerice, plaža.²⁷²

Mikroplastika olakšava širenje patogena i može doprinijeti njihovoj genetskoj rekombinaciji. Istraživanja su pokazala da plastične čestice ne samo da narušavaju učinkovitost lijekova, već mogu i potaknuti razvoj sojeva bakterija otpornih na antibiotike.²⁷³

Nabijene čestice mikro- i nanoplastike služe kao platforme za kolonizaciju mikroorganizama.²⁷⁴ Bakterije i gljivice, koristeći elektrostatička polja nanoplastike, pokazuju ubrzani rast. Istraživanja na vodenim buhama (*Daphnia*) pokazala su da izloženost nanoplastici izaziva oksidativni stres i povećava učestalost gljivičnih infekcija za faktor 11 (posebno vrste *Metschnikowia*).²⁷⁵ To je u skladu s globalnim širenjem raspona i otpornosti gljivičnih bolesti, koje je WHO identificirao kao sve veću prijetnju javnom zdravlju.



“Nastajući iz sjene pandemije bakterijske antimikrobne rezistencije, gljivične infekcije rastu i sve su otpornije na liječenje, postajući globalna briga za javno zdravlje”, izjavila je dr. Hanan Balkhy, pomoćnica glavnog direktora WHO-a za antimikrobnu rezistenciju.²⁷⁶

Gljivični metaboliti oslobođeni u prisutnosti mikro- i nanoplastike povezani su s rastom tumora²⁷⁷ i kroničnom upalom. Gljivična DNK detektirana je u specifičnim vrstama raka, što ukazuje na potencijalnu ulogu mikro- i nanoplastike u karcinogenezi.²⁷⁸

²⁷²University 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).

²⁷³Dick, 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>

²⁷⁴Rahman, 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>

²⁷⁵Manzi, 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>

²⁷⁶World 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).

²⁷⁷Aykut, 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>

²⁷⁸Dohlman, 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>

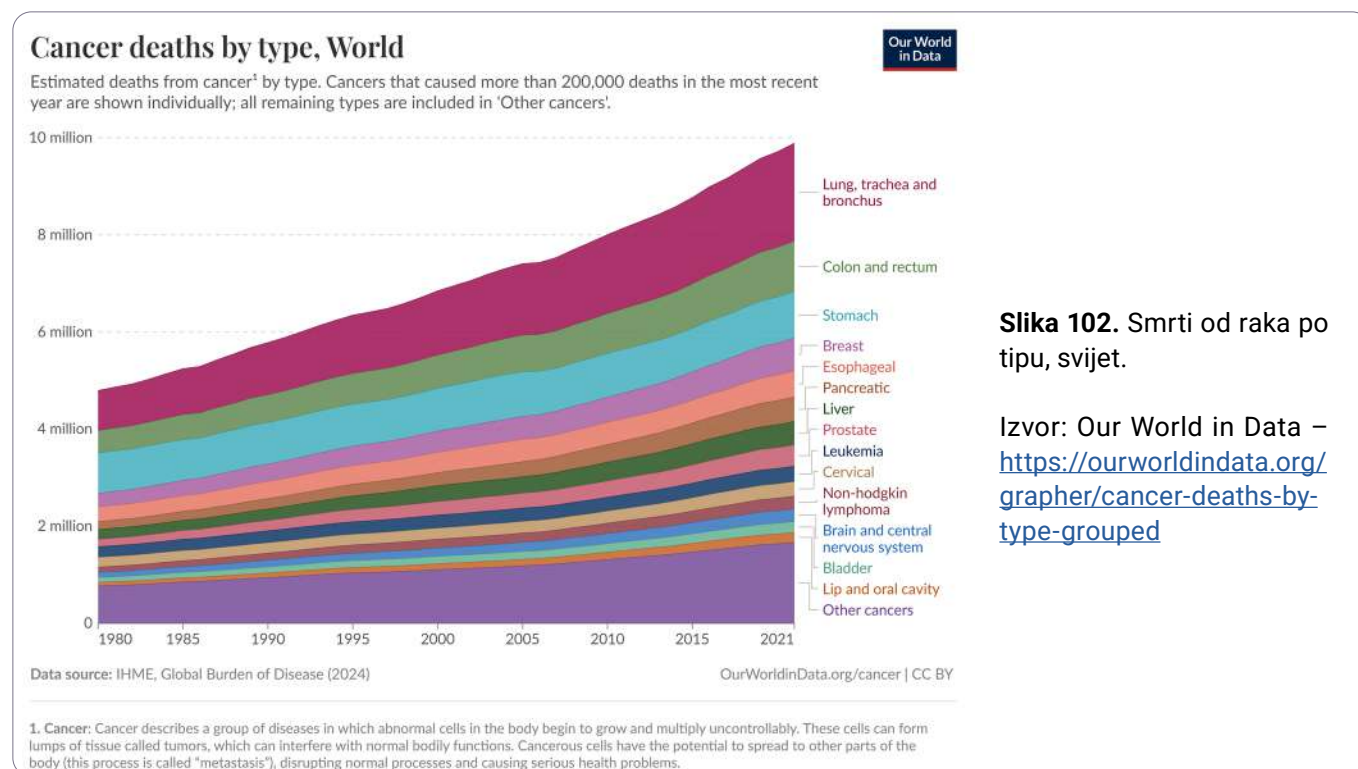
Karcinogena svojstva MNP: Mutacijski putevi i metastatska progresija

Kao što je spomenuto u prethodnim dijelovima ovog izvješća, mikro i nanoplastika značajni su faktori u razvoju zloćudnih tumora, s obzirom na njihov negativan utjecaj na staničnoj i sistemskoj razini.

Istraživanja pokazuju da mikroplastika i nanoplastika mogu djelovati kao skriveni katalizatori progresije tumora, posebno putem jačanja migracije stanica i poticanja metastaza.²⁷⁹ Također je utvrđeno da MNP čestice mogu opstati unutar stanica dulje vrijeme i prenositi se na stanice kćeri tijekom diobe.

Trenutno, stopa smrtnosti od onkoloških bolesti nastavlja rasti globalno (Slika 102).

Predviđa se da će se do 2050. godine broj novih slučajeva raka povećati za 77%.²⁸⁰



Slika 102. Smrti od raka po tipu, svijet.

Izvor: Our World in Data – <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped>

²⁷⁹Brynjak-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>

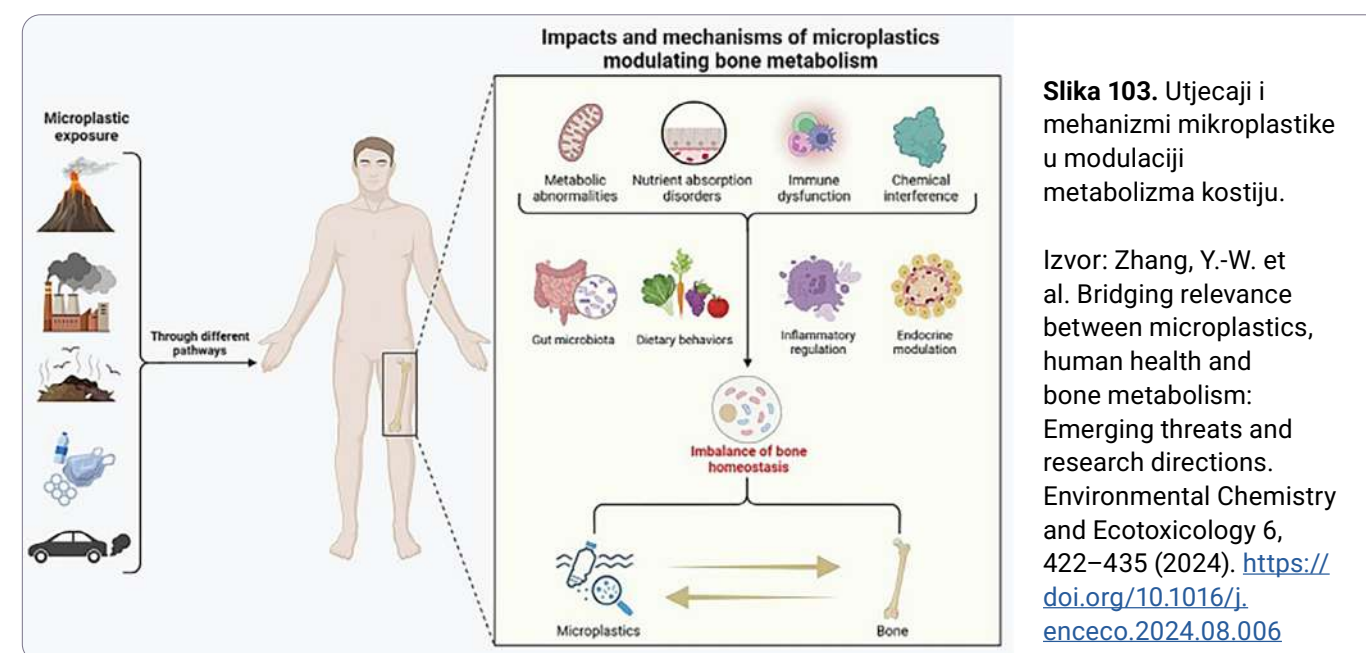
²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

Učinci MNP na metabolizam kalcija i strukturu kostiju

Plastične čestice mogu prodrijeti čak i u mišićno-koštani sustav — temelj čovjekove fizičke funkcije (Slika 103). U području gdje postoji precizna ravnoteža između razaranja i izgradnje, gdje se kosti svakodnevno obnavljaju, zglobovi ublažavaju trenje, a mišići podržavaju kretanje i toplinu, mikroplastika — djelomično zbog svog elektrostatičkog naboja — može građevne zamijeniti molekule i pokrenuti spore, destruktivne procese.

Istraživanja pokazuju da mikroplastika može prodrijeti u koštano tkivo, gdje im njihova molekularna struktura omogućuje da oponašaju kalcij i druge minerale ključne za metabolizam kostiju. Kao rezultat toga, organizam plastiku može pogrešno percipirati kao građevinski materijal za kosti. Organizam doslovno počinje "graditi" kosti od plastike.

Ovaj poremećaj u molekularnom prepoznavanju povezan je s nizom negativnih posljedica: mikroplastika može narušiti funkcije osteoblasta i osteoklasta, poremetiti metabolizam kalcija i fosfora, čime doprinosi razvoju osteoporoze. Pokreću se upalne kaskade, mijenja se ekspresija gena, a koštano tkivo gubi gustoću i snagu. Dodatno, prisutnost nanoplastike može uzrokovati kroničnu upalu, oštećujući zglobnu hrskavicu i koštano tkivo, što je povezano s povećanim rizikom od osteoartritisa, bolnih sindroma i ukočenosti u kretanju.^{281, 282}



Slika 103. Utjecaji i mehanizmi mikroplastike u modulaciji metabolizma kostiju.

Izvor: 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>

²⁸¹Zhang, 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>

²⁸²China 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).

Istraživanja na glodavcima pokazala su da se broj osteoblasta značajno smanjio kod miševa izloženih mikroplastici polistirena.²⁸⁰

Plastika predstavlja značajnu prijetnju i skeletnim mišićima. Studije pokazuju da nanoplastika može prodrijeti u mišićne stanice, narušavajući mitohondrijsku funkciju. To dovodi do energetske deficita, aktivira agresivne oblike reaktivnih kisikovih vrsta, ubrzava stanično starenje, narušava oporavak mišića nakon napora i doprinosi atrofiji mišića. Stariji odrasli i pacijenti s kroničnim bolestima posebno su ranjivi.

Mikro i nanoplastika akumuliraju se u koštanoj srži,²⁸³ narušavajući stvaranje matičnih stanica (hematopoetskih i mezenhimalnih),²⁸⁴ iz kojih se razvijaju crvena krvna zrnca, bijela krvna zrnca, trombociti, osteociti, hondrociti i adipociti. Njihova disfunkcija rezultira sustavnim oštećenjem organizma.

Poremećaji reproduktivnog sustava povezani s izloženošću MNP: Neplodnost i erektilna disfunkcija

Opadanje plodnosti

Predviđanja ukazuju da bi do 2045. godine svijet mogao postati potpuno neplodan.²⁸⁵

Još 2018. godine, skupina vodećih liječnika i znanstvenika na **XIII. Međunarodnom simpoziju o spermatologiji** u Stockholmu pozvala je vlade da prepoznaju opadanje muške plodnosti kao ozbiljan problem javnog zdravstva i da priznaju važnost muškog reproduktivnog zdravlja za opstanak ljudske vrste.²⁸⁶

Suprotno uvriježenom mišljenju, reproduktivno zdravlje nije određeno samo hormonalnom ravnotežom, genetikom i načinom života. Sve veći broj znanstvenih studija ukazuje na ključnu ulogu mitohondrija u procesima začeća i razvoja embrija. Ove sićušne organele, odgovorne za proizvodnju energije nužne za sve životne procese, igraju presudnu ulogu u plodnosti i kod muškaraca i kod žena, a njihov značaj za ljudsku reproduktivnu funkciju pokazao se mnogo dublji nego što se prije razumjelo.

Disfunkcije u mitohondrijskoj aktivnosti mogu biti uzrok neplodnosti i kod žena i kod muškaraca. Kod muškaraca, mitohondriji smješteni u repu spermija odgovorni su za pokretljivost nužnu za oplodnju. Poremećaji u njihovom radu smanjuju pokretljivost spermija i mogu dovesti do abnormalnosti.

²⁸⁰World 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).

²⁸³Guo, 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>

²⁸⁴Sun, 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>

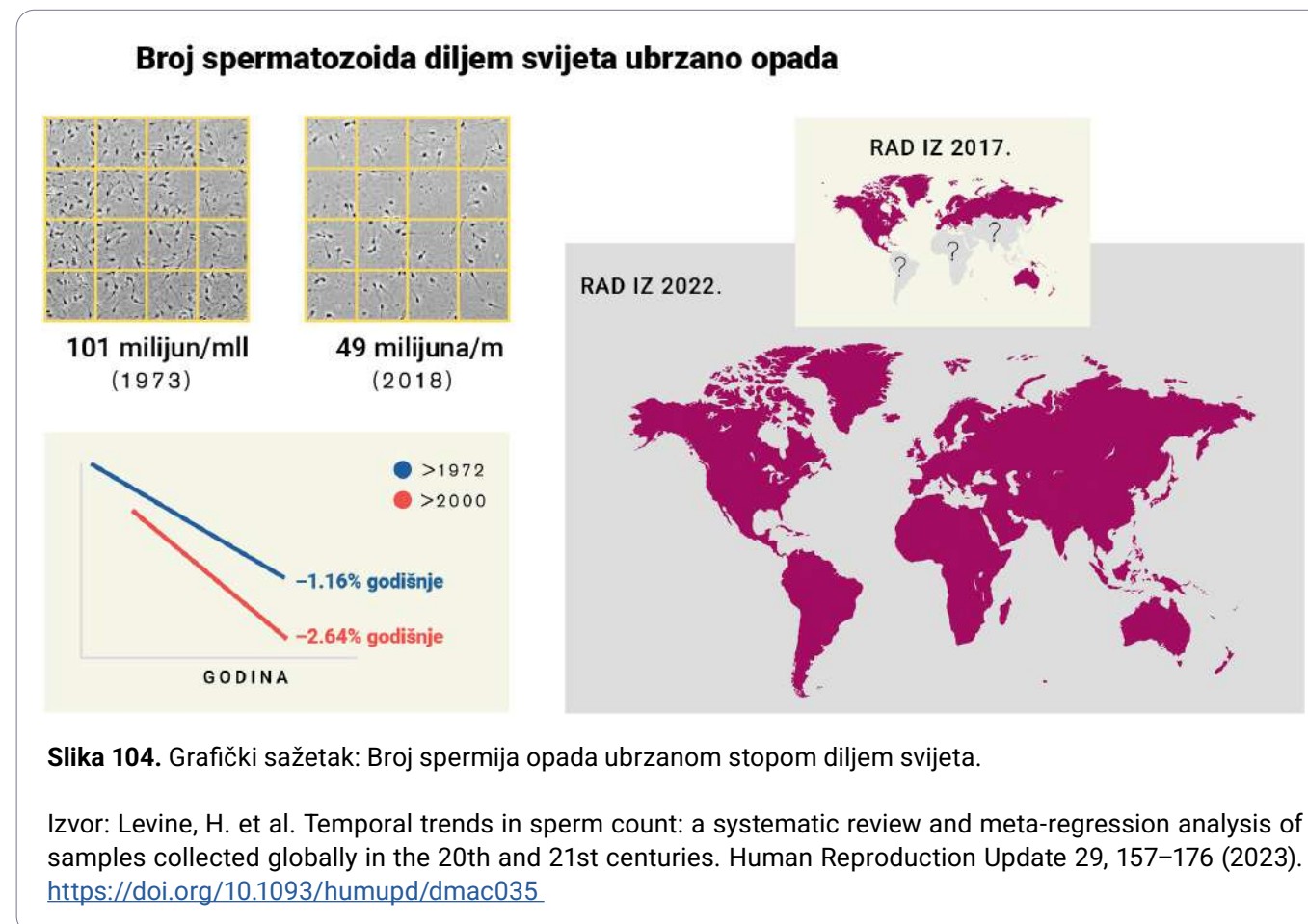
²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

²⁸⁶Levine, 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>

Studije koje su proveli kineski znanstvenici pronašle su mikroplastiku u svim uzorcima spermija, u prosjeku dvije čestice veličine do 7 mikrometara, najčešće polistiren.²⁸⁷ Prisutnost mikroplastike povezana je s morfološkim abnormalnostima spermija i skraćenim telomerama.

Zbog svoje mikroskopske veličine i naboja, nanoplastika može prijeći krvno-testisnu barijeru i infiltrirati se u reproduktivne organe, narušavajući njihove funkcije.

Posebnu zabrinutost izaziva uočeni trend pada ukupnog broja spermija kod muškaraca za 62,3% od 1973. do 2018. godine²⁸⁸ (Slika 104).

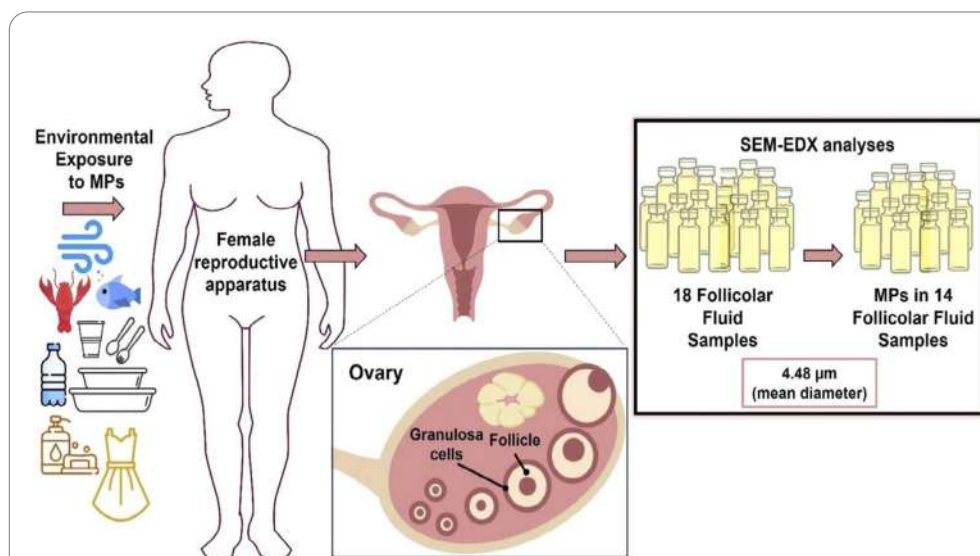


Iako mnogi faktori utječu na plodnost, sve veći broj znanstvenika naginje stajalištu da kemijski spojevi pronađeni u plastici igraju ključnu ulogu u tom procesu. Ftalati, koji se koriste za postizanje fleksibilnosti plastike, narušavaju hormonalnu ravnotežu, smanjuju libido te mogu pridonijeti preuranjenom spolnom sazrijevanju i disfunkciji testisa.

²⁸⁷Li, 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>

²⁸⁸Levine, 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>

Situacija vezana uz žensku plodnost jednako je zabrinjavajuća. Studija iz 2025. godine pronašla je mikroplastične čestice u folikularnoj tekućini jajnika kod 14 od 18 žena, u prosjeku preko 2000 čestica po mililitru, od kojih je većina bila manja od 5 mikrometara u promjeru²⁸⁹ (Slika 105).



Slika 105. Shema mehanizma kojim MP prelazi u folikularnu tekućinu jajnika: putem izloženosti okolišu (inhalacijom, ingestijom i dermalnim kontaktom) ulaze u čovjekov organizam, dosežući ženski reproduktivni sustav, posebno prelazeći krvno-folikularnu barijeru.

Izvor: 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>

Ovi podaci ukazuju na sposobnost plastičnih čestica da prijeđu krvno-folikularnu barijeru u jajnicima. Na staničnoj razini, mikro i nanoplastika mogu oštetiti DNK, poremetiti diobu stanica i izazvati upalu. Dokazana je njihova interferencija s hormonalnom regulacijom, oštećenje funkcija posteljice, utjecaj na angiogenezu i povezanost s razvojem mioma maternice.

Eretilna disfunkcija

Rezultati nacionalne studije u Japanu otkrili su opadanje erektile funkcije i spolne aktivnosti među mlađim generacijama.²⁹⁰ Procjena temeljena na ljestvici tvrdoće erekcije (EHS) identificirala je prevalenciju erektile disfunkcije (ED) od 30,9%, što pogađa približno 14 milijuna muškaraca. Spolna želja, rigidnost erekcije, orgazmi i zadovoljstvo bili su niži od očekivanih među mladim Japancima, posebno onima u dobi od 20 do 24 godine, iako su se ti faktori pogoršavali s godinama. Značajno je da je stopa prevalencije u dobnoj skupini od 20 do 24 godine iznosila 26,6%, gotovo jednako kao i u dobnoj skupini od 50 do 54 godine (27,8%) (Slike 106, 107).

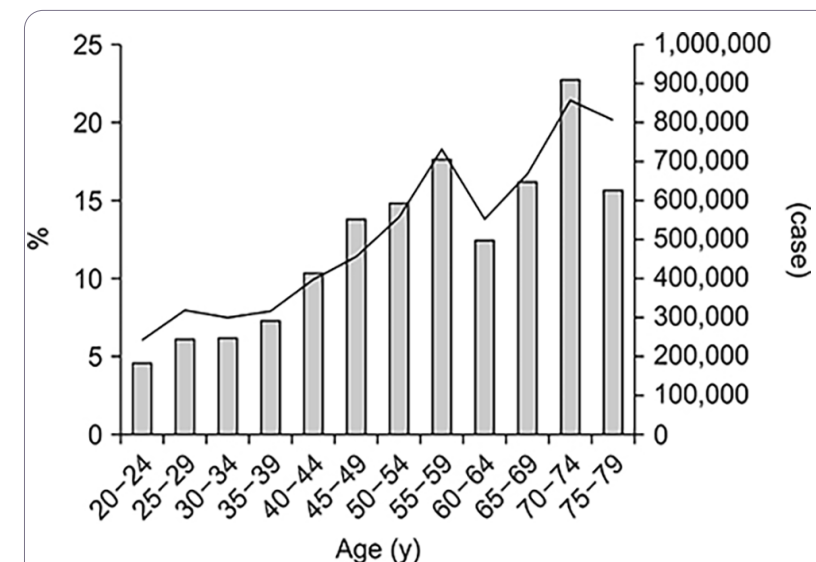
²⁸⁹Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, 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>

Dodatno, zasebna globalna studija izvijestila je da tri od četiri muškarca doživljavaju ED simptome, što ukazuje na to da stanje nije rijetko i može zahvatiti muškarce bilo koje dobi.

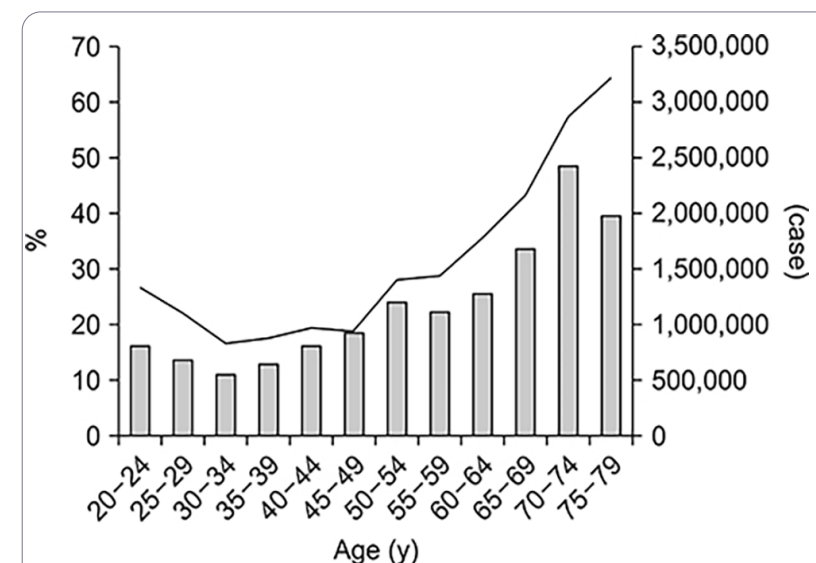
Japansko prvo službeno nacionalno istraživanje o seksualnoj funkciji, provedeno 1998. godine, procijenilo je da je približno 11,3 milijuna muškaraca imalo umjerenu do potpunu erektilnu disfunkciju (ED). Dodatno, nacionalna istraživanja o muškoj neplodnosti u Japanu, provedena 1996. i 2015. godine, otkrila su zapanjujuće podatke. U studiji iz 2015. godine, 13,5% muškaraca suočilo se s muškom neplodnošću zbog ED kao primarnog uzroka, što je gotovo četiri puta više nego 1996. godine.

Trenutni kolektivni znanstveni dokazi sugeriraju da su mikro i nanoplastika u organizmu skriveni, ali značajan uzrok opadanja reproduktivnog zdravlja. Te čestice prodiru u reproduktivne organe, narušavaju mitohondrijsku funkciju, uzrokuju upalu, remete hormonalnu ravnotežu i oštećuju DNK, smanjujući pokretljivost spermija i morfološku kvalitetu. Njihova prisutnost u sjemenu i folikularnoj tekućini ukazuje na njihovu sposobnost prelaska bioloških barijera i ispoljavanja dubokih sistemskih učinaka. To predstavlja prijetnju ne samo individualnom zdravlju već i budućoj reproduktivnoj sposobnosti čovječanstva u cjelini.



Slika 106. Prevalencija i broj pacijenata s erektilnom disfunkcijom procijenjeni na temelju pitanja "Osjećate li se uznemireno zbog ED?"

Izvor: 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>



Slika 107. Grafikon koji prikazuje prevalenciju i broj pacijenata s erektilnom disfunkcijom procijenjen ljestvicom tvrdoće erekcije (EHS).

Izvor: 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>

Prodiranje MNP kroz placentarnu barijeru i njezini učinci na organizam u razvoju

Prenatalni utjecaj mikro- i nanoplastike na fetus

Trudnice su posebno osjetljive na učinke mikroplastike.²⁹¹ Plastične čestice koje uđu u majčin organizam mogu prijeći posteljicu, ometajući lučenje hormona koji reguliraju trudnoću i povećavajući rizik od prijevremenog rođenja, pobačaja i poremećaja fetalnog razvoja (Slika 108). Godine 2020. procijenjeno je da je 13,4 milijuna djece (1 od 10) rođeno prijevremeno (<37 tjedana), što je vodeći uzrok smrtnosti dojenčadi. Preživjela prijevremeno rođena dojenčad suočavaju se s većim rizikom od ozbiljnih bolesti i kroničnih stanja.²⁹²

Razvijajući endokrini sustav djece vrlo je osjetljiv na kemikalije u plastici, koje mogu oponašati ili blokirati hormone²⁹³ (Slika 109). Izloženost dojenčadi može se dogoditi čak i putem majčinog mlijeka. Dodatno, nanoplastika može imati odgođene učinke, narušavajući formiranje reproduktivnih stanica tijekom djetinjstva i adolescencije, potencijalno smanjujući plodnost u odrasloj dobi.

Krvno-placentarna barijera (BPB) igra ključnu ulogu u regulaciji razmjene tvari između majke i fetusa, štiteći fetus od štetnih agensa. Međutim, studije pokazuju da mikro- i nanoplastika mogu prodrijeti kroz BPB.

Godine 2020., studija koju je vodio Antonio Ragusa koristeći Ramanovu mikrospektroskopiju (metodu koja analizira raspršenje svjetlosti za određivanje kemijskog sastava materijala) otkrila je prisutnost mikroplastike u posteljicama četiri od šest žena s normalnim trudnoćama. Uzorci su sadržavali 12 čestica veličine 5–10 µm, uključujući polipropilen i pigmente koji se koriste u kozmetici, bojama, ljepilima i higijenskim proizvodima.²⁹⁴

²⁹¹Dugershaw-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>

²⁹²World 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).

²⁹³Sharma, 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>

²⁹⁴Ragusa, 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>

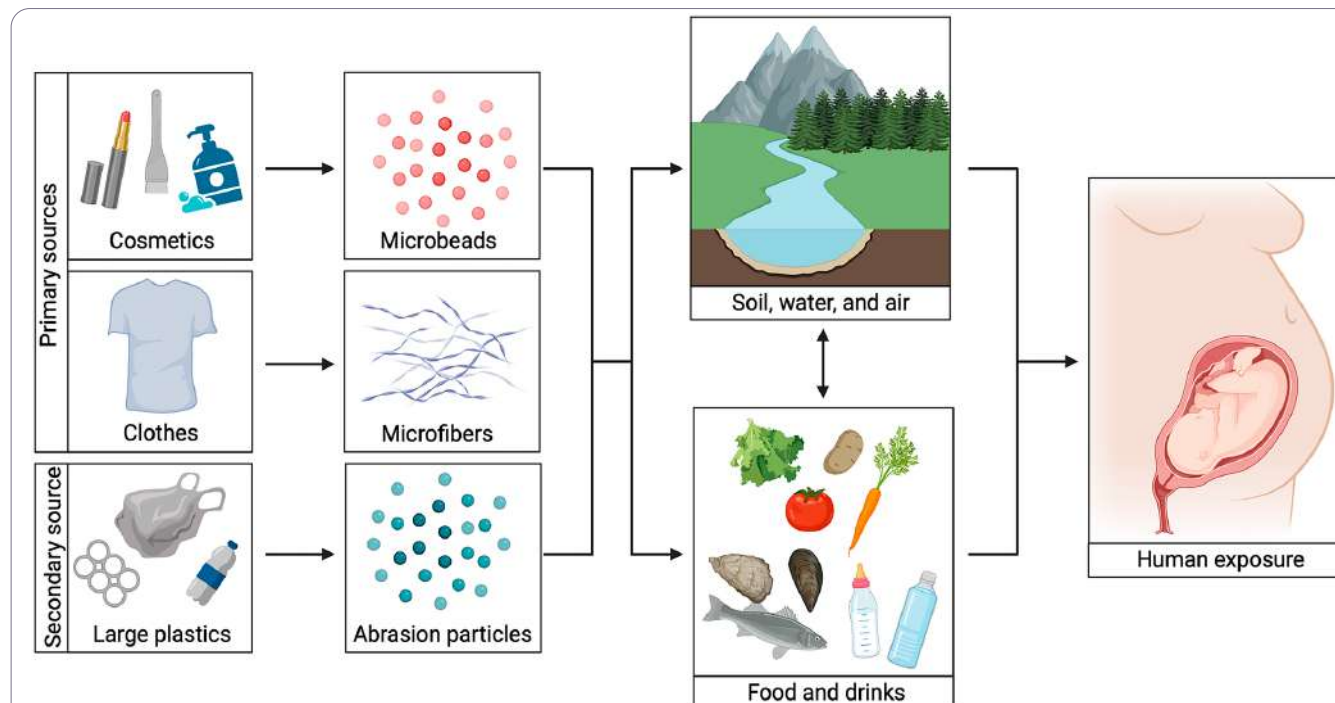
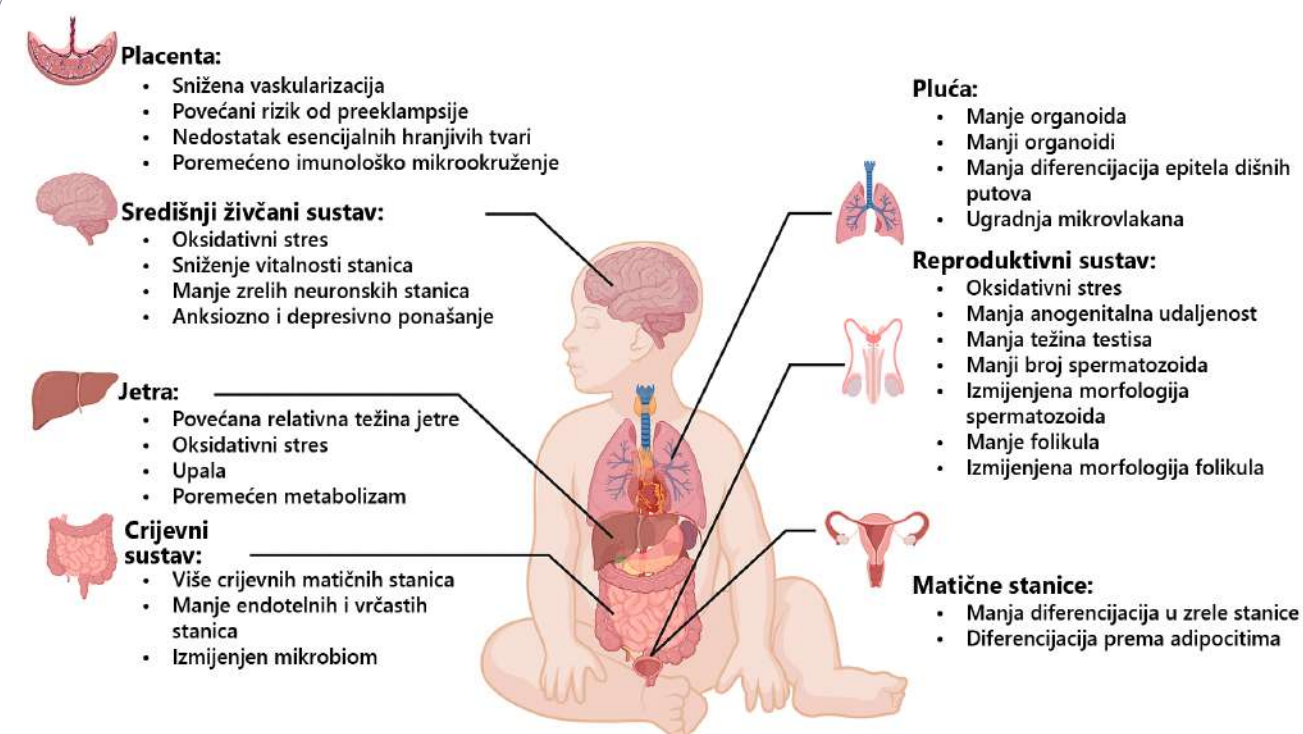


Рисунок 108. Izloženost majki mikroplastici.

Izvor: 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>



Slika 109. Učinci mikroplastike na različite organe i tkiva fetusa u razvoju.

Izvor: 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>

Studija koju je provelo Sveučilište New Mexico otkrila je da je koncentracija mikro- i nanoplastike u posteljicama prijevremeno rođene djece veća nego u posteljicama djece rođene u terminu. Analiza 158 posteljica masenom spektrometrijom otkrila je da su žene koje su rodile prijevremeno imale veću akumulaciju plastičnih čestica.²⁹⁵



“Nanočestice očito imaju neizravan učinak na dijete u maternici, inhibirajući stvaranje krvnih žila putem tvari-posrednika,” izjavila je biologinja Tina Bürki.²⁹⁶

Polistirenske čestice nanometarske veličine mogu uzrokovati poremećaje razvoja mozga, posebno kognitivne deficite.²⁹⁷

Prema istraživanjima, izloženost mikroplastici tijekom trudnoće i prvih nekoliko mjeseci života može rezultirati trajnim promjenama reproduktivne osi i središnjeg živčanog sustava kod potomaka različitih vrsta.²⁹⁸

Postnatalna izloženost mikro- i nanoplastici kod dojenčadi

Novorođenčad su kontinuirano izložena MNP iz okoliša.

Studija iz 2020. godine²⁹⁹ otkrila je da dojenčad može unijeti do 4,5 milijuna plastičnih čestica dnevno samo hranjenjem iz polipropilenskih bočica, koje čine većinu bočica koje se koriste diljem svijeta.

Dojenčad također može unijeti mikroplastiku putem majčinog mlijeka. Godine 2022., analiza majčinog mlijeka 34 zdrave žene otkrila je mikroplastiku u 76% uzoraka³⁰⁰ (Slika 110). MNP mogu imati odgođene učinke, narušavajući razvoj reproduktivnih stanica tijekom djetinjstva i adolescencije, što može smanjiti plodnost u odrasloj dobi.

²⁹⁵Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

²⁹⁶Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024).

<https://www.bjrt.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

²⁹⁷Jeong, 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>

²⁹⁸Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024).

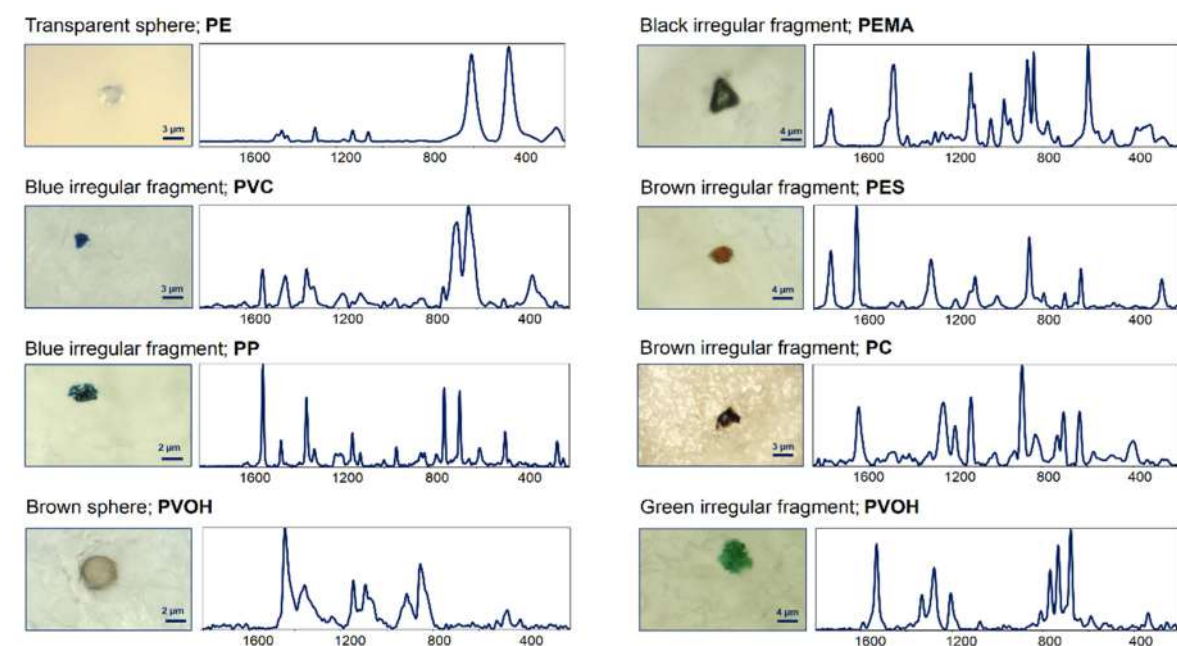
<https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹Li, 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>

³⁰⁰Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022).

<https://doi.org/10.3390/polym14132700>



Slika 110. Mikrofotografije i Ramanski spektri (valni brojevi, cm⁻¹) nekih odabranih MP-ova pronađenih u analiziranim uzorcima majčinog mlijeka. PE: polietilen; PVC: polivinil klorid; PP: polipropilen; PVOH: polivinil alkohol; PEVA: poli(etilen-ko-vinil acetat); PEMA: poli(etil metakrilat); PES: poliester, i PC: polikarbonat.

Izvor: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Dodatni podaci pokazuju da su razine MNP u stolici dojenčadi 14 puta veće nego kod odraslih.³⁰¹

Nanoplastika i povezane kemikalije narušavaju molekularnu strukturu i funkcionalnost majčinog mlijeka. Ovi spojevi mogu promijeniti proteine u ljudskom majčinom mlijeku i adaptiranim formulama za dojenčad, što potencijalno dovodi do razvojnih problema kasnije u životu.^{302, 303}

Visoke koncentracije MNP ispoljavaju kumulativni toksični učinak na organizam u razvoju. Nanoplastika, prodirući u stanice, može uzrokovati strukturna oštećenja DNK i poremetiti metaboličke procese. Ovi učinci povećavaju rizik od genetskih mutacija i dugotrajnih patologija, predstavljajući prijetnju zdravlju budućih generacija.

³⁰¹Zhang, 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>

³⁰²Yadav, 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>

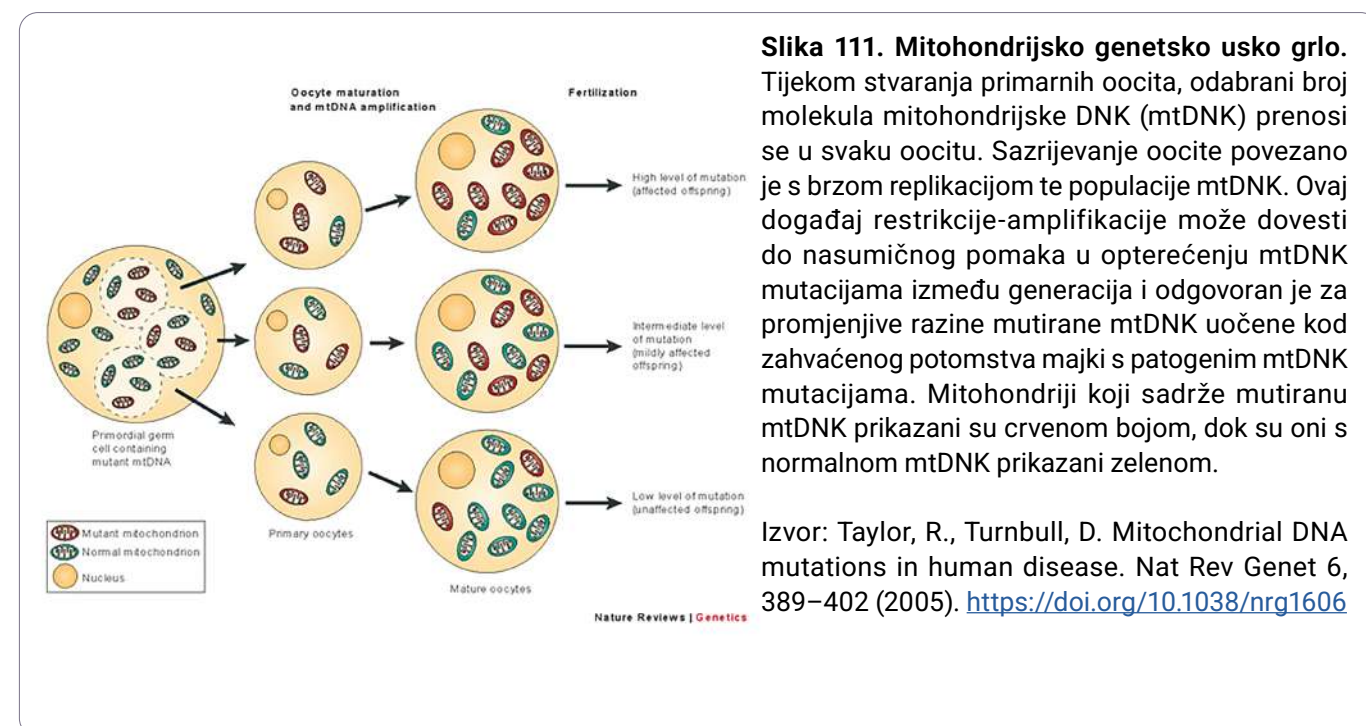
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Učinci izloženosti mikro- i nanoplastici i njegova povezanost s prirođenim anomalijama

Osim sposobnosti prodiranja u tkiva i stanice, MNP posjeduju još jedno opasno svojstvo: mogu biti "nasljeđem" budućih generacija. Tijekom stanične diobe, fragmenti MNP prenose se s jedne stanice na drugu. Zbog svoje sićušne veličine i elektrostatičkog naboja, ove čestice mogu lako prijeći krvno-placentarnu barijeru i ući u fetalna tkiva i stanice, ispoljavajući štetne učinke na organizam u razvoju. Kao što je naglašeno u cijelom ovom izvješću, jedna od primarnih posljedica izloženosti mikro- i nanoplastici je mitohondrijska disfunkcija.

Nedavna Mendelova randomizirana studija pružila je uvjerljive dokaze o uzročnoj vezi između ekspresije mitohondrijskih proteina i rizika od prirođenih anomalija. Studija je koristila genetske varijante kao instrumentalne varijable kako bi smanjila pristranosti tipično povezane s opservacijskim podacima. Među 66 ispitivanih osobina mitohondrijskih proteina, pronađene su značajne povezanosti s razvojnim defektima srca, uha, živčanog sustava, genitourinarnog sustava i udova. Ovi nalazi podupiru hipotezu da mitohondrijska aktivnost igra ključnu ulogu u embrionalnoj morfogenezi.³⁰⁴

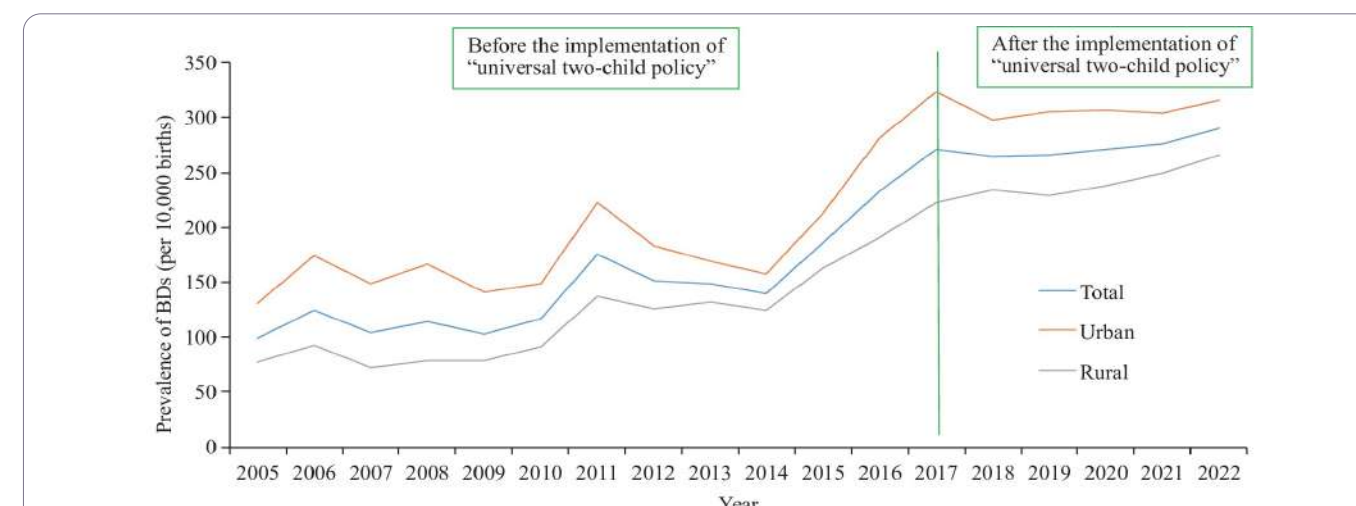
Mutacije u mitohondrijskoj DNA (mtDNA), bilo naslijeđene ili nastale de novo, odgovorne su za širok spektar kliničkih sindroma uključujući MELAS, MERRF, NARP, Leighov sindrom i druge. Te mutacije prvenstveno zahvaćaju organe s visokim energetskeim zahtjevima, poput srca, mozga, mišića i očiju. Prijenos se odvija isključivo po majčinskoj liniji zbog mitohondrijskog podrijetla oocite (Slika 111). Ovi se poremećaji često manifestiraju rano u životu i karakteriziraju ih teška neurološka i metabolička oštećenja.



³⁰⁴Li, 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>

Djeca s mitohondrijskim poremećajima često se suočavaju s razvojnim kašnjenjima, slabošću mišića, kognitivnim oštećenjima i problemima s koordinacijom. Stanja poput Kearns-Sayre sindroma, Barth sindroma, Alpersove bolesti i drugih mogu dovesti do teških ishoda, uključujući invaliditet ili čak smrt.

Tijekom protekla dva desetljeća, liječnici su izvijestili o zabrinjavajućem porastu urođenih mana kod novorođenčadi. Samo u Kini, učestalost se gotovo utrostručila — s 99,15 na 10.000 rođenja 2005. godine na 290,27 na 10.000 rođenja 2022. godine (Slika 112).³⁰⁵ Slični trendovi primijećeni su i u drugim zemljama. Iako je ovaj porast potaknut višestrukim faktorima, sve veći broj znanstvenih dokaza ukazuje na novu i brzo rastuću prijetnju: mikroplastiku, a posebno nanoplastiku, koja je sposobna prodirati u embrionalna tkiva i ometati formiranje organa i bioloških sustava.



Slika 112. Prevalencija urođenih mana između urbanih i ruralnih područja od 2005. do 2020. godine.

Izvor: 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>

Elektrostatički naboj koji nose nanoplastike predstavlja posebnu prijetnju embrionalnim tkivima, gdje čak i jedna pogreška može rezultirati razvojnou anomalijom. Te čestice pokazuju povećano prijanjanje na stanične površine, uključujući stanice neuralnog grebena — ključne čimbenike u formiranju srca, krvnih žila i kraniofacijalnih struktura. U eksperimentalnim studijama na pilećim embrijima, nanoplastika je izazvala teške defekte, uključujući malformacije srca i velikih krvnih žila. Jedna od najbrže rastućih abnormalnosti je gastroschisis — razvojni defekt prednje trbušne stijenke kod kojeg fetalni organi strše izvan tijela kroz otvor na koži i mišićima (Slike 113, 114, 115). Prema međunarodnim podacima, prevalencija ovog stanja porasla je za 161% u posljednja tri desetljeća, s višestruko povećanim stopama među majkama mlađim od 20 godina.³⁰⁶ Pretpostavlja se da nanoplastika ometa razvoj trbušne stijenke tijekom rane trudnoće (4-8 tjedana), potičući upalu i narušavajući zatvaranje ventralne tjelesne stijenke.

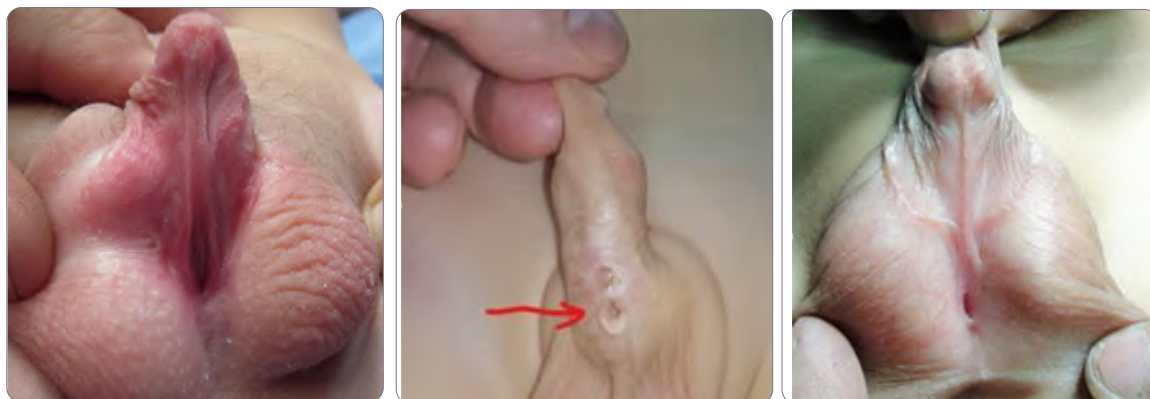
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, 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>



Slike 113-115. Gastroschisis

Još jedno stanje — hipospadija, prirođena mana kod koje se uretra kod dječaka otvara na abnormalnom mjestu³⁰⁷ — također je pokazala stalan porast (Slike 116, 117, 118). Na primjer, u Sjedinjenim Američkim Državama, od 1997. do 2018. godine, učestalost hipospadije porasla je za približno 1,06 slučaja na 1000 živorođenih muške djece (sa 6,1 na 7,16 na 1000), što predstavlja otprilike 17%-tni porast.³⁰⁸ Studije na životinjskim modelima pokazale su da izloženost ftalatima — kemikalijama koje se često nalaze u mikroplastici — remeti sintezu testosterona kod muških fetusa.



Slike 116-118. Hipospadija

Ove supstance, usidrene na nabijenoj površini nanoplastike, lako se prenose u krvotok i posteljicu, pojačavajući hormonske poremećaje tijekom kritičnih razdoblja spolne diferencijacije. U tom kontekstu, zabilježen je porast učestalosti Downovog sindroma, trisomija, atrioventrikularnih srčanih mana i drugih ozbiljnih stanja, s 12,78 na 10 000 živorođenih 1999. – 2001. godine na 15,55 na 10 000 2016. – 2020. godine.³⁰⁹

Istodobno, bilježi se porast neuropsihijatrijskih problema među djecom, uključujući anksiozne poremećaje i kognitivne deficite. Iako je izravna uzročna veza s mikroplastikom još uvijek pod istragom, poznati mehanizmi — poput upale, epigenetičke modulacije i mitohondrijske disfunkcije — pružaju osnovu za sumnju na mikroplastiku kao doprinosni faktor.^{307, 310}

³⁰⁷Chen, 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>

³⁰⁸Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, 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>

³¹⁰Zhang, 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>

Zaključci i izgledi:

Je li moguće smanjiti utjecaj MNP na čovjekovo zdravlje

Analiza prikupljenih podataka pokazuje da mikro- i nanoplastika predstavljaju značajan i podcijenjen čimbenik rizika za čovjekovo zdravlje. Trenutni znanstveni dokazi snažno ukazuju na to da su MNP sastavni dio globalnog toksičnog opterećenja na čovjekov organizam. Zbog svoje sposobnosti da prijeđu biološke barijere i akumuliraju se u raznim tkivima — uključujući mozak, srce, pluća i posteljicu — MNP ispoljavaju toksične učinke na molekularnoj, staničnoj i sistemskoj razini. U kombinaciji s kemijskim aditivima i zagađivačima iz okoliša adsorbiranim na njihovim površinama, plastične čestice djeluju kao okidači za kroničnu upalu, oksidativni stres, mitohondrijsku disfunkciju i mutacije DNK — procese koji su u osnovi širokog spektra bolesti, uključujući neurodegenerativne, onkološke, kardiovaskularne, endokrine i autoimune poremećaje. Posebno je alarmantna činjenica da su MNP čestice praktički neizlučive, akumulirajući se u organizmu s godinama i intenzivirajući svoj kumulativni učinak.

Trenutni dokazi potvrđuju da je izbjegavanje izloženosti MNP praktički nemoguće: prisutne su u zraku koji udišemo, vodi koju pijemo, hrani koju jedemo, pa čak i unutar stanica životinja i biljaka koje konzumiramo. Kao rezultat, izloženost ljudi plastičnim česticama je sveprisutna i kontinuirana, od prenatalnog razvoja do završnih faza života. Inhalacija je posebno zabrinjavajuća, jer nanočestice mogu zaobići krvno-moždanu barijeru i akumulirati se izravno u moždanom tkivu, čineći središnji živčani sustav jednom od najranjivijih meta.

Dodatni biološki rizik proizlazi iz elektrostatske aktivnosti MNP, koja pojačava njihovu interakciju s biološkim strukturama i narušava staničnu homeostazu. Štoviše, MNP mogu djelovati kao nositelji patogena i mikroorganizama otpornih na antibiotike, dajući plastičnom zagađenju izrazito interdisciplinarnu dimenziju — onu koja presijeca ekologiju, toksikologiju, imunologiju, neurologiju i reproduktivnu medicinu.

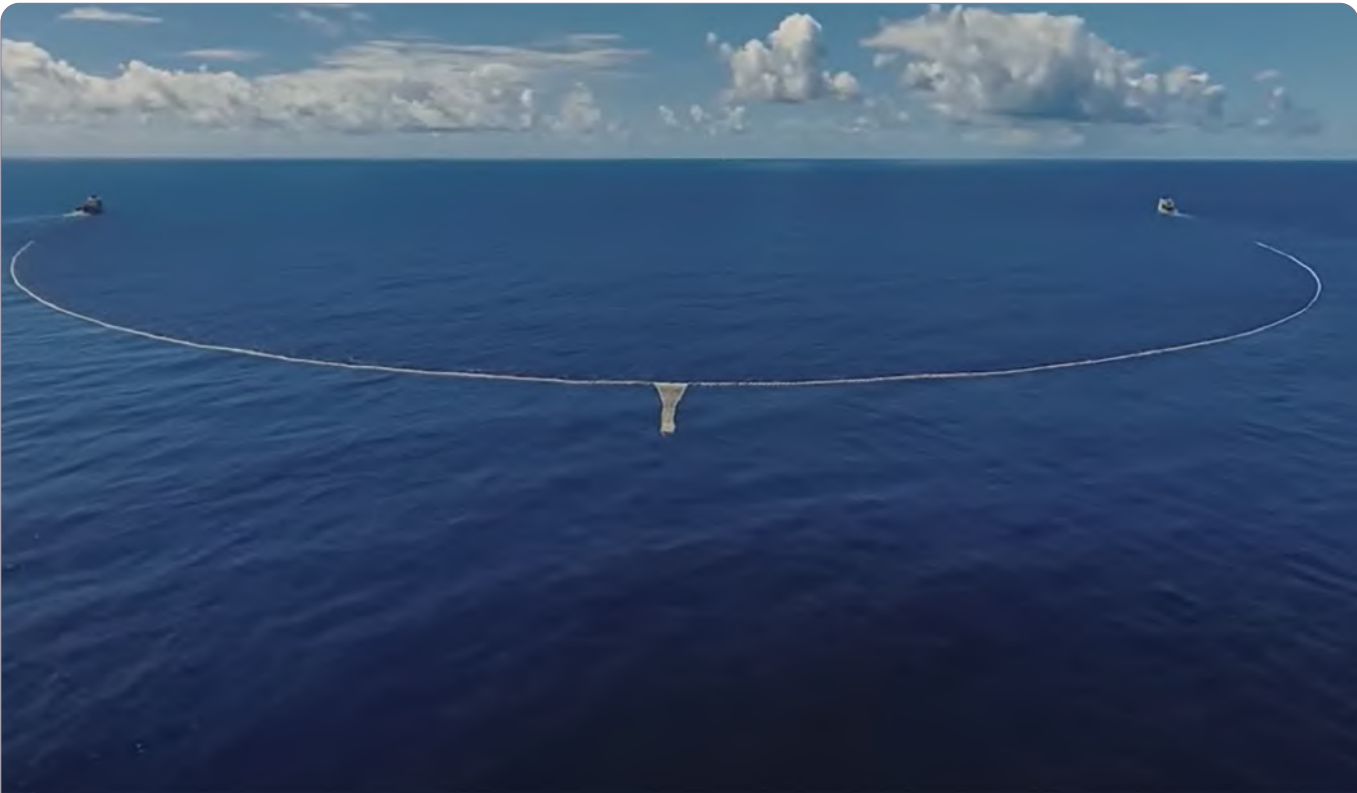
S tim u vezi, jedan od strateških smjerova koje je predložila ALLATRA kao dio šireg napora za suzbijanje prijetnje MNP jest razvoj metoda za neutralizaciju ili zaštitu od elektrostatskog naboja nanoplastike. Smanjenje elektrostatske aktivnosti takvih čestica moglo bi značajno smanjiti njihove štetne učinke i usporiti njihovo nakupljanje u organizmu. Prema autorima ovog izvješća, metode zaštite ili neutralizacije naboja mogu smanjiti potencijalne rizike povezane s MNP za najmanje 50%. To bi moglo osigurati ključno vrijeme za razvoj sveobuhvatnijih strategija za dijagnosticiranje, prevenciju i uklanjanje MNP iz organizma. U tom kontekstu, daljnja istraživanja u područjima biofizike, nanotehnologije i molekularne toksikologije postaju posebno važna.

Unatoč rastućem broju znanstvenih publikacija na ovu temu, utjecaj MNP na čovjekovo zdravlje ostaje slabo shvaćen i nedovoljno uzet u obzir u razvoju strategija javnog zdravstva i zaštite okoliša. S obzirom na razmjere plastičnog zagađenja, biološku aktivnost tih čestica i potencijalno nepovratne posljedice njihovih učinaka, ovo područje zahtijeva hitnu pozornost znanstvene zajednice i zdravstvenih autoriteta. Također poziva na sistematizaciju postojećih podataka, razvoj standardiziranih okvira za procjenu rizika i proširenje međuvladine i međunarodne znanstvene suradnje.

ANALIZA MODERNIH STRATEGIJA ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA PLASTIKOM

Tehnologije za uklanjanje krupnog plastičnog otpada iz vodenih ekosustava

Nastojanja ublažavanja usmjerena na rješavanje onečišćenja oceana primarno su se fokusirala na uklanjanje vidljivog, velikog otpada s površine vode. Jedan od najambicioznijih projekata do danas je inicijativa The Ocean Cleanup, koja cilja prikupljanje plastike i drugih vrsta plutajućeg otpada. Njeni plutajući sustavi hvataju površinski otpad (Slika 119), koji se zatim sortira i priprema za recikliranje ili odlaganje.



Slika 119. Slika prikazuje tehnologiju Ocean Cleanup u akciji. Duga, U-oblikovana plutajuća barijera izrađena od izdržljivog materijala skuplja plastični otpad s površine oceana.

Izvor: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.).

Iako ova metoda obećava, nekoliko kritičnih problema mora se uzeti u obzir:

- 1. **Proces prikupljanja otpada nije selektivan**, što znači da se uz plastični otpad mogu uhvatiti i živi organizmi – poput mikroskopskih algi, ličinki riba i meduza. Trenutno nema kvantitativnih procjena volumena usputnog ulova, ali potencijalno masovno uklanjanje tih organizama moglo bi imati štetne posljedice za morske ekosustave narušavanjem prirodnih hranidbenih lanaca. Unatoč mjerama usmjerenim na zaštitu života u moru, problem ostaje neriješen.
- 2. Aktivisti su istinski predani čišćenju oceana, no **trenutačni naponi ostaju nedovoljni za postizanje značajnih rezultata**.

Do studenog 2024. godine, *The Ocean Cleanup* inicijativa uklonila je približno 20 000 tona plastičnog otpada iz svjetskih oceana. To je nedvojbeno značajno postignuće. Međutim, u pozadini globalne krize, to čini samo 0,01% od procijenjenih 200 milijuna tona plastike koja trenutačno zagađuje ocean. Nadalje, važno je uzeti u obzir kontinuirani priljev novog otpada, koji iznosi približno 11 milijuna tona godišnje (Slika 120). Ove brojke naglašavaju ogroman nerazmjer između napora čišćenja i razmjera problema.



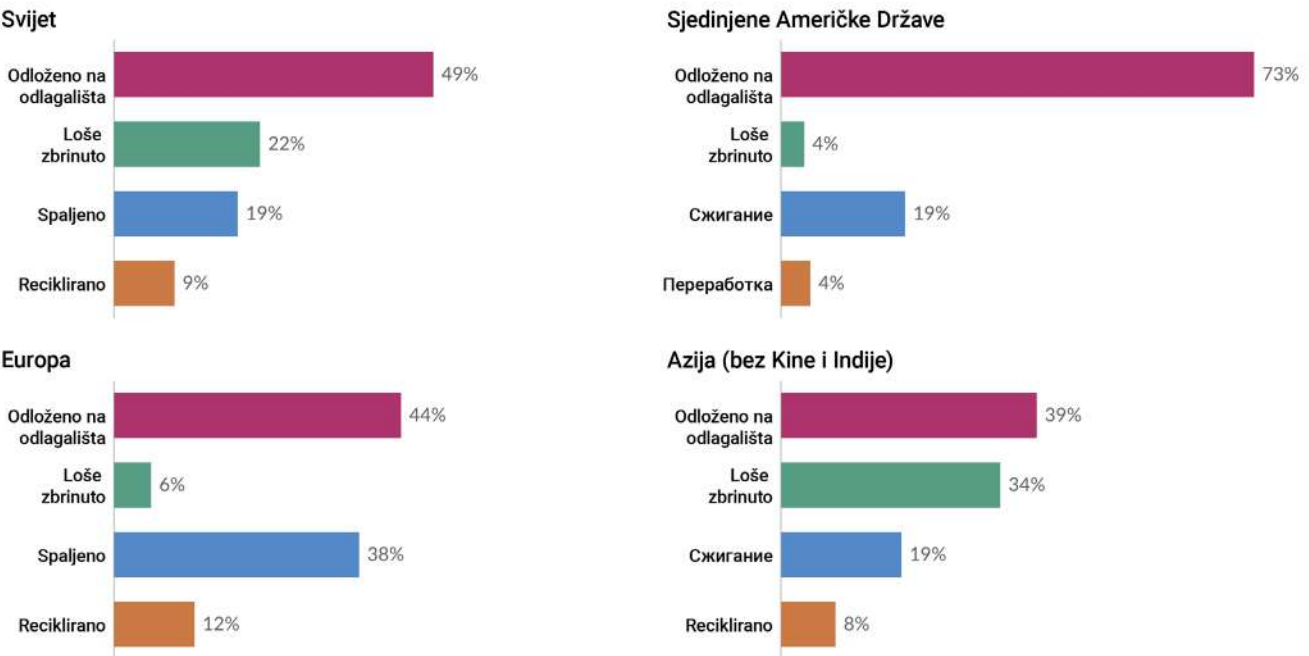
Slika 120. Grafikon uspoređuje tri ključne metrike povezane s onečišćenjem plastikom u oceanima: procijenjenu masu plutajućeg plastičnog otpada, godišnji unos plastike u ocean i količinu prikupljenu od strane *The Ocean Cleanup*.

Izvor podataka: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Datum pristupa: 01. 05. 2025.)

3. Ključno pitanje ostaje sudbina prikupljene plastike. Trenutne globalne stope recikliranja plastičnog otpada ne prelaze 9 % (Slika 121). Kao rezultat toga, postoji velika vjerojatnost da će značajan dio oporavljene plastike završiti na odlagalištima, što dugoročno ne rješava zagađenje.

Udio plastičnog otpada koji se reciklira, odlaže na odlagališta, spaljuje i loše zbrinjava, 2019. god.

Loše zbrinut plastični otpad uključuje materijale spaljene u otvorenim jamama, bačene u mora ili otvorene vode, ili odložene na nesanitarna odlagališta i smetlišta.



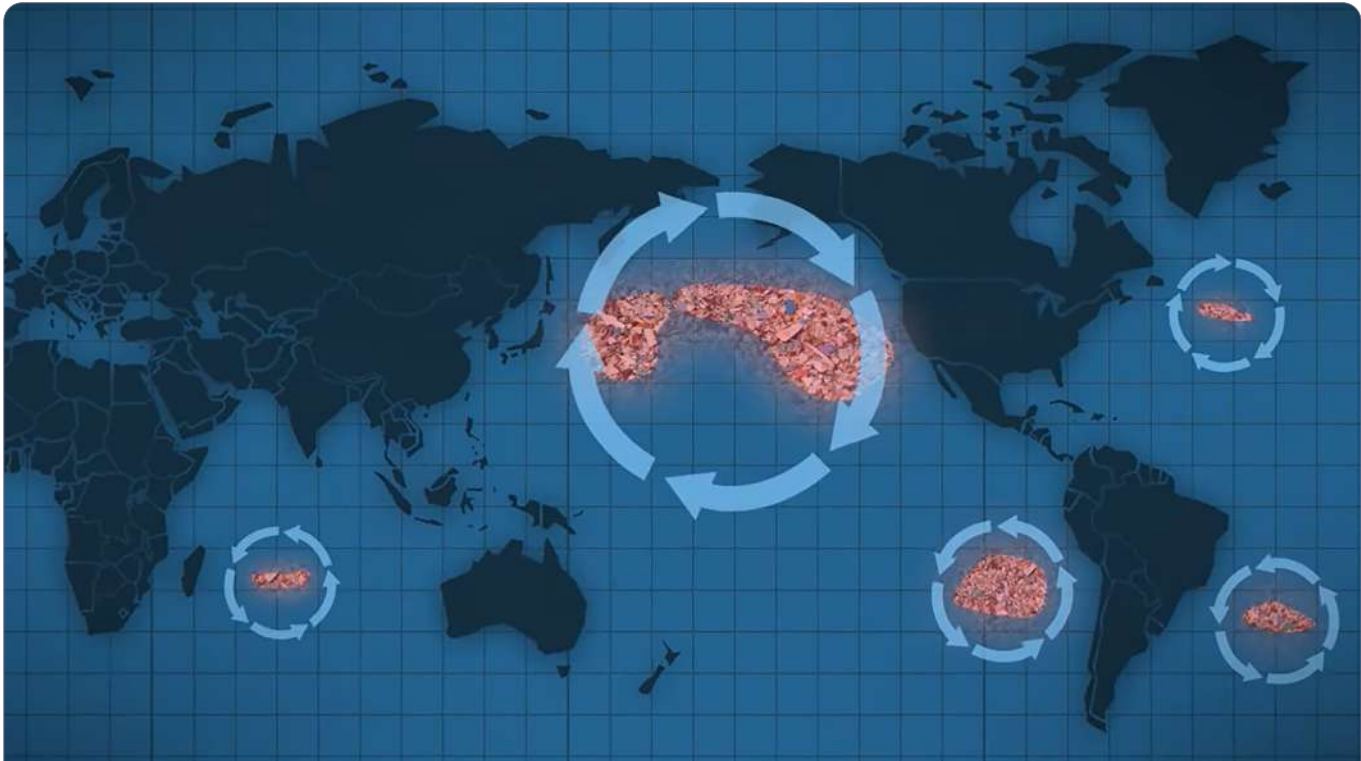
Izvor podataka: OECD (2023.)
OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY
Napomena: Regionalni agregati izračunati su od strane Our World in Data i temelje se na onima koje je specificirao OECD.

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

Slika 121. Udio plastičnog otpada koji se reciklira, odlaže na odlagališta, spaljuje i njime se loše gospodari, 2019. god. Loše gospodarenje plastičnim otpadom uključuje materijale spaljene u otvorenim jamama, bačene u mora ili otvorene vode, ili odložene na nesanitarna odlagališta i smetlišta.

Izvor podataka: Regional aggregates were calculated by Our World in Data and are based on those specified by the OECD. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY
<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

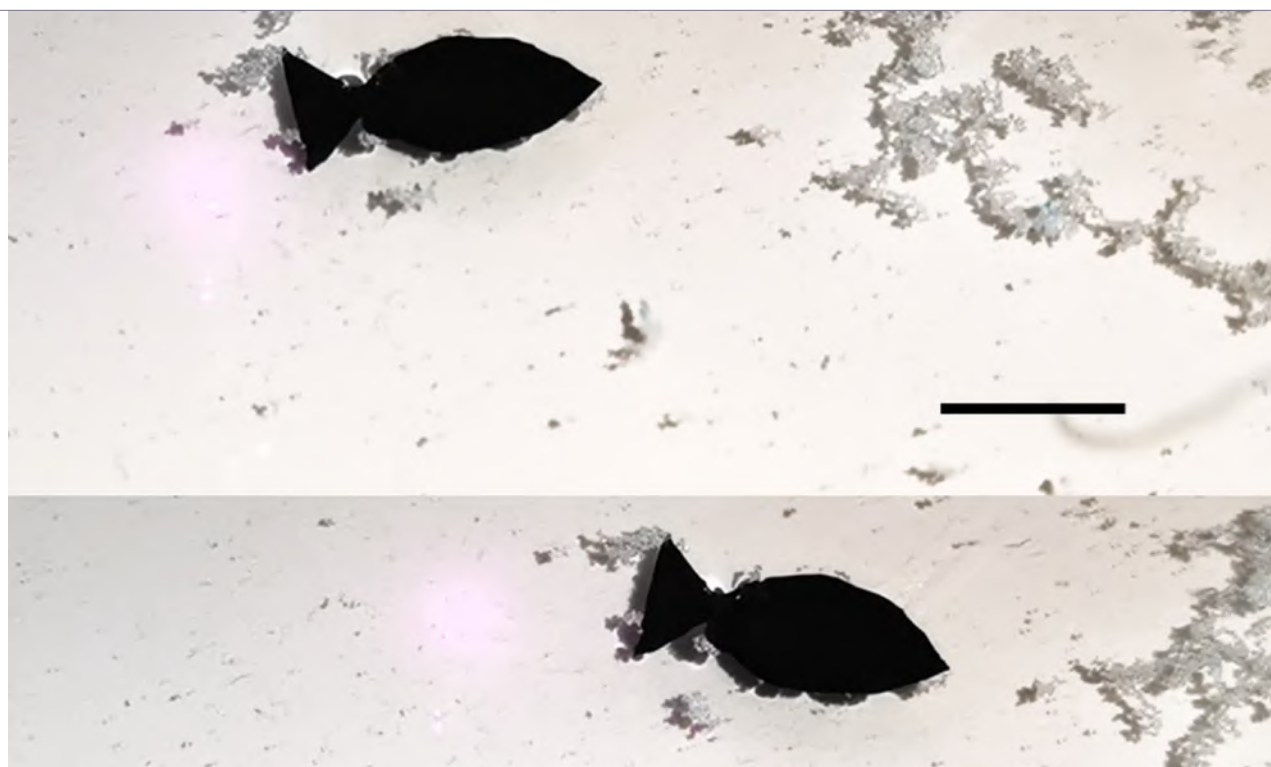
Nadalje, operacije čišćenja oceana uključuju značajne financijske troškove. Na primjer, udaljenost Velikog pacifičkog kontinenta smeća nalazi se daleko od teritorijalnih voda bilo koje zemlje, stvarajući situaciju u kojoj nijedna nacija nije jasno odgovorna za financiranje ili provođenje napora čišćenja. Prema Charlesu Mooreu – oceanografu i istraživaču koji je prvi otkrio Veliki pacifički kontinent smeća – potpuno čišćenje tog područja bi “bankrotiralo bilo koju zemlju” koja pokuša takav napor. Također je važno napomenuti da je pet sličnih pojaseva smeća identificirano diljem svjetskih oceana (Slika 122), što dodatno pogoršava problem.



Slika 122. Shematski prikaz koji prikazuje lokacije pet glavnih pojaseva smeća u svjetskim oceanima

Važno je napomenuti da je krupni vidljivi otpad samo dio šireg problema onečišćenja plastikom u oceanu. Prema morskoj biologinji Melanie Bergmann s Instituta Alfred Wegener, **“Ovo se odnosi samo na plastiku na površini oceana, koja predstavlja samo mali dio – manje od 1 % onoga što je zapravo u oceanu.”**

Kako se plastika razgrađuje na mikroplastiku i nanoplastiku, zadatak čišćenja oceana od ove vrste onečišćenja postaje značajno izazovnije. Neke eksperimentalne tehnologije za uklanjanje mikroplastike iz vode već postoje. Na primjer, istraživači sa Sveučilišta Sichuan stvorili su sitnu robo-ribu (Slika 123) sposobnu plivati u vodenim okolišima i adsorbirati obližnje slobodno plutajuće komadiće mikroplastike.³¹¹ Ovaj 13 milimetara dug bionički robot učinkovito skuplja mikroplastiku zahvaljujući snažnim kemijskim vezama i elektrostatičkim interakcijama između materijala njegovog tijela i mikroplastičnih komponenti, poput organskih boja, antibiotika i teških metala.



Slika 123. Slika prikazuje sićušnu robotsku ribu koju su stvorili istraživači sa Sveučilišta Sichuan. Ovaj kompaktni uređaj, nalik pravoj ribi, može plivati uokolo, aktivno adsorbirajući slobodno plutajuću mikroplastiku.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Međutim, unatoč ovim inovacijama, praktična primjena takvih tehnologija na globalnoj razini trenutno je ograničena. Sićušni roboti adsorbiraju mikroplastiku samo u svojoj neposrednoj blizini, čineći proces lokaliziranim. Čak ni u velikom broju, oni nisu u stanju pokriti golemi opseg oceana. Nadalje, mogli bi postati dio hranidbenog lanca. Postoje i neizvjesnosti u vezi sa sposobnošću robota da funkcioniraju u teškim oceanskim uvjetima, kao što su struje, pritisak i salinitet. Stoga postojeća rješenja još nisu dovoljno učinkovita i suočavaju se s ozbiljnim izazovima u proširenju primjene.

³¹¹Wang, 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>

Trenutne metode za uklanjanje mikroplastike i nanoplastike

Raste interes za potencijalnu upotrebu mikroorganizama, posebno bakterija, za enzimsku razgradnju sintetičkih polimera, osobito polietilen tereftalata (PET). Ova se tehnologija često predstavlja kao ekološki prihvatljiva alternativa tradicionalnim metodama odlaganja plastičnog otpada, poput spaljivanja. Međutim, dosad prikupljeni empirijski podaci dovode u sumnju njezinu učinkovitost, sigurnost i mogućnost primjene u industrijske svrhe.

Godine 2016., tim japanskih znanstvenika predvođen Shosukeom Odom otkrio je bakteriju nazvanu *Ideonella sakaiensis*, sposobnu razgraditi PET proizvodnjom dvaju enzima — PETaze i MHETaze. Ovo je otkriće bio značajan događaj u mikrobiologiji.³¹² Međutim, laboratorijske studije pokazale su da je proces razgradnje iznimno spor: trebalo je bakterijama oko sedam tjedana da razgrade plastični film od 20 grama pod optimalnim uvjetima. Jasno je da se ova stopa razgradnje ne može smatrati zadovoljavajućom za rješavanje razmjera onečišćenja plastikom. Na globalnoj razini, gdje milijuni tona plastike ulaze u okoliš svake godine, tako spor tempo sličan je pokušaju pražnjenja oceana žličicom.

Znanstveni naponi fokusirali su se na modificiranje PETaze, enzima koji bakterije koriste za razgradnju plastike. Međutim, istraživači priznaju da je enzim iz *Ideonella sakaiensis* još uvijek u ranim fazama svoje evolucije. Njegova učinkovitost je niska, stabilnost ograničena, a ubrzavanje reakcije zahtijeva temperature koje se ne nalaze u prirodnim okolišima. Čak ni genetski inženjering još ne može predvidjeti koje će mutacije dovesti do poboljšanja. Kako je Elizabeth Bell iz Američkog nacionalnog laboratorija za obnovljivu energiju izjavila, napredak je više poput “dva koraka naprijed, jedan korak natrag”.

Nadalje, enzimatska razgradnja daleko je od univerzalne. Samo određene vrste plastike, poput PET-a, mogu se teoretski razgraditi na ovaj način. Uobičajene plastike poput polietilena i polipropilena ostaju praktički nepropusne za mikrobnu razgradnju. Znanstvenici iz Naturea potvrdili su: većina plastike je previše energetske gustoće da bi se učinkovito razgradila biokemijskim sredstvima.

Čak i ako bi se mogao razviti visoko učinkovit mikrob, javlja se daleko problematičnije pitanje: može li se ikada sigurno pustiti u okoliš? **Bilo koja genetski modificirana bakterija predstavlja potencijalni rizik od izazivanja ekološke katastrofe. Trenutno, gotovo sve zemlje strogo reguliraju ili potpuno zabranjuju puštanje takvih organizama u divljinu.**

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Razlozi su jasni: ne može se znati kako bi se te bakterije mogle ponašati nakon “završetka svoje misije”. Bi li mogle početi razgrađivati druge vitalne organske spojeve? Bi li mogle nadmašiti esencijalne mikrobe? Bi li mogle izazvati mutacije s još nepredvidljivijim posljedicama?

Na ovaj način, jedna ekološka kriza mogla bi lako biti zamijenjena drugom — onom koja je daleko nepredvidljivija i destruktivnija.

Iako fundamentalno istraživanje bakterijske razgradnje plastike ima neospornu vrijednost, u ovoj fazi tehnologija se ne može smatrati učinkovitim, skalabilnim ili sigurnim rješenjem problema onečišćenja plastikom.

Studija o učinku kipuće vode na uklanjanje mikroplastike: učinkovitost i rizici

Istraživači biomedicinskog inženjeringa i mikroplastike sa Sveučilišta Guangzhou Medical i Sveučilišta Jinan (Kina) proveli su studiju³¹³ istražujući utjecaj kipuće vode s povišenim sadržajem kalcijevih soli (tj. tvrde vode) na uklanjanje mikroplastike.

Istraživači su prikupili uzorke vode iz slavine različitih razina tvrdoće iz grada Guangzhoua. Tri vrste plastičnih čestica—polistiren, polietilen i polipropilen — veličine od 0,1 do 150 mikrometara dodane su uzorcima. Voda je kuhana pet minuta, zatim ohlađena, a izmjerena je preostala koncentracija mikroplastike.

Tijekom procesa kuhanja, tvrda voda bogata kalcijem formirala je netopivi kalcijev karbonat (CaCO_3), poznat kao kamenac. Istraživači su pretpostavili da se čestice mikroplastike mogu vezati na kristale kalcijevog karbonata i taložiti, što bi moglo objasniti primijećeno smanjenje koncentracija mikroplastike nakon kuhanja.

Najveća učinkovitost pročišćavanja primijećena je u uzorcima s visokom tvrdoćom vode (300 mg CaCO_3 po litri), gdje je kuhanjem uklonjeno do 90% mikroplastike. Nasuprot tome, u uzorcima s mekom vodom (manje od 60 mg CaCO_3 po litri), učinak je bio značajno slabiji, s uklonjenih samo oko 25% plastičnih čestica.

Međutim, unatoč nekim pozitivnim učincima kuhanja tvrde vode, javlja se važna zabrinutost: potencijalno oslobađanje mikro- i nanoplastičnih čestica u zrak. Dok voda ključa, stvara se para, a s njom se mikroplastične čestice mogu aerosolizirati. Udisanje ovih čestica predstavlja daleko ozbiljniji zdravstveni rizik od gutanja putem hrane ili vode.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. Environ. Sci. Technol. Lett. 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Studije pokazuju da nakon udisanja nanoplastika može doći do mozga unutar dva sata. Nasuprot tome, kada mikroplastika uđe u probavni sustav, dio nje se izlučuje. Akumulacija plastičnih čestica u mozgu povezana je s dugoročnim rizicima, jer je njihovo uklanjanje iz moždanog tkiva praktički nemoguće.

Dakle, iako kuhanje može smanjiti sadržaj mikroplastike u pitkoj vodi, ono potencijalno povećava rizik od kontaminacije zraka, predstavljajući veću prijetnju čovjekovom zdravlju. To naglašava hitnu potrebu za sigurnijim i učinkovitijim metodama pročišćavanja vode.

Piroliza kao metoda za obradu plastike: učinkovitost i rizici

Piroliza je jedna od tehnologija za obradu plastičnog otpada, temeljena na toplinskoj razgradnji plastičnih materijala na visokim temperaturama u okruženju s ograničenom dostupnošću kisika. Proces se tipično provodi na temperaturama u rasponu od 300 do 800 °C i rezultira proizvodnjom plinovitih i tekućih ugljikovodičnih spojeva, uz kruti ugljični ostatak.

Na povišenim temperaturama, polimerni lanci plastičnih materijala razgrađuju se formirajući smjesu ugljikovodika koja se može koristiti kao gorivo. Međutim, ova metoda — zajedno s konvencionalnim spaljivanjem plastike — nosi značajne ekološke rizike zbog oslobađanja nanoplastike.

Pod utjecajem visokih temperatura, plastika se razgrađuje u ultra-fine čestice, uključujući nanoplastiku (čestice manje od 100 nanometara). Ove čestice su toliko male da ih moderni filtracijski sustavi nisu sposobni potpuno uhvatiti, omogućujući njihovo ispuštanje u atmosferu.

Izgaranje plastike također je praćeno emisijom dioksina i furana—visoko toksičnih spojeva za koje se zna da imaju kancerogeni učinak.³¹⁴

Dakle, upotreba pirolize i spaljivanja plastike za proizvodnju goriva povlači za sobom znatan rizik od emisija u zrak, predstavljajući prijetnju ne samo okolišu već i čovjekovom zdravlju. Ova metoda odlaganja plastike ne može se smatrati sigurnim ili održivim rješenjem krize onečišćenja okoliša. Prava cijena takvog goriva — to je prijetnja koju ono predstavlja životu i dobrobiti ljudi.

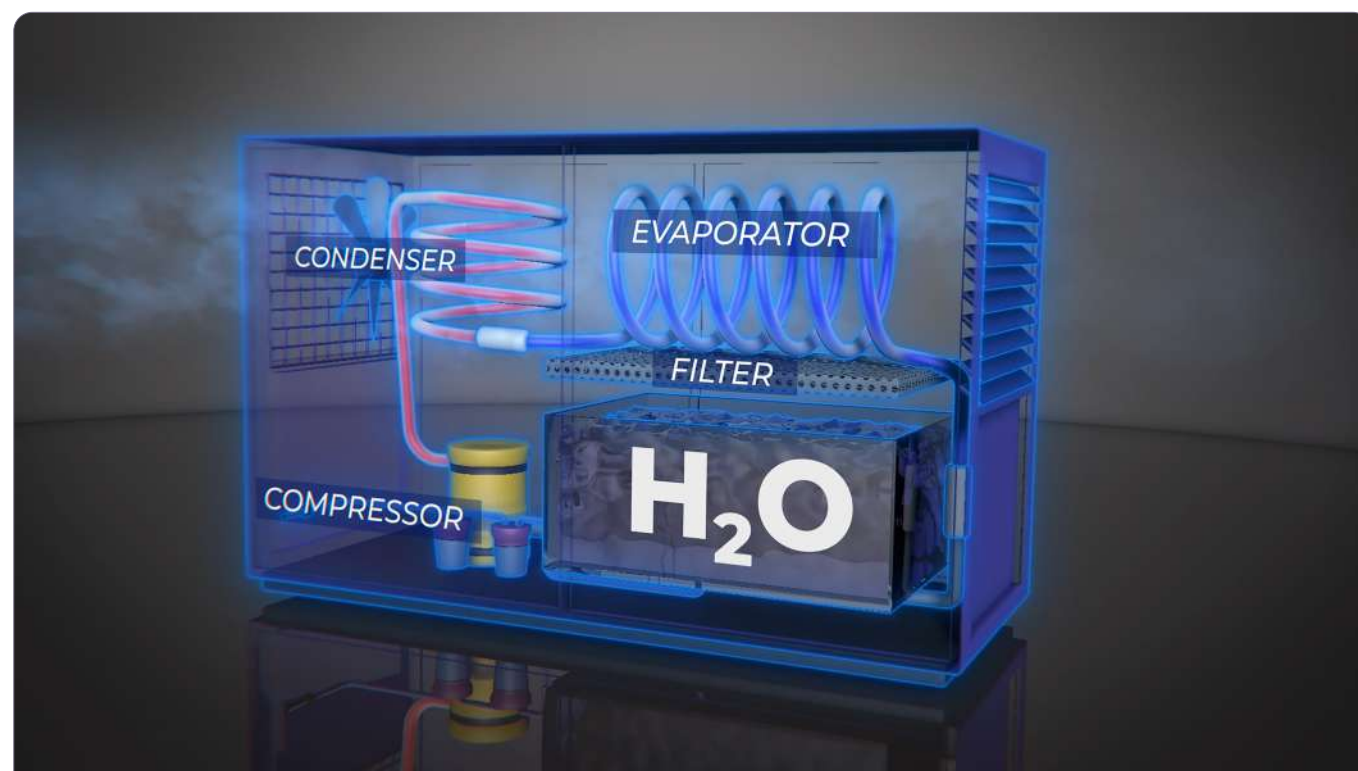
³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. Environmental Advances 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

PRISTUP ZNANSTVENE ZAJEDNICE ALLATRA U BORBI S EPIDEMIJOM MIKRO- I NANOPLASTIKE

Tehnologije Atmosferskih Generators Vode (AWG) za Čišćenje Oceana od MNP

Obnavljanje ekološke ravnoteže zahtijeva široku primjenu inovativnih tehnologija poput atmosferskih generatora vode (AWG). Danas su ovi sustavi dostupni u širokom rasponu — od kućanskih do industrijskih modela. AWG su sposobni proizvoditi pitku vodu iz zraka, učinkovito uklanjajući zagađivače uključujući mikroplastiku (Slika 124). Voda se također može mineralizirati kako bi se poboljšao okus i pružile dodatne zdravstvene pogodnosti.

Ovi generatori rade tako što kondenziraju vlagu prirodno prisutnu u zraku.



Slika 124. Slika prikazuje shematski prikaz atmosferskog generatora vode, s njegovim komponentama i principom rada

AWG funkcioniraju na temelju dviju ključnih tehnologija:

1. **Tehnologija temeljena na kondenzaciji.** Ova metoda uvlači okolni zrak u jedinicu i izlaže ga ohlađenoj površini ili rashladnoj spirali, uzrokujući kondenzaciju vodene pare u tekući oblik. Proces je sličan načinu na koji se kondenzacija stvara na hladnom predmetu izvađenom iz zamrzivača. AWG temeljeni na kondenzaciji najbolje rade u toplim i vlažnim okruženjima.

2. **Tehnologija temeljena na adsorpciji.** Ova metoda koristi materijale koji apsorbiraju vlagu, poput silika gela, zeolita ili metalno-organskih okvira, za hvatanje vlage iz zraka. Apsorbirana voda se zatim oslobađa kada se materijal zagrije.

Danas se takvi sustavi lokalno koriste za opskrbu pitkom vodom, uključujući i područja pogođena klimatskim katastrofama.

Široka primjena AWG za zadovoljavanje potreba industrije i javnosti mogla bi značajno smanjiti onečišćenje oceana u roku od nekoliko godina.

Trenutno izvori vode za kućanstva, uključujući vodu koja se koristi za kuhanje, često dolaze iz rezervoara koji sadrže visoke koncentracije mikro- i nanoplastike. Ova kontaminirana voda pridonosi nakupljanju plastike u čovjekovom organizmu. Prelazak na vodu dobivenu iz zraka, umjesto oslanjanja na zagađene izvore, mogao bi značajno poboljšati kvalitetu pitke vode.

Obnova ekosustava pomoću prirodne filtracije i atmosferskih generatora vode

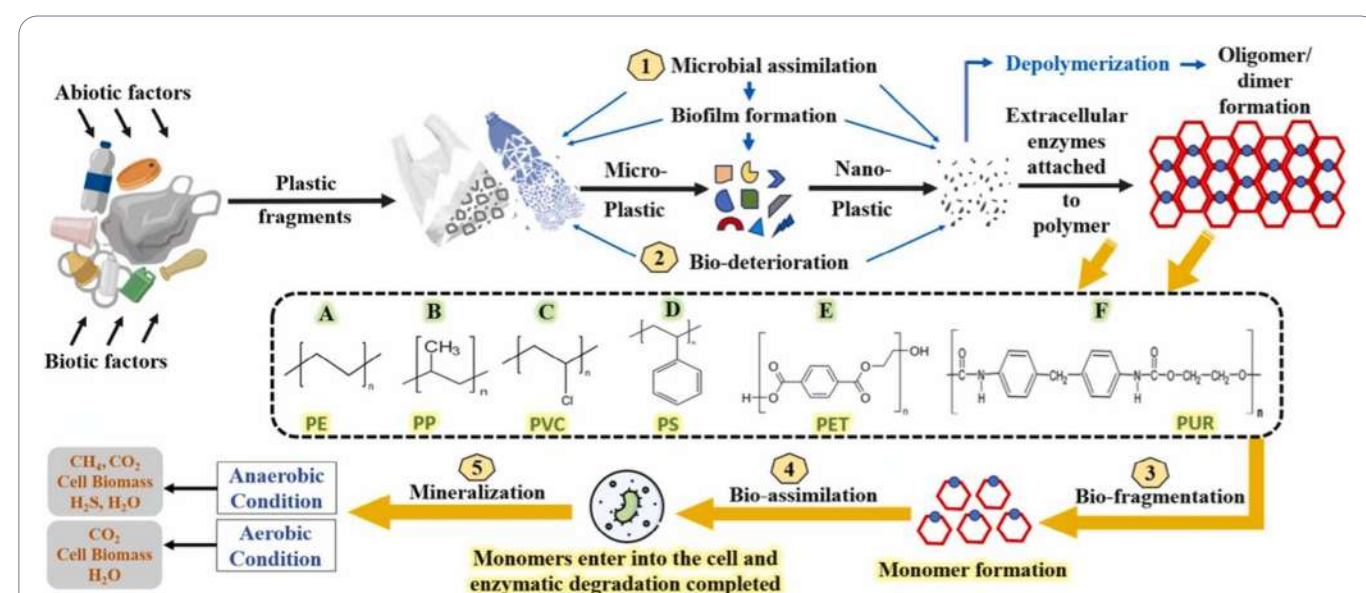
Za učinkovito uklanjanje mikroplastike iz otpadnih voda potrebna je primjena naprednih tehnologija, uključujući moderne sustave filtracije i asimilacije. Osim toga, postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda trebala bi se prenamijeniti kako se pročišćena voda ne bi ispuštala u vodena tijela, već bi se umjesto toga usmjeravala u tlo — gdje su prirodni mikroorganizmi sposobni razgraditi plastiku.³¹⁵

Ovi se mikroorganizmi bitno razlikuju od genetski modificiranih ili umjetno stvorenih sojeva razvijenih u laboratorijima. Njihova je prisutnost u ekosustavima prirodna i ne pokazuju karakteristike invazivnih vrsta u tim okruženjima.

³¹⁵Park, 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>

Istraživanja³¹⁶ pokazuju da određeni mikroorganizmi koji žive u tlu, autohtoni u prirodnim okolišima³¹⁷ pokazuju značajnu učinkovitost u razgradnji polimera³¹⁸ poput polietilena³¹⁹ i polietilen tereftalata.³²⁰ Na primjer, najveća stopa gljivične razgradnje – prosječno smanjenje mase polietilena za $36,4 \pm 5,53\%$ tijekom 16 tjedana – primijećena je kod soja *Aspergillus oryzae* A5, 1.

Sposobnost mikroba da biološki razgrađuju polimere leži u njihovoj proizvodnji enzima koji im omogućuju razgradnju složenih molekularnih struktura plastike.³¹⁷



Slika 125. Razgradnja mikroplastike i nanoplastike pomoću bakterijskih enzima.

Izvor: 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>

Ova otkrića, potvrđena eksperimentalnim opažanjima, ističu potencijal prirodnih mikrobnih zajednica u smanjenju zagađenja okoliša mikroplastikom i nanoplastikom.

„Među nekoliko dostupnih tehnika sanacije do danas, mikrobna sanacija pokazala je veće perspektive za razgradnju ili održivo uklanjanje MNP iz okoliša”, navodi se u preglednoj studiji indijskih istraživača.³¹⁸

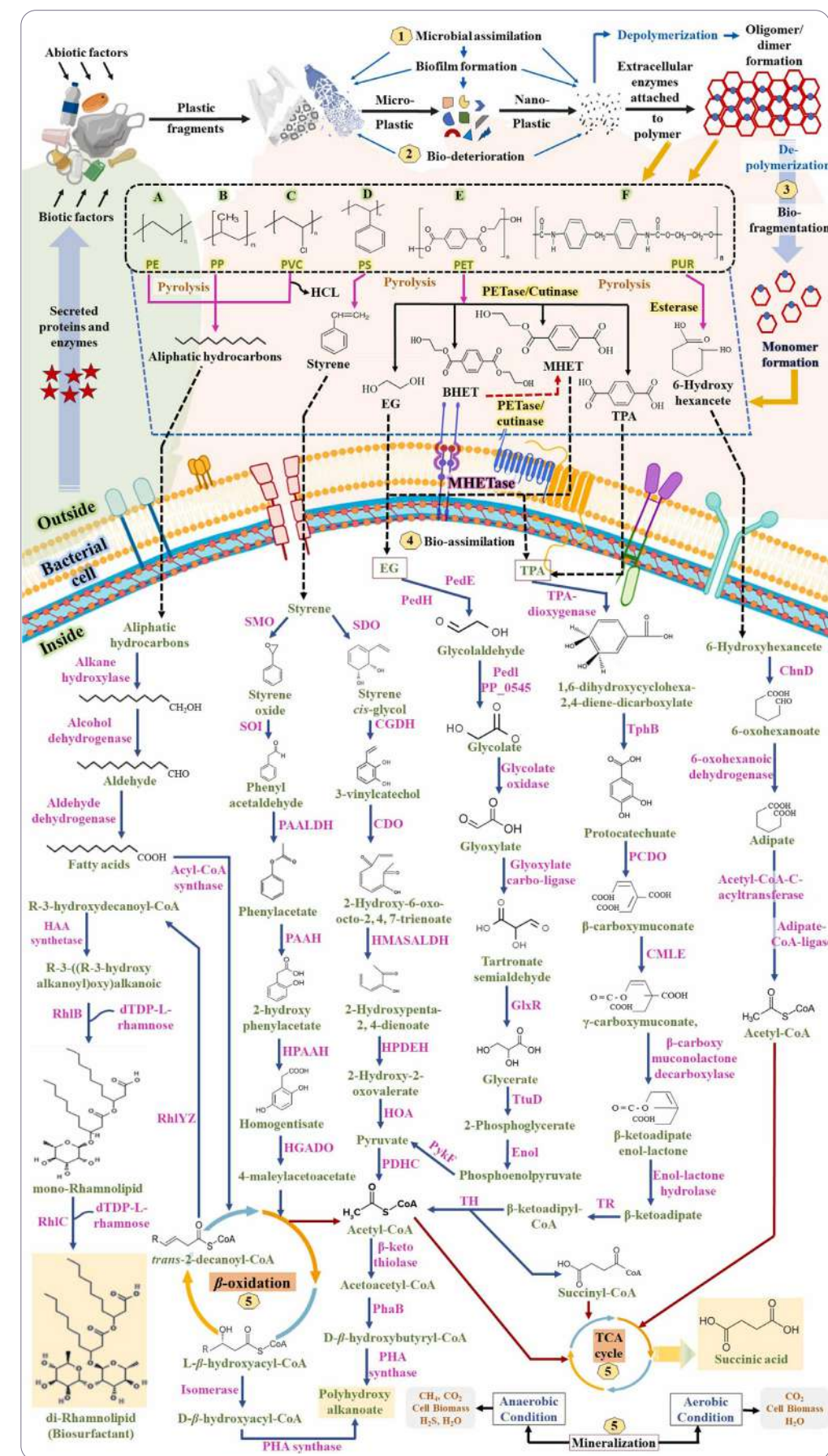
³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, 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>

³¹⁸Auta, 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>

³¹⁹Muhonja, 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>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

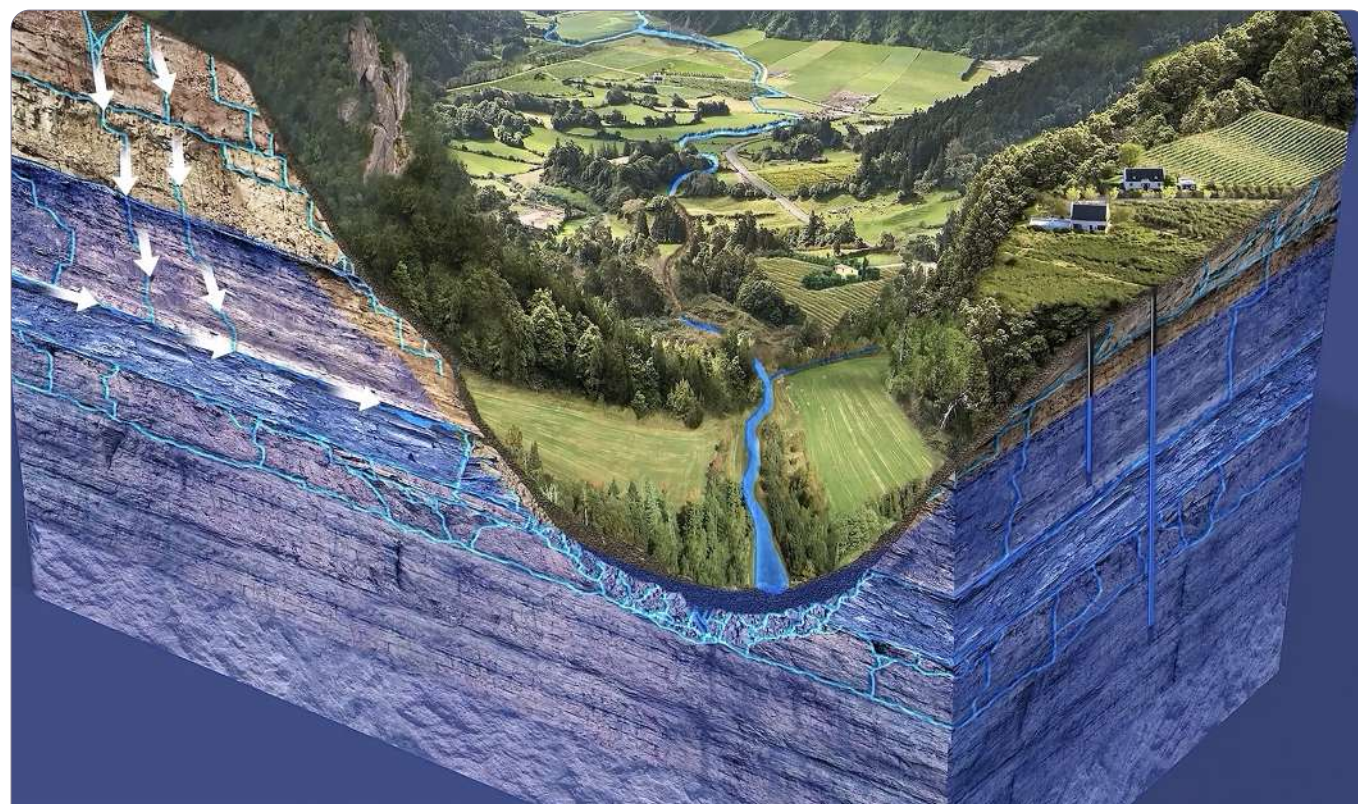


Slika 126. Onečišćena plastika razgrađuje se u MNP zbog različitih abiotskih i biotskih čimbenika.

Izvor: 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>

Stoga će prelazak na tehnologije vode dobivene iz zraka značajno poboljšati kvalitetu konzumirane vode. U kombinaciji s tehnikama mikrobne sanacije, ovaj pristup mogao bi značajno smanjiti zagađenje mikroplastikom i nanoplastikom u okolišu.

U gornjim slojevima tla, baš kao i u vodenim tijelima, koncentracije plastike ostat će visoke neko vrijeme. Međutim, kako voda prodire dublje pod zemlju, dolazi do prirodnog procesa samopročišćenja (Slika 127). Mikroorganizmi koji žive u tlu pomažu u razgradnji sićušnih nanoplastičnih čestica.



Slika 127. Slika shematski prikazuje proces biološkog pročišćavanja otpadnih voda ispuštenih u tlo kroz geološke slojeve. Strelice označavaju put otpadne vode dok prolazi kroz slojeve tla i stijena, gdje mikroorganizmi i filtrirajući materijali uklanjaju zagađivače. Slojevi tla označeni su različitim bojama: smeđom za površinski sloj tla, sivom za pijesak i šljunak

Povećanje volumena pročišćene i filtrirane otpadne vode usmjerene u tlo potiče rast mikroorganizama — bakterija, gljivica i arheja — koji igraju temeljnu ulogu u izgradnji zdravog tla, kruženju hranjivih tvari i ukupnoj otpornosti ekosustava. S vremenom će se ova pročišćena voda procijediti u dublje slojeve i na kraju vratiti u oceane.

Postavljanje atmosferskih generatora vode u suhim regijama, zajedno s povratkom iskorištene vode u tlo, predstavlja obećavajuću strategiju za rješavanje globalne vodne krize i borbu protiv dezertifikacije.

Ovi napori aktiviraju procese koji podržavaju obnovu vegetacije i ekosustava.³²¹ Korištenje AWG također će poboljšati kvalitetu života u lokalnim zajednicama pomažući u rješavanju problema nestašice pitke vode.

U kombinaciji s tehnikama mikrobne remedijacije, upotreba AWG može biti veliki korak prema održivom upravljanju vodom i oporavku degradiranog zemljišta.

Potpuni prijelaz na AWG tehnologiju podrazumijevao bi korištenje atmosferske vode za sve ljudske potrebe — kućanske, industrijske i poljoprivredne. Globalno prihvaćanje ovog pristupa povećalo bi stope isparavanja, što bi rezultiralo hlađenjem oceana i ubrzanim čišćenjem oceana. Dodatno, smanjenjem viška atmosferske vlage, AWG bi mogli smanjiti intenzitet ekstremnih oborina i pojava vjetrova, potencijalno ublažavajući destruktivni utjecaj prirodnih katastrofa (više pogledajte u filmu "Voda iz zraka: Put do spašavanja čovječanstva").

Izazovi i rizici povezani s upotrebom atmosferskih generatora vode

Međutim, postoji i loša strana široke primjene AWG. Glavna briga leži u nedovoljnoj procjeni izravnog utjecaja AWG na čovjekovo zdravlje. Iako tehnologija doista može doprinijeti pročišćavanju oceanskih voda i poboljšati toplinsku vodljivost u klimatskom sustavu, masovna upotreba AWG također može dovesti do značajnog povećanja koncentracije mikroplastike u atmosferi.

Operativni mehanizam AWG uključuje kondenzaciju vlage iz atmosfere, koja se zatim nadopunjuje isparavanjem iz oceanskih voda. Budući da te vode sadrže visoke koncentracije mikroplastike i nanoplastike, para koja ulazi u atmosferu tijekom ovog procesa može nositi ultrafine plastične čestice. Kao rezultat toga, u regijama u kojima su AWG sustavi raspoređeni — uključujući velika gradska područja — koncentracija nanoplastike u zraku kojeg ljudi udišu može porasti na razine koje se trenutno promatraju u obalnim zonama. To predstavlja ozbiljan rizik: povećane atmosferske koncentracije nanoplastike, predstavljaju prijetnju čovjekovom zdravlju. Udahnuta nanoplastika može se akumulirati u čovjekovom organizmu, uključujući i mozak.

I to je kritična točka. Bitno je razumjeti da su originalnu ideju korištenja AWG kao alata za pomoć u pročišćavanju oceanske vode predložili ALLATRA znanstvenici prije više od dvadeset godina, u vrijeme kada su atmosferske koncentracije mikroplastike još uvijek bile izuzetno niske. Tada je primjena takvih tehnologija doista mogla donijeti opipljive ekološke koristi bez ozbiljnih rizika za čovjekovo zdravlje.

Međutim, situacija se drastično promijenila. Pod sadašnjim uvjetima, velika primjena AWG vjerojatnije će povećati koncentracije MNP u zraku. S obzirom na to da su trenutačne razine MNP u atmosferi već visoke, uvođenje dodatnih količina putem AWG moglo bi se pokazati fatalnim za čovjekovo zdravlje.

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>

Dakle, tehnologija koja se nekada smatrala obećavajućom i inovativnom sada je izgubila svoju relevantnost. Kao globalno društvo, propustili smo kritično važan prozor tijekom kojeg su AWG mogli poslužiti kao održivo rješenje. U kontekstu klimatskih problema i zagađenja okoliša, faktor vremena igra odlučujuću ulogu. Ono što je prije dva desetljeća moglo očuvati zdravlje milijuna i istinski pridonijeti čišćenju planeta sada predstavlja potencijalno ozbiljnu opasnost.

AWG više nije tehnologija budućnosti — to je podsjetnik na propuštenu priliku. U sadašnjim okolnostima, prioritet se mora prebaciti na razvoj metoda za uklanjanje MNP iz atmosfere i iz čovjekovog organizma. Iznad svega, moramo si kupiti vrijeme.

Inovativan znanstveni pristup smanjenju toksičnosti mikro- i nanoplastike

S obzirom na predstavljene podatke o višerazinskom i kumulativnom utjecaju mikroplastike, a posebno nanoplastike, na čovjekovo zdravlje, postaje očito da se moderna civilizacija suočava s ekološkim i biomedicinskim izazovom koji nadilazi tradicionalne predodžbe o zagađenju okoliša. Ovo pitanje ne utječe samo na pojedine biosfere, već i na dugoročnu održivost Homo sapiens populacije.

Do danas se gotovo sva ikad proizvedena plastika — preko 9 milijardi tona — nastavlja akumulirati u okolišu, fragmentirajući se u čestice mikro i nano veličine, koje pokazuju visoku kemijsku i biološku aktivnost. Mikroplastika i nanoplastika pronađene su u tlu, vodi, zraku i u svim glavnim kategorijama hrane, od povrća i voća do mesa, ribe, meda, mlijeka i soli. To ukazuje na raširenu infiltraciju plastičnih čestica u prehrambeni lanac, značajno transformirajući tradicionalno razumijevanje "sigurne" ili "zdrave" hrane.

Put prodiranja čestica u čovjekov organizam uvelike određuje njihovo biološko ponašanje i distribuciju. Dok se plastika koja ulazi kroz probavni trakt može djelomično izlučiti, put udisanja predstavlja znatno veći stupanj rizika. Udahnuta nanoplastika taloži se u plućnom tkivu, prelazi krvno-moždanu barijeru i može izravno dospjeti u mozak, gdje se s vremenom može akumulirati. Prirodni mehanizmi detoksikacije (poput jetre i bubrega) nemaju učinkovita sredstva za prepoznavanje i uklanjanje ovih čestica.

Najveća koncentracija mikroplastike nalazi se u blizini vodenih tijela, obalnih zona i šumskih područja, osobito u uvjetima visoke vlažnosti i temperature. U takvim krajolicima plastika dulje ostaje, sudjeluje u aerosolnom transportu, izaziva oksidativni stres u biljkama i smanjuje učinkovitost fotosintetskih procesa. Obalna rekreacija, nekada smatrana aktivnošću koja promiče zdravlje, sada nosi dodatno inhalacijsko opterećenje: prema procjenama, volumen udahnute plastike u blizini otvorenih vodenih tijela može biti višestruko veći od pokazatelja urbanog okoliša.

Epidemiološke studije pokazuju dosljednu korelaciju između razina onečišćenja mikro- i nanoplastikom (MNP) i prevalencije kroničnih nezaraznih bolesti, uključujući hipertenziju, dijabetes, moždani udar, kao i depresivne i kognitivne poremećaje. Zbog svoje sposobnosti prelaska bioloških barijera i akumulacije u različitim tkivima, uključujući mozak, srce, pluća i posteljicu, čestice MNP iskazuju toksične učinke na molekularnoj, staničnoj i organskoj razini. Kako se plastika nakuplja u organizmu, proizvodi imunosupresivne, upalne i genotoksične učinke. Unatoč napretku u identificiranju ovih rizika, učinkoviti mehanizmi za neutralizaciju i uklanjanje MNP iz ljudskog tijela još nisu razvijeni.

Jedno od najkritičnijih svojstava nanoplastike sa sustavnim biološkim implikacijama jest njezina sposobnost zadržavanja elektrostatičkog naboja. Za razliku od inertnih čestica, nanoplastika aktivno međusobno djeluje s površinama stanica, proteinima, receptorima, pa čak i genetskim materijalom, stvarajući stabilne veze na molekularnoj razini. Ovo svojstvo ne samo da pojačava prodiranje nanoplastike kroz biološke barijere, uključujući krvno-moždanu barijeru, već i otežava njezino uklanjanje, što dovodi do produljenog zadržavanja u tkivima, osobito u mozgu. Elektrostatičke interakcije pokreću kaskadu staničnih poremećaja, uključujući depolarizaciju membrane, disfunkciju mitohondrija, oksidativni stres i apoptozu, što značajno povećava toksičnost čak i pri minimalnim koncentracijama nanoplastičnih čestica.

Autori ovog izvješća predlažu da rješenje za neutralizaciju ili zaštitu elektrostatičkog naboja mikro- i nanoplastike

može predstavljati temeljni proboj koji bi značajno smanjio biološku aktivnost nanoplastike i usporio brzinu nakupljanja u kritičnim organima. Prema procjenama autora, zaštita ili neutralizacija elektrostatičkog naboja mogla bi smanjiti potencijalnu opasnost mikro- i nanoplastike za najmanje 50%, čineći ovo područje istraživanja kritično važnim. To bi znanstvenoj zajednici moglo pružiti potreban vremenski prozor za razvoj sveobuhvatnijih pristupa dijagnosticiranju, detoksikaciji i prevenciji učinaka povezanih s MNP. U tom pogledu, istraživanja u biofizici, znanosti o nanomaterijalima i molekularnoj toksikologiji bit će od najveće važnosti. Kašnjenja u rješavanju ovog problema mogla bi ubrzati procese degradacije.

Istodobno s biomedicinskim rješenjima, hitno je potrebna znanstveno potkrijepljena strategija za sigurno rukovanje plastičnim otpadom. Trenutačni sustavi odlaganja otpada ne mogu spriječiti daljnje fragmentiranje plastike i njezin ulazak u biosferu. U kontekstu globalizacije, ključno je razviti međunarodnu tehnološku platformu za stvaranje, implementaciju i skaliranje sigurnih metoda prikupljanja i recikliranja plastike. Takve se mjere mogu postići samo institucionalnom podrškom, prekograničnim propisima i znanstvenom diplomacijom.

Podizanje svjesnosti unutar znanstvene zajednice, među zdravstvenim djelatnicima i širom javnosti postalo je posebno ključno. Do danas, većina ljudi nije svjesna punog razmjera utjecaja mikro- i nanoplastike (MNP) i nastavlja nesvjesno doprinosti njihovom širenju.

Dakle, pitanje mikro- i nanoplastike prestalo je biti potencijalna prijetnja i transformiralo se u sistemski faktor rizika. Sada ovo područje zahtijeva prioritetnu pažnju znanstvene zajednice i zdravstvenih autoriteta, sistematizaciju podataka, razvoj standarda za procjenu rizika i jačanje međuvladine i međunarodne suradnje. Za razvoj učinkovitih rješenja koja štite biološku sigurnost kratkoročno i dugoročno, ključni su interdisciplinarni pristup, institucionalno priznavanje i međunarodna koordinacija napora.

X FAKTOR: ULOGA MIKRO- I NANOPLASTIKE U DINAMICI PRIRODNIH KATASTROFA

Kao što je navedeno u poglavlju „Utjecaj mikro- i nanoplastike na klimu”, mikro- i nanoplastične čestice smanjuju toplinsku vodljivost oceanske vode, što dovodi do nakupljanja topline i, kao rezultat, kritičnog porasta temperature oceana. Međutim, mikro- i nanoplastika same po sebi nisu izravan izvor zagrijavanja oceana.

Od proljeća 2023. godine, i nastavljajući više od godinu dana, prosječna površinska temperatura Svjetskog oceana svakodnevno obara povijesne rekorde, što označava događaj bez presedana u povijesti promatranja (Slika 128). Znanstvenici diljem svijeta duboko su zabrinuti zbog ovog abnormalnog porasta.



Dr. Brian McNoldy, viši istraživač na Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science Sveučilišta u Miamiu, napominje: **“Ne radi se samo o rekordnim temperaturama oceana koje se bilježe već cijelu godinu – važno je koliko ti novi rekordi nadmašuju prijašnje. Trenutačni pokazatelji nisu ni blizu prethodnim rekordnim vrijednostima.”**³²²



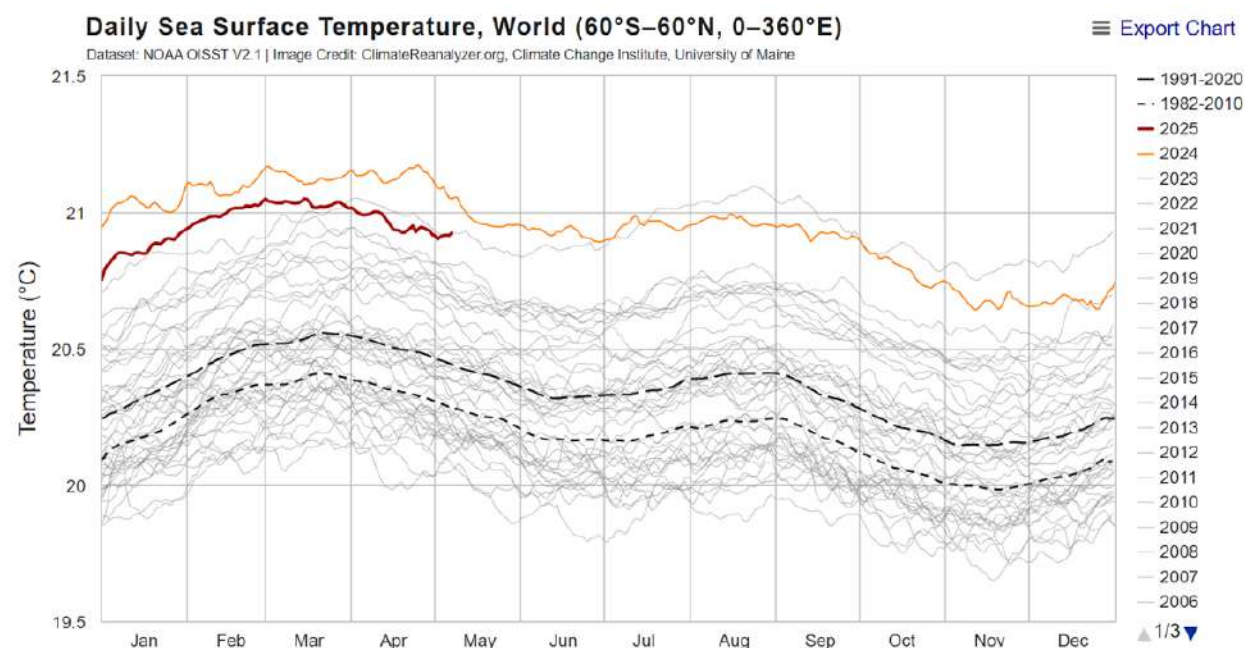
Dr. Rob Larter, britanski morski geofizičar, ponavlja istu zabrinutost: **“Prilično je zastrašujuće, dijelom zato što ne čujem nijednog znanstvenika koji ima uvjerljivo objašnjenje zašto imamo takvo odstupanje”... “Ali dojam je trenutačno da su stvari otišle dalje i brže nego što smo očekivali.”**³²³

Podaci istraživanja klime pokazuju da trenutni modeli predviđaju postupno povećanje temperature površine oceana, no opažena stopa zagrijavanja značajno nadmašuje sve projekcije. Iako znanstvenici potvrđuju da je antropogena klimatska promjena čimbenik koji tome pridonosi, ona sama ne može u potpunosti objasniti ovaj fenomen bez presedana.

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)
<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html>. (Accessed May 1, 2025).

Profesor John Abraham sa Sveučilišta St. Thomas, specijalist za studije temperature oceana, predložio je postojanje prethodno nepoznatih čimbenika koji utječu na dugoročne promjene temperature površine oceana.³²² Naglasio je da ti elementi nisu uzeti u obzir u postojećim klimatskim modelima. Autori ovog izvješća predlažu postojanje takozvanog 'X-faktora' koji bi mogao biti odgovoran za dodatno zagrijavanje oceana i atmosfere.



Slika 128. Prosječna dnevna temperatura površine mora, 1981. – 2025. god.

Izvor podataka: Dataset NOAA OISST V2.1 | Источник изображения: [ClimateReanalyzer.org](https://climateanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.
https://climateanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024).
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Mogu li mikro- i nanoplastika u oceanu biti neidentificirani X faktor?

Analiza mogućnosti da su mikro- i nanoplastika glavni pokretač trenutnog zagrijavanja oceana otkriva kritičnu kontradikciju. Iako nanoplastika doista narušava sposobnost oceana da oslobađa toplinu, ona sama ne stvara toplinsku energiju — ona samo sprječava njezin bijeg iz oceana.

Tijekom proteklih 60 godina, prosječne dubine oceana zagrijavale su se 15 puta brže nego tijekom prethodnih 10 000 godina,^{324, 325} a ovaj se trend ubrzava svake godine. Stopa napredovanja postaje sve brža. Međutim, potrebna je ogromna količina energije za podizanje temperature na dubinama gdje sunčeva svjetlost više ne prodire.^{326, 327}

Veliki priljev mikro- i nanoplastike u ocean započeo je relativno nedavno — prije otprilike 30 godina. Međutim, ubrzano zagrijavanje dubljih slojeva oceana opaženo je prije više od 60 godina. Dakle, plastika ne može objasniti dugoročan i rastući trend zagrijavanja srednjih dubina oceana, koji je započeo mnogo prije nego što su značajne količine ovih zagađivača ušle u ocean.

Sunčevo zračenje također ne pruža dovoljno objašnjenje. Sunčeva svjetlost prodire u ocean samo do dubine od oko 200 metara. Voda se suncem može zagrijati do maksimalne dubine od oko 700 metara kao rezultat miješanja.³²⁸

Međutim, zagrijavanje mnogo dubljih slojeva — gdje sunčeva svjetlost ne dopire — zahtijeva ogromnu količinu energije. To sugerira da toplina koja se akumulira u oceanu mora dolaziti iz drugog izvora. U međuvremenu, prisutnost nanoplastike izgleda da zarobljava tu toplinu, sprječavajući je da pobjegne u atmosferu.

Budući da solarno zagrijavanje ne može objasniti eksponencijalni porast temperature oceana, znanstvenici su predložili da možda postoje dodatni izvori topline u različitim regijama oceana.

Vertikalna distribucija temperaturnih anomalija

Analiza globalnih fluktuacija temperature na različitim dubinama oceana, temeljena na podacima Argo sustava tijekom posljednja dva desetljeća, otkrila je niz anomalija koje se ne podudaraju s

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).

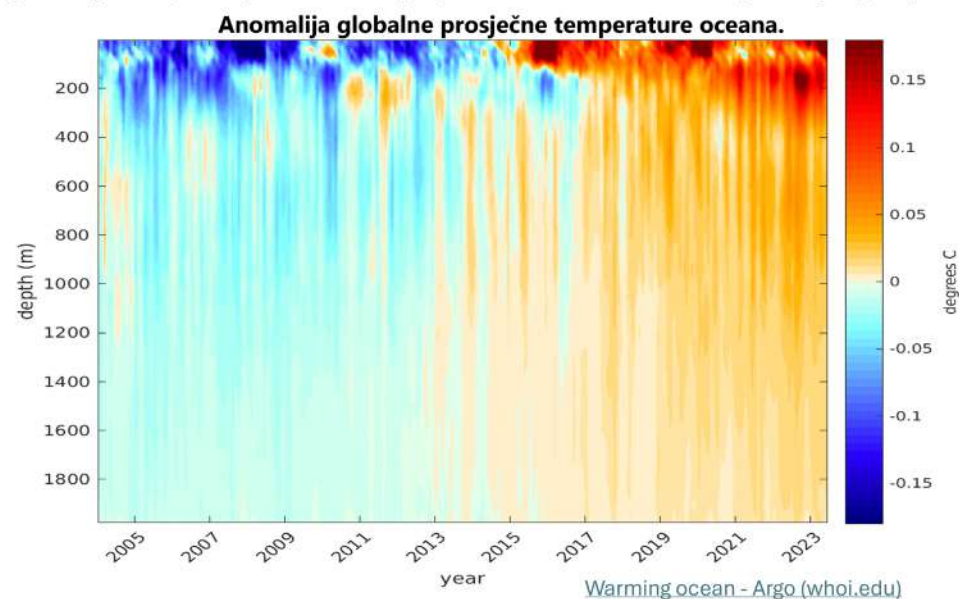
³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

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).

konvencionalnim modelom prijenosa topline prema dolje, s površine u dublje slojeve oceana.^{329, 330}

Zabilježeni su statistički značajni slučajevi inverzije temperaturnog gradijenta, u kojima se toplije vodene mase nalaze ispod relativno hladnijih površinskih slojeva (Slika 129). Takva stratifikacija temperatura fizički je nemoguća isključivo kod silaznog prijenosa topline s površine, budući da toplinska energija, prema zakonima fizike, nije sposobna prevladati međusloj hladnog sloja odozgo prema dolje.

ARGO podaci pokazuju temperaturne varijacije na različitim dubinama tijekom posljednjih 20 godina.



Slika 129. Globalne temperaturne anomalije oceana na dubinama od 0–6 250 stopa (0–1 900 metara) od 2004. god.

Izvor: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Nedavne studije znanstvenika s Oceanološkog sveučilišta u Kini³³¹ potvrđuju prisutnost toplinskih anomalija unutar vodenih stupova oceana koje se ne pojavljuju na površini. Istraživanje je pokazalo da se jedna trećina morskih toplinskih valova uopće ne manifestira na površini oceana, a oko polovice se ne pojavljuje tijekom svih faza svog životnog ciklusa.

Godišnji broj ovih podpovršinskih morskih toplinskih valova značajno se povećao tijekom posljednja tri desetljeća zbog kontinuiranog zagrijavanja oceana. Činjenica da se značajan dio morskih toplinskih valova ne opaža na površini oceana jasno ukazuje da ih ne može uzrokovati toplina iz atmosfere.

Proučavanje izvora topline na oceanskom dnu

Istraživanje i kontinuirano praćenje temperatura na dnu oceana ostaju iznimno rijetki i ograničeni do danas. Znanost dugo nije davala prioritet praćenju promjena na tako ekstremnim dubinama. Moderni sustavi praćenja, poput mreže plutača ARGO, trenutačno prikupljaju podatke s samo oko 0,03% površine oceana, pri čemu većina plutača silazi na samo pola prosječne dubine oceana — nedovoljno za doseganje morskog dna.³³²

Do danas je čovječanstvo istražilo samo oko 3–3,5% oceanskog dna.³³³ To je zbog nekoliko značajnih izazova. Prije svega, većina Svjetskog oceana leži na dubinama od 3 000 do 6 000 metara. Razvoj dubokomorskih vozila sposobnih izdržati ogroman pritisak na dubinama do 6 000 metara zahtijeva znatna financijska i tehnološka sredstva.

Drugo, same ekspedicije su iznimno složene i skupe; kroz povijest, za tu je svrhu ikada konstruirano samo osam specijaliziranih vozila. Zbog toga smo, u nekim aspektima, temeljitije proučavali svemir nego najudaljenija područja Svjetskog oceana.

Istodobno, postaje sve jasnije da geološki procesi na dnu oceana mogu igrati značajnu ulogu u klimatskim promjenama i u oblikovanju toplinske ravnoteže oceana. Morsko dno je dom milijunima jedinstvenih geoloških obilježja — vulkana, rasjednih linija i hidrotermalnih izvora — koji oslobađaju golemu količinu energije. Međutim, zbog njihove nepristupačnosti i ograničene pokrivenosti praćenjem, puni opseg njihovog potencijalnog utjecaja znanosti je u velikoj mjeri nepoznat.

Ipak, istraživanje oceanskog dna se nastavlja, a brojne studije već su ukazale na lokalizirano zagrijavanje oceanske vode koje potječe s morskog dna.

Na primjer, u **dva duboka dijela Argentinskog bazena**,³³⁴ na dubinama većim od 4500 metara, primijećeni su značajni trendovi zagrijavanja: $0,02\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ po desetljeću tijekom razdoblja od 2009. do 2019. godine. Potrebna je golema količina energije za zagrijavanje tako golemih volumena hladne vode na dnu oceana.

Neposredno uz obalu Zapadnog Antarktika, odvija se anomalno zagrijavanje dubokih voda Weddellovog mora.³³⁵ Dok gornjih 700 metara vode pokazuje malo ili nimalo zagrijavanja, dosljedan porast temperature opažen je u dubljim regijama. S jedne strane, Weddellovo more graniči sa Zapadnoantarktičkim riftom, a s druge strane — s podmorskim vulkanskim grebenom s Južnim Sandwich Otocima.

³²⁹Johnson, 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>.

³³⁰Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." Frontiers in Marine Science, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹Sun, 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>

³³²Argo Program. "Mission". (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

³³³Bell, 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>.

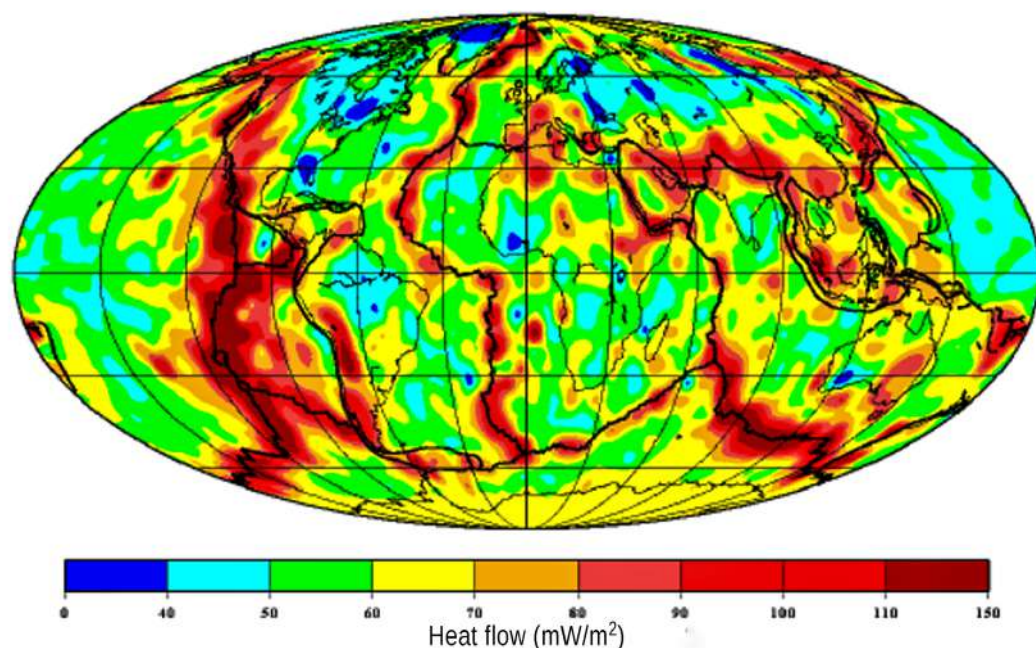
³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. Geophysical Research Letters 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, 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>

Uloga geotermalnog toplinskog toka, tektonske aktivnosti i podmorja

U kontekstu zabilježenih anomalija zagrijavanja dubokih voda – gdje je atmosferski utjecaj minimalan – čini se logičnim razmotriti geotermalni toplinski tok iz unutrašnjosti Zemlje kao potencijalni izvor dodatne topline. Tradicionalno, klimatski modeli tretiraju geotermalni toplinski tok odozdo kao konstantan, na približno 0.09 W/m^2 (ili 90 mW/m^2)³³⁶, što je nekoliko redova veličine niže od solarnog zračenja.^{337, 338}

Međutim, sve veći broj znanstvenih dokaza ukazuje na značaj ovog podcijenjenog izvora topline. Velike geotermalne studije pokazale su da količina toplinskog toka koja izlazi iz oceanskog dna ovisi o starosti oceanske kore: najviša je u zonama mladog širenja morskog dna, a najniža u starijim oceanskim bazenima³³⁹ (Slika 130). Ove lokalizirane anomalije mogu utjecati na vertikalnu temperaturnu strukturu vode, oslabiti termoklin i potaknuti miješanje vodenih masa, što pak utječe na cirkulaciju, biološku produktivnost, pa čak i stabilnost ledenjaka u polarnim regijama.



Slika 130. Globalni prikaz protoka topline.

Ilustracija iz članka: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

Geotermalni toplinski tok — količina toplinske energije koja se oslobađa iz unutrašnjosti Zemlje kroz jediničnu površinu u jedinici vremena, mjerena u milivatima po kvadratnom metru (mW/m^2).

Dok je prosječni geotermalni toplinski tok oko $40\text{--}60 \text{ mW/m}^2$ za kontinentalna područja i približno 100 mW/m^2 za oceansko dno, određene regije pokazuju vrijednosti nekoliko puta veće. Najviše razine toplinskog toka bilježe se u tektonski i vulkanski aktivnim zonama – poput srednjooceanskih grebena i aktivnih rift zona – gdje tok može premašiti 200 do $1,000 \text{ mW/m}^2$.³⁴⁰

Iznimno visok toplinski tok opaža se u područjima hidrotermalnih izvora – područjima gdje se vruće tekućine izravno ispuštaju na morsko dno, s temperaturama vode koje dosežu $350\text{--}400^\circ\text{C}$. Ovi sustavi stvaraju jedinstvene ekosustave i generiraju lokalizirane anomalije toplinskog toka koje značajno utječu na toplinske uvjete pridnenih voda.

Najtemeljitiije proučena područja povišenog geotermalnog toplinskog toka na dnu oceana su srednjooceanski hrptovi – zone gdje se tektonske ploče razmiču i aktivno se formira nova oceanska kora. Ovaj globalni sustav podvodnih hrptova proteže se na približno $60\,000$ kilometara,³⁴¹ okružujući planet poput šavova bejzbol lopte. Srednjooceanske hrptove karakterizira visoka koncentracija hidrotermalnih izvora, podmorskih vulkana i aktivnih rasjednih linija koje omogućuju ulazak značajnih količina toplinske energije iz plašta Zemlje u ocean.³⁴²

U ovim regijama, geotermalni toplinski tok je 10 do 100 puta veći od prosjeka za ostatak morskog dna,³³² što srednjooceanske hrptove čini kritičnim zonama za izmjenu topline između Zemljine unutrašnjosti i Svjetskog oceana.

Profesor Arthur Viterito sa Sveučilišta Maryland dokumentirao je porast aktivnosti potresa duž srednjooceanskih hrptova od 1995. godine (Slika 131).³⁴³ S koeficijentom korelacije od $0,7$, ovo povećanje usklađeno je s globalnim porastom temperature, pri čemu povećanje temperature kasni otprilike dvije godine za porastom seizmičke aktivnosti. Ovaj porast seizmičnosti povezan je s uzlaznim kretanjem magme, što stvara novu oceansku koru.

³³⁶Pollack, 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>

³³⁷Kopp, 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>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. Georesources, (2), 24–43.

³⁴⁰Polyak, 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>

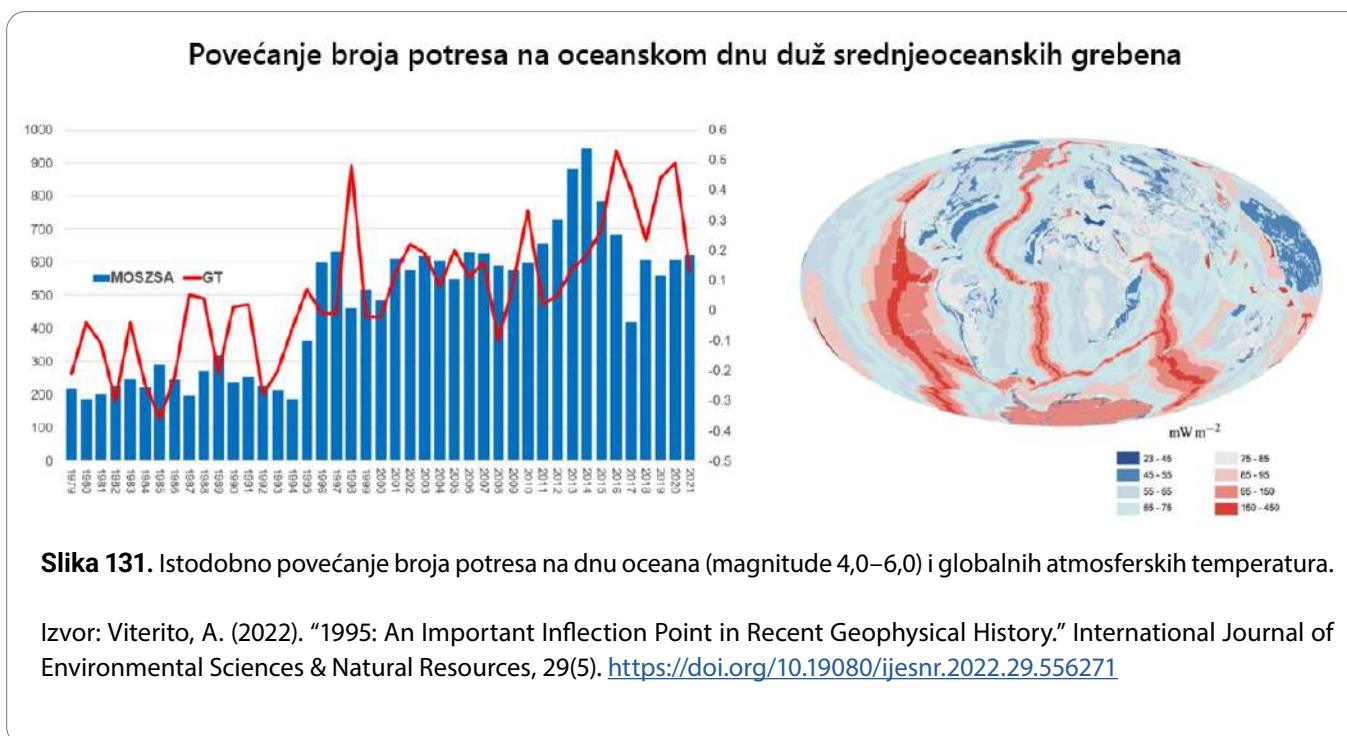
³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in The Encyclopedia of Volcanoes (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, 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).

³⁴³Viterito, 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>



Iako ne postoje izravna mjerenja volumena rastuće magme, globalna mreža seizmičkog nadzora omogućuje znanstvenicima neizravnu procjenu razmjera tih procesa analizom broja i intenziteta seizmičkih događaja, koji se povećavaju bez obzira na količinu seizmičkih podataka. Prema Viteritoj hipotezi, seizmička i vulkanska aktivnost duž srednjеоceanskih hrptova dovodi do povećanja hidrotermalnog ispuštanja i zagrijavanja oceanske vode, što zauzvrat pridonosi emisijama stakleničkih plinova i zagrijavanju atmosfere. Na taj način, Viterito pokazuje da se oceani zagrijevaju ne samo odozgo, već i odozdo, kao rezultat geoloških procesa.

Podmorski vulkanizam također može igrati veliku ulogu u oblikovanju toplinskog režima oceanskog dna. Trenutni podaci pokazuju da se oko 75% svih vulkanskih erupcija na Zemlji događa pod vodom.³⁴⁴ Prethodno se vjerovalo da se podvodne erupcije događaju blagim istjecanjem lave te da su eksplozivne erupcije nemoguće zbog pritiska vodenog stupca. Kao rezultat toga, pretpostavljalo se da podmorski vulkani ne mogu zagrijati vodeni stupac, budući da bi se lava koja izlazi gotovo odmah skrutnula. Međutim, nedavna istraživanja promijenila su naše razumijevanje mehanizama erupcije podvodnih vulkana.

Tlak magme kreće se od 10 000 do 30 000 bara, dok je tlak vodenog stupca u najdubljim dijelovima oceana samo oko 1000 bara.

Kada magma eruptira, uzrokuje trenutno vrenje vode i razgradnju molekula H₂O, tvoreći plinsko-vodenu šuplinu s tlakovima koji dosežu stotine ili čak tisuće bara.³⁴⁵ To rezultira snažnim eksplozivnim erupcijama.

Ove erupcije prate oslobađanje tefre i hidroterma — divovskih mlazova pregrijane vode, čiji volumeni mogu doseći ekvivalent od 40 milijuna olimpijskih bazena. Takve emisije mogu poremetiti toplinsku ravnotežu oceana ne samo lokalno, već i na globalnoj razini.

Istraživanje koje je provelo Sveučilište u Leedsu otkrilo je kilometarske nakupine vulkanske tefre na dnu Tihog oceana,³⁴⁶ pružajući snažne dokaze o snažnim eksplozivnim podmorskim erupcijama. Jedna takva erupcija može osloboditi toplinsku energiju reda veličine 1 teravat — dvostruko više od godišnje potrošnje energije Sjedinjenih Država.



Doprinos eksplozivnih erupcija zagrijavanju oceana dodatno potkrepljuje profesor Bernd Zimanowski sa Sveučilišta Julius-Maximilians u Bavarskoj, koji objašnjava:³⁴⁷

"Kod podmorskih erupcija lave, potrebno je dosta vremena da se toplina lave prenese na vodu. Međutim, kod eksplozivnih erupcija magma se razbija na sitne čestice. To može stvoriti toplinske impulse toliko jake da se termalne ravnotežne struje u oceanima poremete lokalno ili čak globalno."³⁴⁸

Trenutne procjene sugeriraju da se broj hidrotermalno aktivnih podmorskih formacija kreće od 100 000 do čak 10 milijuna^{349, 350} — što ukazuje na to da je doprinos hidrotermalne aktivnosti toplinskoj ravnoteži oceana možda značajno podcijenjen. Eksplozivne erupcije magme generiraju snažne toplinske impulse sposobne poremetiti oceanske toplinske struje na lokalnoj razini. Međutim, s obzirom na golemu veličinu oceana, čak ni tako intenzivne podvodne erupcije nisu dovoljne da ga globalno zagriju. Vulkani nisu ravnomjerno raspoređeni, njihove su erupcije epizodne, a ukupna oslobođena energija nije dovoljna za zagrijavanje cijelog oceana. Ipak, može biti dovoljna za pokretanje lokaliziranih toplinskih valova u određenim regijama.

Specifičan primjer takvih lokaliziranih toplinskih anomalija je fenomen poznat kao morski toplinski valovi — područja oceanske vode koja ostaju abnormalno topla dulje vrijeme. Drugi naziv za ove događaje su — "blobovi": masivne mrlje površinske vode sa značajno povišenim [temperaturama](#). Od 1995. godine broj blobova naglo je porastao,³⁵¹ i češće se pojavljuju u različitim dijelovima svjetskih oceana, uključujući obale Novog Zelanda, jugozapadne Afrike i južni Indijski ocean.

³⁴⁴Crisp, 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)

³⁴⁵Lyons, 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>

³⁴⁶Pegler, 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>

³⁴⁷Dürrig, 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>

³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (accessed 1 May 2025).

³⁴⁹Baker, 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>

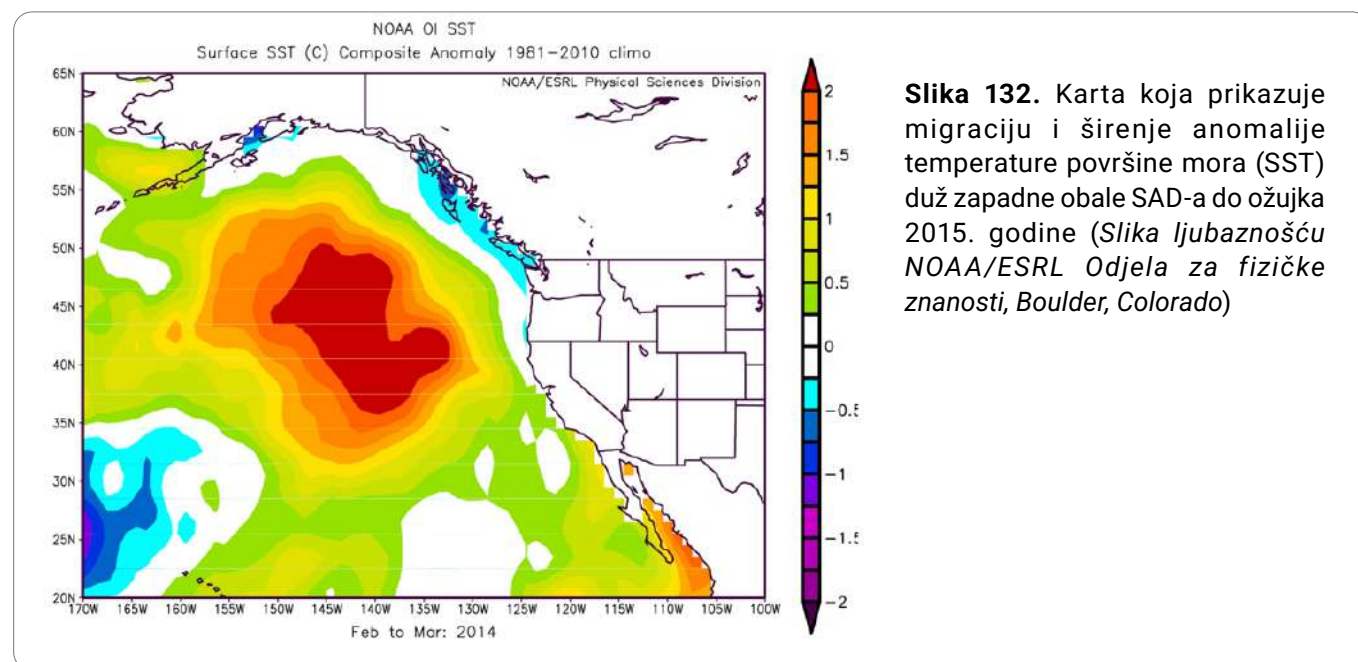
³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016)

<https://www.snews.explores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

³⁵¹Laufkötter, 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>

Jedan od najpoznatijih i najopsežnijih “blobova” formirao se u Aljaskom zaljevu 2013. godine i brzo se proširio Tihim oceanom. Pokrivao je područje veće od 4 000 000 kvadratnih kilometara — veće od cijele Indije, a u nekim je područjima temperatura površine mora prelazila prosjek za 5–6 stupnjeva Celzijusa (Slika. 132). Taj je “blob” plutao oceanom od Aljaske do Meksika tijekom tri godine, sve do 2016. godine. Ovaj je fenomen imao značajan negativan utjecaj na morski ekosustav i klimu regije.

Najvjerojatniji uzrok formiranja “bloba” bila je intenzivna vulkanska aktivnost uz obalu Aljaske i prisutnost magmatskog stupa Cobb,³⁵² koji je zagrijao duboke oceanske vode koje su se kasnije u ogromnim količinama podigle na površinu.



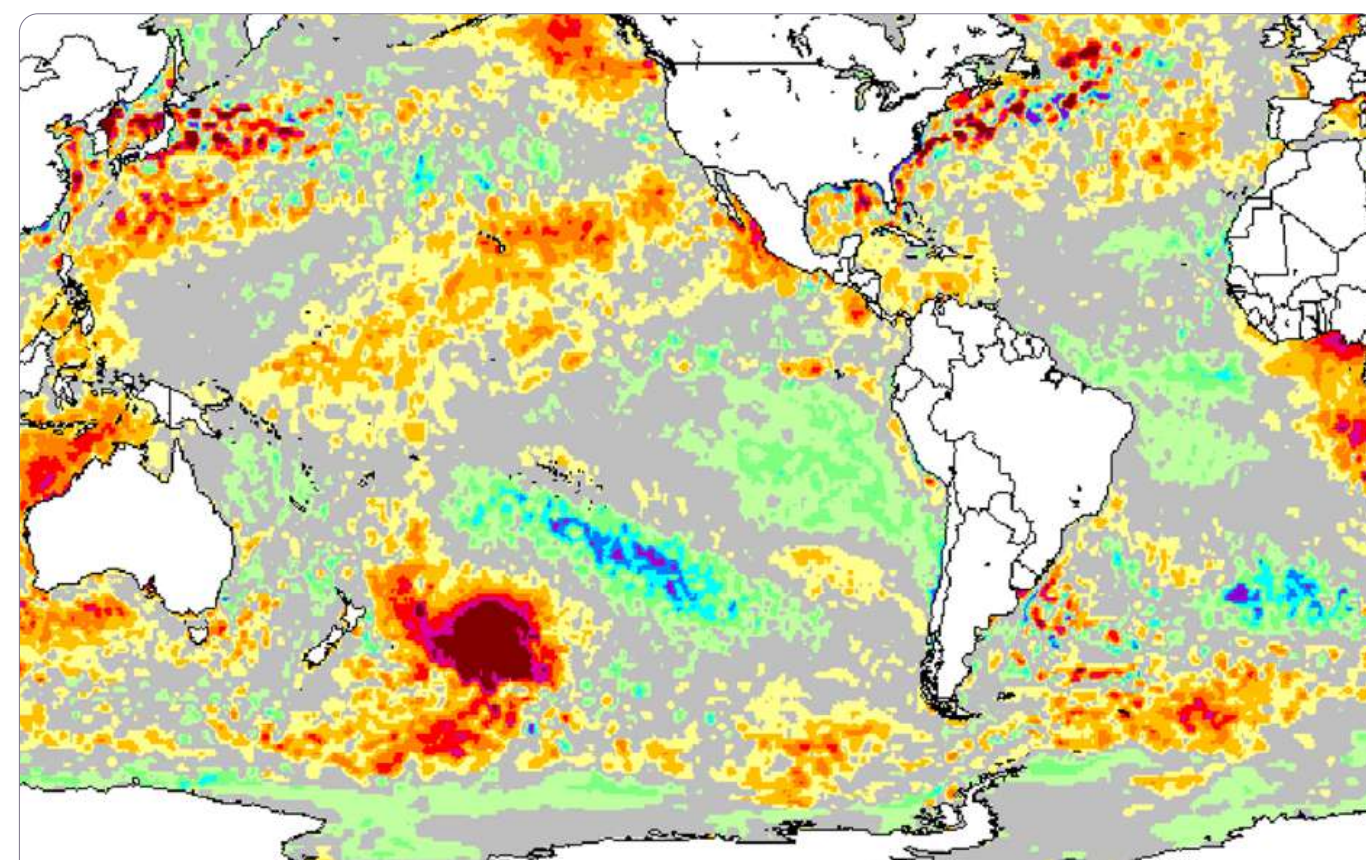
Slika 132. Karta koja prikazuje migraciju i širenje anomalije temperature površine mora (SST) duž zapadne obale SAD-a do ožujka 2015. godine (Slika ljubaznošću NOAA/ESRL Odjela za fizičke znanosti, Boulder, Colorado)

U prosincu 2019. godine, “toplinski blob” pojavio se u južnom Tihom oceanu, istočno od Novog Zelanda, s temperaturama koje su pojedinih dana dosežale 6 °C iznad prosjeka. Blob je pokrivao područje veće od milijun kvadratnih kilometara — što je ekvivalent 1,5 puta veličini Teksasa ili četiri puta veličini Novog Zelanda (Slika 133). Tada je zabilježeno da je to bio najveći toplinski blob u svjetskim oceanima. Štoviše, bio je to drugi najveći takav događaj ikada zabilježen u toj regiji.

66

James Renwick, profesor na Školi za geografiju, okoliš i znanosti o Zemlji pri Sveučilištu Victoria u Wellingtonu, napomenuo je:

“Trenutačno je to najveće područje iznadprosječnog zagrijavanja na planetu. Normalno su temperature tamo oko 15°C, a trenutačno su oko 20°C.”³⁵³



Slika 133. Anomalija temperature površine mora u južnom Tihom oceanu 25. prosinca 2019. god.

Izvor: 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> (Datum pristupa: 11.05.2025.)

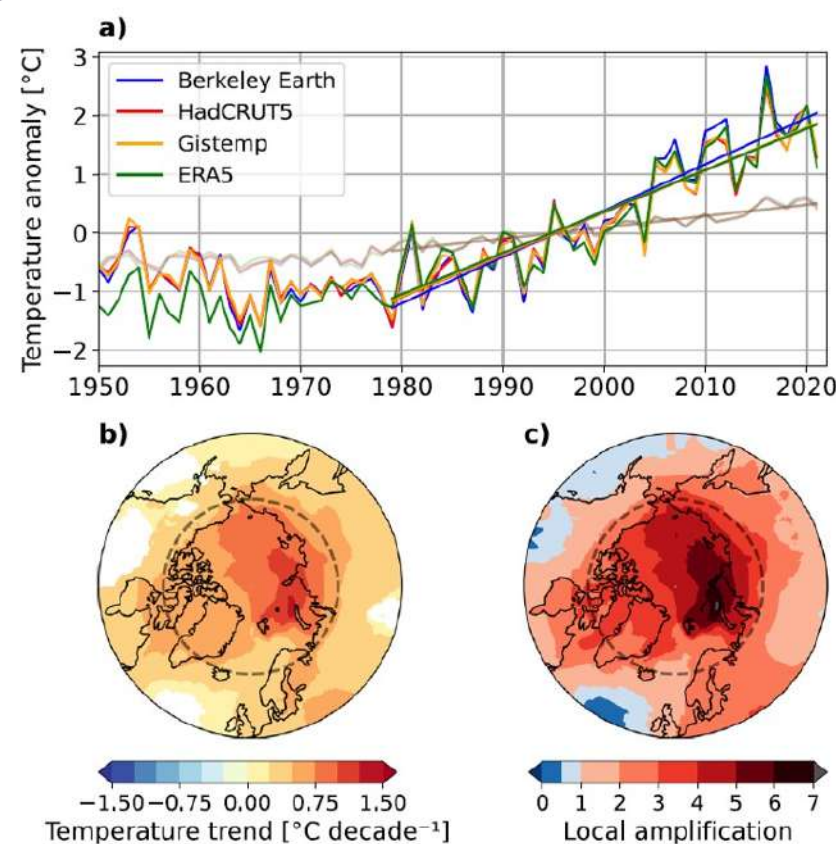
Vjerojatni uzrok nastanka ovog “bloba” bila je aktivnost drevnog vulkanskog platoa smještenog uz obalu Novog Zelanda.³⁵⁴

³⁵²Chadwick, 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>

³⁵³The 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).

³⁵⁴Gase, 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>

Još jedan značajan primjer kako geotermalna toplina iz magmatskih procesa pridonosi zagrijavanju oceana je anomalno zagrijavanje arktičkih mora duž obale Sibira. Prema istraživanju iz 2022. godine, sibirski Arktik zagrijava se gotovo četiri puta brže od globalnog prosjeka — stopa je to znatno viša od one koja je prethodno uzeta u obzir u klimatskim modelima, što je znanstvenike prilično iznenadilo (Slika 134).³⁵⁵



Slika 134. Razvoj godišnje prosječne temperature na Arktiku.

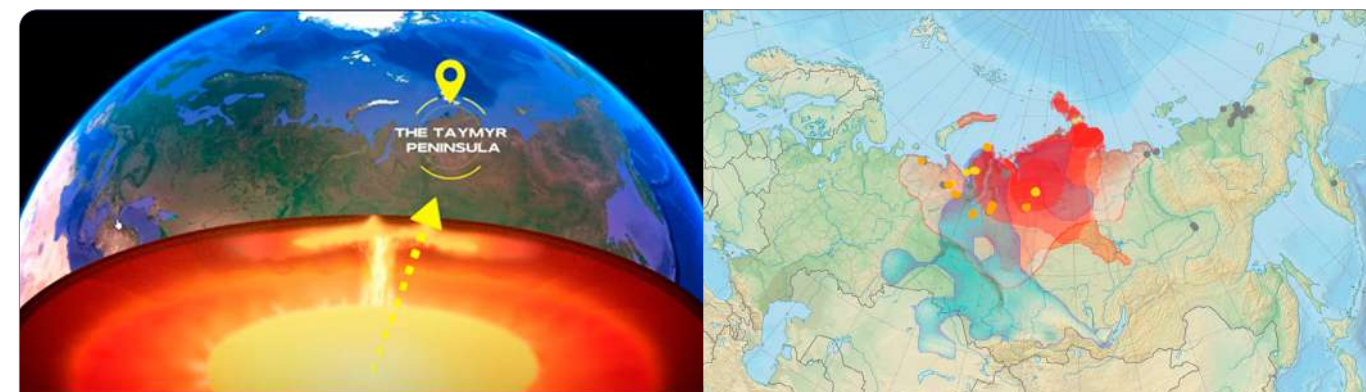
(a) Anomalije godišnje prosječne temperature na Arktiku (66,5°–90°N) (tamne boje) i globalno (svijetle boje) tijekom razdoblja 1950. – 2021. godine, izvedene iz različitih skupova promatračkih podataka. Temperature anomalije izračunate su u odnosu na standardno 30-godišnje razdoblje od 1981. do 2010. godine. Isprekidana linija u (b) i (c) prikazuje Arktički krug (66,5°N zemljopisne širine).

Izvor: 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>

U ovoj specifičnoj regiji svijeta — u blizini poluotoka Tajmir — svjedoci smo aktivacije sibirске magmatske perjanice, koja se sada brzo diže na istom području gdje su Sibirske trape eruptirale prije 250 milijuna godina. Trenutačni dokazi sugeriraju da glava perjanice aktivno erodira Istočnosibirski kraton, s magmom koja se širi ispod cijelog njegovog prostranstva (Slika 135). Preliminarne procjene sugeriraju da bi područje rasprostiranja magme ispod Sibira moglo obuhvaćati 2500 do 3000 kilometara u promjeru — područje usporedivo s veličinom Australije.

³⁵⁵Rantanen, 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>



Slika 135. Lokalizacija položaja perjanice temeljena na rezultatima različitih znanstvenih studija

Važno je napomenuti da se tako intenzivno zagrijavanje arktičkih mora događa upravo u regiji u blizini poluotoka Tajmir. Ovu anomaliju, posebno u oceanskoj zoni Sibira, može se objasniti tanjom oceanskom korom koja učinkovitije provodi toplinu, te većim toplinskim kapacitetom vode u usporedbi s atmosferom. Oceanska voda, stoga, intenzivno apsorbira i zadržava toplinu iz uzlazne magmatske perjanice, iako se perjanica diže ispod kontinentalne kore na relativnoj udaljenosti od obale.



Za detaljniju analizu sibirске magmatske perjanice, njezinog utjecaja na klimatski sustav, povezanih rizika i potencijalnih rješenja, pogledajte izvješće

**“O PRIJETNJI ERUPCIJE SIBIRSKЕ
MAGMATSKE PERJANICE I STRATEGIJE
ZA RJEŠAVANJE TOG PROBLEMA”**

Kombinirani dokazi snažno ukazuju na to da su geološki procesi na dnu oceana značajan čimbenik u globalnom zatopljenju. Porast seizmičke i vulkanske aktivnosti na morskom dnu korelira s rastućim globalnim temperaturama, sugerirajući moguću uzročno-posljedičnu vezu. Podmorske erupcije — posebno one eksplozivne prirode — sposobne su generirati snažne toplinske impulse koji narušavaju i lokalnu, pa čak i globalnu toplinsku ravnotežu.

Hidrotermalni sustavi i vulkanska aktivnost proizvode velike anomalije poput “blobova”, koje imaju značajan utjecaj na morske ekosustave i klimu, dok su magmatski procesi odgovorni za anomalno zagrijavanje arktičkih mora. Dakle, ocean se zagrijava ne samo odozgo, pod utjecajem atmosfere, već i odozdo, zbog dinamičkih procesa u unutrašnjosti Zemlje. To zahtijeva ponovnu procjenu postojećih klimatskih modela i dublje proučavanje podvodne geološke aktivnosti kao važne komponente ukupne toplinske ravnoteže planeta.

Međutim, postoji jedno ključno pitanje: Zašto se u ovom trenutku bilježi porast magmatske i tektonske aktivnosti na Zemlji?

Kratak opis geodinamičkog modela klimatskih promjena na Zemlji u tekućem razdoblju

Tijekom proteklih 30 godina, Zemlja je doživjela neviđenu i sinkroniziranu eskalaciju ne samo klimatskih promjena, već i anomalija u svim slojevima planeta i njegovim geofizičkim parametrima. Te se promjene povećavaju eksponencijalno. Sveobuhvatna analiza znanstvenih podataka ukazuje da primarni uzrok leži u astronomskim ciklusima koji se ponavljaju svakih 12 000 godina.

Hipoteza kozmičkog utjecaja potkrijepljena je sličnim promjenama koje se istodobno događaju na drugim planetima i mjesecima u Sunčevom sustavu. Na primjer, brzina vjetrova se povećava, a zone uragana se šire na Uranu,³⁵⁶ Jupiteru,³⁵⁷ i Veneri.³⁵⁸ Mars doživljava topljenje polarnih ledenih kapa,³⁵⁹ dok se vulkanska aktivnost povećava i na Veneri³⁶⁰ i na Marsu.³⁶¹ Dodatno, seizmička aktivnost se pojačava³⁶² na Marsu — geološki “mrtvom” planetu — što sugerira anomalne unutarnje procese.

Kritične promjene u geosustavu Zemlje počele su se pojavljivati oko 1995. godine, obilježene značajnim geofizičkim anomalijama kao što su naglo ubrzanje rotacije planeta, pomak osi Zemlje i početak brzog pomicanja Sjevernog magnetskog pola (Slika 136).

³⁵⁶de 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>

³⁵⁷Wong, 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>

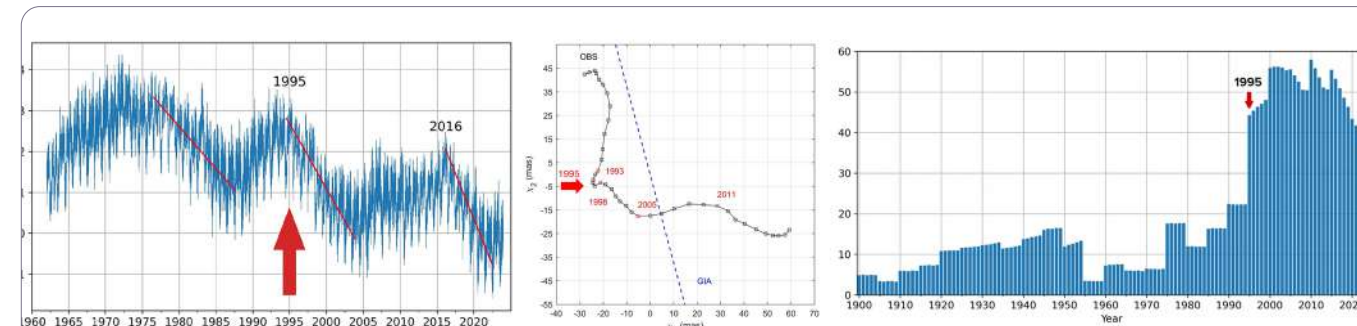
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140-158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, 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>

³⁶⁰Encrenaz, 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>

³⁶¹Broquet, 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> <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, 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>



Nenadano i naglo ubrzanje rotacije planeta, zabilježeno od strane Centra za orijentaciju Zemlje Pariškog opservatorija.

Izvor podataka:
IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Anomalni pomaci osi rotacije Zemlje: nagla promjena smjera polarnog drifta i 17-struko povećanje njegove brzine.

Izvor: 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>

Prethodno se pomicao brzinom od 10 km godišnje, no Sjeverni magnetski pol naglo je ubrzao na 55 km godišnje i promijenio svoju putanju prema poluotoku Tajmir u Sibiru.

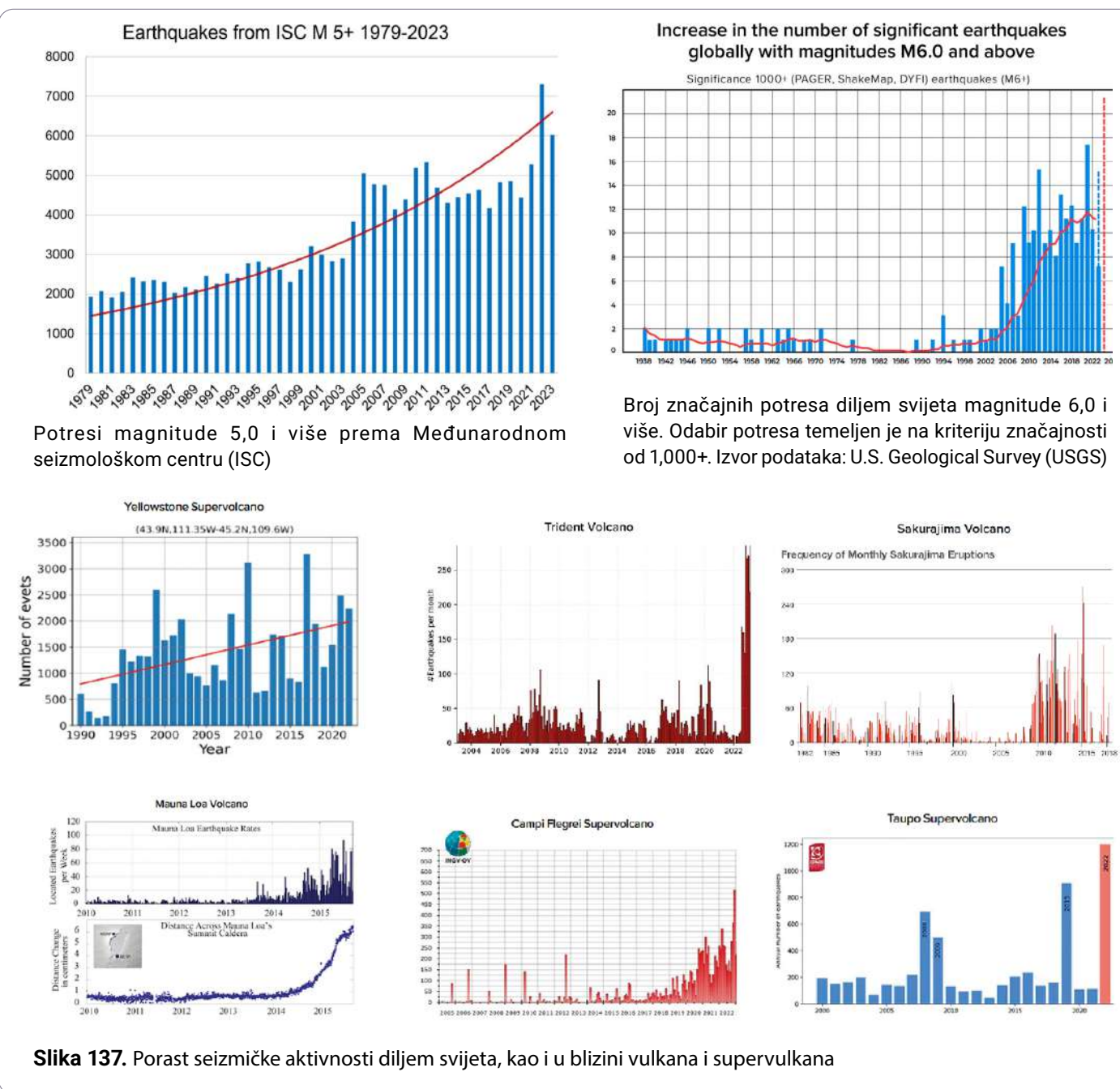
Izvor: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Slika 136. Promjene u geofizičkim parametrima Zemlje 1995. godine

Ove anomalije ukazuju na duboke promjene u jezgri Zemlje, koje zahtijevaju kvadrilijune puta više energije nego što je čovječanstvo proizvelo tijekom cijele povijesti civilizacije. Uzrok je vanjski kozmički utjecaj koji utječe na jezgru Zemlje, kao i na jezgre drugih planeta u Sunčevom sustavu. Ova vanjska sila pojačava taljenje plašta, uzrokujući njegovo uzdizanje bliže površini. Kao rezultat toga, pokreće se lančana reakcija: pojačava se vulkanska i seizmička aktivnost, povećava se zagrijavanje iz unutrašnjosti Zemlje, a prirodne katastrofe rastu u učestalosti diljem svijeta.

Od 1995. godine primijećen je značajan porast seizmičke aktivnosti, karakteriziran višom učestalošću, magnitudom i energijom potresa. Ovaj trend vidljiv je i na kopnu i u oceanima, uključujući regije gdje seizmička aktivnost prethodno gotovo nije postojala. Sve to ukazuje na globalni razmjer ovih promjena. Važno je napomenuti da porast potresa magnitude 5,0 ili više nije povezan s povećanjem mreža senzora ili osjetljivosti, već istinski odražava promjene u geodinamici Zemlje. Prema podacima Međunarodnog seizmološkog centra, broj takvih potresa tijekom posljednjih 25 godina znatno se povećao i nastavlja rasti (Slika 137).

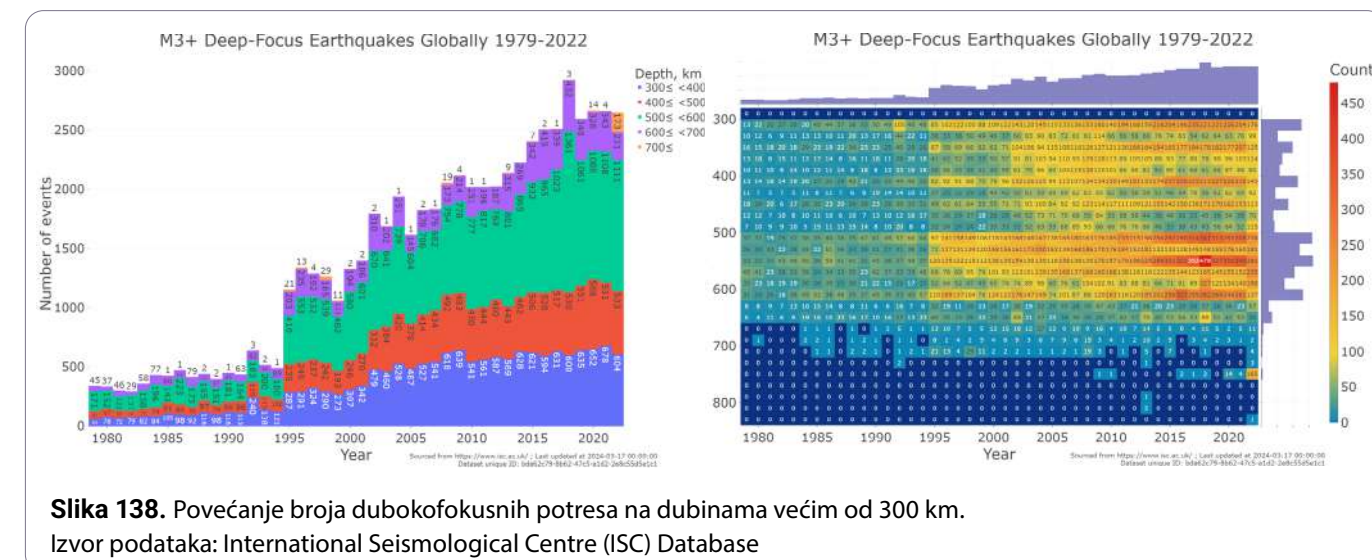
Nadalje, seizmička aktivnost raste u blizini vulkana, uključujući supervulkane kao što su Yellowstone u SAD-u, Flegrejska polja u Italiji³⁶³ i Taupō na Novom Zelandu³⁶⁴—kao i drugih vulkana koji su eruptirali tijekom prethodnih 12 000-godišnjih ciklusa (Slika 137).



Sve veći broj dana svake godine obilježen je vulkanskim erupcijama, pri čemu izbačena lava često pokazuje anomalna svojstva poput pregrijavanja i jedinstvenog kemijskog sastava karakterističnog za magmu koja potječe iz dubljih slojeva plašta planeta.

Posebno zabrinjavajući razvoj je rastuća učestalost dubokofokusnih potresa, koji se javljaju na dubinama većim od 300 kilometara — ponekad se protežu i do 750 kilometara ispod površine Zemlje. Za razliku od tipičnih potresa koji se događaju u kori Zemlje, ovi fenomeni potječu iz plašta, gdje je materijal obično duktilan, deformirajući se poput plastike umjesto da puca. To čini prirodu ovih potresa vrlo neuobičajenom. S obzirom na to da se ti dubokofokusni potresi javljaju pod ekstremnim uvjetima tlaka i temperature, vjerojatno su rezultat snažnih eksplozija plašta. Njihova energija usporediva je s istovremenom detonacijom više nuklearnih bombi unutar plašta Zemlje.

Dodatno, dubokofokusni potresi često su sposobni pokrenuti snažne seizmičke događaje u Zemljinoj kori, pojačavajući njihove destruktivne učinke. Od 1995. godine došlo je do naglog povećanja broja takvih dubokofokusnih potresa (Slika 138), što se podudara s drugim geodinamičkim anomalijama koje su započele u istom razdoblju. Porast učestalosti ovih unutar-plaštnih eksplozija signalizira pojačanu energetska aktivnost unutar unutrašnjosti Zemlje i ubrzano taljenje plašta, što bi potencijalno moglo dovesti do velikih vulkanskih erupcija.



Od 1995. godine, pod utjecajem centrifugalnih sila, otopljena magma unutar plašta Zemlje počela se aktivnije uzdizati prema površini, erodirajući i zagrijavajući litosferu iznutra intenzivnije nego obično. Ovo uzlazno kretanje magme povećava geotermalni toplinski tok iz unutrašnjosti Zemlje i aktivira magmatske perjanice ispod ledenjaka Zapadnog Antarktika, središnjeg Grenlanda i Sibira. Kao rezultat toga, ledenjaci i permafrost tope se odozdo prema gore ubrzanim tempem.^{365, 366, 367}

Dakle, jedan od ključnih uzroka zagrijavanja oceana je rastuća magma, koja posebno utječe na oceansku koru — tanju i ranjiviju od kontinentalne kore — zagrijavajući je odozdo. Povijesni zapisi iz geoloških slojeva i ledenih jezgri ukazuju na to da je Zemlja prošla kroz slične katastrofalne cikluse otprilike svakih 12 000 godina. Štoviše, svakih drugi ciklus — otprilike svakih 24 000 godina — ove planetarne katastrofe bile su još intenzivnije (Slika 139).

³⁶³Fanpage.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).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022)

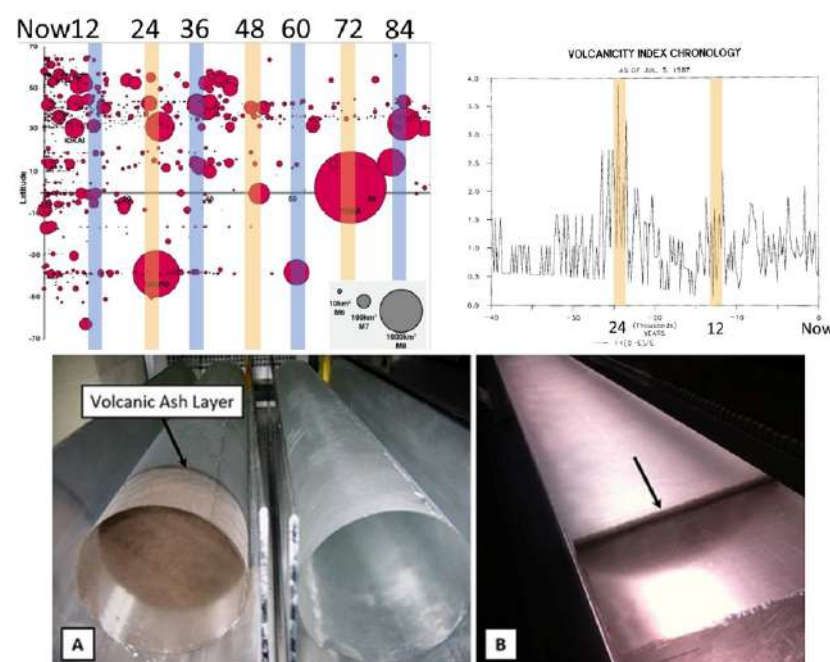
<https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDg0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *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. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>



Slika 139. Grafikoni prikazuju katastrofalnu vulkansku aktivnost svakih 12 000 godina, te još intenzivnije događaje svakih 24 000 godina.

Izvori: Brown, S. K., Croswell, 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>

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>

Zemlja trenutačno ulazi u jedan od ovih ciklusa. Međutim, ovaj put, zbog antropogenog zagađenja oceana mikro- i nanoplastikom, toplinska neravnoteža unutar plašta se intenzivirala. To je dovelo do povećanja broja dubokofokusnih potresa, stvaranja novih magmatskih komora i opće destabilizacije planeta. Kao rezultat toga, kataklizme se ubrzavaju daleko brže i jače nego u prethodnim ciklusima. Zapravo, zagađenje oceana postalo je primarni razlog zašto Zemlja možda neće izdržati ovaj ciklus. Važno je razumjeti da rješavanje zagađenja oceana mikro- i nanoplastikom može usporiti napredovanje ovih kataklizmi — ali ih neće zaustaviti.



Detaljnije informacije o trenutačnoj geodinamičkoj aktivaciji Zemljine unutrašnjosti, 12 000-godišnjem ciklusu kataklizmi i mogućim rješenjima ovog problema možete pronaći u izvješću

“O NAPREDOVANJU KLIMATSKIH KATASTROFA NA ZEMLJI I NJIHOVIM KATASTROFALNIM POSLJEDICAMA”

Kao što su pokazala višegodišnja interdisciplinarna istraživanja geodinamičkih promjena tijekom 12 000-godišnjeg ciklusa, primarni uzrok zagrijavanja oceana je uzlazna magma, koja posebno snažno utječe na oceansku koru zbog njezine tanje i ranjivije strukture u usporedbi s kontinentalnom korom. Onečišćenje Svjetskog oceana plastikom i nakupljanje mikro- i nanoplastičnih čestica postalo je kritičan čimbenik koji mijenja termofizička svojstva oceana. Prisutnost ovih sintetičkih čestica u morskoj vodi značajno smanjuje njezinu sposobnost provođenja topline, narušavajući prirodne procese izmjene topline između dubokih oceanskih slojeva i površine. Još kritičnije, ometa rasipanje topline iz litosfernih ploča. U uvjetima povećane geodinamičke aktivnosti tijekom 12 000-godišnjeg ciklusa, ovo kritično narušavanje funkcije toplinske vodljivosti oceanske vode ne samo da intenzivira zagrijavanje oceana i atmosfere, već i povećava podzemno zagrijavanje. Kao rezultat toga, ubrzava se taljenje plašta, što dodatno pojačava geodinamičku aktivnost.

To dovodi do akumulacije viška energije u unutrašnjosti Zemlje, što rezultira povećanjem potresa s dubokim žarištem i ubrzanim stvaranjem novih magmatskih komora. Zauzvrat, ti procesi dodatno pogoršavaju planetarnu nestabilnost i ubrzavaju zagrijavanje oceana.

Počinje se stvarati opasna povratna sprega:

geodinamička aktivnost zagrijava ocean → topline ubrzava razgradnju plastike → rastuće koncentracije mikroplastike smanjuju toplinsku vodljivost morske vode → to narušava odvođenje topline iz unutrašnjosti Zemlje → što dodatno pojačava geodinamičku aktivnost i povećava učestalost potresa → dovodeći do još većeg zagrijavanja oceana, što pak ubrzava razgradnju plastike u mikro- i nanočestice.



To doprinosi rastućoj učestalosti i intenzitetu ekstremnih vremenskih pojava i prirodnih katastrofa — poput poplava, uragana i tropskih ciklona — koje se sada događaju intenzivnije nego ikada prije.

Dakle, zagađenje oceana mikro- i nanoplastikom ne samo da ima destruktivan učinak na čovjekovo zdravlje, ekosustave, biosferu i klimatski sustav intenziviranjem zagrijavanja oceana, već djeluje i kao pojačavajući faktor u već ekstremnim katastrofama povezanim s 24 000-godišnjim ciklusom u koji je Zemlja sada ušla. To stvara neviđene rizike ne samo za opstanak čovječanstva, već i za sam planet.

Rješavanje globalne ekološke, klimatske i geodinamičke krize zahtijeva međunarodnu suradnju znanstvenika iz različitih disciplina kako bi se hitno razvila i implementirala sveobuhvatna rješenja. Ona moraju uključivati dekontaminaciju oceana od mikro- i nanoplastike, ublažavanje njihovih štetnih učinaka na čovjekov organizam i temeljne odgovore na geodinamičke prijetnje.

Predložena rješenja mogu se pronaći u relevantnim izvješćima:



IZVJEŠĆE

**“O NAPREDOVANJU KLIMATSKIH
KATASTROFA NA ZEMLJI I NJIHOVIM
KATASTROFALNIM POSLJEDICAMA”**



IZVJEŠĆE

**“O PRIJETNJI ERUPCIJE SIBIRSKJE
MAGMATSKJE PERJANICE I STRATEGIJE
ZA RJEŠAVANJE TOG PROBLEMA”**

ZAKLJUČCI: NANOPLASTIKA JE IZAZOV KOJI SE NE SMIJE IGNORIRATI

Problem plastičnog zagađenja, posebno mikro- i nanoplastikom (MNP), prešao je okvire lokalne ekološke štete i razvio se u složenu globalnu prijetnju. Nedavna istraživanja potvrđuju izravan i neizravan utjecaj MNP na klimatski sustav, otpornost ekosustava i čovjekovo zdravlje. Čestice mikroplastike sposobne su prodirati u žive organizme, izazivajući upalne reakcije, narušavajući hormonsku ravnotežu, oštećujući imunološke i reproduktivne funkcije, te mijenjajući fizička i kemijska svojstva okoliša, od oceanske vode do atmosfere.

Prije više od deset godina, predstavnici međunarodne znanstvene zajednice ALLATRA iznijeli su hipotezu da će plastično zagađenje imati sve značajniji utjecaj na klimatske anomalije i pogoršati izazove javnog zdravlja. Danas, ove hipoteze potvrđuju neovisne studije vodećih znanstvenih institucija. Brza akumulacija podataka o ekološkim i biološkim učincima MNP otvara nove putove analize, uključujući transformaciju klimatskih obrazaca, promjene u hidrosferi i eskalaciju sistemskih rizika za održivi razvoj.

Posebno zabrinjava otkriće da čak i mikroskopske koncentracije nanoplastike mogu pokrenuti kaskadne učinke kroz biosferu i klimatski sustav. Plastika više nije samo kruti otpad: postala je aktivni čimbenik transformacije, utječući i na okoliš i na čovjekov organizam. Njezine se posljedice već naziru. Kriza s MNP proteže se izvan ekologije i medicine; mora se razumjeti i u kontekstu nacionalne sigurnosti, makroekonomije i međunarodnih odnosa.

Kao dio svoje strategije za suzbijanje ove prijetnje, Pokret ALLATRA predložio je dva ključna smjera, oba s praktičnom primjenom i prediktivnim potencijalom. Prvi uključuje veliku implementaciju tehnologija za stvaranje atmosferske vode (AWG), koje mogu istovremeno riješiti problem nestašice slatke vode i pridonijeti uklanjanju mikroplastičnih čestica iz atmosfere i oceana. Međutim, primjena AWG tehnologija mora uzeti u obzir i potencijalne rizike: konkretno, povećanu koncentraciju MNP u zraku i posljedično intenziviranje izloženosti udisanjem kod ljudi. To naglašava hitnu potrebu za paralelnim razvojem vrlo učinkovitih sustava filtracije i zaštite.

Drugi strateški smjer koji je predložila ALLATRA uključuje razvoj metoda za neutraliziranje ili zaštitu elektrostatičkog naboja nanoplastike — jednog od primarnih čimbenika koji pridonose njihovoj toksičnosti. Nabijene nanoplastične čestice aktivno stupaju u interakciju sa staničnim membranama, proteinima i genetskim materijalom, tvoreći stabilne molekularne veze. Te čestice mogu prodrijeti kroz biološke barijere, uključujući krvno-moždanu barijeru, akumulirajući se u tkivima i pokrećući kaskadu staničnih poremećaja — od oksidativnog stresa do apoptoze. Smanjenje elektrostatičke aktivnosti mikro- i nanoplastike moglo bi značajno smanjiti njihove štetne učinke i usporiti njihovo nakupljanje u čovjekovom organizmu.

Prema autorima izvješća, zaštita ili neutralizacija elektrostatičkog naboja MNP može smanjiti njihovu potencijalnu opasnost za najmanje 50%, čineći ovo područje istraživanja kritično važnim. Takve bi mjere pružile neophodan vremenski prozor za razvoj sveobuhvatnijih strategija za dijagnosticiranje, prevenciju i uklanjanje MNP iz čovjekovog organizma, kao i za čišćenje biosfere. U ovom kontekstu, istraživanja u područjima biofizike, nanotehnologije i molekularne toksikologije postaju posebno značajna.

Stoga, učinkovit odgovor na prijetnju koju predstavlja MNP ne zahtijeva izolirane mjere, već globalan i interdisciplinarni pristup. Potrebni su koordinirani naponi u znanstvenim istraživanjima, tehnološkim inovacijama, regulatornim okvirima i međunarodnoj suradnji. Plastično zagađenje ne smije se promatrati kao usko ekološko pitanje, već kao sistemski izazov koji utječe na javno zdravlje, sigurnost, sigurnost resursa i otpornost društvene infrastrukture.

Ono što ovo izvješće čini jedinstvenim jestž njegov sveobuhvatan, interdisciplinarni pristup, koji integrira podatke iz fizike, kemije, biologije i medicine. Ova sinteza omogućuje da se problem MNP promatra kao civilizacijski izazov koji zahtijeva rješenja na više razina. Globalna zajednica tek počinje shvaćati prave razmjere ove prijetnje. Iako trenutačno ne postoji univerzalno rješenje, upravo potraga za takvim rješenjem i napredak znanstvene suradnje mogu utrti put prema prevladavanju krize. Primarni izazov nije nepostojanje rješenja, već sposobnost da se ono identificira prije dostizanja kritične prekretnice.

Literatura

- 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/acsnano.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 ≥ 10 µm 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](https://www.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/kit/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. 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., Ingrassia, 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, ead12746 (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.enccco.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>