

JELENTÉS

MIKROPLASZTIK
ÉS NANOPLASZTIK

NANOMŰANYAG A BIOSZFÉRÁBAN

A MOLEKULÁRIS HATÁSTÓL
A BOLYGÓSZINTŰ VÁLSÁGIG



JELENTÉS

NANOMŰANYAG A BIOSZFÉRÁBAN

A MOLEKULÁRIS HATÁSTÓL
A BOLYGÓSZINTŰ VÁLSÁGIG

SZERZŐK



ALLATRA Nemzetközi Társadalmi Mozgalom

INTÉZMÉNYI ÁTTEKINTÉS Akadémiai együttműködés



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

„San Pablo” Bolíviai Katolikus Egyetem – UCB
Környezetmérnöki és Kutatási Kar



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Juan Misael Saracho Autonóm Egyetem – UAJMS Kutatási
Tudományos és Technológiai Osztály

TUDOMÁNYOS PARTNER



**CREATIVE
SOCIETY**

Nemzetközi projekt - Alkotó társadalom

TARTALOM

Összefoglaló.....	5
A műanyag hulladékok következményei: mikro- és nanoműanyag (MNM) mint a globális válság új tényezője.....	7
A műanyag hulladékok globális termelésének mennyiségi becslései és tendenciái.....	7
A Csendes-óceáni szemétkontinens.....	12
A műanyag mikro- és nanorészecskék kialakulásának folyamatai.....	12
Az MNM terjedése a környezetben.....	18
A mikro- és nanoműanyag szennyezésének ökológiai és éghajlati következményei.....	23
Hogyan rombolja az MNM az ökoszisztémákat molekuláris szinten.....	23
Az MNM hatása az éghajlatra.....	46
A mikro- és nanoműanyag hatása az emberi egészségre.....	71
Az MNM mint a XXI. század járványok kialakulásának új kockázati tényezője.....	71
Az MNM toxicitásának molekuláris mechanizmusai. DNS-, mitokondrium- és sejtmembrán-károsodás....	72
Az MNM szerepe a korai öregedés és az onkogenezis mechanizmusában.....	84
A hormonális rendszer destabilizálódása az MNM hatására.....	87
A nanoműanyag elektrosztatikus töltése mint kulcsfontosságú tényező a szervezetre gyakorolt fokozott toxicitásában.....	93
Az MNM rendszerszintű hatása az emberi szervekre és funkcionális rendszerekre.....	100
A légzőrendszer károsodásának mechanizmusai az MNM belélegzése esetén.....	101
Az MNM neurotoxikus hatása. A központi és perifériás idegrendszer károsodása.....	102
Az MNM szerepe a szív- és érrendszeri betegségek patogenezisében.....	114
Az MNM által okozott gyomor-bélrendszer működési zavarok.....	116
Az MNM hatása az immunrendszerre.....	117
Az MNM onkogén hatása. A mutációk és a metasztázisok kialakulásának mechanizmusai.....	120
Az MNM hatása a kalciumcserére és a csontok szerkezetére.....	121
Az MNM hatásával összefüggő reproduktív rendellenességek. Meddőség és merevedési zavarok.....	122
Az MNM placentáris gáton való átjutása és hatása a fejlődő szervezetre.....	126
Az MNM hatásának következményei és összefüggése a veleszületett rendellenességekkel.....	130
Következtetések és kilátások. Lehetséges-e csökkenteni az MNM hatását az emberi egészségre?.....	133
A műanyag hulladékok minimalizálására irányuló modern megközelítések elemzése.....	134
A nagy méretű műanyagok vízi ökoszisztémákból való eltávolítására szolgáló technológiák.....	134
A mikro- és nanoműanyag eltávolítására szolgáló jelenlegi módszerek.....	139
Az ALLATRA tudományos közösség megközelítései a mikro- és nanoműanyag járványának leküzdésére.....	142
A légköri vízgenerátorok (LVG) technológiái az óceán MNM-től való megtisztítására.....	142
Innovatív tudományos megközelítés a mikro- és nanoműanyag toxicitásának csökkentésére.....	148
X-tényező. A mikro- és nanoműanyag hatása a természeti katasztrófák ciklusának dinamikájára.....	151
Következtetések. A nanoműanyag – egy kihívás, amelyet nem lehet figyelmen kívül hagyni.....	171
Források.....	173

ÖSSZEFOGLALÓ

„Ha a Föld naplót vezetne, az elmúlt évszázadról fekete tintával írná: „A műanyag korszak”. A mikroszkopikus részecskéktől, amelyek behatolnak az élő szervezetek sejtjeibe, a hatalmas szemétszigetekig az óceánban – a műanyag a geológiai krónika elválaszthatatlan részévé vált. De milyen áron?

Évente több mint 400 millió tonna műanyag hulladék keletkezik a világon, amelyből körülbelül 11 millió tonna kerül a világóceánba. Az óceánban már több mint 200 millió tonna műanyag halmozódott fel. A felszíni vizek mintáinak elemzése kimutatta, hogy a műanyag tömege hatszorosa a zooplankton tömegének. Az előrejelzések szerint 2050-re a műanyag tömege meghaladja a halak tömegét az óceánban.

A műanyag több száz vagy akár több ezer év alatt bomlik le, de a hullámok, a sós víz és az UV-sugárzás hatására apró részecskékre – mikro- és nanoműanyagra – oszlik. Ezeket a tengeri levegő és a csapadék több ezer kilométerre szállítja, országokat, kontinenseket és óceánokat átkelve, felhalmozódnak az erdőkben, és jelen vannak az élelmiszerekben és a vízben. A mikroműanyag még a bolygó távoli zugaiba is eljutottak, például a Mariana-árokba és az Everest csúcsára.

Ez a jelentés mélyreható elemző értékelést ad a műanyag hulladékok környezetre, az emberi egészségre és a társadalom létfontosságú rendszereinek fenntarthatóságára gyakorolt hatásáról. A jelentés a statikus töltéssel rendelkező és mérgező vegyi anyagokat tartalmazó mikro- és nanoműanyag ökoszisztémákra gyakorolt hatását vizsgálja. Különös hangsúlyt fektetnek annak szerepére az óceán savasodásában, az élelmiszerláncok destabilizálásában és a biológiai sokféleségre jelentett fenyegetésben. A jelentés felveti azt a hipotézist, hogy a mikro- és nanoműanyag hatással vannak a víz tulajdonságainak megváltozására, ami az óceán gyorsabb felmelegedéséhez és a természeti katasztrófák súlyosbodásához vezet.

A jelentés egyik legaktualitásosabb és legaggasztóbb problémája a mikro- és nanoműanyag (MNM) emberi egészségre gyakorolt hatása. A műanyag részecskék kis méretüknek köszönhetően képesek áthatolni a biológiai gáton, oxidatív stresszt, DNS-károsodást, gyulladásos reakciókat és sejtfunkciók zavarait okozva. Különös figyelmet fordítanak az MNM hatása és a neurodegeneratív és neuropszichiátriai betegségek előfordulásának növekedése közötti lehetséges összefüggésre. A jelentés rámutat, hogy az MNM hatása a fejlődő szervezetre a prenatális és posztnatális időszakban kognitív funkciók és mentális egészség zavaraihoz vezet, ami komoly problémát jelent az emberiség jövője szempontjából.

A mikro- és nanoműanyag hatásának következtében kialakuló betegségek számának növekedése már ma is jelentősen rontja a lakosság életminőségét, különösen a magas műanyag hulladék-szenyezettségű régiókban.

A jelentés megjelöli azokat a régiókat, amelyek már most is fokozott veszélynek vannak kitéve, valamint azokat, amelyek egyelőre viszonylag biztonságosak. A helyzet súlyosbodása, valamint a hatások elleni hatékony védelmi módszerek hiánya arra kényszerítheti az embereket, hogy elhagyják a szennyezett területeket, és biztonságosabb életkörülményeket keressenek. Ez megteremti az ellenőrizhetetlen tömeges migráció feltételeit, ami viszont fokozhatja a társadalmi feszültségeket, növelheti a városi infrastruktúrák terhelését és destabilizálhatja a gazdaságot.

Így a műanyag hulladékok okozta környezeti probléma fokozatosan makrogazdasági és geopolitikai problémává fog válni.

A jelentés a mikroműanyag problémájának megoldásának fontosságára hívja fel a figyelmet, új nézőpontot kínálva azok elterjedésére, hatására és következményeire vonatkozóan. A munka egyedisége az interdiszciplináris megközelítésben rejlik, amely egyesíti a műanyag hulladék fizikai, kémiai és biológiai aspektusaira vonatkozó adatokat. Ez teszi a jelentést aktuálissá a kutatók és tudósok széles körének, akik érdeklődnek a fenntartható megoldások kidolgozása iránt az emberiség és a bolygó biztonságos jövője érdekében.

A MŰANYAG SZENNYEZÉS KÖVETKEZMÉNYEI: A MIKRO- ÉS NANOMŰANYAG (MNM) MINT A GLOBÁLIS VÁLSÁG ÚJ TÉNYEZŐJE

A műanyag a modern élet elválaszthatatlan részévé vált. Csomagolás, edények, ruhák, cipők, higiéniai cikkek, orvosi eszközök, közlekedési és kommunikációs eszközök – az embert körülvevő tárgyak többsége műanyagból készül. A műanyag azonban nem csak nagy tárgyak formájában létezik, hanem mikroszkopikus részecskék formájában is, amelyek ezekből a termékekből válnak ki – mikro- és nanoműanyagok. A mikroműanyag 5 mm-nél kisebb méretű műanyag részecskék, amelyek szabad szemmel is láthatók. A nanoműanyagok ezzel szemben 1 mikrométernél (a méter egymilliomod részénél) kisebbek, ezért a legtöbb ilyen részecske még hagyományos mikroszkóppal sem látható.

A műanyagok sokféle típusban léteznek, de mindegyikük polimereken alapul – természetes vagy szintetikus vegyületeken, amelyek nagy, egymással összekapcsolt molekulákból állnak. Egyedülálló kémiai tulajdonságaiknak köszönhetően a polimerek rendkívül tartósak és ellenállóak.

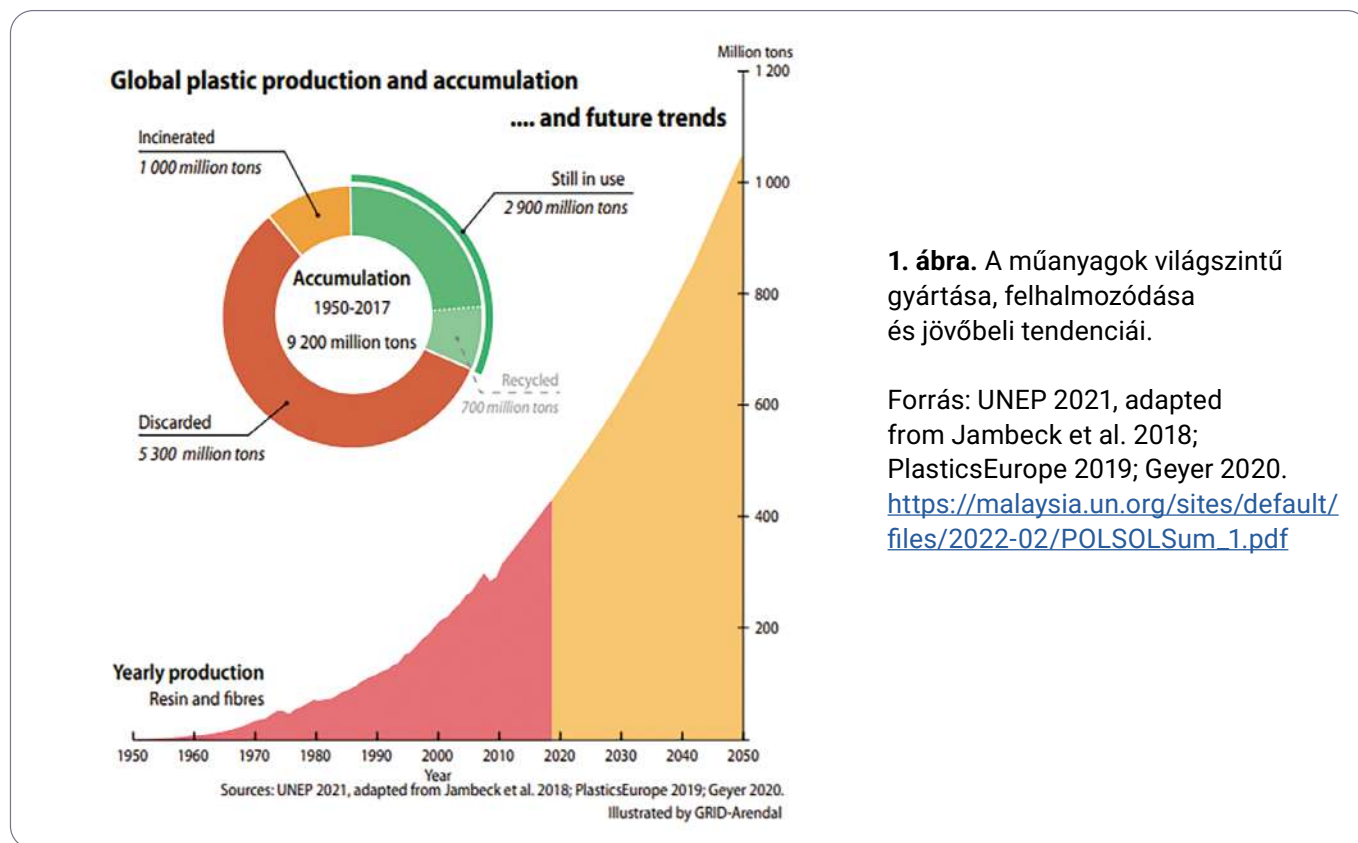
Így, a műanyag, szilárdsága, sokoldalúsága és alacsony önköltsége miatt, a tömegtermelés fő anyagává vált, beleértve az egyszer használatos tárgyakat is.¹ A műanyag hulladékok helytelen kezelése azonban a műanyagot a világ legnagyobb mennyiségű környezetszennyezőjévé tette.

A műanyag hulladék globális termelésének mennyiségi becslései és tendenciái

Az 1950-es évek óta világszerte körülbelül 9,2 milliárd tonna műanyagot gyártottak. Ebből jelenleg 2,9 milliárd tonna van használatban, beleértve 2,7 milliárd tonna elsődleges műanyagot és körülbelül 0,2 milliárd tonna újrahasznosított anyagot. 5,3 milliárd tonna hulladéklerakókba került, 1 milliárd tonna pedig elégetésre került. Ismert továbbá, hogy 1,75–2,5 milliárd tonna „nem megfelelően kezelt” hulladéknak minősül, ami azt jelenti, hogy ellenőrizetlenül kerülhet a környezetbe (1. ábra).

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

A mai napig körülbelül 640 millió tonna további vegyszert adtak a műanyag termékekhez.² Az UNEP adatai szerint³ évente több mint 400 millió tonna műanyag hulladék keletkezik világszerte.



1. ábra. A műanyagok világszintű gyártása, felhalmozódása és jövőbeli tendenciái.

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

A műanyag hulladékok mindössze körülbelül 9%-át újrahasznosítják, 19%-át égetik el, a többi pedig a környezetben marad, beleértve a hulladéklerakókat és az óceánokat is⁴ (2. ábra).

Hulladékkezelési módszerek aránya	Világszerte, 2023
Újrahasznosítás	9%
Égetés	19%
Nem megfelelő hulladékkezelés	22%
Hulladéklerakás	49%

2. ábra. Éves műanyag hulladékok az ártalmatlanítási módszer szerint, 2000–2023.
Forrás: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Minden évben körülbelül 11 millió tonna műanyag kerül a világ óceánjaiba.⁵ Ez megfelel több mint egy személy szállító autónak, amely percenként műanyagot dob az óceánba.

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>

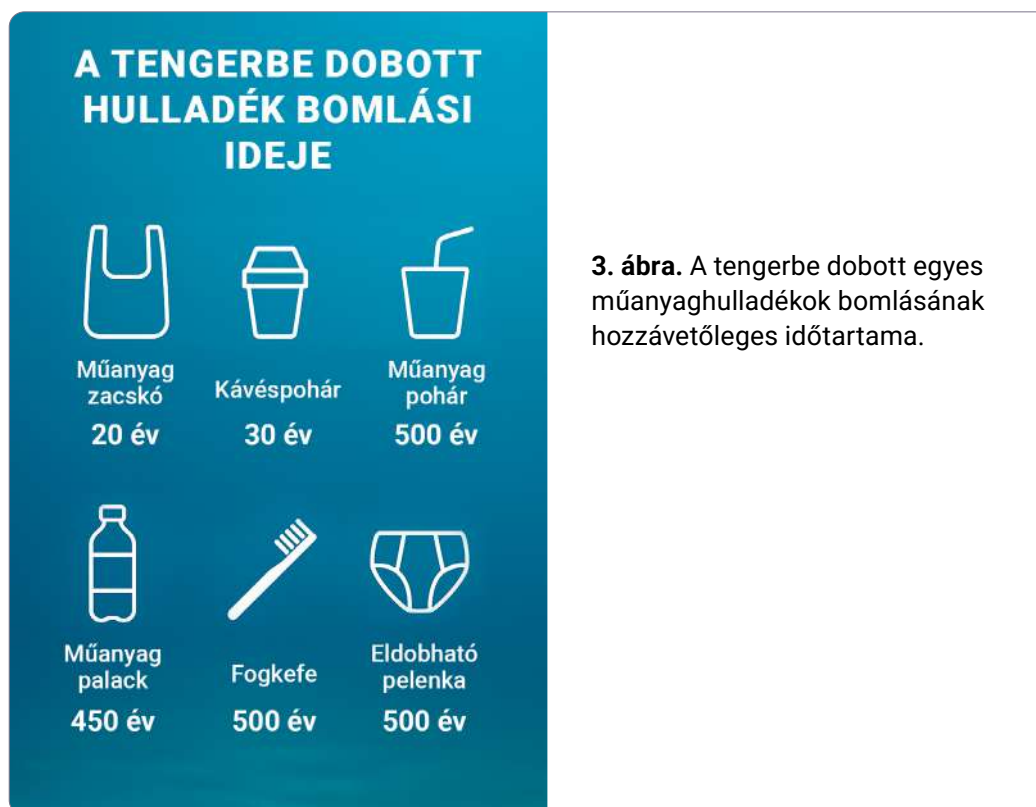
⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jelenleg az óceánokban már több mint 200 millió tonna nagy méretű műanyag hulladék és 35 540 tonna mikroműanyag halmozódott fel.⁶ A szárazföldi forrásokból a környezetbe kerülő műanyag hulladékok éves mennyiségét különböző módszerekkel becsülik, az alkalmazott elemzési módszerektől függően. Normál forgatókönyv esetén és a szükséges intézkedések hiányában a vízi ökoszisztémákba kerülő műanyag hulladék mennyisége csaknem megháromszorozódhat: a 2016-os évi 9–14 millió tonnáról 2040-re 23–37 millió tonnára nőhet.

Egy másik elemzési módszer szerint a hulladék mennyisége több mint kétszeresére nőhet: körülbelül 19–23 millió tonnáról 2016-ban 53 millió tonnára 2030-ra.⁷

A kutatások szerint, ha a jelenlegi tendenciák megmaradnak, 2050-re az óceánban körülbelül 12 000 millió tonna műanyag lesz,⁸ ami tömegét tekintve összehasonlítható az óceánban élő halak teljes tömegével (körülbelül 10 000 millió tonna).⁹

A műanyag típusától függően 100-1000 év alatt bomlik le (3. ábra). Az óceánban a műanyag sokkal lassabban bomlik, és a sötét és hideg tengeri mélységekben a bomlás sebessége még tovább csökken.¹⁰



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>

⁹Irigoin, 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>

A megégett anyagok kivételével minden hagyományos műanyag, amely valaha a környezetbe került, még mindig bomlatlanul marad, akár egész termékek, akár töredékek formájában.¹¹ Ez a hulladék gyakorlatilag sehova sem tűnik el, hanem tovább halmozódik. Hasonló helyzetet lehet elképzelni egy szemétkonténerrel, amelybe folyamatosan hulladékot dobnak, de soha nem viszik el. A kérdés, hogy mi történik egy ilyen konténerrel egy hónap múlva, jól illusztrálja a globális műanyag hulladék-felhalmozódás problémájának mértékét.

A Nagy Csendes-óceáni szemétkontinens

A vízben és a víz felszínén található műanyag hulladékot az óceáni áramlatok elragadják, az óceán középső régióiba szállítják, és ott hatalmas halmazokat, úgynevezett „szigeteket” képeznek.

A „Nagy Csendes-óceáni szemétkontinens” a bolygó legnagyobb műanyag hulladék-koncentrációját jelenti, amely folyamatos növekedést mutat (4. ábra). A szemétkontinens Észak-Amerika és Japán között húzódó hatalmas területet fed le. Megfigyelések szerint 2018-ban területe körülbelül 1,6 millió négyzetkilométer volt,¹² bár ez az érték változhat az óceáni áramlatok és az évszakok változékonysága miatt.



4. ábra. A csendes-óceáni szemétsziget kialakulásának sematikus ábrázolása

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>

A kutatások szerint a szemétszigetek tartalmának akár 80 %-át¹³ a műanyag hulladékok teszik ki.¹⁴ A szemétsziget legalább 80 000 tonna hulladékot tartalmaz.¹⁵ Ez azonban csak a probléma látható része. Az óceánba kerülő műanyagok akár 94 %-a a tengerfenéken köt ki.¹⁶ Pontosan ott rejtőzhet és halmozódhat fel jelentős mennyiségű hulladék.

A Csendes-óceáni szemétsziget pontos mérete ismeretlen marad, mivel az észak-csendes-óceáni szubtrópusi körforgás túl nagy ahhoz, hogy a jelenlegi technológiai lehetőségek mellett átfogó tudományos kutatás tárgyát képezze.

A műanyagok felhalmozódásának dinamikája az óceánban

A műszeres mérések a Nagy szemétsziget térfogatának exponenciális növekedését mutatják. 2015 és 2022 között az átlagos műanyag hulladék-tömeg ötszörösére nőtt ebben a térségben.¹⁷ Különösen aggasztó az a tény, hogy ugyanebben az időszakban a kis műanyagdarabok mennyisége tízszeresére nőtt, ami a nagy műanyag tárgyak intenzív fragmentációs folyamatát jelzi.

A Nagy szemétsziget gyakorlatilag bolygónk hetedik „kontinensét” képezi. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez a jelenség nem egyedülálló. Jelenleg a tudományos közösség 5 nagy szemétszigetet azonosított a világtengereken¹⁸: kettőt az Atlanti-óceánban, kettőt a Csendes-óceánban és egyet az Indiai-óceánban¹⁹ (5. ábra).

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>

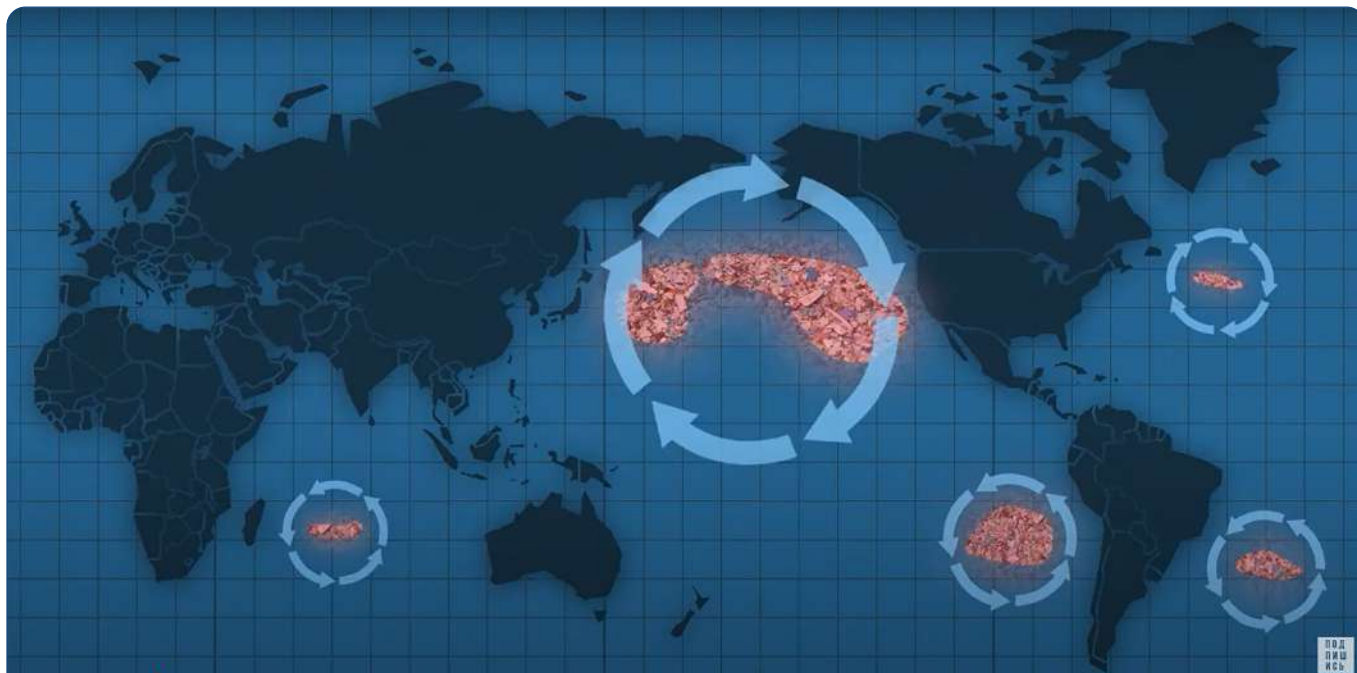
¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

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>



5. ábra. Az öt nagy szemétsziget sematikus ábrázolása a világtengeren: kettő az Atlanti-óceánban, kettő a Csendes-óceánban és egy az Indiai-óceánban. Az óceánokban több millió tonna műanyag és más, ember által előállított hulladék kering. A szemétszigetek katasztrofális ütemben növekednek.

A műanyag mikro- és nanorészecskék képződésének folyamatai

A műanyag hulladék nagyon ellenálló a biológiai lebomlással szemben, de a hullámok, a sós víz és a nap sugárzásának hatására apró részecskékre bomlik – mikro- és nanoműanyagra,²⁰ amelyek szabad szemmel nem láthatók. Ezek a részecskék megőrzik polimer szerkezetüket,²¹ és a bomlási folyamat egészen a nanoméretig folytatódik (6–7. ábra). Ennek eredményeként a műanyag hulladékok a bolygó ökoszisztémájának állandó részévé válnak.

Ezenkívül a mikro- és nanoműanyagok veszélyes vegyi anyagokat tartalmaznak, amelyeket a műanyag gyártási folyamatában adnak hozzá.

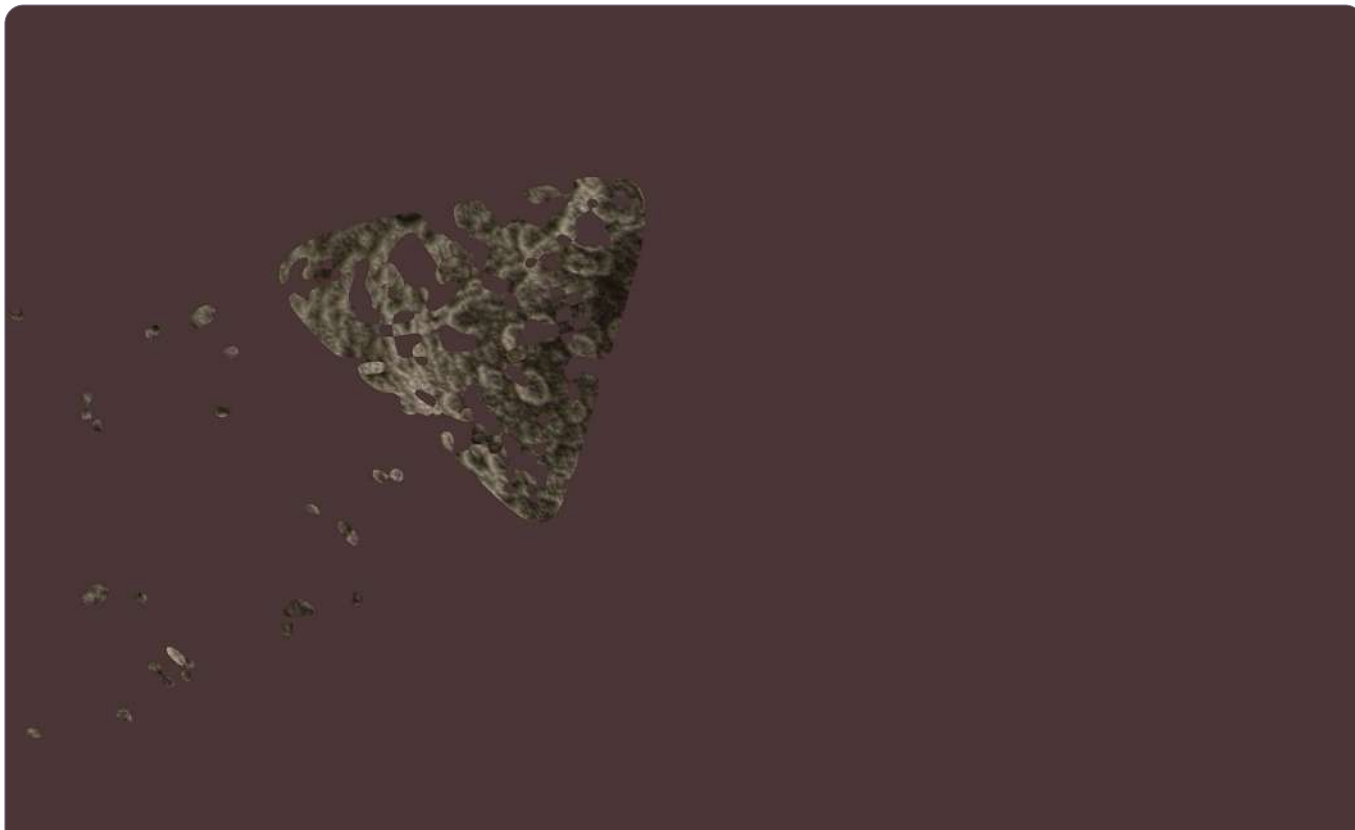


„A műanyag körülbelül 16 000 vegyi anyagot tartalmaz. Ismert, hogy több mint 4200 közülük környezetben stabil, felhalmozódik az élő szervezetekben, nagy távolságokra terjed, vagy potenciális veszélyt jelent” – mondja Annika Jahnke, író és környezetkémikus a Helmholtz Környezetkutató Központban.²²

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>

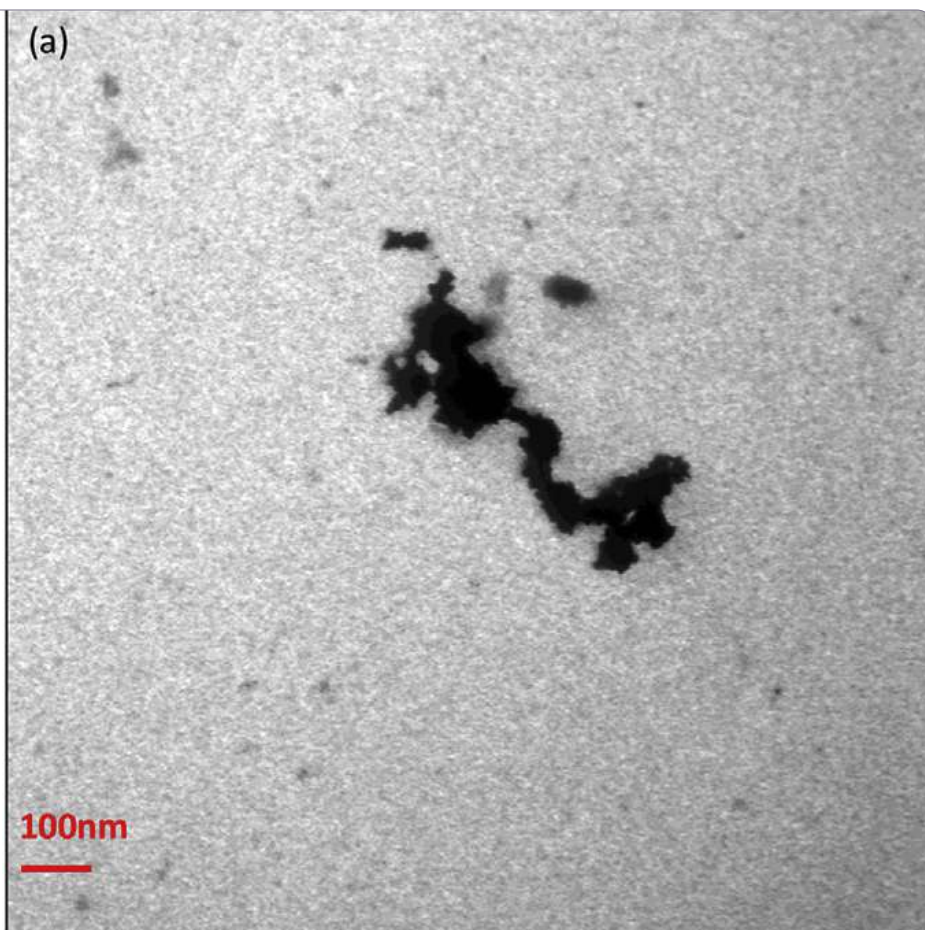
²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



6. ábra. A műanyag részecskék nanoméretűre történő fragmentálásának folyamatának sematikus ábrázolása a polimer szerkezet megőrzésével.

7. ábra. Átlátszó elektronmikroszkópos felvétel a környezetben található polietilén nanoműanyagokról, amelyek az Atlanti-óceán északi részén gyűjtött, előregedett mikroműanyag részecskék UV-sugárzás hatására történő lebomlásával keletkeztek.

Forrás: 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>



Az MNM terjedése az óceánban

A műanyag legnagyobb koncentrációja a szemétszigetek területén figyelhető meg. Ezek az óceáni hulladéklerakók olyan gyárakként működnek, ahol folyamatosan mikro- és nanoműanyagok keletkeznek. Ahogyan a vírus a véráramon keresztül terjed a szervezetben, úgy a mikroműanyag is az óceáni áramlatok által terjed az egész világtengeren, ami hangsúlyozza a probléma globális méretét.

Annak ellenére, hogy a mikroműanyagok kimutatása technikai nehézségekbe ütközik, ami megnehezíti pontos mennyiségük meghatározását az óceánokban, elméleti számítások segítségével meg lehet becsülni a probléma mértékét.

Gyakorlatilag minden óceáni vízminta tartalmaz mikroműanyagot, és egyes régiókban annak koncentrációja tízszerese is lehet az átlagos szintnek.

Az óceáni áramlatok elősegítik a mikroműanyagok globális terjedését, még olyan távoli régiókban is, mint az Északi-sarkvidék. A jégmagok vizsgálata kimutatta, hogy a mikroműanyag-szennyezés szintje az Északi-sarkvidéken 100-szor magasabb, mint az Atlanti-óceánban, Skócia északi részén, vagy az Észak-Csendes-óceán szubtrópusi áramlatában.²³ Ez a probléma mértékét és határokon átnyúló jellegét bizonyítja.

A tengeri környezet műanyag hulladékkal való szennyeződésével foglalkozó globális kutatások többsége az óceán felszíni rétegére koncentrál. Becslések szerint 2019-ben 82–358 billió műanyag részecske volt az óceán felszíni rétegében.²⁴

Egyre több bizonyíték utal azonban arra, hogy a mélytengeri területeken és a tengerfenéken a mikroműanyag-részecskék száma meghaladja a számtalan billiót.²⁵

A könnyű műanyag a felszínen lebeg, míg a sűrűbb vagy az élővilággal benépesített műanyag a tengerfenékre süllyed.²⁶ A számítások szerint a városi hulladékokból származó műanyagok körülbelül 50 %-a sűrűbb a tengervíznél, ami elősegíti gyors süllyedését. A fenéken mélytengeri áramlatok terjesztik, és a csatornában és mélyedésekben halmozódik fel. Mikroműanyagot még az óceán legmélyebb pontján, a Mariana-árok fenekén is találtak²⁷ (8–9. ábra).

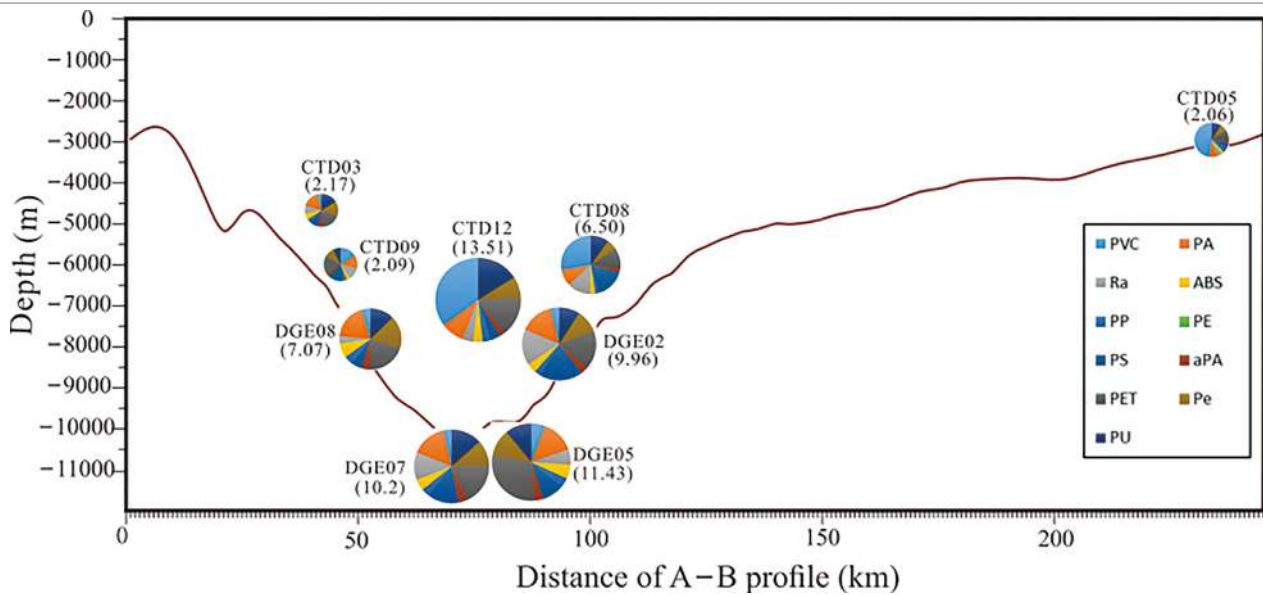
²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

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>

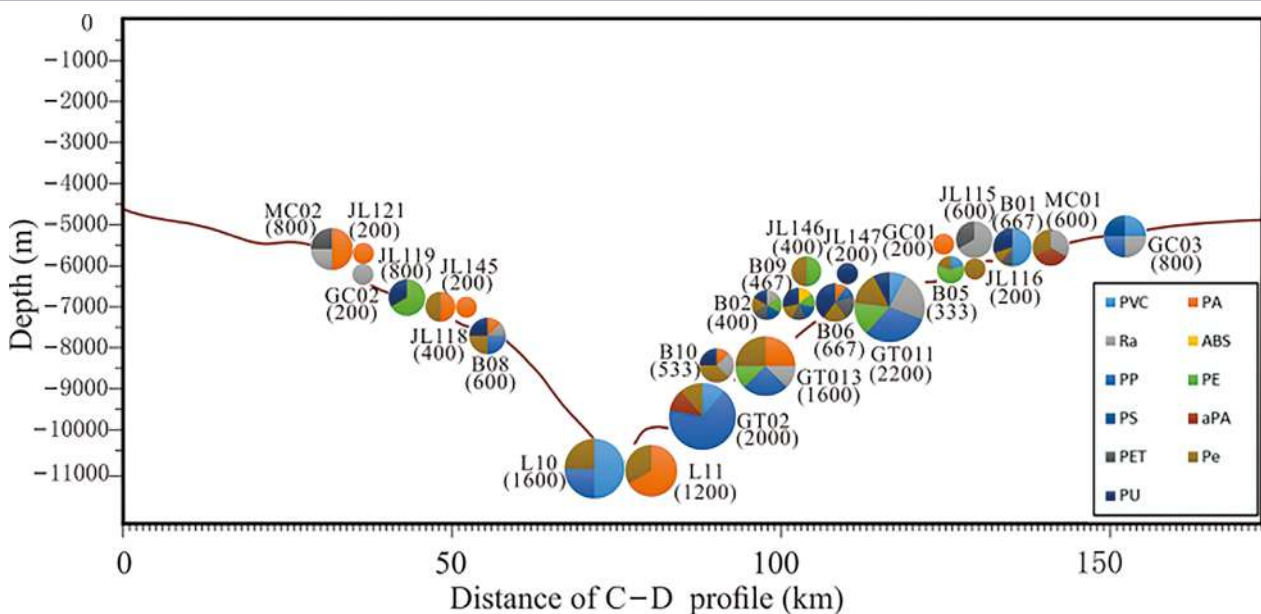
²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



8. ábra. A Mariana-árok vízmintáiban található mikroműanyagok mennyiségének és összetételének profilja. A kördiagramok a mikroműanyagok összetételét, a zárójelben szereplő számok pedig a mikroműanyagok mennyiségét literenkénti darabszámban mutatják. PVC – polivinil-klorid, PA – poliamid, Ra – viszkóz, ABS – akrilnitril-butadién-sztirol, PP – polipropilén, PE – polietilén, PS – polisztirol, aPA – aromás poliamid, PET – polietilén-tereftalát, Pe – poliészter, PU – poliuretán. Az X tengely az A pont (12 °N, 142,5 °E) és a B pont (9,8 °N, 141,43 °E) közötti keresztvonalnak felel meg.

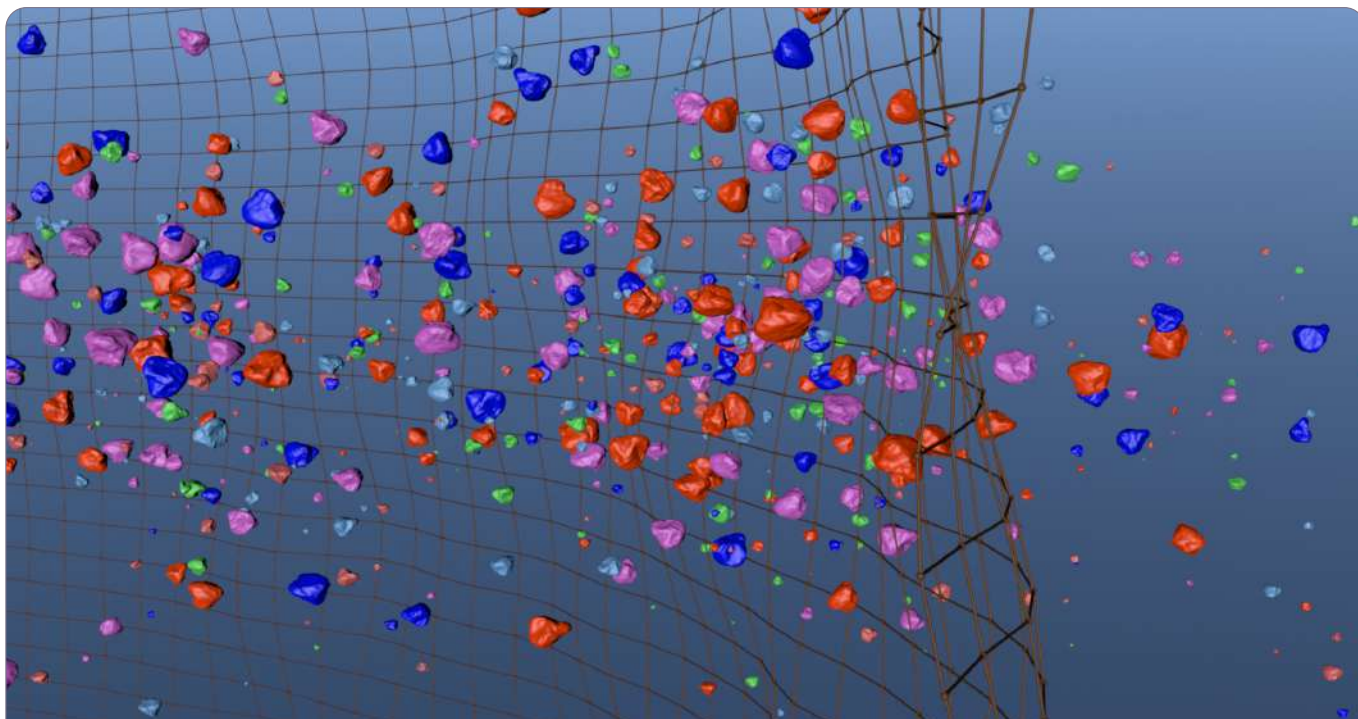
Forrás: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



9. ábra. A Mariana-árok üledékmintáiban található mikroműanyagok mennyiségének és összetételének profilja. A kördiagramok a mikroműanyagok összetételét, a zárójelben szereplő számok pedig a mikroműanyagok mennyiségét literenkénti darabszámban mutatják. PVC – polivinil-klorid, PA – poliamid, Ra – viszkóz, ABS – akrilnitril-butadién-sztirol, PP – polipropilén, PE – polietilén, PS – polisztirol, aPA – aromás poliamid, PET – polietilén-tereftalát, Pe – poliészter, PU – poliuretán. Az X tengely a C pont (12 °N, 141,9 °E) és a D pont (10,5 °N, 141,3 °E) közötti keresztvonalnak felel meg.

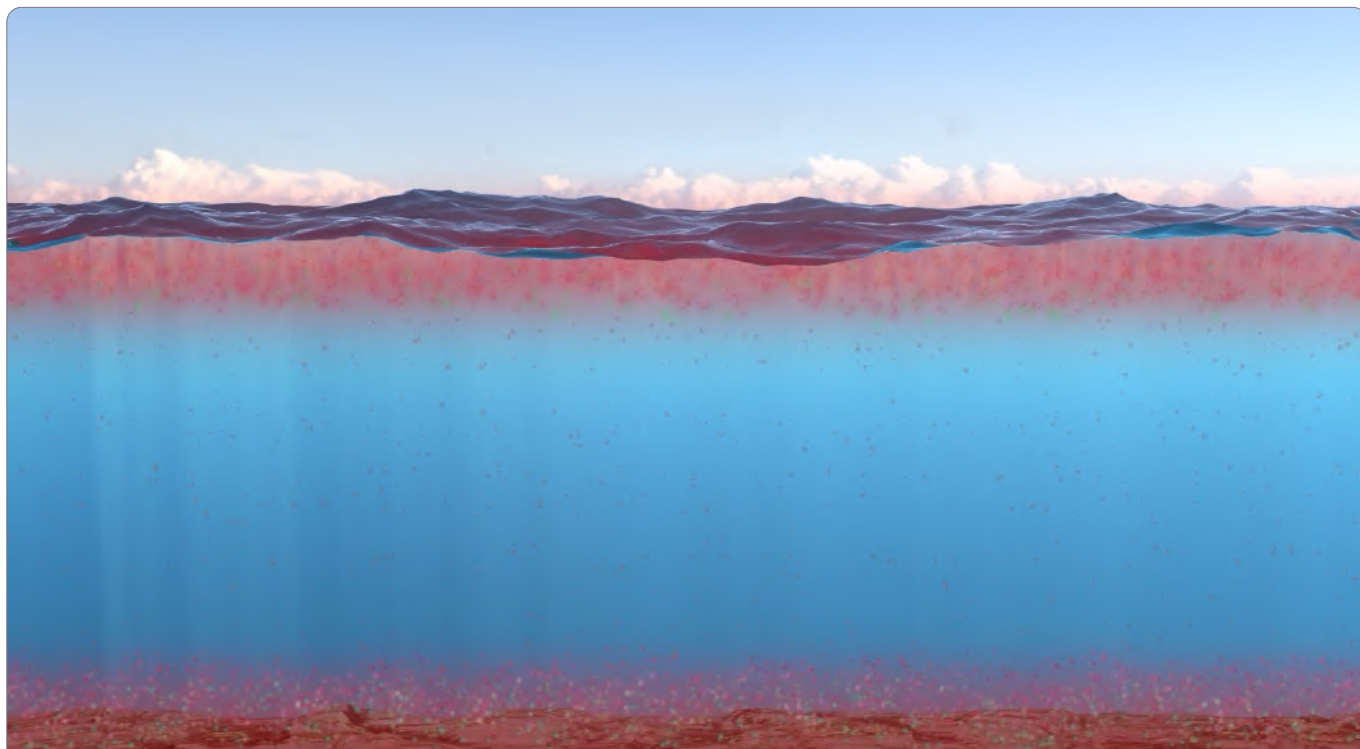
Forrás: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

A mikroműanyagok fő felhalmozódási helye valójában nem az óceán felszíne, hanem a mélytengeri fenék. Fokozatosan az egész óceánfenék műanyagréteggel borul. Az óceán mikroműanyag-szenyezettségére vonatkozó adatok azonban valószínűleg alulbecsültek, és a valós helyzet ennél jóval rosszabb lehet. „*Nem mindenki rendelkezik a mintavételhez szükséges bonyolult és drága eszközökkel*” – magyarázza Melanie Bergmann, a németországi Alfred Wegener Intézet biológusa. Becslései szerint a tengeri mikroműanyag-részecskék akár 90%-a is észrevétlen maradhat a standard mintavételi módszerek alkalmazása esetén, mivel méretük túl kicsi ahhoz, hogy kimutatható legyen²⁸ (10. ábra).

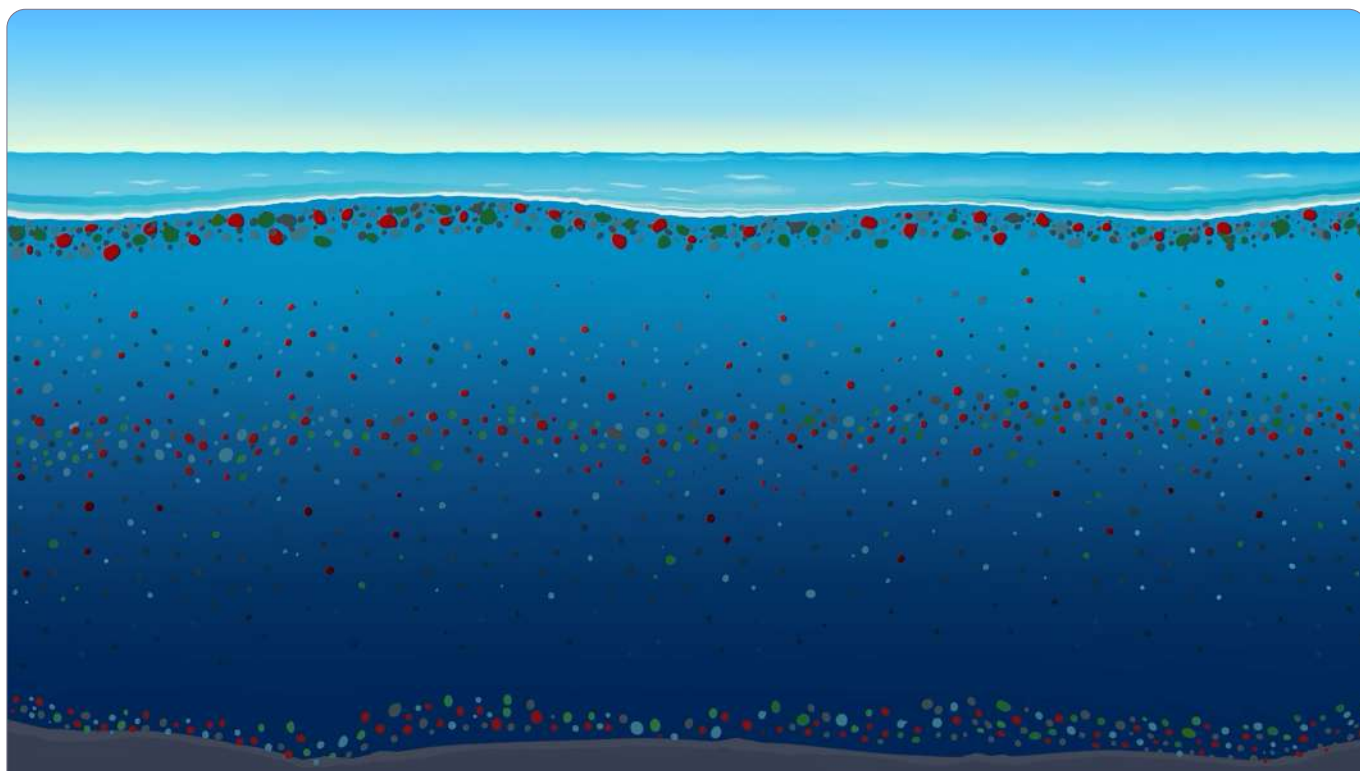


10. ábra. A mikro- és nanoműanyagok befogásának tökéletlen analitikai módszereinek sematikus ábrázolása

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>



11. ábra. A mikro- és nanoműanyaggal szennyezett felszíni és fenékrétegek sematikus ábrázolása

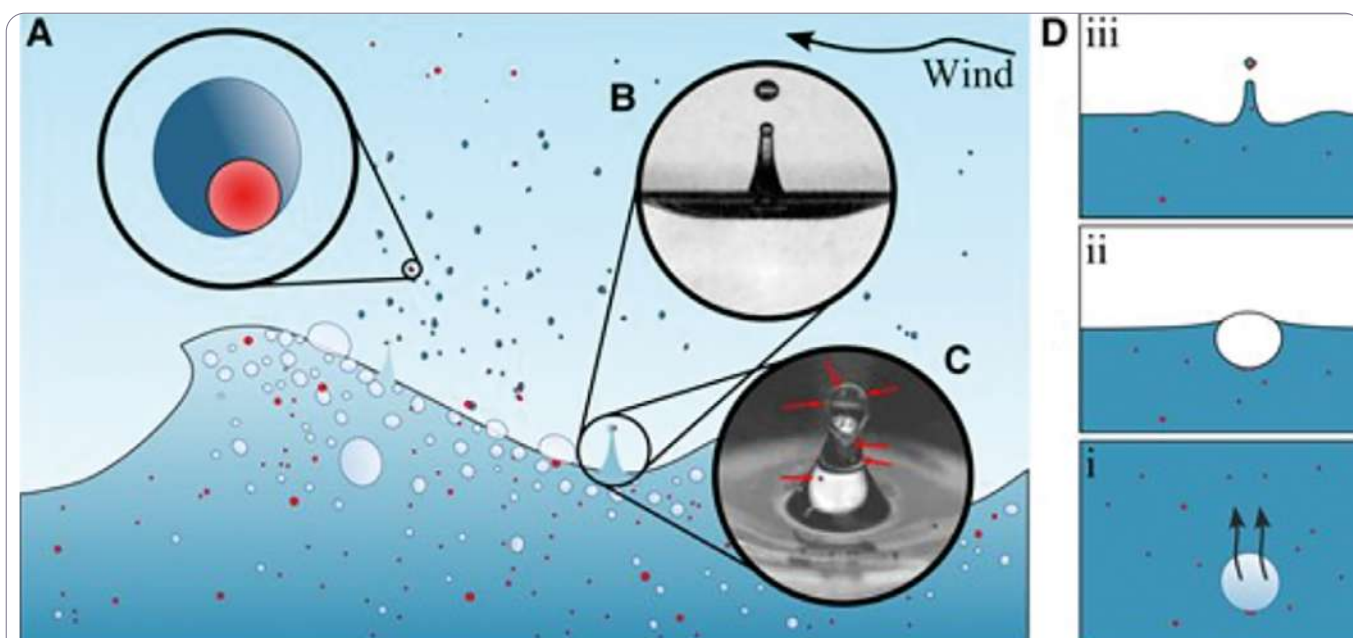


12. ábra. A mikro- és nanoműanyagok elhelyezkedésének sematikus ábrázolása a felszíni, fenékrétegekben és a termoklin zónában

A felszíni és fenékréteg szennyeződése mellett (11. ábra) a mikro- és nanoműanyag koncentrációja jelentősen megnő a termoklin területén (12. ábra),²⁹ azaz azon a víztömegrétegen, ahol hirtelen hőmérsékletváltozás figyelhető meg. A magas sűrűséggradiens ebben a rétegben hozzájárul ahhoz, hogy a mikro- és nanoműanyag részecskék ezekben a zónákban megrekedjenek és hosszú ideig ott maradjanak. Az óceánt réteges tortaként lehet elképzelni, ahol minden rétegnek egyedi hőmérséklete és sűrűsége van, és a mikroműanyag a rétegek közötti határokon halmozódik fel.

Ezenkívül, a mikroműanyag az óceánban élő szervezetek segítségével terjed, amelyek felszívják, megemésztik és kiválasztják.³⁰

Az MNM terjedése a környezetben



13. ábra. Az óceánból származó mikroműanyagok kibocsátásának folyamatai.

- A) Az óceánban található mikroműanyagok (piros/sötétebb szín) a tengervíz cseppjeivel kerülnek a légkörbe.
 B) A felrobbanó buborékok kis cseppeket vagy aeroszolókat hoznak létre, például sugárcseppeket.
 C) A folyadékban jelen lévő mikroműanyagok átjuthatnak a kialakuló sugárcseppekbe. A nyilak 100 µm méretű mikroműanyag részecskéket jelölnek. A kialakuló cseppeket a szél felkaphatja, és a mikroműanyag anyagot a légkörbe juttathatja. A folyadék végül elpárolog, és mikroműanyag részecskéket hagy maga után.
 D) A buborékok kipukkanásakor a mikroműanyag kibocsátásával kapcsolatos fizikai folyamatok a buborék emelkedése során a részecskék befogásával kezdődnek. Di). A felszín elérését követően Dii) a buborék végül egyensúlyi alakot ölt, amely a kipukkanás után a kapilláris hullámokat az alján összpontosítja, és Diii) cseppeket képez, amelyek a mikroműanyagot szállítják.

Forrás: 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>

Amikor a víz elpárolog,³¹ a mikroműanyag az óceán felszínéről a légkörbe emelkedik.³² Emellett a tengeri habok, a szél és a hullámok együttesen mikroműanyagot tartalmazó légbuborékokat képeznek a vízben. Amikor a buborékok felszakadnak, a részecskék a légkörbe kerülnek (13. ábra). Évente csak a partvidékeken a tengeri szél körülbelül 136 ezer tonna mikroműanyagot szállít.³³ A tengeri levegő, a hullámok, a hó és a köd pedig évente akár 25 millió tonna mikro- és nanoműanyagot szállít több ezer kilométerre, országokat, kontinenseket és óceánokat átívelve.



„A levegő sokkal dinamikusabb környezet, mint a víz. Ennek eredményeként a mikro- és nanoműanyagok sokkal gyorsabban juthatnak el bolygónk legeldugottabb és eddig nagyrészt érintetlen régióiba” – mondja Dr. Melanie Bergmann, a németországi Alfred Wegener Intézet biológusa. Miután oda kerültek, a részecskék befolyásolhatják a felszíni éghajlatot és a helyi ökoszisztémák egészségét.³⁴

A mikroműanyagok különböző helyeken kerültek elő, a tenger felszínétől a mélytengeri üledékekig, a mezőgazdasági területektől a legmagasabb hegyeinkig, valamint a tengeri jégben, tavakban és folyókban is. 1300 vízi és szárazföldi fajban találták meg, a tápláléklánc alján álló gerinctelenektől a legfőbb ragadozóig, és bizonyítékok vannak arra, hogy minden biológiai szerveződési szinten, a sejt szintjétől az ökoszisztéma szintjéig hatással van rájuk. A mikroműanyagok széles körben elterjedtek az ételekben, amelyeket eszünk, a vízben, amelyet iszunk, és a levegőben, amelyet belélegzünk (14. ábra). Számos emberi testszövetben és szervben kimutatták, és egyre több bizonyíték van a negatív hatására.³⁵



14. ábra. A mikroműanyagok széles körű jelenléte az élelmiszerekben, a vízben és a levegőben.

Forrás: <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, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Így, a távoli és akár sarkvidéki régiókba való eljutás az atmoszférikus és tengeri transzfer kombinációjának eredménye lehet. Ezért fontos megérteni az atmoszféra és az óceán közötti kölcsönhatást, hogy meg lehessen határozni, milyen méretű részecskék kerülnek átvitelre és milyen mennyiségben.

Például, egy kutatócsoport nemrégiben hidrofíl (vízvonzó) felületű műanyag szemcséket talált a japán hegycsúcsok felhőiben.³⁶ Ezután elemezték a mintákat, és arra a következtetésre jutottak, hogy az alacsony magasságú és sűrűbb felhők nagyobb mennyiségű mikroműanyagot tartalmaznak. A polimerek jelenléte kondenzációs magként kulcsszerepet játszik a felhők gyors kialakulásában, ami végső soron hatással lehet az általános éghajlatra.³⁶

A felhőkben található műanyagrészecskék több víz visszatartását segítik elő, ami késlelteti az esőzéseket. Amikor, pedig, elkezdenek esni az esőzések, azok erősebbek lesznek, mivel a felhőkben több víz halmozódik fel. Ezenkívül, az UV-fénynek és a felhőkből kiszűrt víznek kitett mikroműanyagok felülete érdekesebb, ami elősegíti az ólom, higany és oxigéntartalmú csoportok felhalmozódását a felületén.³⁷

A légkör főként apró mikroműanyag-részecskéket szállít, ami sokkal gyorsabb szállítási módot jelent, és az ökoszisztémák széles körében jelentős lerakódásokhoz vezethet. A kutatási adatok azt mutatják, hogy az erdők gátat képeznek a széllel szállított mikroműanyagok számára. A levelek, ágak és fatörzsek visszatartják a mikroműanyagokat, amelyek leülepednek a felületükön. Ez azt eredményezi, hogy a szél és a csapadék által szállított mikroműanyag-részecskék a növényeken maradnak vagy a földre hullnak.

A sűrű erdő lombkorona alatt korlátozott szellőzés elősegíti ezeknek a részecskéknek a tartós felhalmozódását az erdőterületeken. A lombkorona levelei hosszú távú tárolóhelyként szolgálnak a levegőben szállított mikroműanyagok számára.³⁸ Kutatások kimutatták, hogy 2017 őszétől 2019 nyaráig 11 természeti parkban és rezervátumban az Egyesült Államok nyugati részén több mint 1000 tonna műanyag részecske hullott le a csapadékkal együtt. Ez a mennyiség elegendő 120 millió műanyag palack gyártásához.³⁹ Hasonló helyzet figyelhető meg a világ más régióiban is. Például, a japán fűrészes tölgy (*Quercus serrata*) erdők, amelyek területe körülbelül 32 500 km², évente körülbelül 420 billió léghő szállított mikroműanyag részecskét fogják meg lombjaikban.⁴⁰

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>

Az erdőktől eltérően a városokban, a jó szellőzésnek és a gépjárművek kipufogógázából és az ipari szmogból származó nehezebb részecskéknak köszönhetően, a mikro- és nanoműanyagok egy része leülepszik. Ma az erdők levegője több nanoműanyaggal telített, mint a nagyvárosoké.

A világ megváltozott! És most, amikor az emberek az óceánban fürdenek, a tengerparton napoznak, vagy a part mentén vagy a parkban futnak, az erdőben sétálnak az egészségük javítása érdekében, éppen ellenkezőleg, szervezetüket további mikroműanyag-hatásnak teszik ki. Afrikából és Észak-Amerikából származó mikroműanyagokat találtak távoli és látszólag érintetlen helyeken, például a francia Pireneusokban. Ez a mikroműanyagok globális elterjedtségét bizonyítja, amelyek a légáramlatokkal és a csapadékkal hatalmas távolságokat tesznek meg.

A mikro- és nanoműanyagok a csapadékvíz-elvezető rendszereken, ipari kibocsátásokon és az atmoszférából részecskéket felvevő esővízen keresztül kerülnek a városi víztározókba. Például, egy szintetikus szövetek mosásával akár 1,5 millió mikroműanyag részecske⁴¹ is bekerülhet a szennyvízbe. Ezek a részecskék a szennyvízbe kerülve aztán a folyókba és óceánokba jutnak, ahol halak és más vízi szervezetek lenyelik őket. A folyókban és a környező tájban talált hulladékok elemzésével a kutatók kiszámították, hogy összesen 10 folyórendszer szállítja a folyókból az óceánba kerülő műanyagok 88–95%-át.⁴²

Egy másik tanulmány során a tudósok felülvizsgálták a műanyagok folyókban történő szállításáról szóló általánosan elfogadott feltételezéseket, és arra a következtetésre jutottak, hogy a folyókban található műanyag hulladékok tényleges mennyisége 90 %-kal nagyobb lehet, mint korábban feltételezték.⁴³

A műanyag a világ legtöbb nagy tavában is jelen van. A műanyag hulladékok sűrűsége a tavakban még a legnagyobb óceáni hulladékfoltoknál is magasabb lehet, és még az érintetlen területeken található tavak is jelentős mennyiségű hulladékot tartalmaznak. Ezt egy nagy nemzetközi kutatás is megerősítette, amelyet Barbara Leoni és Veronica Nava vezetett a Milánói Bicocca Egyetemen.⁴⁴

Az ENSZ Környezetvédelmi Programjának (UNEP) 2021-es jelentése szerint mikroműanyagokat találtak az összes vizsgált édesvízi víztározóban, beleértve a folyókat, tavakat és víztározókat.⁴⁵ A kutatók például azt találták, hogy évente közel 10 000 tonna, vagyis 22 millió font műanyag hulladék kerül az Egyesült Államokból és Kanadából a Nagy-tavakba.⁴⁶

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>

Végül, a mikroműanyagok halak vagy tengeri termékek formájában kerülnek vissza az emberhez.

Olasz tudósok felfedezték, hogy a gyümölcsök és zöldségek is több millió mikroműanyag-részecskét tartalmaznak. Ezeknek a részecskéknek a legnagyobb koncentrációját almákban, körteben, sárgarépában, burgonyában, salátában és brokkoliban találták. Ugyanakkor a gyümölcsökben a részecskék koncentrációja 2-3-szor magasabb volt, mint a zöldségekben: 52 ezer részecske grammonként a salátában és 223 ezer az almában.⁴⁷

A kutatás során kiderült, hogy a világszerte vett 159 csapvízmintából 81% tartalmaz mikroműanyagot.⁴⁸ Más kutatások is megerősítik ezeket a következtetéseket, és az ásványvízben is megfigyelték a mikroműanyag részecskék jelenlétét. Érdekes, hogy a részecskék száma körülbelül azonos volt az üveg- és a polietilén-tereftalát (PET) palackokban, és elérte a 6292 részecskét literenként.^{49, 50, 51}

A Newcastle-i Egyetem (Ausztrália) tudósai kutatást végeztek,⁵² hogy felmérjék, mennyi műanyagot fogyaszt átlagosan egy modern ember. Az eredmények azt mutatták, hogy egy ember évente körülbelül 250 g műanyagot fogyaszt, ami 50 műanyag zacskónak felel meg.⁵³

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>

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/news/2019/06/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>

A MIKRO- ÉS NANOMŰANYAGOK SZENNYEZÉSÉNEK ÖKOLÓGIAI ÉS ÉGHAJLATI KÖVETKEZMÉNYEI

Hogyan zavarják meg az MNM-k az ökoszisztémákat molekuláris szinten?

A műanyag hulladékok mindenütt jelen vannak: az óceánokban és folyókban, a talajban, a levegőben és még a gleccserekben is.⁵⁴ Hosszú távú megfigyelések igazolják, hogy a műanyag, ellentétben a növényi és állati anyagokkal, nem bomlik le természetes úton. A környezetben megmarad, és nem vesz részt a természetes biológiai lebomlási ciklusokban.⁵⁵ A bomlási folyamatoknak ellenállni képes műanyag a globális ökoszisztéma állandó elemévé vált. Ez a tartósság, amelyet eredetileg technológiai sikerként tartottak számon, ma már jelentős ökológiai egyensúlyhiányhoz vezet.

A műanyagok gyártásában több mint 13 000 vegyi anyagot használnak. Ezek közül több mint 3 200, beleértve a monomereket, adalékanyagokat és feldolgozási segédanyagokat, mérgező tulajdonságaik miatt potenciálisan veszélyesek.⁵⁶

Az MNM hatása a talaj tulajdonságaira és az ökoszisztémák romlására

Kutatások szerint a szárazföldi ökoszisztémák, különösen a mezőgazdasági talajok mikroműanyag-szennyezettsége 4–23-szorosa⁵⁷ lehet a vízi környezet szennyezettségének, ami a műanyag jelentős felhalmozódására utal a talajban. A műanyag különböző módon halmozódik fel a talajban, többek között a szennyvíztisztító telepeken, a talajtakarás során, a légköri lerakódásokból és a mindennapi használatú termékekből. Az eldobható műanyag termékek számtalan felhasználása szorosan összefügg a talaj mikro- és nanoműanyagokkal való súlyos szennyeződésével. Természetes és antropogén tényezők hozzájárulnak⁵⁸ a mikroműanyag apró részecskéinek talajba való bejutásához, ami megváltoztatja a fontos ökológiai folyamatokat.⁵⁹

A megfigyelések megerősítik a mikroműanyag ökoszisztémákra gyakorolt káros hatását, amely befolyásolja a mikroorganizmusok, növények és talajok szerkezetét és funkcióit (15. ábra).

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>

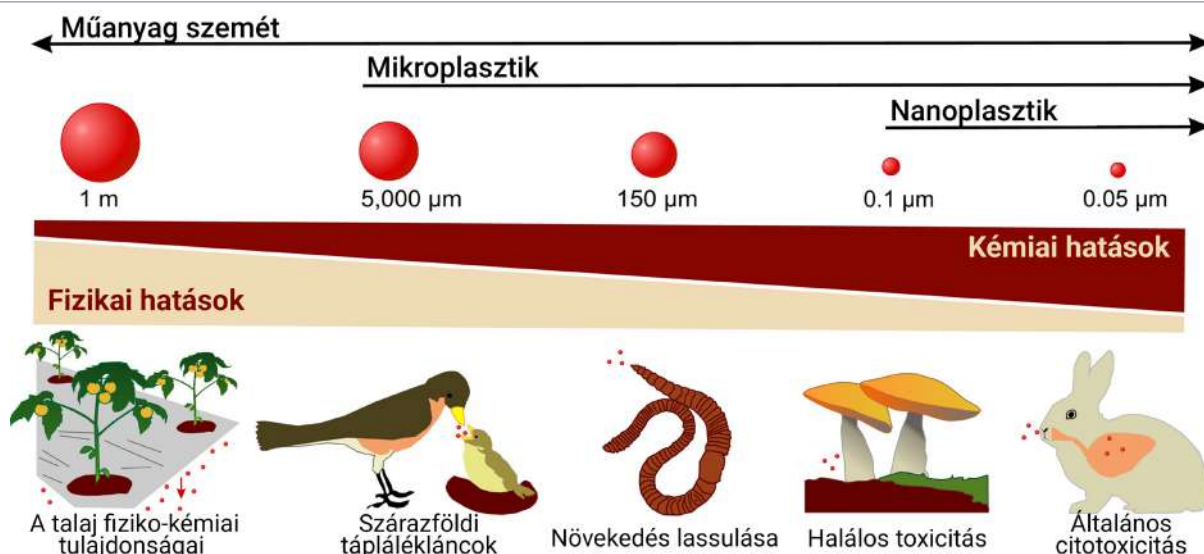
⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

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., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

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>

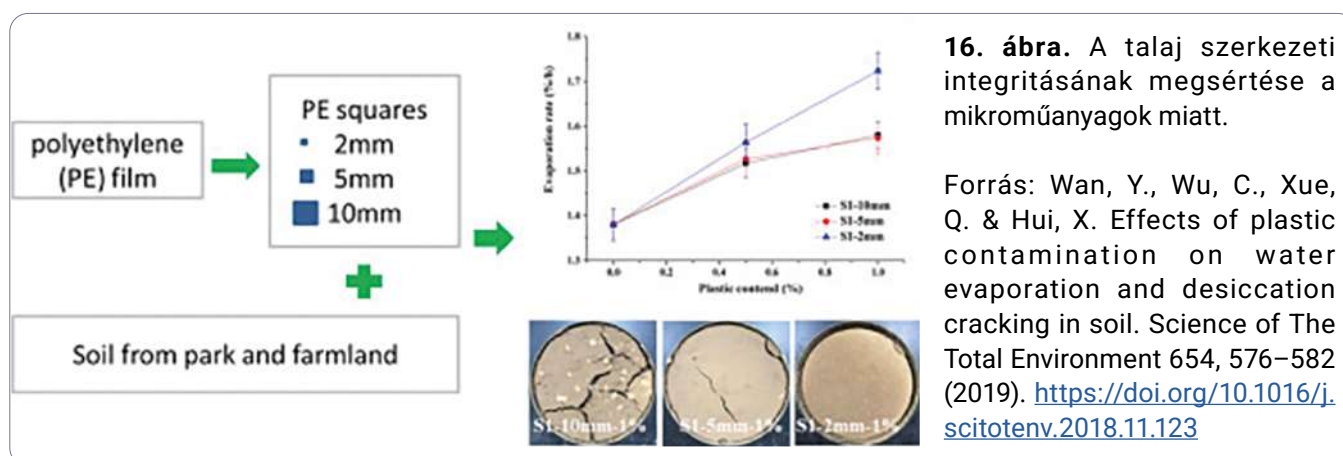


15. ábra. A mikroműanyagok mint kombinált fizikai vagy kémiai hatások kiváltói.

A talaj biogeokémiája, amely összefüggésbe hozható a mezőgazdasági talajtakarással, a szárazföldi és kontinentális madarak táplálkozásával, az esőféreg növekedésének csökkenésével, a gombákra gyakorolt halálos toxicitással, a emlősök tüdőgyulladásával és a nanoműanyagok széles körű citotoxicitásával.

Forrás: 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>

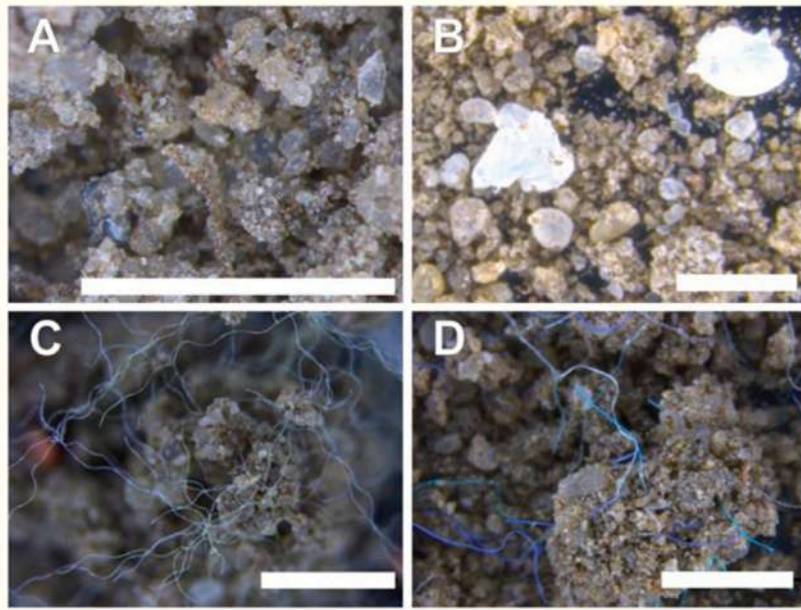
A Kínai Tudományos Akadémia kutatási eredményei kimutatták, hogy a különböző méretű műanyag fóliák jelenléte a talajban jelentősen növeli a víz párolgási sebességét. Különösen erős hatás figyelhető meg 2 mm-es részecskék hozzáadásakor. A nagyobb műanyagdarabok (5–10 mm) a talaj repedéséhez vezetnek, megsértve annak szerkezeti integritását. Ezek az adatok arra utalnak, hogy a műanyag hulladékok megzavarják a talaj vízkörforgását, ami súlyosbíthatja a talajvízhiányt és befolyásolhatja a szennyező anyagok vertikális szállítását⁶⁰ (16–17. ábra).



16. ábra. A talaj szerkezeti integritásának megsértése a mikroműanyagok miatt.

Forrás: 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>

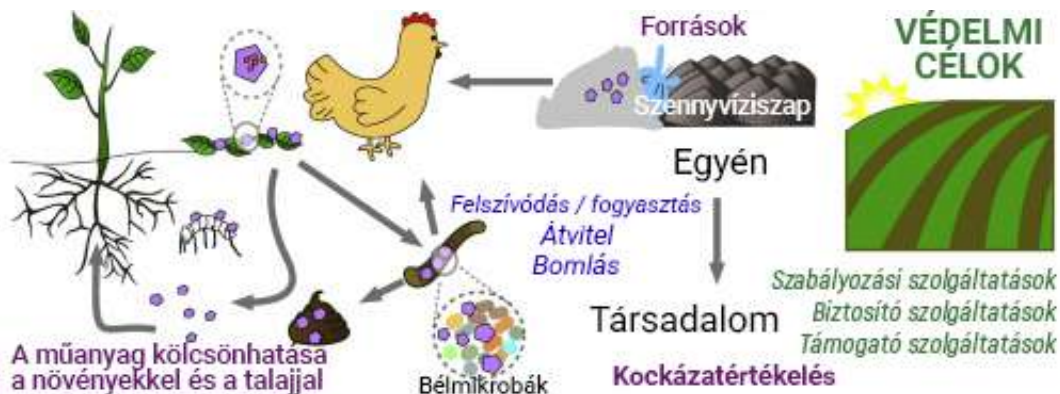


17. ábra. Mikroműanyag részecskék integrálódása a talaj biofizikai környezetébe.

A kontrolltalaj (A) szerkezete sztereomikroszkóp alatt vizuálisan nem különbözött a poliamidgolyókkal szennyezett talajtól (SI S1D). A polietilén darabok (B) és a poliészter (C) vagy poliakril szálak (D) vizuálisan megkülönböztethető talajjelenségeket eredményeztek. A fehér sáv minden panelen 1 mm-es méretet jelöl.

Forrás: 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>

A kutatások azt is megerősítik, hogy a műanyagok káros hatással vannak a talaj élővilágára – egy sokszínű közösségre, amely mikroorganizmusokat (pl. baktériumokat, gombákat) és állatokat (mikroszkopikus és makroszkopikus állatokat) foglal magában. Ezek az organizmusok egymással, a növények gyökereivel és a környezettel kölcsönhatásba lépnek, és így kialakulnak a talaj táplálékláncai (18. ábra), amelyek szükségesek a tápanyagok körforgásához és a növények egészségéhez.

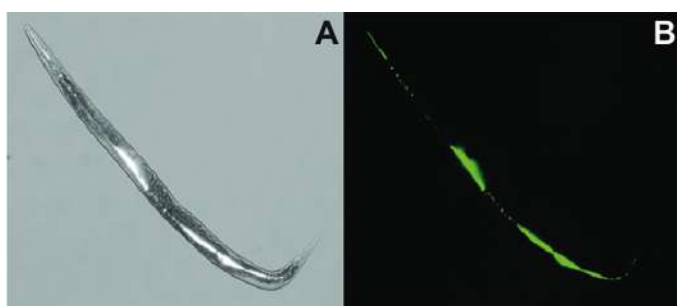


18. ábra. A talaj tápláléklánckok kialakulásának folyamatának sematikus ábrázolása.

Forrás: 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>

Különböző típusú szárazföldi élővilág fajok szolgálnak a mikroműanyag-szennyezés bioindikátoraként. Az összes minta elemzése mikroműanyag-részecskék és potenciálisan toxikus elemek (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) jelenlétét mutatta⁶¹ ki különböző koncentrációkban, ami a mikroműanyagok lehetséges toxicitására utal.⁶²

A kutatások kimutatták, hogy a polisztirol granulátumokat a *Caenorhabditis elegans* nematoda talajszervezetek felszívhatják (19. ábra); ez azt is jelenti, hogy a polisztirol részecskék felhalmozódhatnak a talaj táplálékláncában.⁶³



19. ábra. Világos mezőben készült képek (A) és fluoreszkáló képek (B) egy felnőtt *Caenorhabditis elegans* férgéről, amely 15 percig 20 °C-on 0,5 mikrométeres, sárga-zöld fluoreszkáló mikrogömböket halmozott fel. A fényképeket 100-szoros nagyításban készítették.

Forrás: 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>

A talaj élővilága nem csupán a „Föld biológiai motorja”, hanem egy multifunkcionális rendszer, amelytől minden szárazföldi ökoszisztéma függ. A bolygón az élet fenntartásában betöltött szerepe összehasonlítható az óceánok és a légkör funkcióival, amit talajkutatók, ökológusok és klimatológusok kutatásai is megerősítenek. Ezért bármilyen, toxicitás által okozott változás hatással lehet a talajban zajló számos kritikus folyamatra és az élelmiszerláncra, ami ökológiai egyensúlyhiányt okozhat.⁶⁴

Az adatok arra utalnak, hogy a mikroműanyagok kis méretük, nagy fajlagos felületük, magas hidrofób tulajdonságuk és biológiai lebomlásnak való ellenállásuk miatt gyorsan adszorbeálódnak a talaj felszínén.⁶⁵ Ez elősegíti könnyű felszívódását a szervezetekben és felhalmozódását bennük, ami potenciális veszélyt jelent az emberi egészségre. Ez a folyamat nem korlátozódik a talajrétegre, hanem kiterjed a növényekre is, ahol továbbra is káros hatást gyakorol.

Az MNM az élelmiszerekben

Az antropogén szennyező anyagok jelentős hatással lehetnek az ökoszisztémákra, különösen akkor, ha növényekbe kerülnek. Megerősítést nyert, hogy a mikroműanyagok felszívódhatnak és eljuthatnak a növények különböző szerveibe.

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>

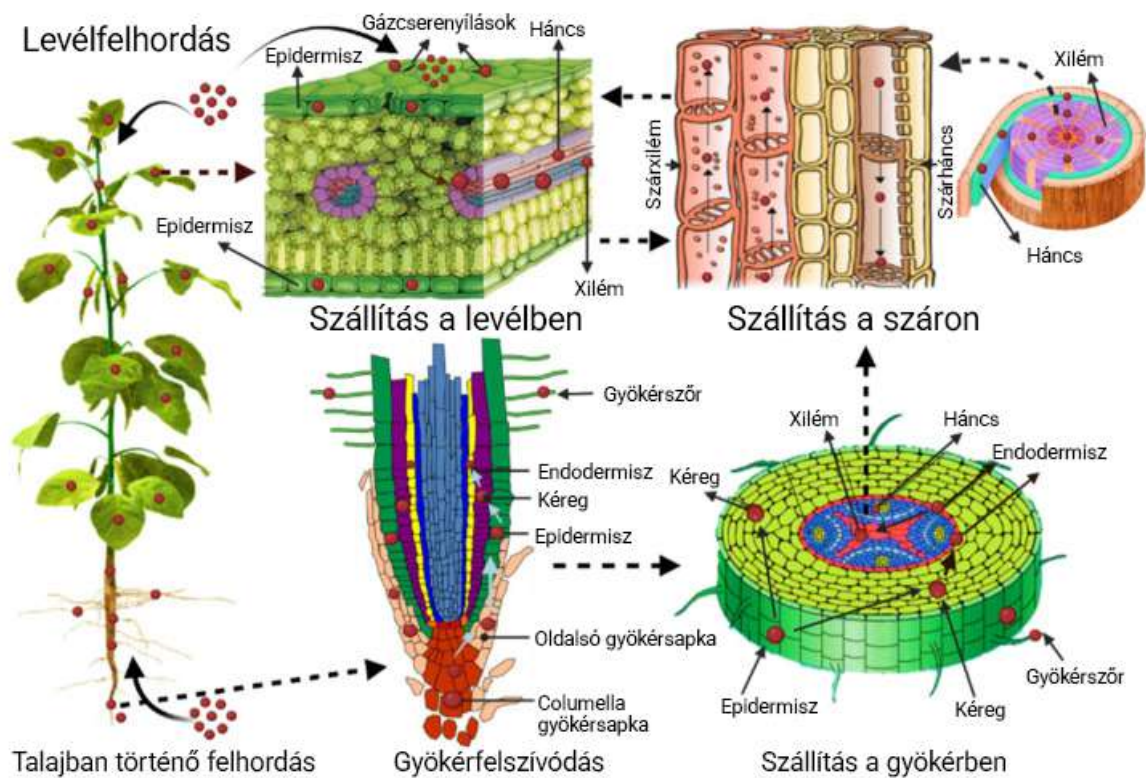
⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

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>

A kutatási adatok arra utalnak, hogy a mikroműanyagok különböző úton halmozódnak fel a növényi rendszerekben, kedvezőtlen hatást gyakorolva a növényekre, a mezőgazdasági kultúrákra és az élelmiszerekre.

A nanoműanyagok kis méretüknek köszönhetően közvetlenül behatolnak a növényi szövetekbe.⁶⁶ A növények a táptalajból felszívják a nanoműanyagokat, amelyek ezután a xilémán – a gyökerektől a szárakig és levelekig vizet és tápanyagokat szállító vezetékrendszeren – keresztül a föld feletti részekbe jutnak.

A leveleken lerakódó mikroműanyag a szellőzőnyílásokon keresztül behatol, és a vaszkuláris kötegek mentén a gyökerekhez juthat. Mind a mikroműanyag, mind a nanoműanyag toxikus hatást gyakorol a mezőgazdasági növények fiziológiai folyamataira és enzimaktivitására (20. ábra).⁶⁷



20. ábra. A mikro- és nanoműanyag felvételének mechanizmusai a növényekben.

A műanyag talajba juttatásának növényi felvételi mechanizmusa gyökérfelszívódás és transzportútvonalak révén a gyökértől a szárig, valamint a szárból a levélhez és a gyümölcsökhöz. A lombtrágyázás során a műanyag a levél sztómáiba jut, majd később a növény más részeibe kerül. A folytonos nyíl a műanyag növény számára való elérhetőségét, a szaggatott nyíl pedig a növényen belüli transzportját jelzi.

Forrás: 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>

A növények vízszállító rendszere képes gyorsan továbbítani a nanoműanyagot a szárakba, levelekbe és esetleg a gyümölcsökbe. A dohány-növények (*Nicotiana tabacum*) vizsgálata során kapott adatok szerint a 100 nm méretű nanoműanyag nem hatol be a növényi sejtekbe, míg a 20–40 nm méretű részecskék sikeresen felszívódnak.⁶⁸

Ezenkívül, egyes műanyag részecskék saját töltéssel rendelkeznek, ami elektrosztatikus vonzás révén fokozhatja adszorpciójukat a növények gyökereiben, befolyásolva a tápanyagok immobilizációját vagy a fotoszintézis folyamatait.⁶⁹ A negatív töltésű mikroműanyagok nagyobb valószínűséggel hatolnak be a gyökérkéregbe.⁷⁰

Az erősen műanyag részecskékkel szennyezett agroökoszisztémákban a növények növekedésének és fejlődésének lassulása,⁷¹ valamint a csírázási sebességre és a gyökérfejlődésre gyakorolt rövid távú és átmeneti hatás figyelhető meg.⁷²

Kutatások igazolják a mikroműanyagok jelenlétét a kereskedelemben kapható, ipari és helyi termelésű mézben. A későbbi elemzés kimutatta a mikroműanyagok széles körű elterjedtségét különböző növényfajok virágzataiban.^{73, 74}

Az elmúlt években a méhpopulációk állapota világszerte jelentősen romlott. Kutatások szerint, ennek egyik alulbecsült oka a mikroműanyag (MM) és a nanoműanyag (NM) által okozott környezetszennyezés lehet. A kutatások kimutatták, hogy a méhek „gyűjtik” a mikroműanyagot a levegőből, a vízből, a növényekből és a talajból, majd visszaviszik a kaptárba. A méhek nektárt és polleneket gyűjtenek a növényekről, valamint vizet természetes forrásokból – és mindezek a közegek már ma is mikroműanyagot tartalmaznak. A méhek testén lévő szőrszálak „csapdaként” működnek a részecskék számára. A műanyag részecskék a lábakon is felhalmozódnak, különösen a hajlatokban és a szegmensek között – így érintkeznek a növények, a talaj, a víz és még a kaptár felületével is.



„A mézelő méh nagyon jó biológiai indikátora a környezetszennyezésnek, mivel mindenütt jelen van, szőrszálak borítják, amelyek megkötik a levegőben lévő szennyeződések és részecskéket, érzékeny a szennyező anyagokra, nagyon mozgékony és nagy repülési sugárral rendelkezik, többek között.”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>

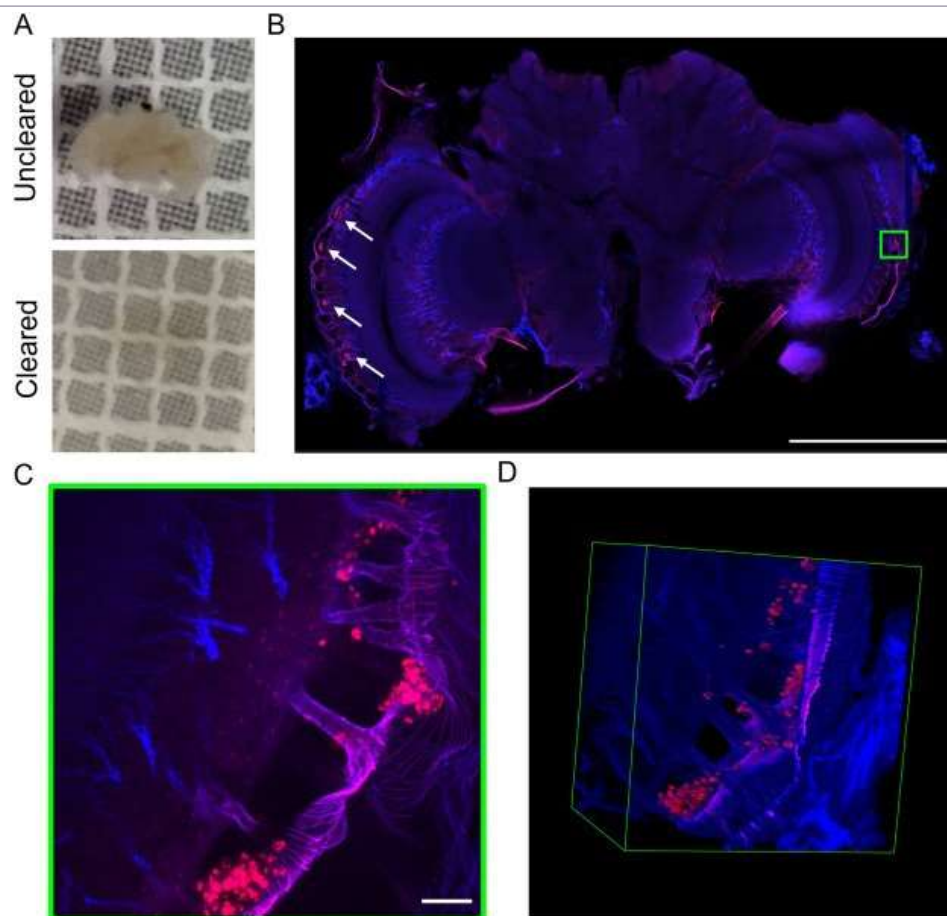
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & 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>

A mikro- és nanoműanyag a méh szervezetébe a kutikulán (a test külső héján) keresztül is bejut. Miután a méh testébe kerültek, a műanyag részecskék már 3 nap múlva elérik az agyat, ami memóriaromlást, tájékozódási zavarokat és kognitív funkciók romlását okozza, amelyek kritikus fontosságúak az élelemkereséshez és a navigációhoz.⁷⁶ A mikroműanyagok agyra gyakorolt hatása a memória helyreállítási képességének csökkenéséhez is vezet. Ez kritikus jelentőségű, mert a méhek ismerős tájékozódási pontok alapján orientálódnak a térben. A méhek agyában található nanoműanyagok azt is eredményezik, hogy a méhek elveszítik azt a képességüket, hogy megjegyezzék, hol található a nektárforrások, rosszabbul reagálnak a virágok illatára, és eltévednek a kaptárba vezető úton. Az ilyen kognitív zavarok közvetlenül csökkentik a beporzás hatékonyságát, és destabilizálhatják az egész kolóniát.⁷⁶



21. ábra. Jelentős mennyiségű mikroműanyag kimutatása a mézelő méh agyában.

A) Fotók a boncolt agyról az iDISCO módszerrel történő világosítás előtt és után.

B) Egyetlen optikai metszet (mélység ~ 200 μm) a teljes agy 3D-rekonstrukciójából, amelyet kétfoton fluoreszcens mikroszkópiával, 10 $\times$ -os objektívvel készítettek; felbontás – 0,51 $\times$ 0,51 $\times$ 2 μm^3 . Kék szín – a szövet autofluoreszcenciája, piros – mikroműanyag piros fluoreszcenciával (fehér nyilak jelzik). Méretarány: 1000 μm .

C) Nagy felbontású beillesztés a B képen zölddel kiemelt területről, 63 $\times$ -os objektívvel készítve. A kép egy 150 μm mélységű, 0,17 $\times$ 0,17 $\times$ 1 μm^3 felbontású, maximális intenzitású stack sorozat vetülete. Méretarány: 20 μm .

D) A C-ben bemutatott stack sorozat 3D-megjelenítése. Méretek: 170 $\times$ 170 $\times$ 150 μm^3 .

Forrás: 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>

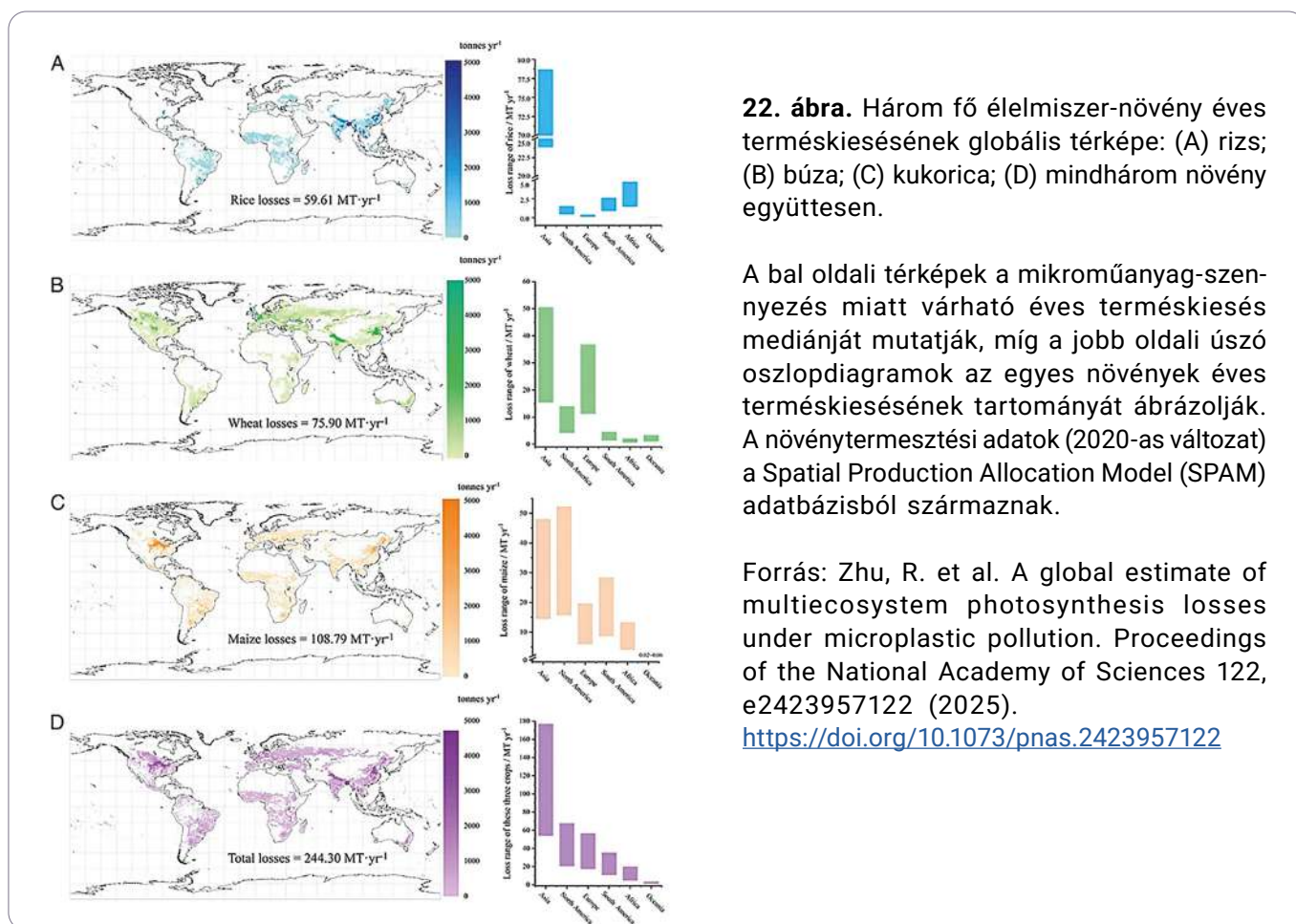
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

A méhek szervezetébe kerülve a nanoműanyagok szintén károsítják a beleket, gyengítik az immunrendszert és növelik a vírusokkal szembeni fogékonyságot, ami a méhek halálához vezethet, még akkor is, ha a műanyag nem mutat akut toxicitást.^{75,77} Ezenkívül, a műanyagdarabok nemcsak a méhekben, hanem a mézben, a viaszban és a lárvákban is felhalmozódnak, ami zárt körű műanyagszennyezést eredményez a kaptárban.⁷⁵

Ez potenciálisan súlyos következményekkel járhat nemcsak a méhekre, hanem az élelmezés-biztonságra is. A méhek kulcsfontosságú beporzók, és gyengülésük közvetlenül befolyásolja a mezőgazdasági növények terméshozamát.

Az agykárosodás, a testsúlycsökkenés és az immunrendszer gyengülése a beporzási aktivitás csökkenéséhez vezet, ami a tudósok figyelmeztetése szerint súlyosbíthatja a globális élelmiszertermelés válságát.⁷⁷ A méhek aktív bioindikátorokként működnek a szennyezés tekintetében, és már most jelentős mennyiségű mikroműanyagot találtak a mézben, függetlenül a termelési országtól.⁷⁸

Az MM hatása továbbá 5,63–17,42 %-kal csökkenti a klorofill teljes tartalmát, ami a világ rizs-, búza- és kukoricatermelésének csökkenéséhez vezet. Ez a veszteség a világ teljes éves termelésének 4,11–13,52 %-át teszi ki, ami jelentős következményekkel jár az élelmezésbiztonságra nézve (22. ábra).⁷⁹



22. ábra. Három fő élelmiszer-növény éves termés kiesésének globális térképe: (A) rizs; (B) búza; (C) kukorica; (D) mindhárom növény együttesen.

A bal oldali térképek a mikroműanyag-szennyezés miatt várható éves termés kiesés mediánját mutatják, míg a jobb oldali úszó oszlopdiagramok az egyes növények éves termés kiesésének tartományát ábrázolják. A növénytermesztési adatok (2020-as változat) a Spatial Production Allocation Model (SPAM) adatbázisból származnak.

Forrás: 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>

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 multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Az erdők mint MNM felhalmozói

Az elemzés kimutatta a nanoműanyag jelenlétét a gyökerekben, szárukban, levelekben és tűlevelekben minden vizsgált koncentráció és időintervallum esetében. A gyökerekben a nanoműanyag koncentrációja legalább tízszerese volt a föld feletti részekben mért koncentrációnak.

A műanyagszennyezés negatív hatással van mind az örökzöld tűlevelű, mind a lombhullató fafajok működésére, oxidatív stresszt okozva és csökkentve a fotoszintézis hatékonyságát, ami a növény növekedésének lassulásához, sőt elhalásához is vezethet. A kutatások azt mutatják, hogy a fotoszintézis szakaszaiban bekövetkező zavarok túlzott fényenergia felhalmozódásához vezetnek, amely anélkül, hogy kémiai energiává alakulna, fotooxidatív stresszt és a növényi szövetek károsodását okozza. A növény védelme érdekében aktiválódnak a fényvédő mechanizmusok, amelyekben a karotinoidok a felesleges energiát hő formájában szórják szét.⁸⁰

A fotoszintézis megzavarásával, oxidatív stressz okozásával és a növények fiziológiai aktivitásának csökkentésével a műanyag hulladék fokozza az ökoszisztémák sebezhetőségét a klímaváltozással szemben. Ezek az adatok hangsúlyozzák a műanyag hulladékok növényi közösségekre gyakorolt hatásának mértékét, ami viszont felveti a kérdést, hogy milyen hatással van ez a földi állatokra, amelyek ezekektől az ökoszisztémáktól függenek.

Hogyan pusztítja el a nano-műanyag az állatvilágot?

Számos kutatás adatai azt mutatják, hogy a mikro- és nanoműanyag felhalmozódása a környezetben, többek között a növényekben, hatással van az állattenyésztés fejlődésére,⁸¹ érintve az élelmiszerláncot és az állatok egészségét. Az olaszországi tejtermelő gazdaságban végzett megfigyelések kimutatták, hogy az összes rajgrás szénaminta mikroműanyagot tartalmazott.⁸² Egy indiai tanulmány kimutatta, hogy a tejtermelő tehenek takarmányának 100 %-ában található polietilén-tereftalát mikroműanyag-szennyeződés, 89–326 g/kg koncentrációban.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., 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>

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>

Az elemzés megerősítette a mikroműanyagok jelenlétét a szarvasmarhák tüszőfolyadékában,⁸⁴ tejében,⁸⁵ juhok ürülékében,⁸⁶ marhahúsban és vérben,⁸⁷ ami jelentős hatást jelez a kérődző állatokra. Az adatok szerint a levágott állatokból,⁸⁸ beleértve a kisméretű kérődzőket, mint a kecskék és a juhok, kivett idegen testek 50–60 %-a műanyag anyagokból áll. Ezenkívül, mikroműanyagot találtak városi kutyák és macskák⁸⁹ belső szöveteiben, házi kacsák⁹⁰ belében és sertés tüdőszövetében.⁹¹

A kutatási adatok megerősítik, hogy a mikroműanyagok nemcsak önmagukban károsítják az állatokat, hanem a gyártásuk során használt adalékanyagok és a környezetből felszívódó szennyező anyagok is, különböző mértékű károsodásokat okozva.⁹² A megfigyelések azt mutatják, hogy a mikroműanyagok toxikus hatásokat váltanak ki az állatokban, beleértve az oxidatív stresszt, a bélkárosodást, az immunotoxicitást, valamint a reprodukív toxicitást és a neurotoxicitást (23. ábra).⁹³ Ráadásul, a mikroműanyagok olyan szennyező anyagok hordozói, mint a nehézfémek, antibiotikumok, perzisztens szerves vegyületek és peszticidek, ami fokozza a potenciális kockázatokat az ökoszisztémákra, az állatok és az emberek egészségére nézve.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/VOE-2022-JUL-PLASTICSOU.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>

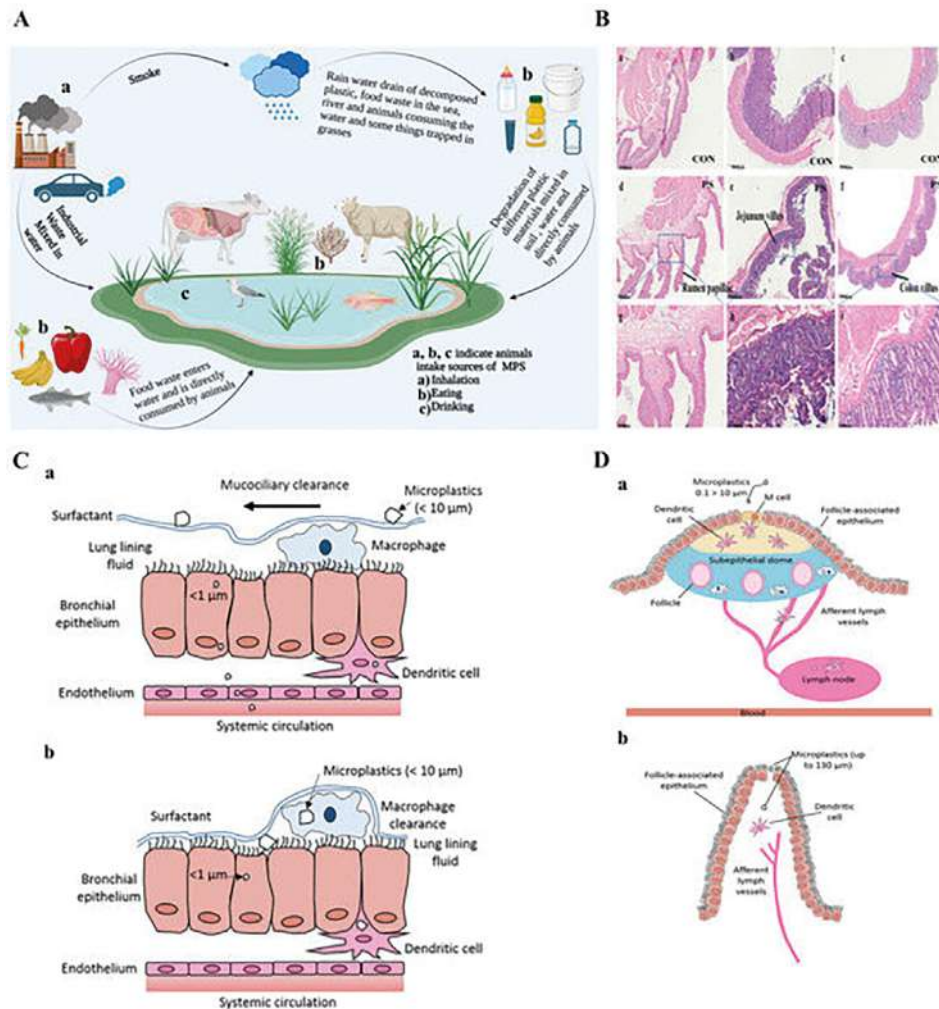
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

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>



23. ábra. A mikroműanyagok állatok szervezetébe való bekerülésének és a gyomor-bél traktusra gyakorolt hatásának sematikus ábrázolása.

(A) Az állatok MM-felvételi útvonalai.

(B) A PS gyomor-bélrendszeri szakasz expozíció előtt és után:

H&E felvételek a bendőről (a), jejunumról (b) és colonról (c) a CON csoportban;

(d) a S-PS csoport bendőjének H&E képe;

(e) az L-PS csoport jejunumának H&E képe;

(f) az L-PS csoport colonjának H&E képe;

és (g–i) a (d–f)-nek megfelelő, lokálisan felnagyított felvételek.

(C) Az MM-k ($0,1 > 10 \mu\text{m}$) lehetséges felvételi és kiürülési mechanizmusai a tüdőben:

(a) Csökkent az esélye annak, hogy a tüdőnedvek (felületaktív anyagok és nyálka) mikroműanyagokat mozdítsanak el a felső légutakban (a tüdő központi részében), ahol a tüdőhártya vastagabb. A $>1 \mu\text{m}$ részecskéket a csillós nyálkahártya kiürítette. Az $<1 \mu\text{m}$ részecskéket képesek lehetnek az epithelialis rétegen keresztüli felvétellel.

(b) Ha a mikroműanyag aerodinamikai átmérője lehetővé teszi a mélyebb tüdőszakaszokban történő lerakódást, akkor áthatolhat a vékonyabb tüdőnedv-rétegen, érintkezhet az epitheliummal, és diffúzió vagy aktív sejtfelvétel útján továbbjuthat (metasztatizálhat).

(D) A MM-k gyomor-bélrendszeri (GIT) felvételének előre jelzett útvonalai:

(a) A MM-k felvétele a GIT lumenből a Peyer-féle nyiroktüszők M-sejtjei által endocitózissal ($0,1 > 10 \mu\text{m}$). Az M-sejtek mintát vesznek és szállítják a részecskéket a bél lumenéből a nyálkahártya limfoid szöveteibe.

(b) A MM-k felszívódhatnak a GIT lumenből paracelluláris abszorpció útján is. A nem lebomló részecskéket, például az MM-k, mechanikai úton benyomódhatnak az egysejtrétegű felszíni hám laza kapcsolódásain keresztül az alatta lévő szövetekbe. A dendritikus sejtek képesek ezeket a részecskéket bekebelezni, majd elszállítani az alatta lévő nyirokereken és vénákon keresztül. Ezek továbbjuthatnak másodlagos szövetekbe, beleértve a májat, izmokat és az agyat is.

A megfigyelések adatai azt mutatják, hogy a vadon élő állatok tévesen élelemnek veszik a műanyag hulladékokat. Ez azok felhalmozódásához vezet a belekben. Zimbabweban⁹⁵ és Srí Lankán⁹⁶ az elnyílt hulladéklerakókon táplálkozó elefántok meghaltak az emészthetetlen műanyagtól. A japán Nara parkban a vadon élő szarvasok a turisták által hátrahagyott műanyag hulladékok lenyelése miatt kialakuló szövődmények következtében haltak meg.⁹⁷ Az Egyesült Arab Emírségekbeli Dubai közelében több mint 30 000 tevét vizsgáltak meg, és kiderült, hogy az állatok 1%-a valószínűleg a gyomor-bélrendszerükben felhalmozódott műanyag miatt halt meg.⁹⁸

A tudósok bevezették a „polibezoár” kifejezést az emészthetetlen anyagok, például műanyag, kötelek, szemét és sólerakódások sűrű masszájának leírására, amely kőszzerű üledéket képez a gyomorban vagy a belekben, különösen a kérődzőknél. A kifejezés a „poli” (szintetikus anyag) és a „bezoár” (kőszzerű képződmény) szavakból áll. Megfigyelések igazolják, hogy a polibezoárok a gyomor-béltraktus elzáródását, a baktériumok szaporodásából eredő szepszist, kiszáradást és alultápláltságot okoznak (24. ábra).



24. ábra. Dubai közelében, a sivatagban elhullott tevék belsejében talált polibezárak. Az új tanulmányban elemzett legnagyobb példány súlya közel 64 kg (141 font) volt.

Forrás: 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>

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>

Az MNM átvitele az élelmiszerláncokon keresztül a planktonoktól az emberekig

A műanyagok felhalmozódása az óceánokban jelentős negatív hatással van a tengeri ökoszisztémákra. Az elmúlt négy évtized tudományos megfigyelései során szinte az összes tengeri élőhelyen mikroműanyagot találtak.⁹⁹ A kutatások megerősítik, hogy a műanyag hulladék veszélyezteti a tengeri biodiverzitást, legalább 690 fajt érintve, köztük a bálnák, a fókák, a tengeri madarak, a teknősök, a halak és a rákfélék.¹⁰⁰ A műanyag lenyelése további toxinoknak teszi ki az állatokat. A műanyagokból származó vegyi anyagok fogyasztás után kiválasztódnak a szervezetből, és a táplálékláncban a zsákmánytól a ragadozóig terjednek. A becsípődés vagy lenyelés következményei a halálosaktól a szubletálisakig terjednek, táplálkozási zavarokat, emésztési problémákat, alultápláltságot, betegségeket, reprodukív képesség csökkenését, növekedés lelassulását és az élettartam rövidülését okozva.¹⁰¹ Kis mérete miatt a mikroműanyagot a plankton – a tengeri táplálékláncok kulcsfontosságú láncszeme – elnyeli. A plankton számos tengeri faj táplálékául szolgál, és azok, akik nem fogyasztják közvetlenül, olyan szervezeteket esznek, amelyek már felszívták a planktont. Így, a mikroműanyagok beépülnek az élelmiszerláncokba (25–26. ábra).

1999-ben a Csendes-óceán északi részének központi körforgásában végzett felszíni vízminták elemzése kimutatta, hogy a műanyag tömege hatszorosa¹⁰² a zooplankton – az ökoszisztéma fő táplálékforrása – tömegének, ami aláhúzza a műanyagok túlsúlyát az élő szervezetek felett az óceánban.

A megfigyelések adatain alapuló számítások azt mutatják, hogy a mikroműanyagok koncentrációja a halak méretének növekedésével nő. Az adatok szerint a legnagyobb állat – a bálna – naponta akár 43,6 kg műanyagot is elfogyaszt, amelynek 98,5 %-a táplálékon keresztül jut a szervezetébe, és nem közvetlenül a vízből, mivel a mikroműanyag már a zsákmányban is megtalálható.¹⁰³

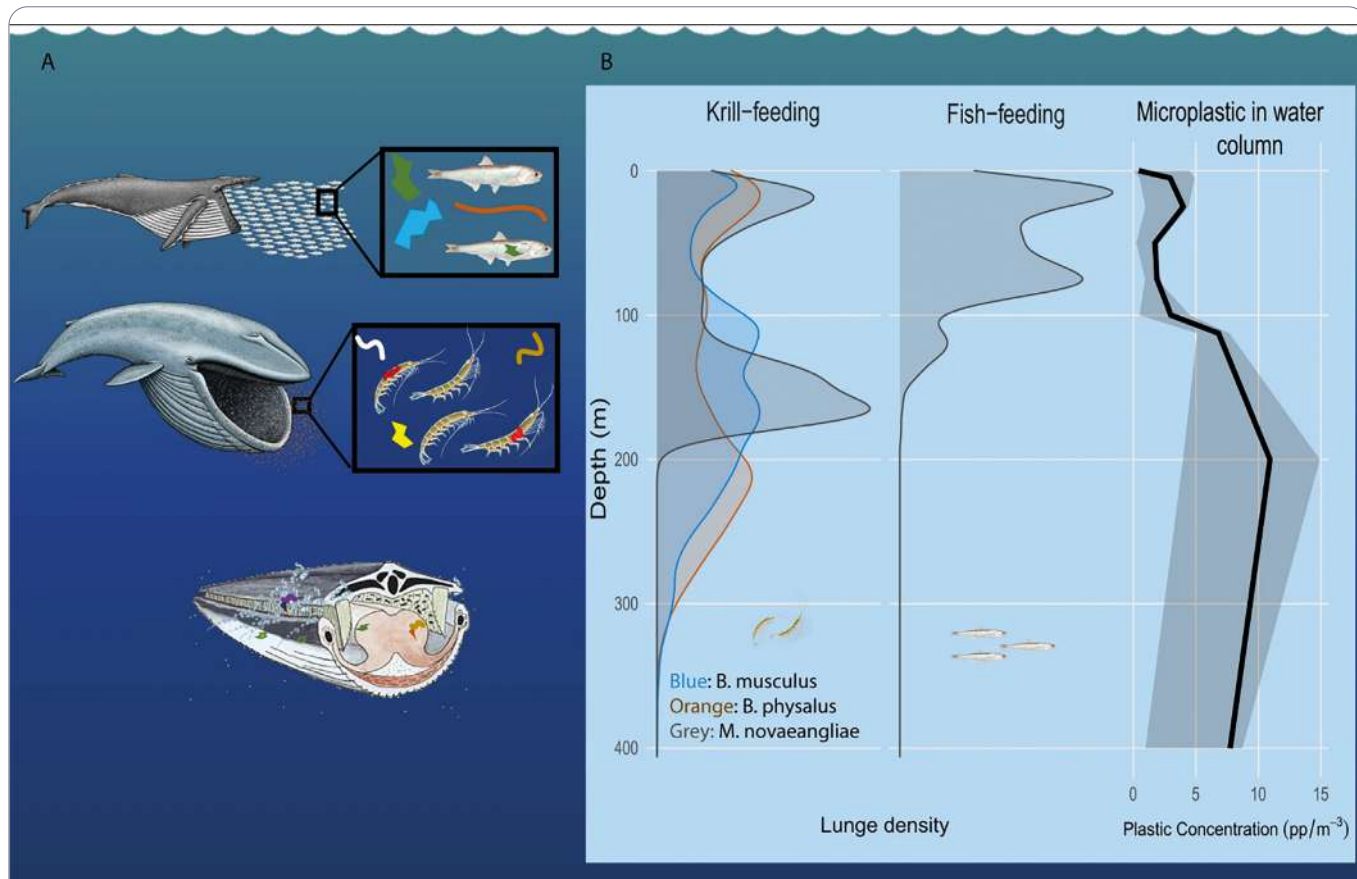
⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

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>



25. ábra. A csíkos bálnák táplálkozási viselkedésének mélysége a vízszlopban található mikroműanyag-koncentráció függvényében.

a – A bálnák által naponta lenyelt műanyag mennyisége, amely (i) a vízből naponta kiszűrt műanyag és (ii) a zsákmány által naponta elfogyasztott műanyag összegeként modellezve. A műanyag lenyelésének lehetséges kockázati tartománya: alacsony, közepes és magas, mivel egyes változókra vonatkozóan nincsenek kimerítő adatok;

b - A Monterey-öbölben található telepek mélységi eloszlása, amely megfelel a Monterey-öbölben található műanyag koncentrációjának mélységi profiljának. A bálnákat és a zsákmányt Alex Boersma ábrázolta, a szűrés diagramot pedig Scott Landry, a Part menti Kutatóközpont munkatársa.

Forrás: 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>

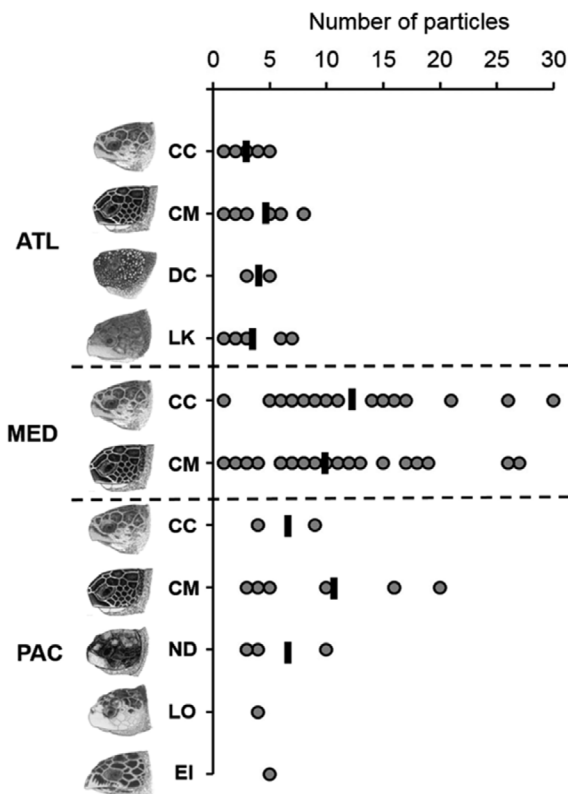


26. ábra. A műanyagok élelmiszerláncba való bejutásának sematikus ábrázolása.

A műanyagok megölik a tengeri szervezeteket

Évente, körülbelül 1 millió tengeri madár és 100 000 tengeri emlős hal meg a szennyezés miatt.¹⁰⁴ A megfigyelések megerősítik a lenyelt hulladékok és a tengeri madarak elhullása közötti összefüggést. Egy tanulmány, amely 51 faj 1733 tengeri madarát vizsgálta, megállapította, hogy 557 (32,1 %) közülük tengeri hulladékot fogyasztott, 1–40 darabot, amelyek maximális súlya 3440 mg, térfogata pedig 3621 mm³ volt.¹⁰⁵

Egyes adatok azt is mutatják, hogy bizonyos műanyagok dimetil-szulfidot bocsátanak ki – ez egy olyan kémiai vegyület, amely imitálja a tengeri madarak által az élelem felismeréséhez használt szagjelet.¹⁰⁶ Új kutatások azt is megállapították, hogy a műanyagok lenyelése vesekárosodást, máj- és gyomorkárosodást, valamint az Alzheimer-kórhoz hasonló agyi elváltozásokat okoz a fiókáknál. Ez rávilágít a műanyagszennyezés tengeri állatvilágra gyakorolt romboló hatására.¹⁰⁷ Műanyagrészcskéket találtak mind a hét teknősfaj minden egyedeiben három óceáni medencében (27. ábra).¹⁰⁸



27. ábra. Szintetikus mikrorészecskék lenyelése minden tengeri teknősfaj által három óceáni medencében. Az egyes fajoknál minden óceáni medencében 100 ml-es alválogatásban azonosított részecskék összesen száma. A fekete vonal az átlagos részecskeszámot jelzi. A tengeri teknősök koponyáinak ábrázolásai a WIDECAST engedélyével kerültek felhasználásra; az eredeti rajzok Tom McFarland munkái.

Forrás: 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>

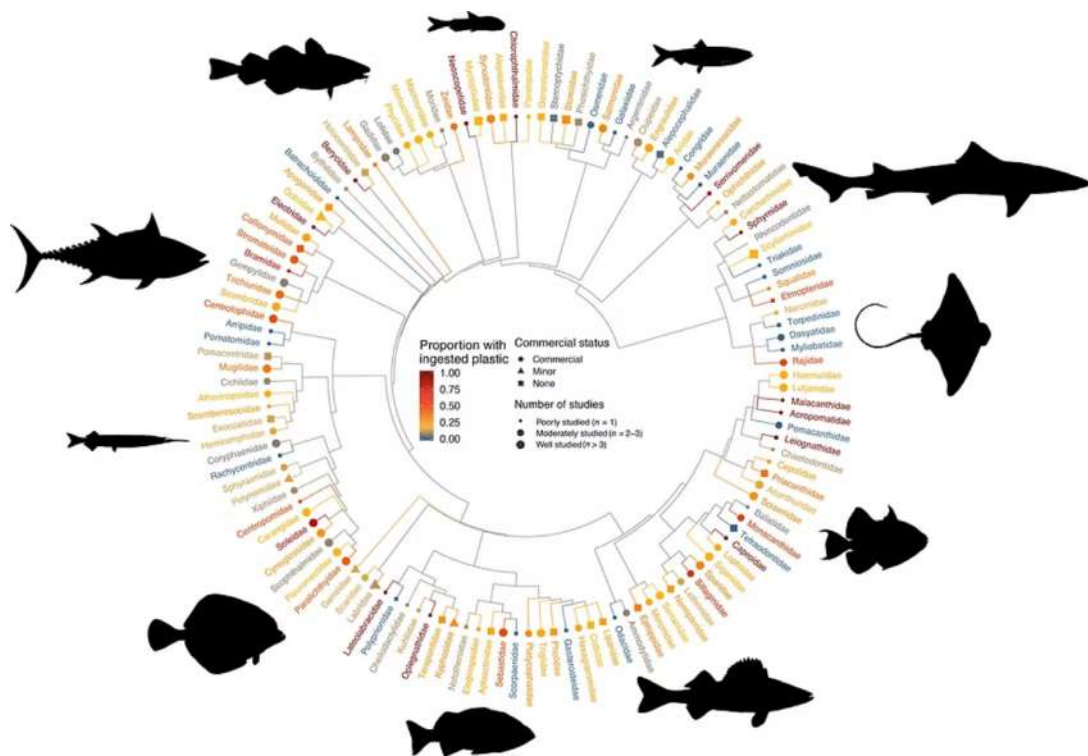
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

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>

555 tengeri halfaj 171 774 példányának vizsgálata azt mutatja, hogy 386 tengeri halfaj, köztük 210 kereskedelmi szempontból jelentős faj, fogyaszt műanyag hulladékot.¹⁰⁹ A kutatások szerint, a halak mikroműanyag-lenyelő gyakorisága 26 % volt, ami az elmúlt évtizedben megduplázódott (28. ábra). Az elemzés pozitív összefüggést tárt fel a felszíni vizekben található műanyagok mennyisége (29. ábra) és a tengeri szervezetek által fogyasztott műanyagok mennyisége (30. ábra) között.

Laboratóriumi vizsgálatok azt mutatják, hogy a műanyag vegyületek, amelyek behatolnak a halak szöveteibe, csökkentik az aktivitást, megzavarják a máj működését, károsítják az agyat, valamint lassítják a növekedést és rontják a reprodukív funkciókat.^{109, 110, 111}



28. ábra. Halcsaládok és műanyag lenyelés.

A tengeri halcsaládok ($n = 131$) filogenetikai kapcsolataik, a műanyag lenyelés gyakorisága szerint színezve. Az egyes csúcsok alakja jelzi az adatbázisban szereplő családon belüli fajok arányát, amelyeket kereskedelmi célokra halásznak (0 = nincs kereskedelmi célra halászott faj; kisebb = a fajok 0–25%-át halásszák kereskedelmi célokra; kereskedelmi = a fajok >25%-át halásszák kereskedelmi célokra). A csúcs mérete jelzi az adott családban élő fajokra végzett tanulmányok számát. Ez kiemeli azt a 15 családot, amelyről sok adat áll rendelkezésre ($n > 10$ egyed, >2 faj) és amelyekben magas a műanyagfogyasztás előfordulása (FO műanyag $> 0,25$); ezek közül 67 család, amelyről műanyagfogyasztásról vannak adatok, kereskedelmi célra is halászott.

Forrás: 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>

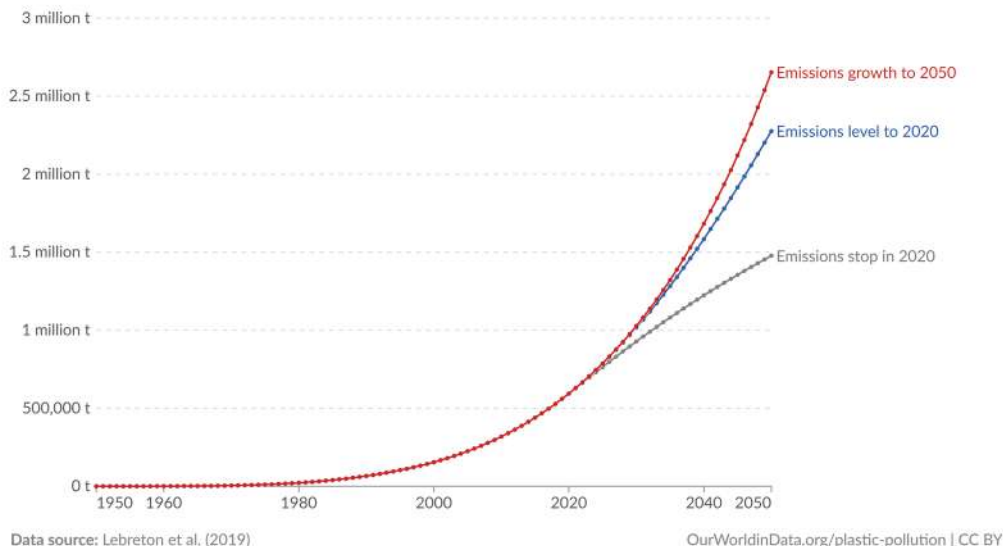
¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorb, 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

Our World
in Data

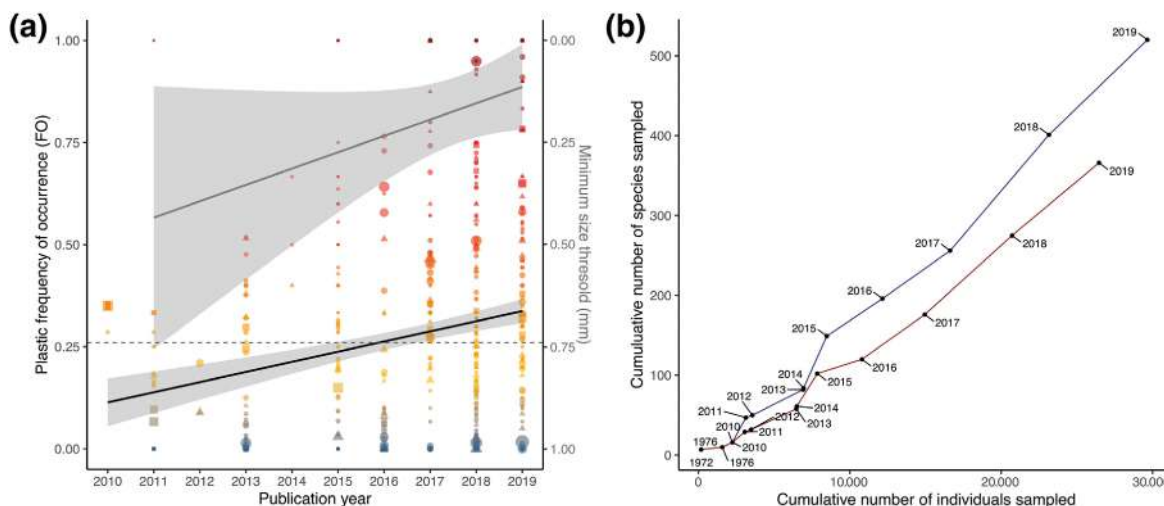
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with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



29. ábra. A mikroműanyagok mennyiségének növekedése az óceán felszínén, előrejelzéssel 2050-ig.

Forrás: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025)

Forrás: 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>



30. ábra. A halak által lenyelt műanyagok időbeli tendenciái.

(a) A felső szürke vonal mutatja, hogy 2011 óta egyre kisebb részecskék észlelésére van tendencia. Az alsó fekete vonal a műanyag előfordulási gyakoriságának (FO) növekedését mutatja az összes halfaj esetében 2010 és 2019 között. Ebben az időszakban a műanyag lenyelés gyakorisága jelentősen, évi 2,4%-kal nőtt. A vízszintes szaggatott vonal 0,26-os FO-t jelöl, ami a halak műanyagfogyasztásának globális átlagát jelenti. (b) Fajok felhalmozódási görbéje, ahol a kék vonal az idő függvényében vizsgált fajok kumulatív számát jelzi, beleértve a műanyagot fogyasztó és nem fogyasztó fajokat, míg a piros vonal csak a műanyagot fogyasztó fajokat ábrázolja. A piros vonal aszimptota hiánya arra utal, hogy nagy valószínűséggel az elkövetkező években további fajok fognak műanyagot fogyasztani.

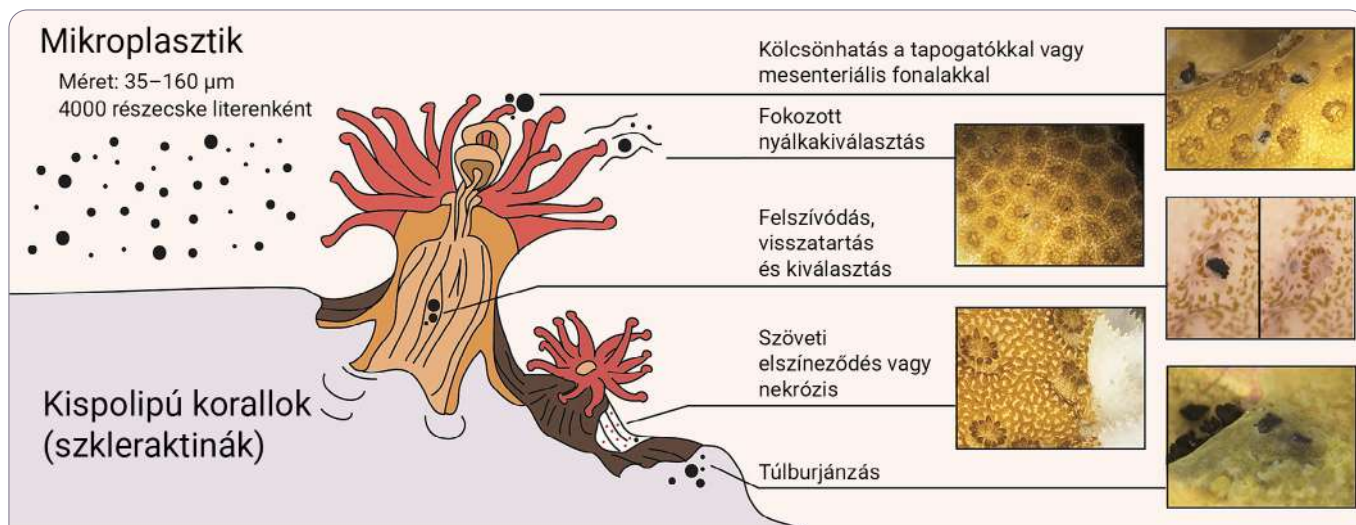
Forrás: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

A korallak veszélyben vannak: globális léptékű mikroszintű fenyegetés

A műanyagszennyezés egyre nagyobb veszélyt jelent a korallzátonyokra, mivel bekerül az élelmiszerláncukba, súlyosbítja a betegségek terjedését és hozzájárul a zátonyok élővilágának pusztulásához. Az elemzések 84 vizsgált zátony közül 77-en azonosítottak antropogén hulladékot, beleértve a Csendes-óceán középső részén elszigetelten fekvő atollokat is.¹¹² Hat vizsgált faj közül ötnél¹¹⁴ negatív egészségügyi hatásokat, például fehéredést és szöveti nekrozist¹¹³ regisztráltak (31. ábra).

A nagyobb műanyagdarabok elősegítik a betegségek terjedését és a fizikai károsodást, növelve a korallak sebezhetőségét a kórokozókkal szemben.¹¹⁵ Ezek a hatások a csontváz mikrobiomjára is kihatnak, amely döntő szerepet játszik a koralltelepek egészségének fenntartásában¹¹⁶ (32. ábra). A kutatások továbbá kimutatták, hogy a mikroműanyagokon kialakuló biofilmek, az úgynevezett "plasztiszférák"¹¹⁴ mikrobiom diszbiózist okozhatnak a korallokban.¹¹⁷

A műanyagokkal való érintkezés esetén a korallbetegségek kockázata 4 %-ról 89 %-ra nő (33. ábra). A korallzátonyok pusztulása jelentősen befolyásolja a biológiai sokféleség csökkenését, mivel a zátonyok a tengeri fajok egynegyedének nyújtanak élőhelyet.¹¹⁵



31. ábra. A műanyagok hatása a korallzátonyok állapotára.

A korallak különböző tisztítási mechanizmusokkal (pl. csillók mozgásával, nyálka termelésével vagy szövetek távolításával) reagálhatnak a műanyag részecskékre, megakadályozva azok terjedését, vagy kiválasztva a véletlenül lenyelt részecskéket.

Forrás: 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>

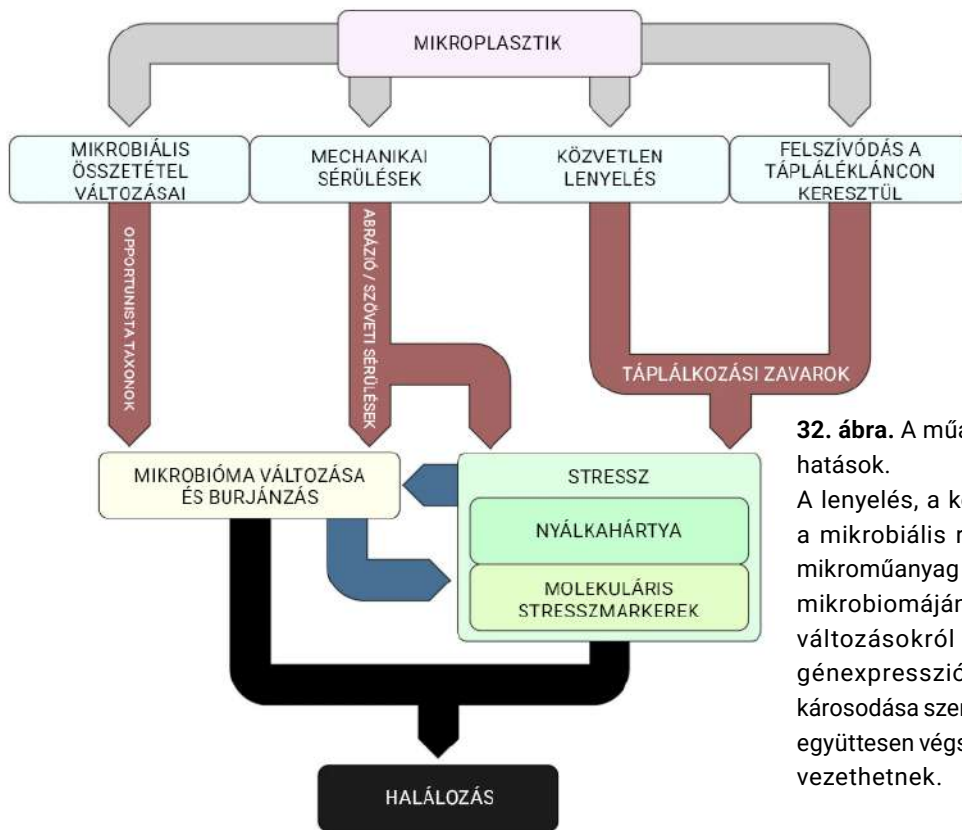
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

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>

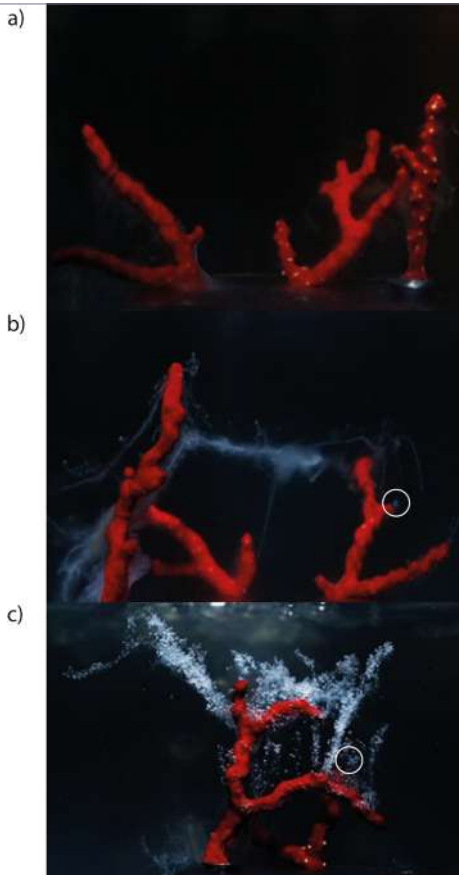


32. ábra. A műanyagokkal való érintkezés okozta hatások.

A lenyelés, a korallszövet fizikai érintkezése és a mikrobiális reakció a tengervízben található mikroműanyag részecskék jelenlétére. A korallak mikrobiomájának összetételében bekövetkező változásokról és stresszről számoltak be a génexpresszió változásai és a DNS oxidatív károsodása szempontjából. Mindezek a folyamatok együttesen végső soron a korallak elpusztulásához vezethetnek.

Forrás: 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>



33. ábra. A nyálkakiválasztás a mikroműanyag részecskék koncentrációjának növekedésével növekszik.

a – alacsony, **b** – közepes és **c** – magas mikroműanyag részecskék koncentrációja. A nyálkakiválasztás a mikroműanyag részecskék koncentrációjának növekedésével növekszik. A fehér körök a nyálkával megkötött mikroműanyag részecskéket (polietilén részecskéket) jelölik.

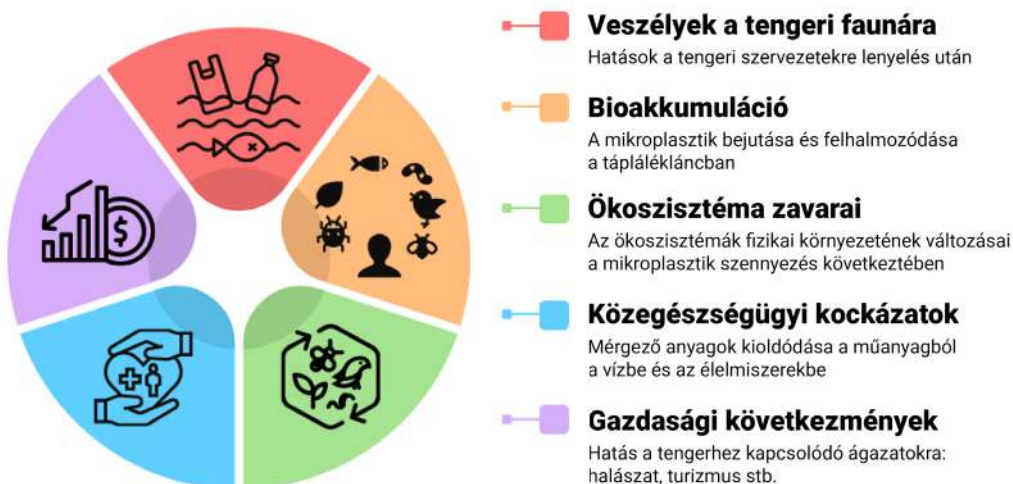
Forrás: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

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

Az MNM hatása az ökoszisztémák oxigénegyensúlyára

Megfigyelések szerint, a környezetben található műanyagok elsősorban a nap sugárzásának hatására bomlanak le. Ez a folyamat megváltoztatja kémiai összetételüket és szerkezetüket. Kutatások igazolják, hogy a napfény által kiváltott reakciók fokozzák az oldott szerves vegyületek kimosódását, ami hatással van a tengervíz biogeokémiájára és serkenti a heterotróf baktériumok szaporodását¹¹⁸ (34. ábra).

A mikroplasztik okozta veszélyek a tengeri környezetben



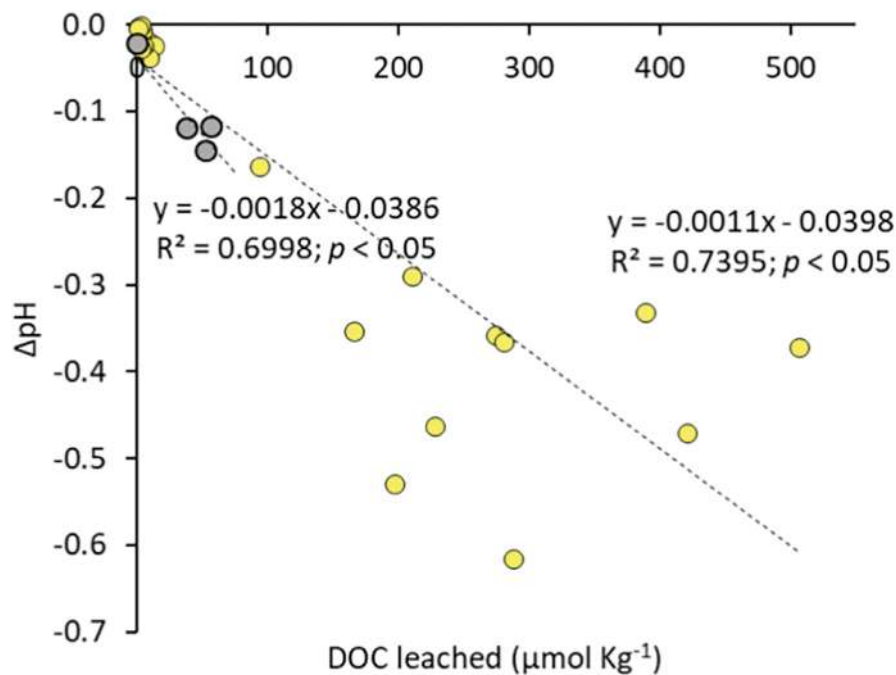
34. ábra. A tengeri mikroműanyagok által jelentett veszélyek.

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

Többéves kutatások azt mutatják, hogy a műanyagok bomlásakor a tengervízbe kerülő kémiai vegyületek vagy magából az anyagból, vagy a polimer színének és tartósságának biztosítására használt adalékanyagokból származnak. Ezek közül néhány vegyület szerves sav, ami magyarázza pH-értékcsökkentő hatását. Így, a műanyag fokozza az óceán savasodását (35. ábra), ami viszont jelentősen megzavarhatja a Föld természetes rendszereinek működését.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>

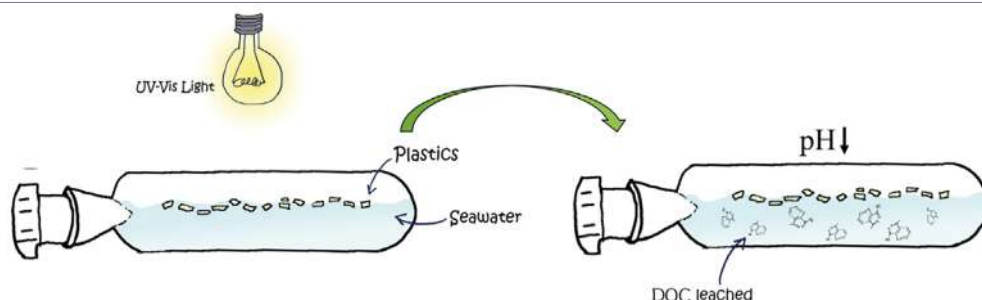


35. ábra. A pH és a műanyagból kimosódott DOC közötti változás összefüggései, minden egyes kísérlet minden egyes ismételt mintájára ábrázolva. Az egyes kísérletek műanyag nélküli kontrolljai is szerepelnek. A sárga pontok a besugárzott kezeléseket, a szürke pontok pedig a sötét kezeléseket jelölik.

Forrás: 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>



„Ezzel a kutatással sikerült bizonyítanunk, hogy a műanyag hulladékkal erősen szennyezett óceánfelületeken a műanyagok lebomlása a pH-érték 0,5 egységgel történő csökkenéséhez vezet, ami összehasonlítható a legrosszabb antropogén kibocsátási forgatókönyvekben a XXI. század végére várható pH-csökkenéssel” – jegyzi meg Cristina Romera-Castillo, a Tengerkutató Intézet (ICM-CSIC) tudományos munkatársa (36. ábra).¹²⁰



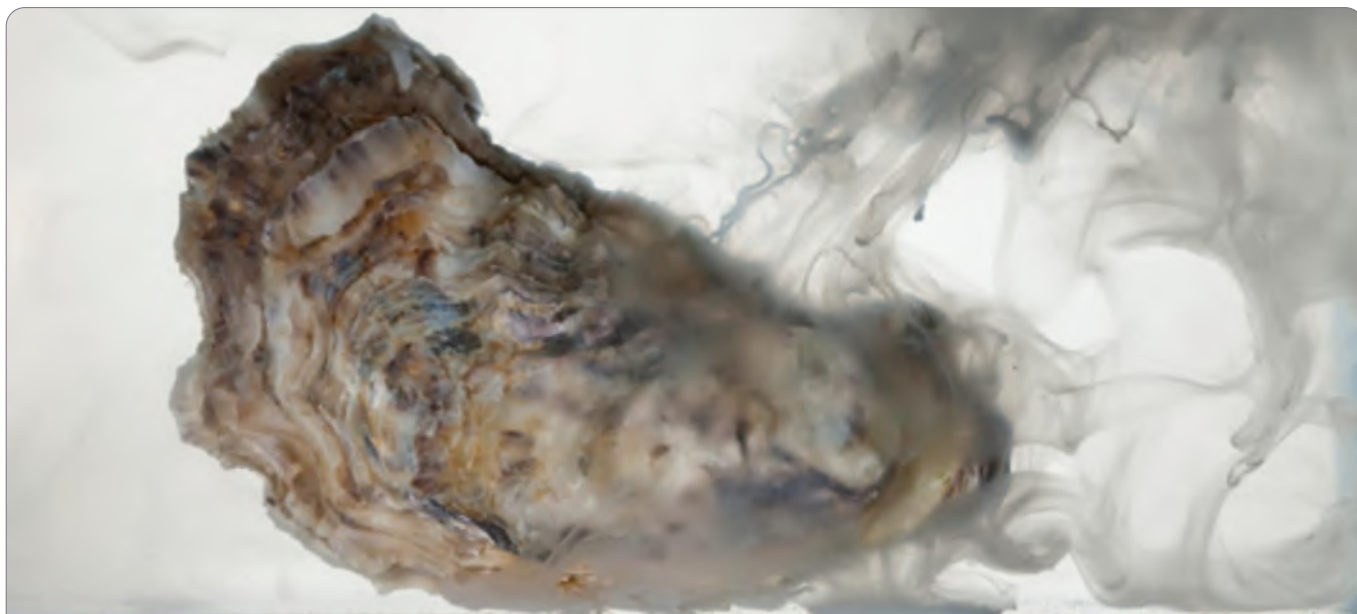
36. ábra. A műanyagok kioldódása a tengervíz pH-értékének akár 0,5 egységgel történő csökkenéséhez vezethet. Forrás: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

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)

Az óceán savasodása a tengeri környezet feltételeinek megváltozása, tartós és növekvő ökológiai nyomás.¹²¹ Az ökoszisztémákra gyakorolt hatások évtizedekig, évszázadokig és még tovább is érezhetők. A megfigyelések igazolják a part menti rendszerek biodiverzitásának csökkenését a pH-érték csökkenése miatt.^{122, 123} Ez csökkenti az ökoszisztémák stabilitását, veszélyezteti funkcióikat, beleértve az élőhelyeket, a tápanyagok körforgását és a szén-dioxid-tárolást.¹²³

Kutatások szerint, az óceán savasodásával a kagylók (*Mytilus edulis*) lassabban nőnek és rosszabbul élnek (37. ábra). Ez csökkenti számukat, ami rontja a vízszűrési képességüket és a part menti környezet minőségének fenntartását.¹²⁴

A jelenlegi óceánfelszíni pH-értékek legalább az elmúlt 26 000 évben példátlanok.¹²⁵ Ez a folyamat jelentős hatással van a korallzátonyokra, a mélytengeri ökoszisztémákra és a magas szélességi fokú ökoszisztémákra, amelyek különleges fajoktól függenek. Ezek a fajok pótolhatatlan szerepet játszanak, és kihalásuk megzavarja az ökoszisztéma kulcsfontosságú funkcióit, mivel nincsenek olyan fajok, amelyek helyettesíthetnék őket.¹²⁶



37. ábra. A csendes-óceáni osztriga zavaros spermát bocsát ki a Whiskey Creek osztrigatenyésztő telepén Oregonban. Egyes part menti vizekben a savasodás már komoly szintet ért el; itt a termelés felére csökkent, lassítva az osztriga lárvák növekedését.

Forrás: <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>

Az osztrigák és a kagylók populációja a karbonát telítettség csökkenésével párhuzamosan jelentősen visszaesik. Az óceán savasodása az osztrigapopulációk és az általuk a vadonban nyújtott ökoszisztéma-szolgáltatások csökkenéséhez vezethet, valamint ronthatja a tengeri élelmiszerek minőségét is.

A kutatások megerősítik, hogy a mikroműanyagok jelentős negatív hatással vannak a mikroalgák biológiai paramétereire, mint például a növekedés,¹²⁷ a klorofilltartalom, a fotoszintézis aktivitás és a reaktív oxigénszármazékok.^{128, 129}

Az adatok azt mutatják, hogy az MM-expozíció a szárazföldi növények, tengeri algák és édesvízi algák fotoszintézisének 7,05–12,12%-os globális csökkenéséhez vezet.¹³⁰ A fotoszintézis a Földön a molekuláris oxigén (O₂) előállításának elsődleges folyamata, amely a légkörbe kerül.

A tengeri üledékekben található mikroműanyagok megváltoztatják a mikrobiális közösségeket és megzavarják a nitrogénciklust, ami potenciálisan felerősítheti az ember által okozott problémákat, mint például, a mérgező algavirágzás. A planktonközösségek változásai az óceán felszínén súlyosbíthatják a klímaváltozás által okozott oxigénszegénységet, ami oxigénhiányhoz vezet a tengeri szervezeteknél.¹³¹

Az adatok azt mutatják, hogy 1960 és 2010 között az óceánok oldott oxigéntartalma 2 %-kal csökkent a víz hőmérsékletének emelkedése és a szennyező anyagok, köztük az ipari, háztartási és mezőgazdasági szennyvíz felhalmozódása miatt.¹³² Az oxigéncsökkenés holtzónák kialakulásához vezet – olyan óceáni területekhez, ahol a tengeri növény- és állatvilág szinte teljesen eltűnt. A megfigyelések szerint az 1960-as években 45 holtzóna volt a világ óceánjaiban, míg 2011-re számuk körülbelül 700-ra nőtt.¹³³ Az UNDP honlapján közzétett adatok szerint a holtzónák száma az 1960-as évek óta minden évtizedben megduplázódik. Ezen tendencia alapján nagy valószínűséggel 2025-re ez a szám elérheti az 1500-at.¹³⁴

A műanyaghulladékok számos folyamatot befolyásolnak a Föld rendszerében. Kutatások szerint, súlyosbíthatják az olyan kritikus környezeti problémákat, mint a biológiai sokféleség csökkenése és az éghajlatváltozás.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.

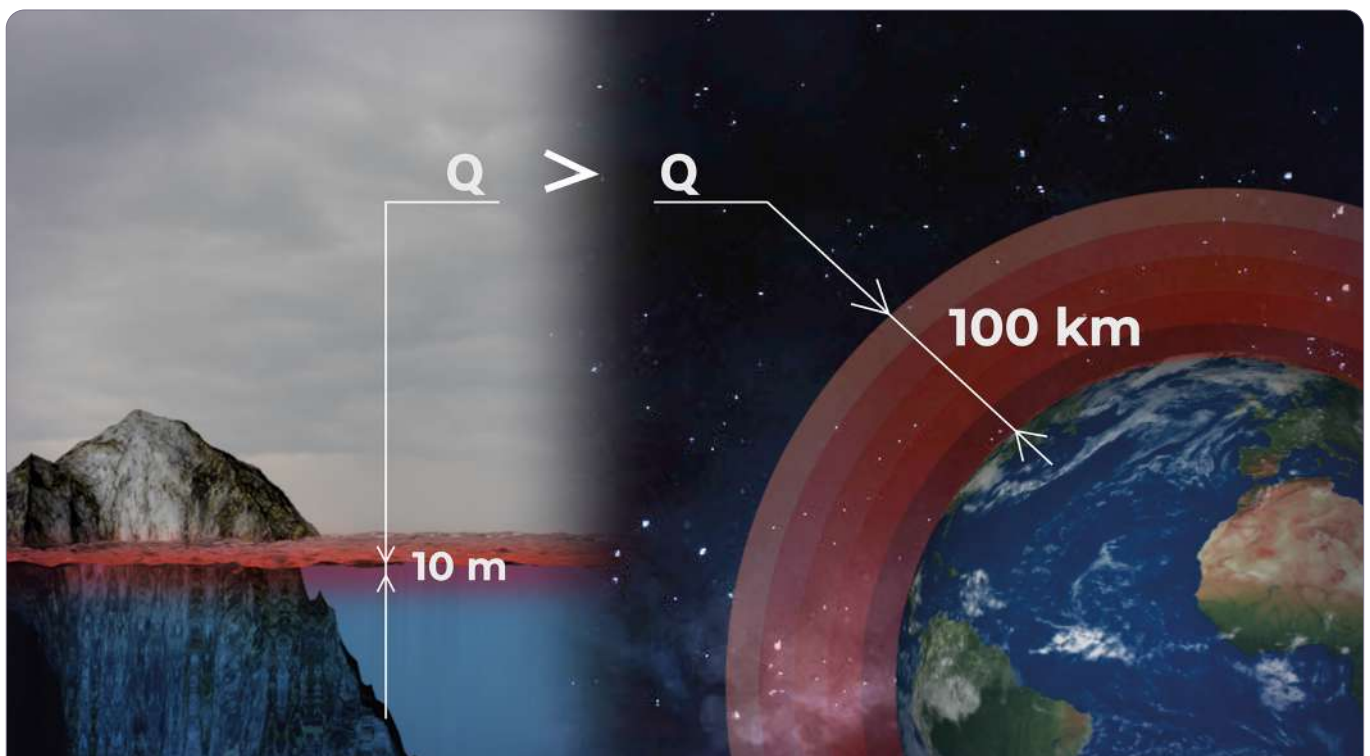
<https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

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>

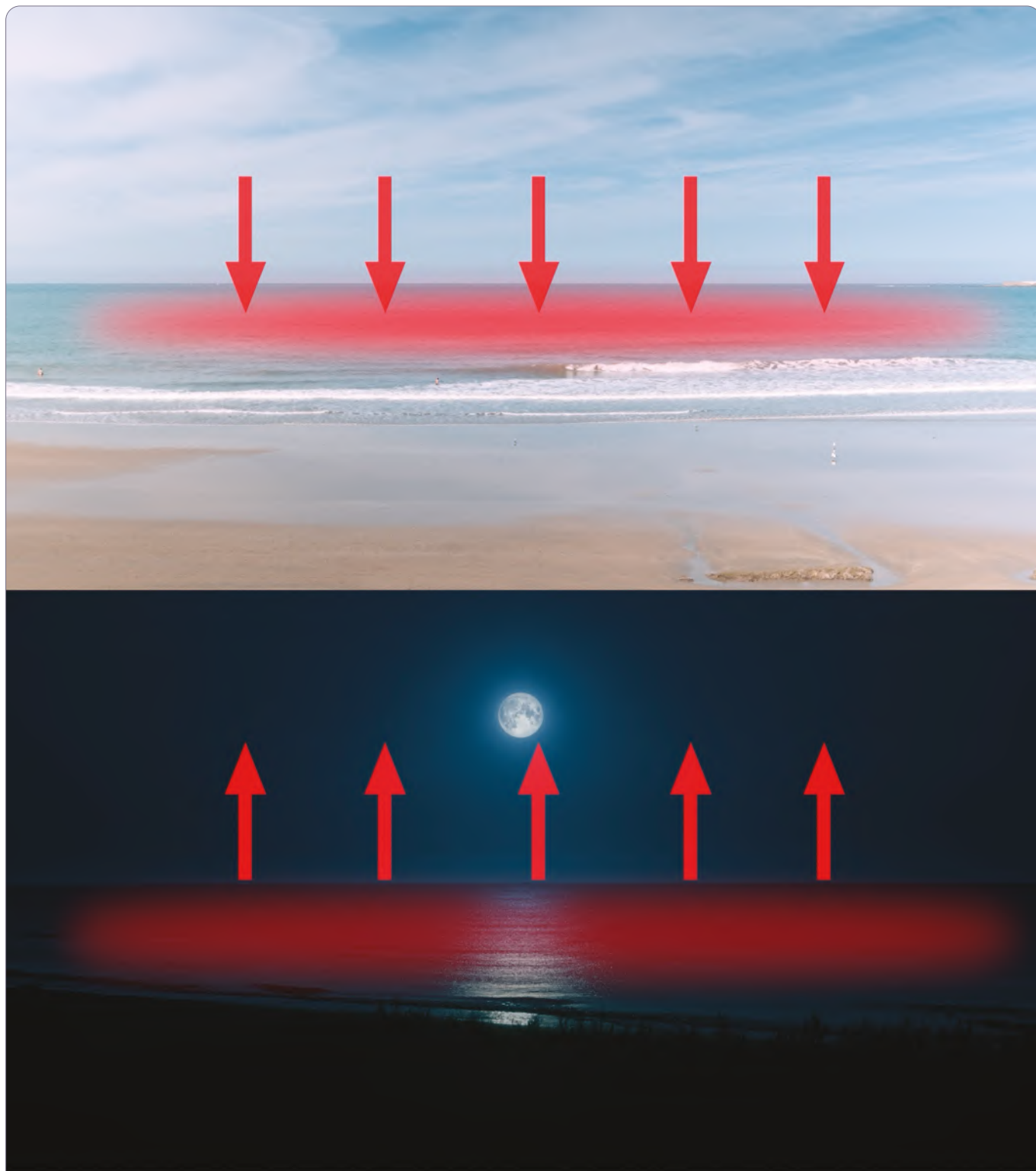
AZ MNM HATÁSA AZ ÉGHAJLATRA

Az óceán funkciói

Az óceán kulcsszerepet játszik a bolygó éghajlati egyensúlyának fenntartásában, természetes „légkondicionálóként” működik. Az óceán egyedülálló képessége, hogy elnyeli és fokozatosan leadja a hőt, segít mérsékelni a Föld hőmérsékleti ingadozásait. A tenger vízének mindössze tíz méteres rétege több hőt képes elnyelni, mint a Föld teljes légköre (38. ábra). Ez csökkenti a hőmérséklet ingadozásait mind nappal, mind éjszaka (39. ábra), valamint a szezonok között – nyáron és télen.



38. ábra. Az óceán és a légkör hőkapacitásának összehasonlítása: annak ellenére, hogy a levegő tömege kisebb, az óceán több tízszer annyi hőt képes felhalmozni és megtartani, így kulcsszerepet játszik a Föld éghajlatának szabályozásában.



39. ábra. A napi hőcsere vázlatos ábrázolása: az óceán nappal elnyeli a hőt, éjszaka pedig leadja, kiegyenlítve a hőmérséklet-ingadozásokat.

Az óceáni áramlatok meleg vizet szállítanak a trópusokról a hidegebb régiókba, például az északi szélességre. Ez segít mérsékelni a part menti területek éghajlatát. A hideg áramlatok viszont, a lehűtött vizet visszaszállítják az Egyenlítő felé. Így szabályozza az óceán a bolygó éghajlatát.

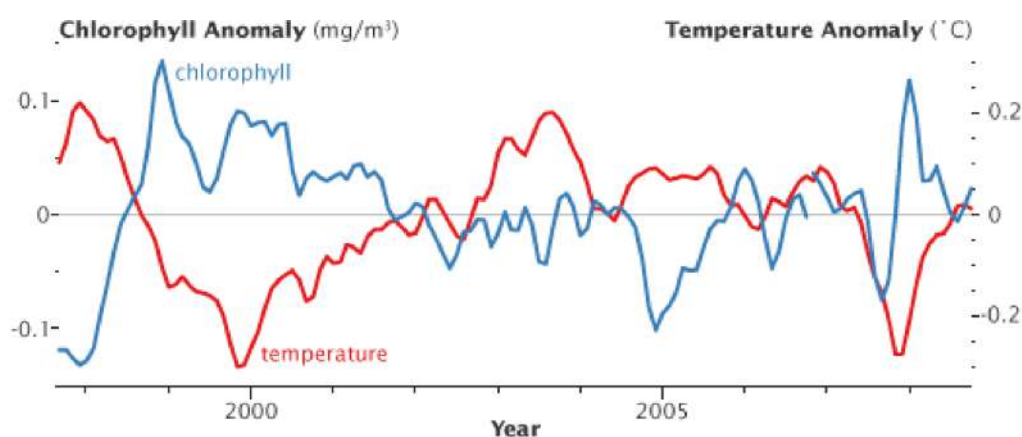
Az óceán jelentős hatással van a légköri folyamatokra, és kulcsszerepet játszik a felhők és a csapadék kialakulásában. Minden nap hatalmas mennyiségű víz párolog el a felszínéről, majd később felhőkké kondenzálódik, és eső vagy hó formájában hullik vissza a Földre. Ez a folyamat elengedhetetlen a folyók, tavak és talaj édesvízkészleteinek pótlásához.

Az óceánban élő mikroszkopikus algák, például a fitoplankton (40. ábra), az oxigén több mint 50%-át termelik.¹³⁶ Számos óceánkémiai és biológiai modell előrejelzi, hogy az óceán felszínének a légkörben növekvő üvegházhatású gázok hatására történő felmelegedésével a fitoplankton termelékenysége csökkenni fog (41. ábra).^{137, 138}



40. ábra. A fitoplanktonok rendkívül változatosak, a fotoszintetizáló baktériumoktól (cianobaktériumok) a növényyszerű diatómákon át a páncélos coccolithophorákig (a rajzok nem méretarányosak). (Kollázs Sally Bensusen rajzai és mikrofelvételei alapján, NASA EOS Project Science Office, NASA EOS projekt tudományos iroda).

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



41. ábra. Az óceán körülbelül 70%-a állandó rétegekre van osztva, amelyek nem keverednek jól egymással. 1997 vége és 2008 közepe között a műholdak megfigyelték, hogy az átlagnál melegebb hőmérséklet (piros vonal) az átlag alatti klorofillkoncentrációhoz (kék vonal) vezetett ezeken a területeken. (A grafikon Behrenfeld et al. 2009 alapján, Robert Simmon által adaptálva).

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

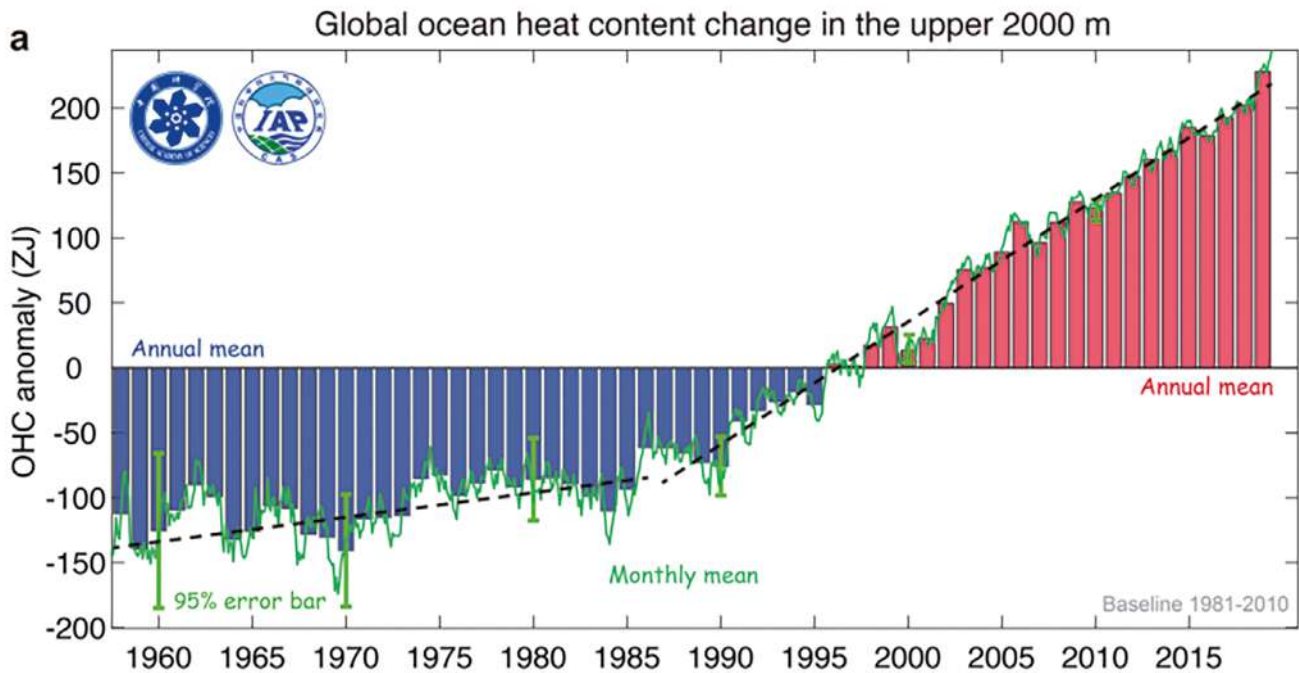
¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

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>

Az óceán hőmérsékleti viszonyainak változása

A 2024-es globális óceánok állapotáról szóló jelentés aggasztó képet fest: az óceánok hőmérséklete soha nem látott mértékben emelkedik. A tanulmányok szerint 1960 és 1986 között az óceánok hőmérséklete egyenletes ütemben emelkedett. Az elmúlt évtizedekben azonban ez a folyamat kétszeresére gyorsult (42. ábra).¹³⁹



42. ábra. A hőtartalom változása a világóceánok felső 2000 méteres rétegében.

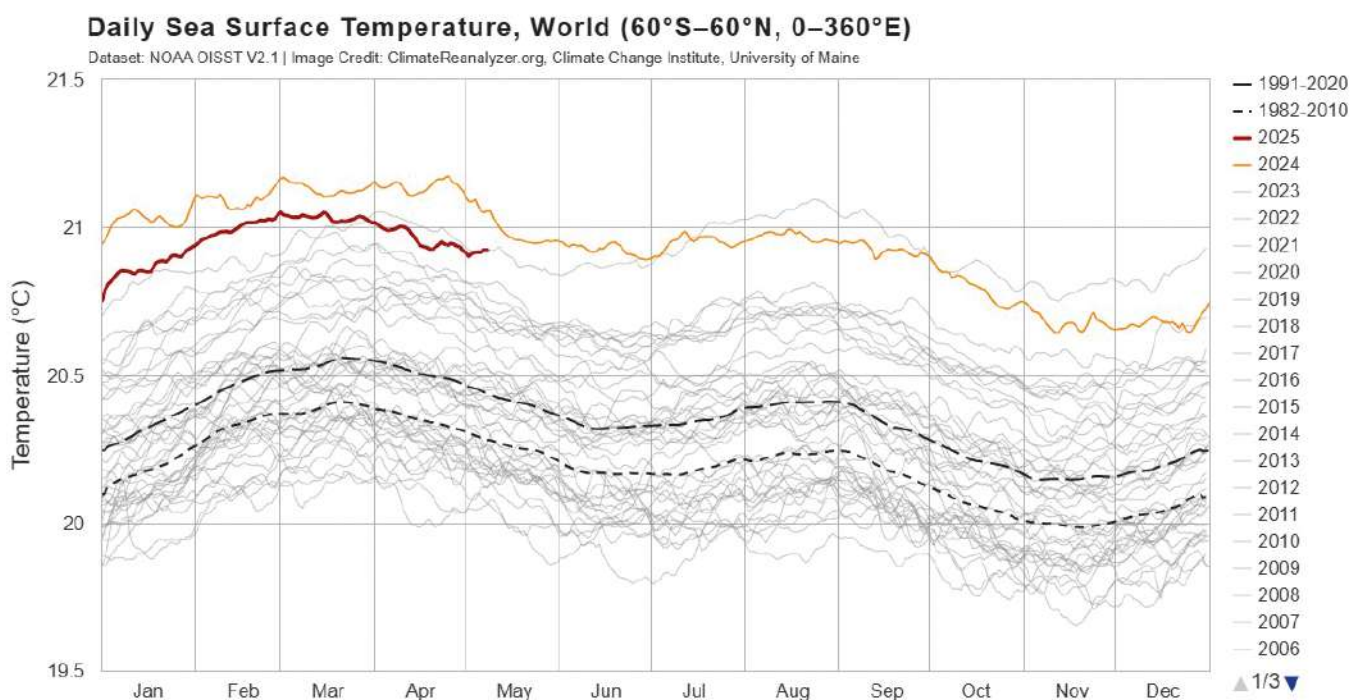
Forrás: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

2023 lett a valaha mért legmelegebb év, meghaladva a 2016-ban elért korábbi csúcst. A tengeri felszíni hőmérséklet (SST) tekintetében is minden idők rekordját megdöntötték.¹⁴⁰ Ez a tendencia folytatódott, és 2024 megdöntötte a 2023-as rekordot (43. ábra), így ez lett a legmelegebb év a mérések történetében.¹⁴¹ Ebben az időszakban a tengeri felszíni hőmérséklet 15 egymást követő hónapban rekord havi értékeken maradt, ami jól mutatja a felmelegedési tendencia tartós maradását.

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.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Accessed May 1, 2025)

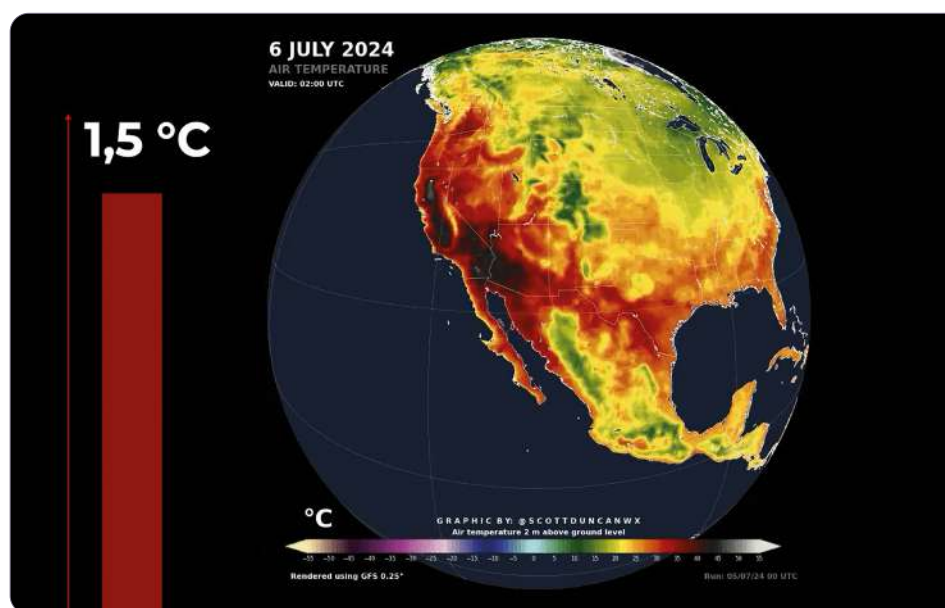
¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.



43. ábra. Napi tengeri felszíni hőmérséklet: a felső óceánréteg hőmérsékletének változásainak grafikus ábrázolása, amely az évszakok szerinti ingadozásokat tükrözi.

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

A feljegyzések óta először a globális átlagos felszíni hőmérséklet 1,5 °C-kal haladta meg az iparosodás előtti szintet¹⁴² (44. ábra). A szakértők szerint ez egy kritikus küszöbérték: ha ezt túllépjük, az emberiség nagyszabású éghajlati katasztrófákkal fog szembesülni.¹⁴³



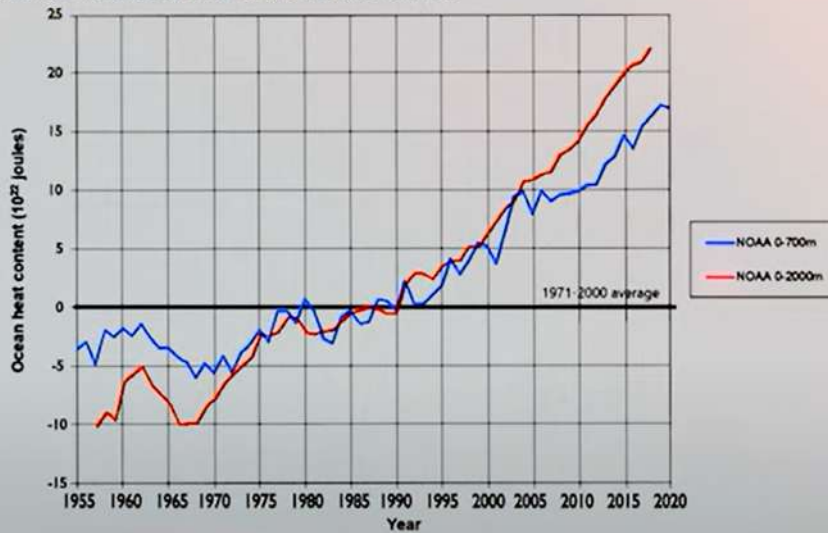
44. ábra. Az éghajlati mérőföldkő sematikus ábrázolása: 2024-ben az átlagos éves globális hőmérséklet először haladta meg az iparosodás előtti szinthez képest az 1,5 °C-os küszöbértéket.

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)

Egy ilyen hőmérséklet-emelkedés a 21. század közepére volt várható,¹⁴⁴ azonban ezt a küszöbértéket máris átlépte. Az ENSZ becslései szerint, ha a jelenlegi tendenciák folytatódnak, a globális hőmérséklet ebben a században közel 3 °C-kal emelkedhet.¹⁴⁴

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



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

45. ábra. Az óceán hőtartalma a 0–700 és 0–2000 méteres rétegekben. NOAA adatsorok, 1955–2020, standard.

Forrás: NOAA adatportál
www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

46. ábra.

Ez az ábra a világ óceánjainak felső 700 méterének hőtartalmának változását mutatja 1955 és 2023 között. Az óceánok hőtartalmát joule-ban, azaz energiaegységben mérik, és összehasonlítják a 1971–2000 közötti átlaggal, amelyet referenciaértéknek tekintve nullára állítottak be. Egy másik referencia-időszak kiválasztása nem változtatna az adatok időbeli alakulásán. A vonalakat négy ország kormányzati szervezetei különböző módszerekkel, egymástól függetlenül számították ki: az Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatala (NOAA), Ausztrália Nemzeti Tudományos és Ipari Kutatószervezete (CSIRO), Kína Légkörfizikai Intézete (IAP) és a Japán Meteorológiai Ügynökség Meteorológiai Kutatóintézete (MRI/JMA).

Forrás: CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024

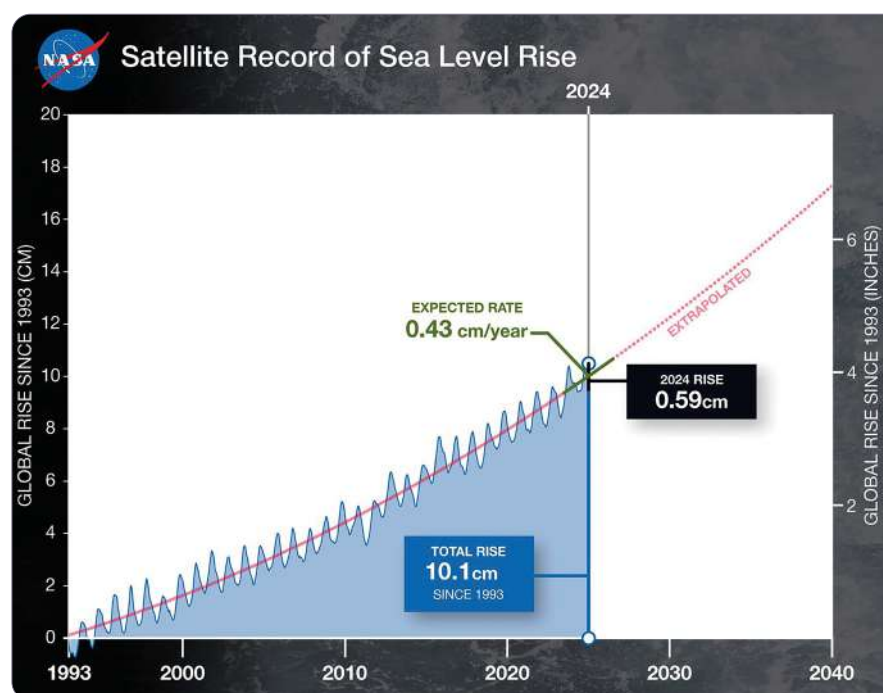


¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

A Csendes-óceán egy részének középső rétegei az elmúlt 60 évben 15-ször gyorsabban melegedtek fel, mint az előző 10 000 évben (45–46. ábra).¹⁴⁵ Ez azt jelzi, hogy a globális felmelegedés nemcsak a felső óceánrétegeket érinti, hanem a napfény által nem elérhető mélyebb rétegeket is. Az ilyen mélységben lévő víz melegítése hatalmas mennyiségű energiát igényel, ami aláhúzza a probléma nagyságrendjét. A tudósok szerint ahhoz, hogy az óceán a jelenlegi ütemben melegedjen, egy egész év alatt másodpercenként 7 atombomba robbanásának megfelelő energia szabadulna fel¹⁴⁶ – ez a megdöbbentő adat felveti a kérdést: honnan származik ez az energia?

Az óceán hőmérsékletének emelkedése elkerülhetetlenül a tengerszint emelkedéséhez vezet, ami az egész partvonalat elárasztja. Az elmúlt két évszázadban a globális átlagos tengerszint 21 centiméterrel emelkedett, és csak az elmúlt 30 évben 10,1 centiméterrel.¹⁴⁷ A jelenlegi emelkedés üteme 2,5-szerese a korábbiaknak, és ez a tendencia várhatóan folytatódik. Ha a helyzet nem változik, milliók válnak éghajlati menekültekké, akik kénytelenek elhagyni otthonukat, és a partoktól távol keresni menedéket.

„A 2024-ben tapasztalt emelkedés nagyobb volt, mint vártuk” – mondta Josh Willis, a NASA dél-kaliforniai Jet Propulsion Laboratory tengerszint-kutatója. – **„Minden év kicsit más, de egyértelmű, hogy az óceán szintje tovább emelkedik, és az emelkedés üteme egyre gyorsul.”**¹⁴⁸ (47. ábra).



47. ábra. Ez a grafikon az 1993 óta mért globális átlagos tengerszintet (kék színnel) mutatja, amelyet öt műhold mérése alapján állapítottak meg. A folytonos piros vonal jelzi a tengerszint emelkedésének pályáját, amely az elmúlt három évtizedben több mint megduplázódott. A szaggatott piros vonal a tengerszint jövőbeli emelkedését jelzi. Forrás: NASA/JPL-Caltech.

Forrás: 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>

Az óceánok felmelegedése hozzájárul a szélsőséges időjárási események, például árvizek, tájfunok és rendkívüli csapadékok gyakoribbá válásához és intenzívebbé válásához. Ezek a változások veszélyeztetik a bolygó ökoszisztémáit és milliárdnyi ember életét, és évről évre egyre nyilvánvalóbbá válik a hatásuk.

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.

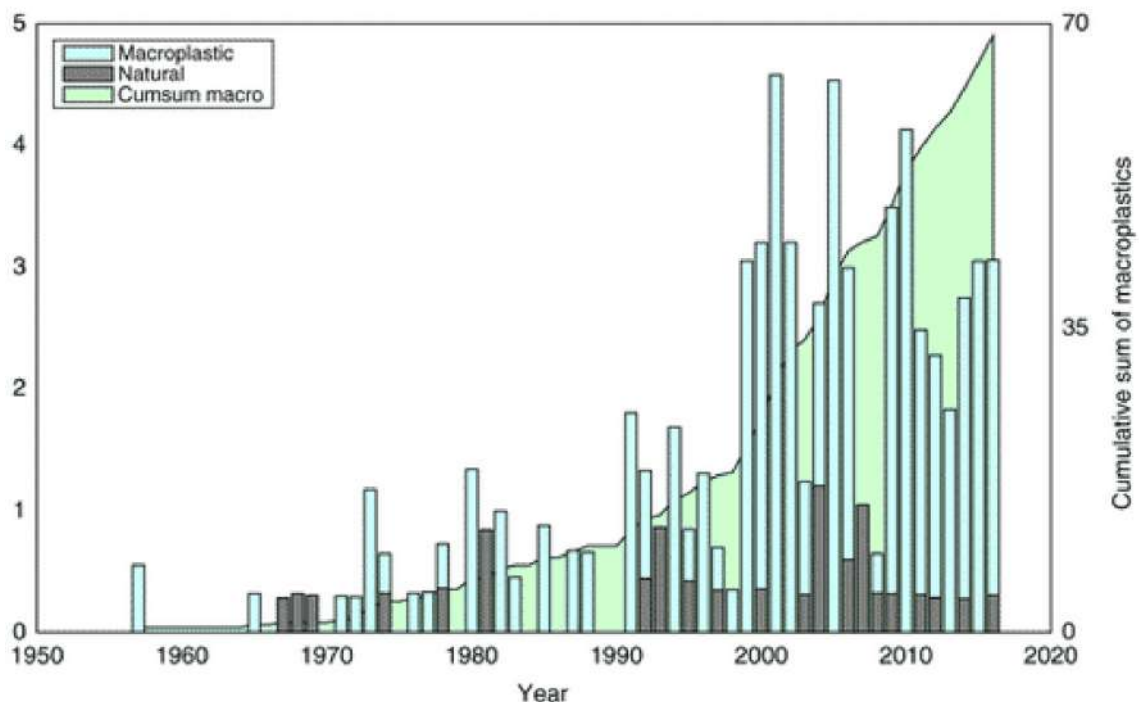
<https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

Miért melegszik az óceán? Hipotézis

Az óceán melegedéséhez hozzájáruló, széles körben elismert fő tényezők az üvegházhatású gázok, például a CO₂, amelyek visszatartják a hőt a légkörben és növelik az óceán felső rétegeinek hőmérsékletét. Vannak azonban más tényezők is, amelyek szintén jelentős hatással lehetnek erre a folyamatra. Az óceán melegedését befolyásoló egy további tényezőt a „X-tényező” című fejezetben tárgyalunk.

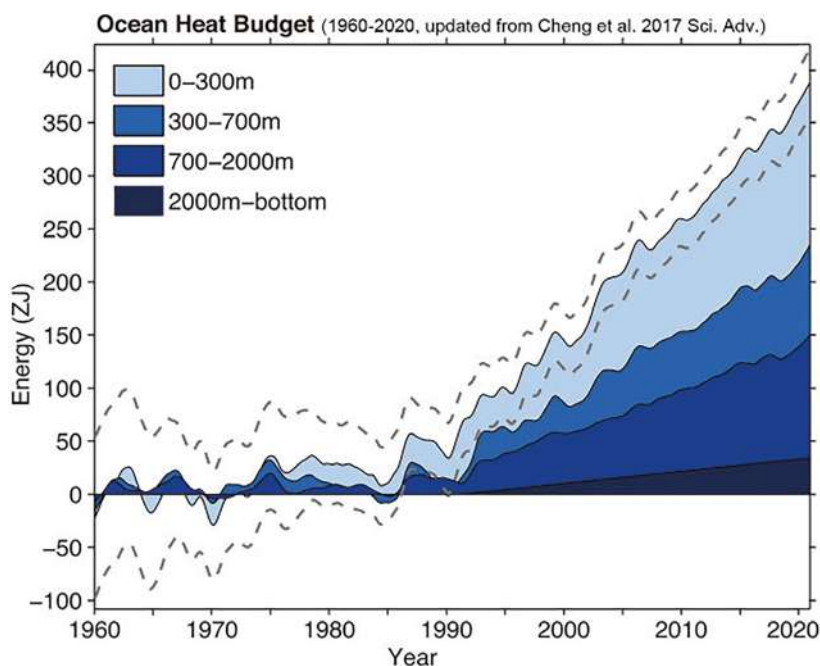
A 20. század második felétől kezdve az óceánokban a műanyagok mennyisége hirtelen megnőtt, ami egybeesett a gyors ipari fejlődés és a műanyagtermékek tömeggyártásának időszakával (48. ábra). 1960 és 2019 között az óceán hőmérsékletének változása is megfigyelhető volt. A diagram (49. ábra) a tengeri felszíni hőmérséklet átlagos emelkedését mutatja, amelyet szintén a 20. század közepe óta rögzítenek.

A két ábra (48–49. ábra) összehasonlításakor korreláció figyelhető meg az óceáni műanyagkoncentrációk emelkedése és az óceánok melegedése között. Ez arra utal, hogy az óceánok műanyagszennyezése az óceánok melegedéséhez hozzájáruló egyik jelentős, de még nem kellőképpen kutatott tényező lehet.



48. ábra. Az óceánokban az elmúlt évtizedekben megnövekedett műanyagkoncentrációt bemutató diagram. A makroműanyagok kumulatív mennyisége az óceánokban és az éves értékek.

Forrás: 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>



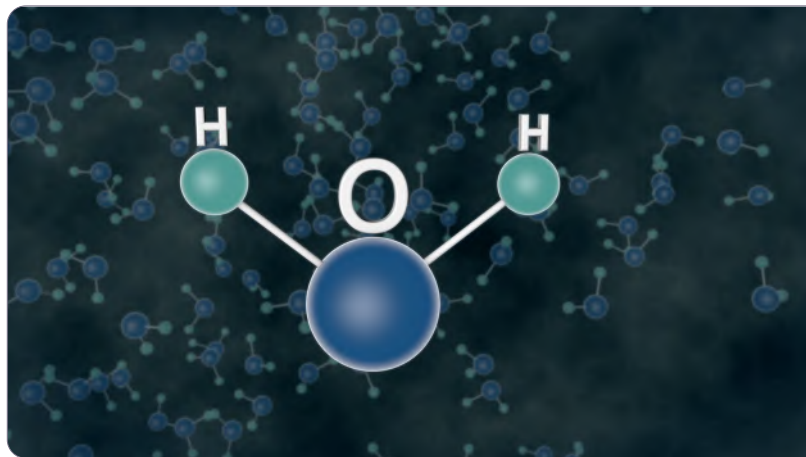
49. ábra. Az óceánok globális hőmérsékletváltozásának grafikonja ugyanazon időszakban (1960–2019).

Forrás: (Purkey and Johnson, 2010; Cheng et al., 2017 adatok frissítésével) Cheng, L. 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>

A kérdés további vizsgálatához fontos megérteni, hogy a műanyagok befolyásolhatják-e az óceánvíz fizikai tulajdonságait, például, a hővezető képességét és a hőkapacitását. És ezek a változások hozzájárulhatnak-e az óceán hőmérsékletének emelkedéséhez? E folyamatok jobb megértése érdekében vizsgáljuk meg a víz alapvető tulajdonságait és azt, hogy hogyan hat egymásra a szennyező anyagokkal.

A víz alapvető tulajdonságai

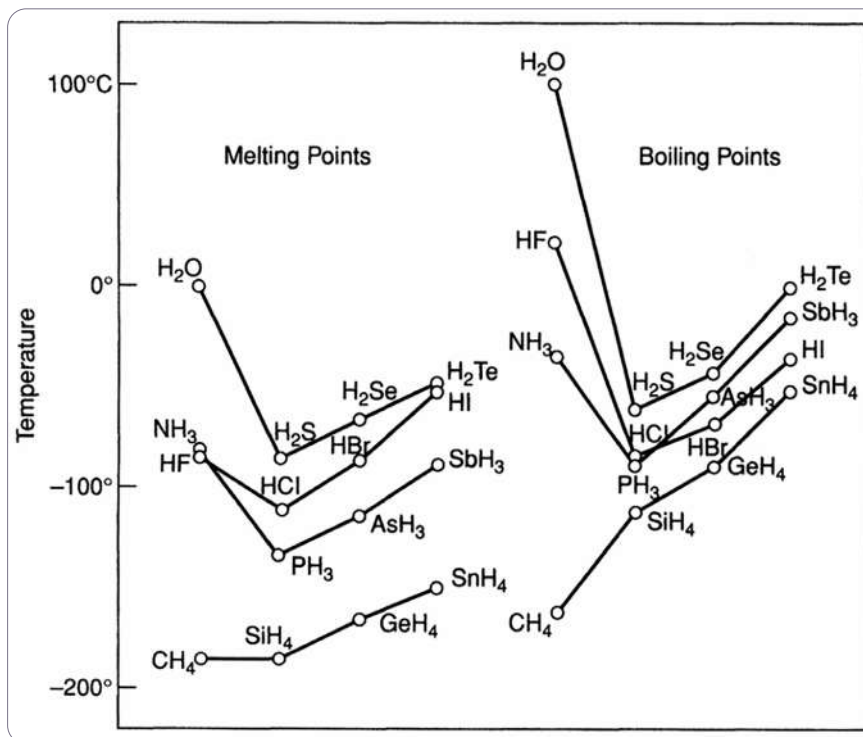
A vízmolekula szimmetrikus V alakú, két hidrogénatom egy oldalon helyezkedik el a nagyobb oxigénatomhoz képest (50. ábra).



50. ábra.

Vízmolekula sematikus ábrázolása: két hidrogén (H) atom $\sim 104,5^\circ$ -os szögben kapcsolódik egy oxigén (O) atomhoz, így pozitív és negatív töltésű dipólust képezve.

Ez a szerkezet eltér a lineáris molekuláktól, mint például a CO_2 , ahol az összes atom egyenes vonalban helyezkedik el. A vízmolekula egyedi alakja miatt számos folyamatban elengedhetetlen szerepet játszik a Földön. A vízmolekulák sajátos tulajdonságai lehetővé teszik, hogy a víz olyan hőmérsékleten is folyékony állapotban maradjon, amelyen más háromatomos molekulák általában gázzá válnak (51. ábra).



51. ábra. Hidridmolekulák izoelektronikus szekvenciáinak olvadáspontjai (bal oldalon) és forráspontjai (jobb oldalon). A víz hőmérsékletei jelentősen magasabbak, mint amit a hasonló vegyületekre vonatkozó adatok extrapolálása alapján várni lehetett.

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

Ez a vízmolekulákat összekötő hidrogénkötéseknek¹⁴⁹ köszönhető, amelyek erős és rendezett szerkezetet alkotnak.

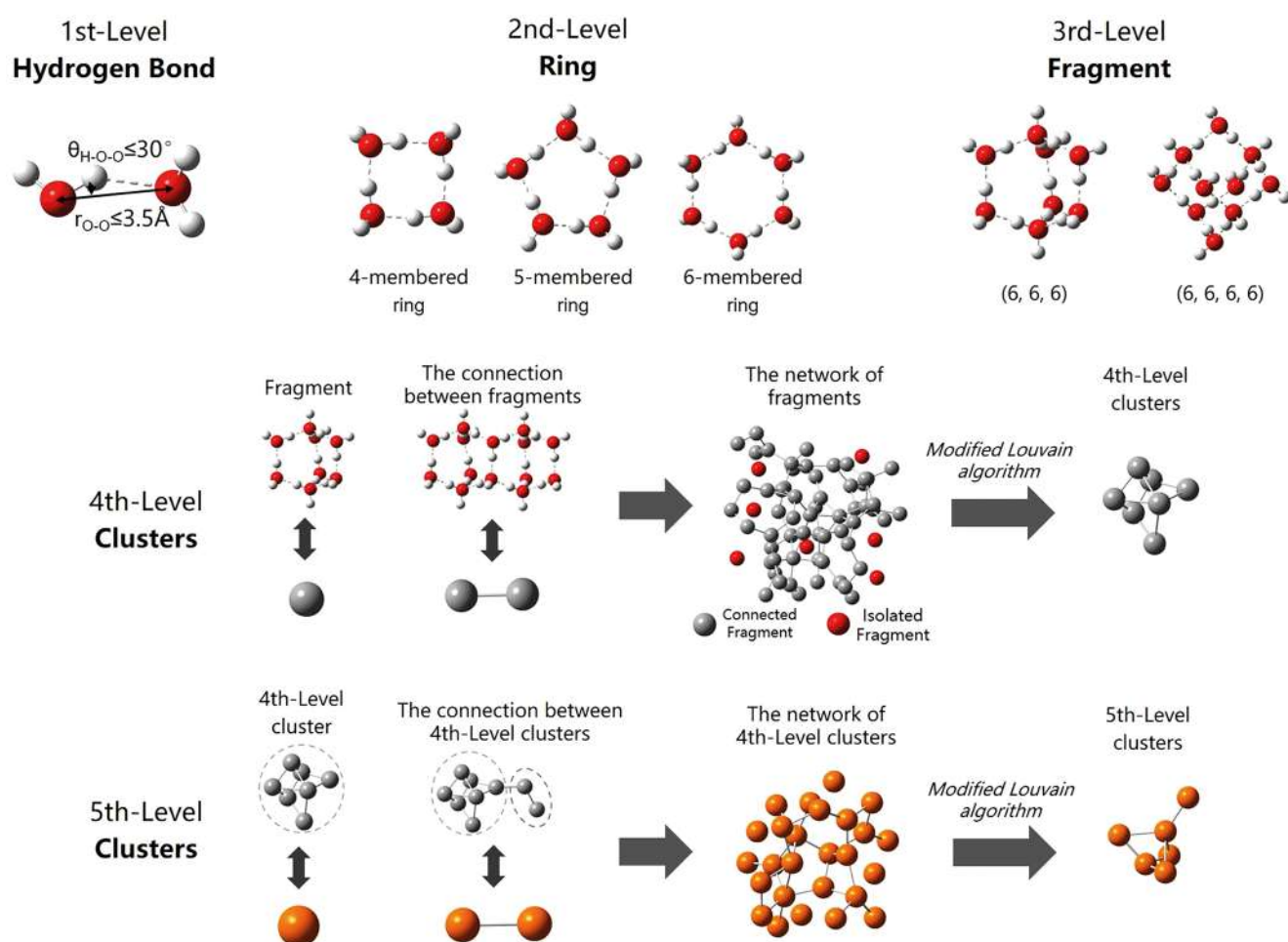
A legtöbb hidrogénkötés gyenge vonzás, kötési ereje körülbelül egy tized része a tipikus kovalens kötésnek. Mindazonáltal rendkívül fontosak. Nélkülük minden fa szerkezet összeomlana, a cement szétmorzsolódna, az óceánok elpárolognának, és minden élő anyag élettelen anyaggá bomlana.¹⁵⁰

Ezért képes a víz klasztereket képezni, ami magyarázza számos rendellenes tulajdonságát (52–53. ábra). A vízklaszterek a hidrogénkötés-hálózat több mint 95%-át lefedhetik, amelyek közül néhány klaszter maximálisan több ezer molekulát foglal magában, amelyek 3,0 nanométernél is nagyobbak.¹⁵¹

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

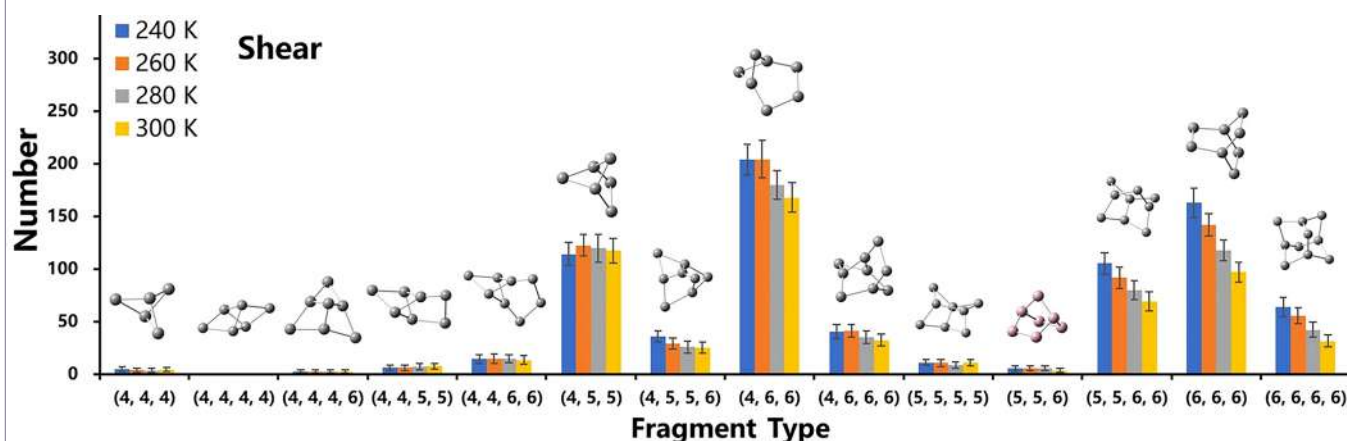
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

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>



52. ábra. A tanulmányban javasolt hierarchikus klaszterezési módszer vázlatos ábrázolása. A hidrogénkötések, gyűrűk és fragmensek első, második és harmadik szintű struktúráknak tekinthetők, amelyek kémiai szempontból gömb- és pálcamodellek, a piros és fehér gömbök pedig oxigén-, illetve hidrogénatomokat jelölnek. A teli és pontozott pálcák O–H kovalens kötések, illetve hidrogénkötéseket jelölnek. A 4. és 5. szintű klasztereket topológiai perspektívából ábráztuk. A gömbök az utolsó szintek szerkezetét jelzik. Megjegyezzük, hogy az ábrán látható szerkezetek csak egy válogatás a klaszterezési algoritmus által figyelembe vett szerkezetek közül.

Forrás: 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>



53. ábra. A hierarchikus struktúrák eloszlása a hálózat 1., 2. és 3. szintjén különböző esetekben.

(a) A hidrogénkötések (1. szintű struktúrák) eloszlása különböző hőmérsékleteken.

(b) A gyűrűk (2. szintű struktúrák) eloszlása különböző hőmérsékleteken.

(c) A fragmensek (3. szintű struktúrák) eloszlása különböző hőmérsékleteken. Megjegyzés: a (4, 4, 4) jelölés három négytagú gyűrűt tartalmazó fragmens szimbólumát jelöli.

Forrás: 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>

A víz hőkapacitása, hővezető képessége és sűrűsége, valamint ezek funkcionális jelentősége

1. A víz magas hőkapacitása

A víz normál körülmények között a legmagasabb fajlagos hőkapacitással rendelkezik az összes folyadék és szilárd anyag közül, csak néhány gáz, például a hidrogén előzi meg.¹⁵² Ez azt jelenti, hogy a víz nagy mennyiségű hőenergiát képes elnyelni, megtartani és átadni, miközben saját hőmérséklete csak viszonylag kis mértékben változik.

A víz hőkapacitását úgy számolják, hogy mennyi hőre van szükség 1 gramm víz hőmérsékletének 1 Celsius-fokkal történő emeléséhez, és ez standard körülmények között körülbelül 4,18 J/(g·°C). Ez a tulajdonság az éghajlat szabályozásának egyik kulcsfontosságú tényezője: az óceánvíz napközben hőt halmoz fel, és éjszaka fokozatosan bocsátja ki. Nyáron az óceán elnyeli a felesleges hőt, míg télen lassan leadja azt, óriási termosztátként működve és csökkentve a hőmérséklet-ingadozásokat a bolygón.

2. A víz hővezető képessége

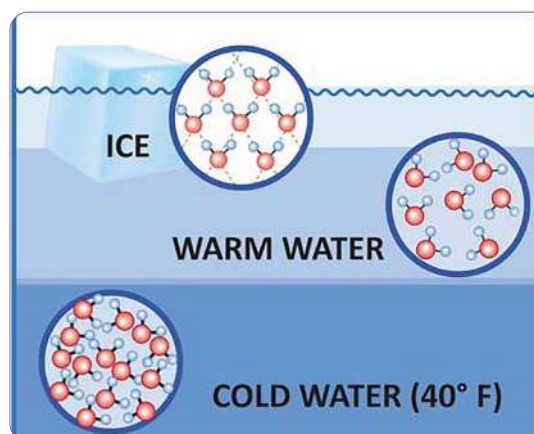
A víz hővezető képessége a fémekhez képest viszonylag alacsony, de sok más folyadéknál magasabb. A hővezető képesség azt mutatja, hogy egy anyag képes-e hőt átadni egyik részéről a másikra anélkül, hogy maga az anyag elmozdulna. Normál körülmények között (25 °C) a víz hővezető képessége körülbelül 0,6 W/(m·K), ami hatékony hővezetővé teszi természetes folyamatokban, például az óceánok és más víztestek hőeloszlásában.

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

Tanulmányok kimutatták, hogy a víz hővezető képessége a hőmérséklet emelkedésével egy bizonyos pontig növekszik.¹⁵² Ezenkívül, ez az érték szennyeződések vagy oldott anyagok jelenlétében változhat^{153, 154}. Ezek a jellemzők befolyásolják a hó eloszlását a vízben, ami kritikus fontosságú az óceán és a légkör közötti kölcsönhatások megértéséhez.

3. A víz sűrűségének rendellenes viselkedése

A legtöbb anyaggal ellentétben a víz sűrűsége a hőmérséklet változásával szokatlanul viselkedik. Amikor a víz 4 °C-ra hűl, sűrűsége nő, de ha tovább hűl (4 °C-ról 0 °C-ra), sűrűsége csökkenni kezd (54. ábra). Amikor a víz megfagy, sűrűsége körülbelül 8–9 %-kal csökken. Ez magyarázza, hogy a jég miért úszik ahelyett, hogy elsüllyedne. Ez a jelenség rendkívül fontos a víztestekben élő élet számára, mert a jég megvédi az alatta lévő vizet és az élő szervezeteket a fagyástól, és megakadályozza, hogy a víz egészen az aljáig megfagyjon.



54. ábra. A víz sűrűsége változásának sematikus ábrázolása hűtés közben: Ahogy a víz lehűl, a molekulák egy bizonyos pontig közelebb kerülnek egymáshoz (növelve a sűrűséget). A víz sűrűsége körülbelül 4 °C hőmérsékleten a legnagyobb. Ahogy a víz tovább hűl, a hidrogénatomok egymásnak nyomódnak, és a jégkristályok kialakulásával bizonyos módon rendeződnek, tágulnak, és a jég sűrűsége körülbelül 10 százalékkal kisebb lesz, mint a folyékony vízé.

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

A víz tulajdonságainak hatása az éghajlatra és az ökoszisztémákra

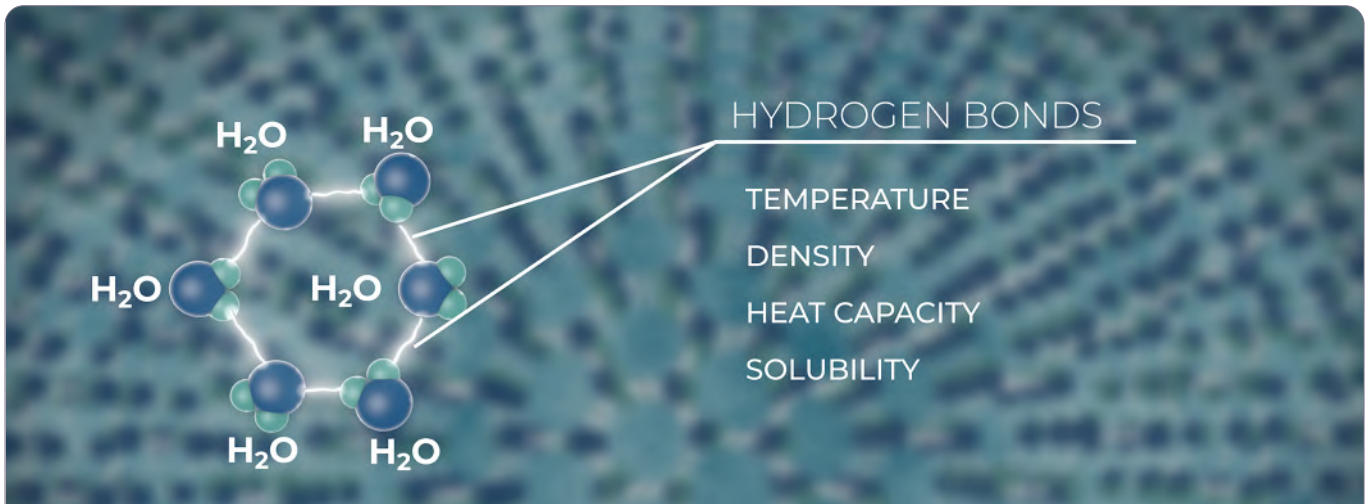
A víz hőmérsékletének változása jelentősen befolyásolhatja a világóceán hőegyensúlyát és hőmegtartó és -átadó képességét. Ez pedig hatással lesz a Föld éghajlati rendszerére.

Így a víz fizikai-kémiai tulajdonságai, különösen hőkapacitása és hővezető képessége, döntő szerepet játszanak a bolygó környezeti egyensúlyának fenntartásában és az éghajlati folyamatok szabályozásában (55. ábra).

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>

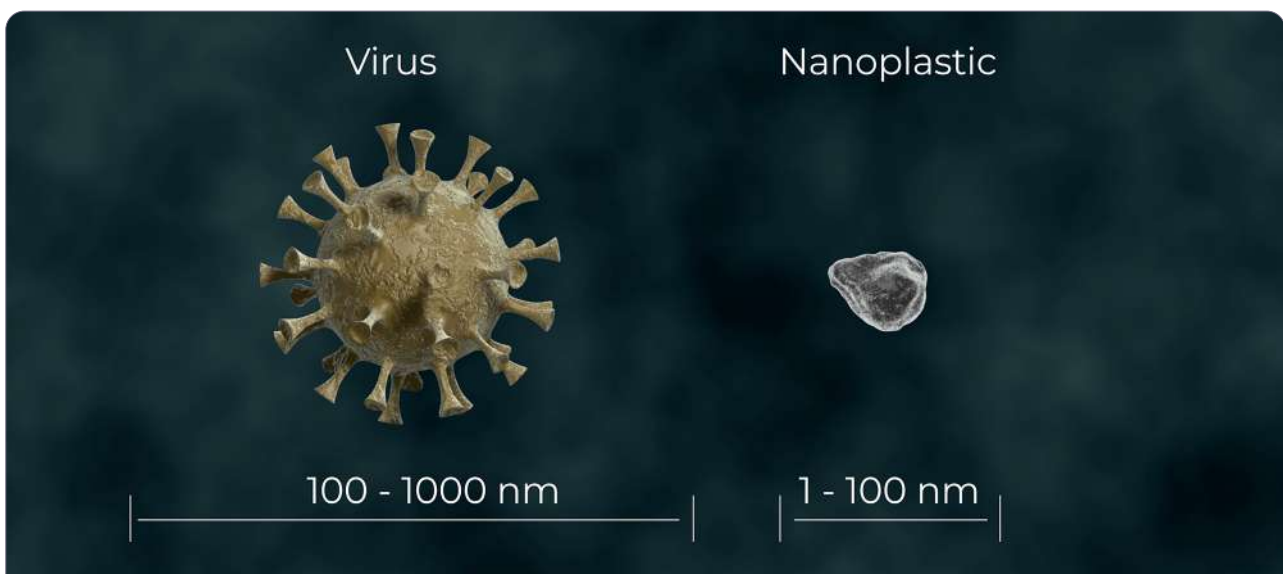
¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)



55. ábra. A vízmolekulákban lévő hidrogénkötések sematikus ábrázolása és azok hatása a víz legfontosabb tulajdonságaira: A hidrogénkötések hozzájárulnak a víz magas hőkapacitásához, lehetővé téve a hő hatékony elnyelését és megtartását. Ezek a kötések meghatározzák a víz sűrűségét is – amely 4 °C-on a legnagyobb –, valamint a poláros és ionos anyagok oldhatóságát, ami a vizet univerzális oldószerré teszi.

MNM szerepe a tengervíz fizikai tulajdonságainak megváltoztatásában

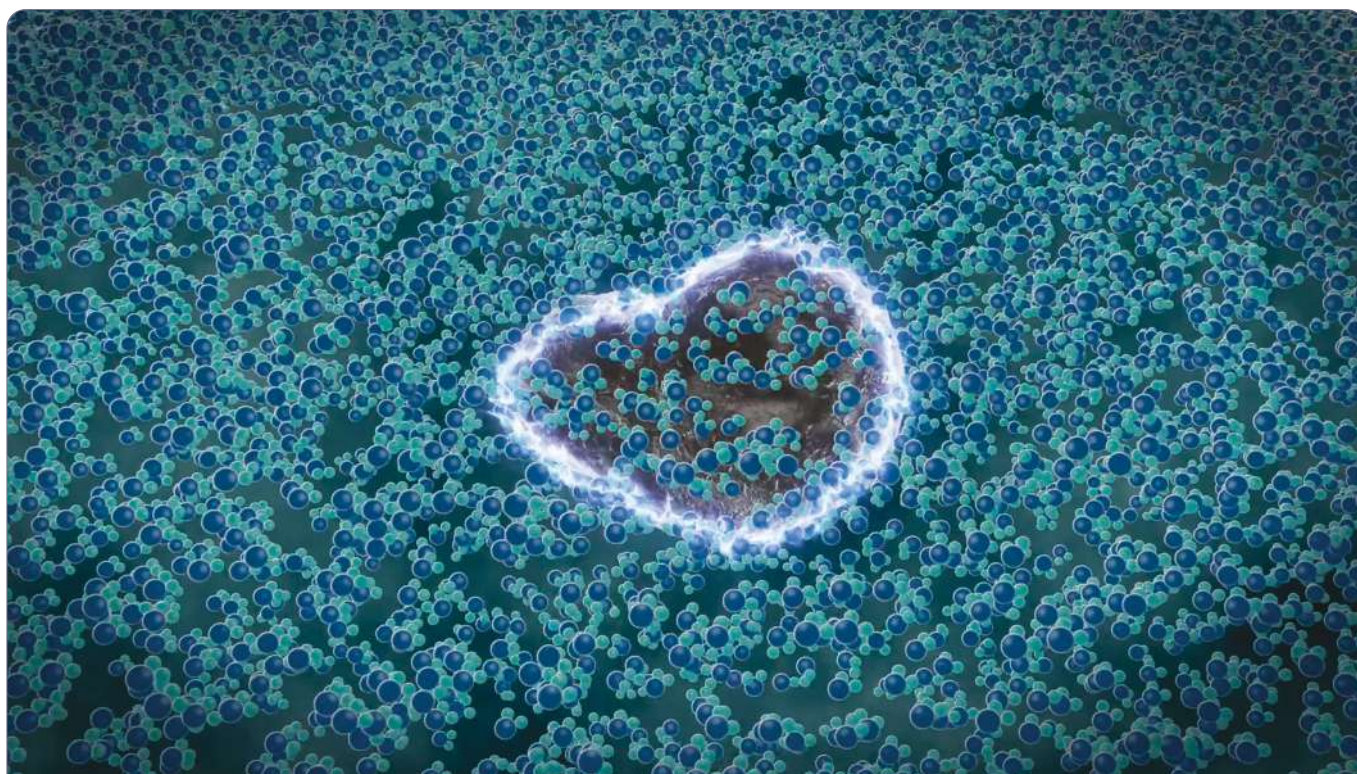
A petrokémiai ipar termékeként a műanyagok nem bomlanak le természetes úton. Ehelyett, kisebb részecskékre, például mikro- és nanoműanyagokra bomlanak.¹⁵⁵ Ezek a részecskék, különösen a nanoműanyagok, jelentősen befolyásolhatják a víz fizikai és kémiai tulajdonságait, ami viszont hatással lehet az ökoszisztémákra és az éghajlati folyamatokra. A nanoműanyagok olyan részecskék, amelyek mérete nanométerben mérhető, vagyis kisebbek, mint egy vírus (56. ábra).



56. ábra. A vírus és a nanoműanyag részecske méretének sematikus összehasonlítása.

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

Például, a nitrogént és oxigént tartalmazó nylon (poliamid) nanoműanyagai hidrogénkötéseket képezhetnek a vízzel.¹⁵⁶ Amikor a nanoműanyag részecskék vízbe kerülnek, megzavarják a vízmolekulák közötti hidrogénkötések rendezett szerkezetét. Ez megváltoztathatja a víz fizikai-kémiai tulajdonságait (57. ábra). Különösen a vízmolekulák mobilitása csökken, ami mérsékli azok hatékonyságát a hőcsere folyamatokban. Ezenkívül, különböző anyagokat tartalmazó vizes oldatokban a műanyag nanorészecskék elektromos töltést vehetnek fel.¹⁵⁷



57. ábra. Vízben lévő feltöltött műanyag nanorészecskék sematikus ábrázolása: instabil vízviszonyok, például szerves vagy szintetikus szennyeződések jelenléte, pH-érték, hőmérséklet vagy sótartalom változása esetén a nanoműanyagok felülete potenciálisan aktívvá válik, és képes elektromos töltéseket generálni a vízi környezetben.

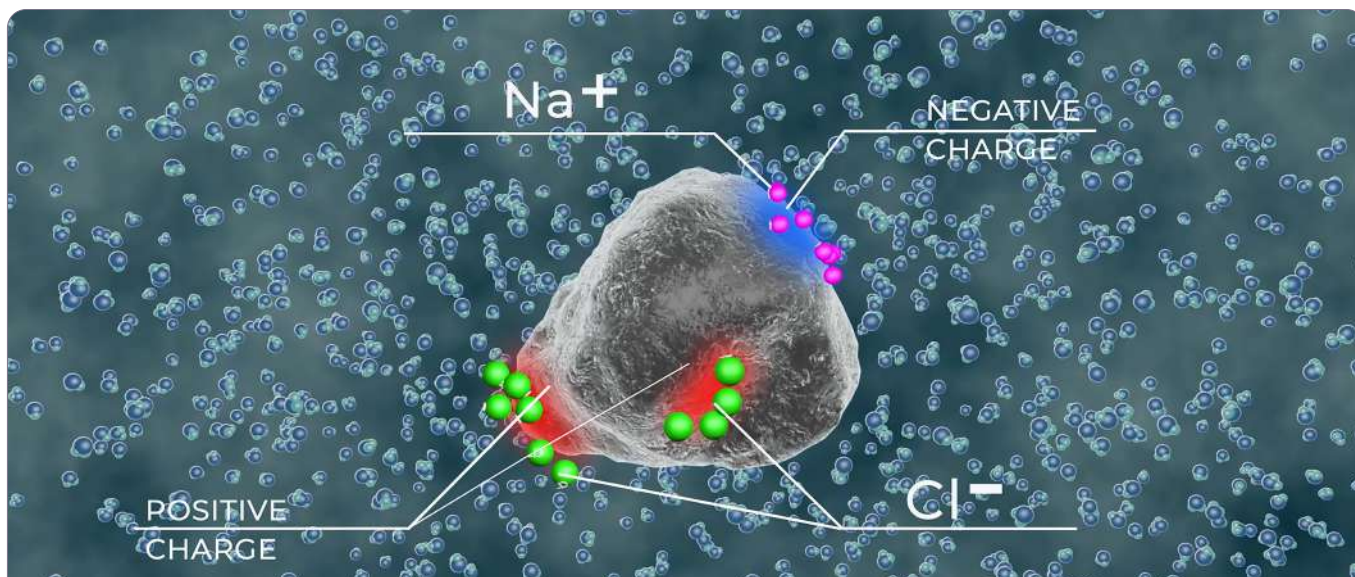
Forrás: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Ez a felületükön végbemenő kémiai változásoknak köszönhető, mint például az oxidáció és az ionok, például a nátrium (Na^+) és a klór (Cl^-) adszorpciója a tengervízben. Az ionokkal körülvett töltött műanyag nanorészecskék vonzzák a vízmolekulákat, és hidrát héjat képeznek körülöttük¹⁵⁸ (58. ábra).

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. 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>

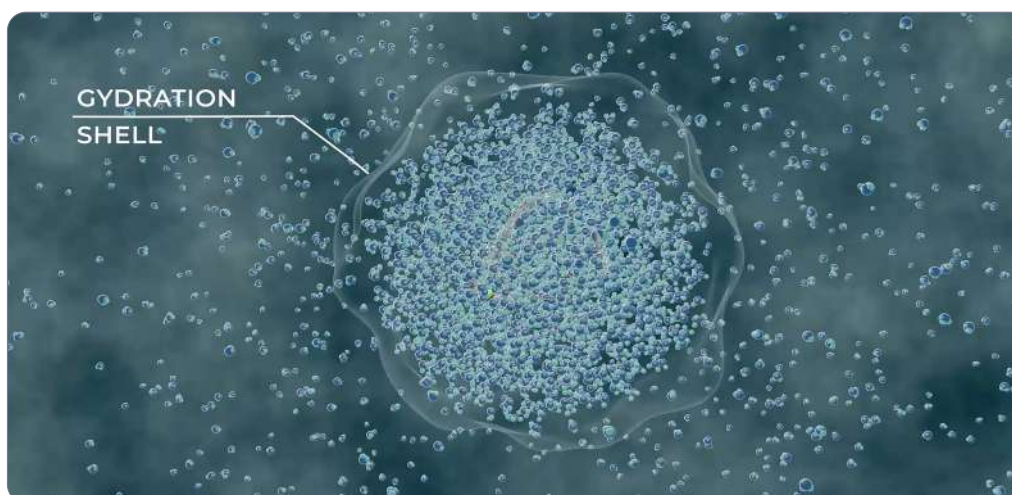
¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>



58. ábra. A töltött műanyag nanorészecskék körül kialakuló hidráthéj sematikus ábrázolása: ebben a folyamatban a töltött nanorészecskék vonzzák az ionokat, hozzájárulva a körülöttük lévő vízmolekulák kialakulásához és egy védő hidráthéj létrehozásához.

Forrás: 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>

A Lausanne-i Műszaki Egyetem (EPFL) kutatói úgy döntöttek, hogy meghatározzák az ionok hidráthéjának méretét, vagyis azt, hogy hány vízmolekula reagál egy ionra. Kiderült, hogy egy ion körülbelül egymillió vízmolekulát képes befolyásolni a környezetében. Ez a hatás fokozódik, ha a részecske nagy felületi töltéssel és magas koncentrációjú adszorbeált ionokkal rendelkezik. Ezért egyetlen nanoműanyag részecske megváltoztathatja több millió vízmolekula tulajdonságait¹⁵⁸ (59. ábra). A hidráthéjban kötött molekulák kevésbé mozgékonyak.¹⁵⁹ Ennek eredményeként a víz teljes hőkapacitása csökken.^{160, 161}



59. ábra.
A nanoműanyag
részecskék körüli
hidráthéj sematikus
ábrázolása.

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>

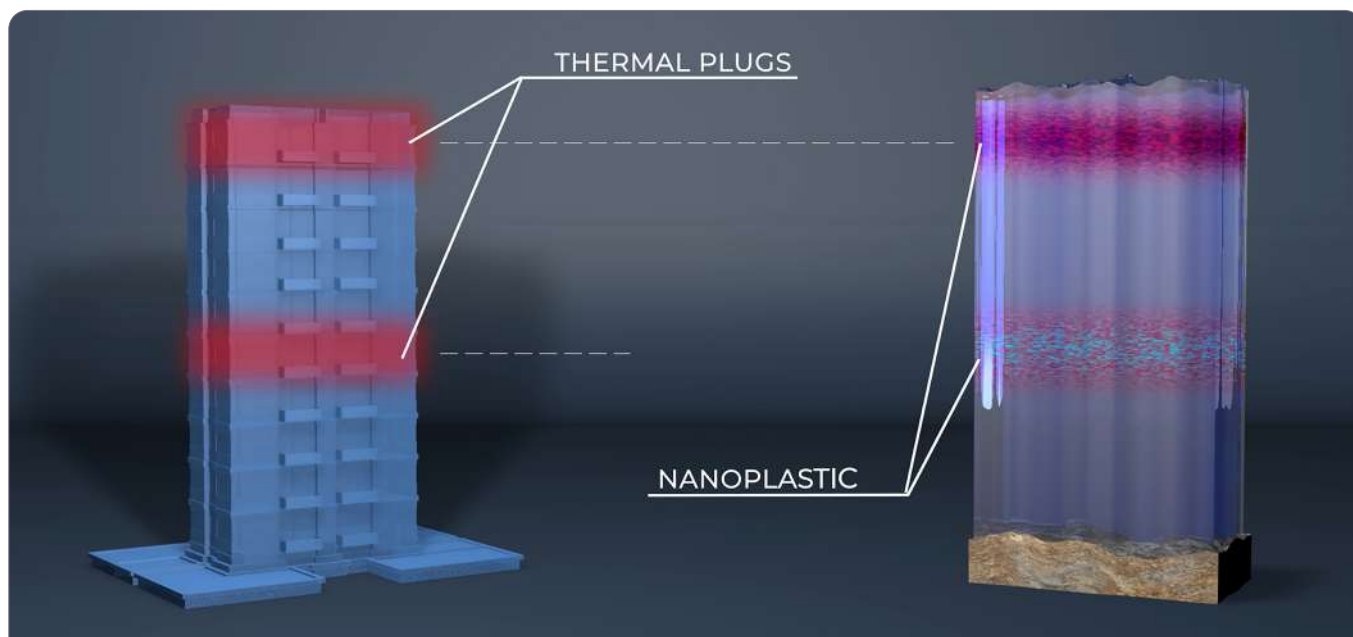
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

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>

A hidrogénkötés szerkezetének megszakadása a hővezető képesség csökkenéséhez is vezet.¹⁶² Ennek következtében a víz a nanoműanyagok közelében meleg maradhat, mivel elveszíti hatékony hőátadási képességét.

A mikro- és nanoműanyagok koncentrációjának területei az óceánban

A mikro- és nanoműanyagok az áramlatok hatására az óceán egész területén eloszthatók, míg a sűrűbb részecskék vagy a szennyezett műanyagok az óceán fenekén ülepedhetnek le. A nanoműanyagok felhalmozódása a termoklin területeken is megfigyelhető – ezek a meleg felszíni vizek és a hidegebb mélyvizek közötti átmeneti rétegek¹⁶³ (60. ábra).

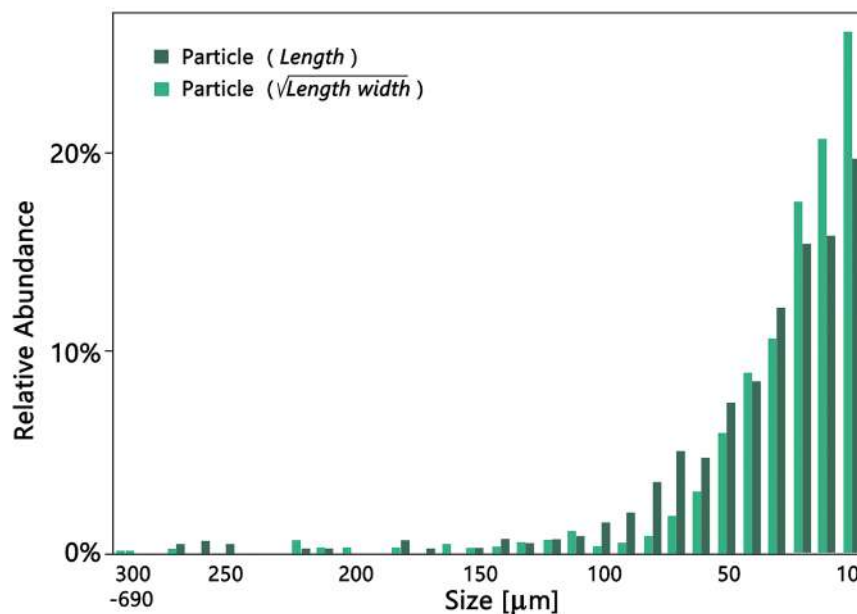


60. ábra. A kép egy figuratív összehasonlítást mutat be az óceánban található mikro- és nanoműanyag koncentrációjának területei és egy többszintes épület között, amelynek 5. és 10. emeletén hőblokkolások vannak. A blokkolások akadályozzák a normális hőcserét, ami miatt a hő ezeken az emeleteken halmozódik fel, ahelyett, hogy egyenletesen feloszlana. Egy hőkamera azt mutatná, hogy az épület belsejében a hőmérséklet jelentősen magasabb, mint egy hasonló, blokkolások nélküli épületben. Hasonlóképpen, a nanoműanyag megzavarja a víz természetes hőcserélési mechanizmusait, „hőblokkolásokat” hozva létre az óceánban.

A nanoműanyagok koncentrációjának növekedése az óceánokban változásokat okozhat a globális hőegyensúlyban. Ez befolyásolhatja az óceánok hőmérsékletének emelkedését, ami potenciálisan éghajlatváltozást okozhat. Fontos megjegyezni, hogy még a kis mennyiségű nanoműanyag is jelentős hatással lehet az ökoszisztémákra. Az óceánok felszíni hőmérsékletének emelkedése felgyorsítja a műanyag hulladékok mikro- és nanoműanyag-összetevőivé történő szétbontását (61. ábra). Ennek következtében ezeknek a részecskéknek a száma növekszik, és vízgőzzel együtt a légkörbe kerülnek. A mikro- és nanoműanyagok jelenléte a légkörben hozzájárul a további felmelegedéshez, ami viszont fokozza az óceánok felmelegedését. Így, egy visszacsatolási hurok alakul ki, amelyben a folyamatok egymást kölcsönösen erősítik.

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>



61. ábra. A mikroműanyag részecskék méret szerinti relatív eloszlása az összes vizsgált állomáson (np = 543). A képek a Raman-spektroszkópiával azonosított és megerősített legkisebb (bal oldalon) és legnagyobb (jobb oldalon) MM részecskéket mutatják.

Forrás: 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>

Az MNM elektrosztatikus töltés és a légköri jelenségek közötti kapcsolat

A mikro- és nanoműanyagok különböző úton jutnak a légkörbe. Az óceánok és más víztestek felszínéről elpárolgó vízgőz mikrorészecskéket szállít a levegőbe.¹⁶⁴ A szárazföldön a légköri műanyagok elsődleges forrásai közé tartoznak a gyárak, a hulladékégető művek és a hulladéklerakók. Ezenkívül, a mikroműanyagok a levegőbe kerülnek, amikor a mezőgazdasági műtrágyák és a műanyag talajtakaró kiszáradnak, és a szél szétszórja őket. A mikroműanyag részecskék az autógumik súrlódása révén is kibocsátódnak.

Ezek és sok más forrás jelentősen hozzájárulnak a légköri szennyezéshez. Ezek a folyamatok elősegítik a mikroműanyagok felhalmozódását és terjedését a légkörben, ami súlyos környezeti és éghajlati veszélyeket jelent. A légkörbe kerülve a mikro- és nanoműanyag részecskék kondenzációs magként szolgálhatnak a vízgőz számára. Minél nagyobb az ilyen magok száma, annál gyorsabban kondenzálódik a vízgőz cseppekké. Légköri mikroműanyagokat találtak a japán hegycsúcsokról gyűjtött felhővíz-mintákban¹⁶⁵ (62. ábra).

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



62. ábra. Magaslégköri felhővízben található levegőben terjedő hidrofил mikroműanyagok és szerepük a felhőképződésben

Forrás: Hiroshi Okochi from Waseda University

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

66

„Egy szennyezett környezetben, ahol sokkal több aeroszol részecske, például mikroműanyag található, a rendelkezésre álló víz sokkal több aeroszol részecske között oszlik el, és ezeknek a részecskéknek a körülöttük kisebb cseppek képződnek. Ha több csepp van, kevesebb eső esik, de mivel a cseppek csak akkor esnek le, ha elég nagyok lesznek, több víz gyűlik össze a felhőben, mielőtt a cseppek elég nagyok lennének ahhoz, hogy lehulljanak, és ennek eredményeként erősebb esőzések vannak, amikor eljön az eső” – mondta Miriam Friedman, a Penn State Meteorológiai és Légkörkutató Tanszékének kémia professzora.¹⁶⁶

Ez magyarázza, miért figyeltek meg rendellenes csapadékok különböző régiókban az elmúlt években.

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>

Elektromos töltések a felhőkben

A Föld légköre egy komplex elektromos rendszer, amelyben a vízmolekulák fontos szerepet játszanak. 1752 óta, amikor Benjamin Franklin először bizonyította, hogy a légkör elektromos töltésű és a zivatarok elektromos jellegűek, egyértelművé vált, hogy a víz, mint gőz, folyadék és jég, kulcsfontosságú szerepet játszik ezekben a folyamatokban. Míg a tiszta víz elektromosan semleges, fázisváltozások, például olvadás és fagyás során, valamint a molekulák ütközései során ionokat tud átadni más részecskének. Ez elektromos töltések felhalmozódásához vezet, és hozzájárul a légköri elektromos jelenségekhez.

A légkörben a jégkristályok, a túlhűtött vízcseppek és más részecskék közötti ütközések, különösen természetes elektromos mezők jelenlétében, töltések szétválasztását okozzák. Ez a folyamat kulcsfontosságú szerepet játszik a légköri elektromosság kialakulásában, beleértve a zivatarfelhők kialakulását is. Ez elengedhetetlen a felhők és a csapadék kialakulásához is. Az elektromosan feltöltött cseppek egymás felé vonzódnak, gyorsítva összeolvadásukat nagyobb cseppekké. Ez végül, olyan felhők kialakulásához vezet, amelyek csapadékot, például esőt, havat vagy jégesőt képesek előidézni.



„A töltések rendkívül fontosak, és a felhők képződésének folyamatában gyakorlatilag a legalapvetőbbek. Megállapítottuk, hogy a töltések kritikus jelentőségűek” – mondta Gerald H. Pollack, PhD, a Washingtoni Egyetem biomérnöki professzora, a WATER interdiszciplináris kutatási folyóirat főszerkesztője és alapítója.¹⁶⁷

1843-ban Michael Faraday felfedezte, hogy elektromosság keletkezik, amikor vízcseppek dörzsölődnek fémfelületekhez, és ezáltal a víz feltöltődik. Ez a felfedezés további kutatásokat indított el arról, hogy a víz hogyan töltődik fel elektromossággal dörzsölődés, fázisátalakulás és érintkezési elektromos feltöltődés révén, és még arra is ösztönözte a kutatókat, hogy ezt a hatást új energiaforrások kiaknázására használják fel.

Ismert, hogy a párás levegő semlegesítheti a felületi töltéseket egy vékony vízréteg kialakításával, amely lehetővé teszi az ionok mozgását és a felhalmozódott töltés eloszlását. Bizonyos esetekben azonban a vizet felszívó felületek valójában felhalmozhatják a párás légkörből származó töltést, ami szintén befolyásolja a környező elektromos környezetet.¹⁶⁸ Kutatások kimutatták, hogy a nehézfémek könnyen kötődnek a mikroműanyagokhoz, és ez a kombináció komoly kockázatot jelenthet a globális ökoszisztémákra.

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>

Emellett a mikroműanyagok és a felületükön található anyagok keveréke nemcsak más szennyező anyagokhoz tapadhatnak, hanem egymással is kölcsönhatásba léphetnek, megváltoztatva kémiai tulajdonságaikat.¹⁶⁹ Amikor a mikro- és nanoműanyag részecskék a légkörbe kerülnek, megzavarhatják a légköri folyamatok kényes egyensúlyát. A műanyag részecskék elektromos töltést hordozhatnak, ami fokozza a poláros vízmolekulák vonzását és elősegíti a cseppek képződését. A tipikus kondenzációs magokkal, mint a pollen, a tengeri só vagy a korom, ellentétben a műanyag részecskék hatékonyabban gyűjtenek cseppeket, mint a semleges részecskék.¹⁷⁰

Ez azt jelenti, hogy a vízcseppek gyorsabban kezdenek kialakulni a töltött részecskék körül, ami befolyásolja a felhőszerkezetet, és nagyobb cseppek, sőt abnormálisan nagy jégkristályok kialakulásához vezethet.¹⁷¹ Például, egy kutatócsoport legutóbbi tanulmánya műanyag granulátumokat talált vízhez vonzó felülettel a japán hegycsúcsok felhőiben.¹⁷²

Hatása a felhőképződésre és a csapadékra

A mikroműanyagok befolyásolhatják a csapadék jellegét, az időjárás-előrejelzést, az éghajlatmodellezést, sőt még a repülés biztonságát is, mivel hatással vannak arra, hogy a légköri jégkristályok hogyan képeznek fel.

Egy tanulmány¹⁷³ kimutatta, hogy a mikroműanyagokat tartalmazó vízcseppek 4–10 °C-kal magasabb hőmérsékleten fagynak meg, mint azok, amelyek nem tartalmaznak mikroműanyagokat, vagyis alacsonyabb magasságban fagynak meg. Általában a szennyeződéseket nem tartalmazó vízcseppek körülbelül –38 °C-on fagynak meg. A mikroműanyagok esetében azonban a cseppek 50 %-a –18 és –24 Celsius-fok között fagyott meg, a műanyag típusától függően.

A mikroműanyagokat tartalmazó vízcseppek gyorsabban fagynak be, nagyobb jégrészecskéket képezve. Ezeket a részecskéket a légáramlatok felfelé szállítják, ahol többszörös jégrétegekkel borítják be őket, majd a földre hullnak. Ez a jelenség a jégeső méretének növekedéséhez vezethet (63–64. ábra), fokozva annak pusztító hatását és felgyorsítva a jégfelhők kialakulását. Ennek eredményeként a csapadék, beleértve az esőt és a havat, gyakorisága és intenzitása megváltozhat. Ez láncreakciót indíthat el, amely hatással van az éghajlatra, a víz körforgására és az ökoszisztémákra.

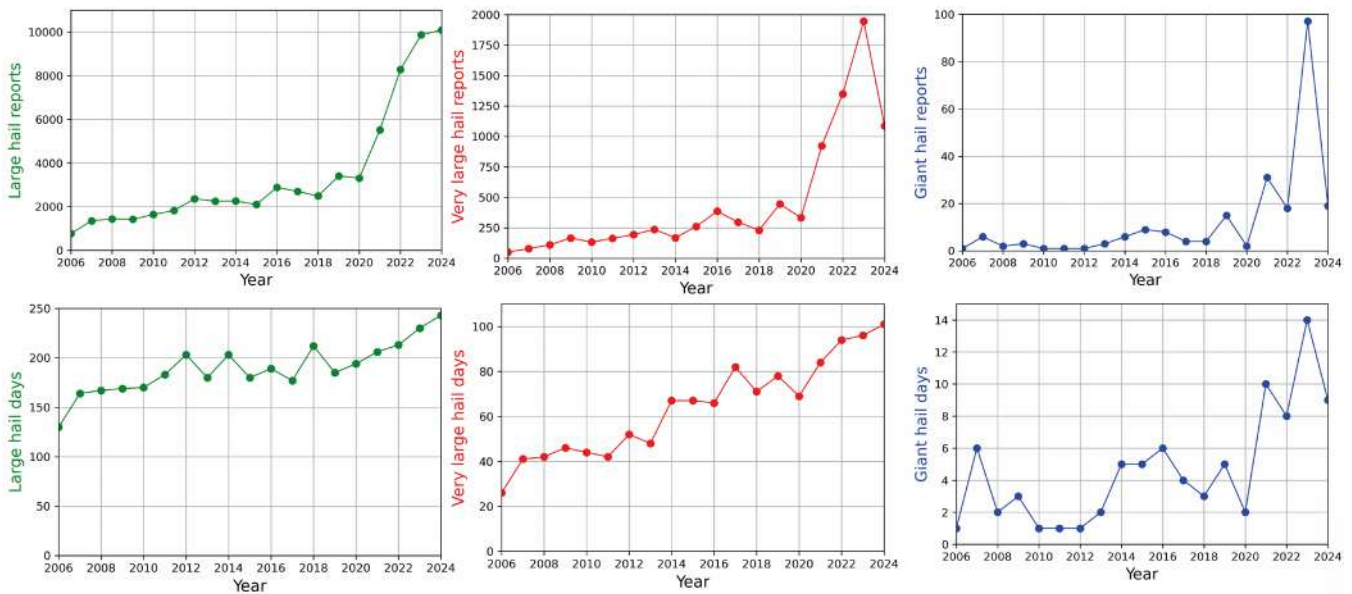
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

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>

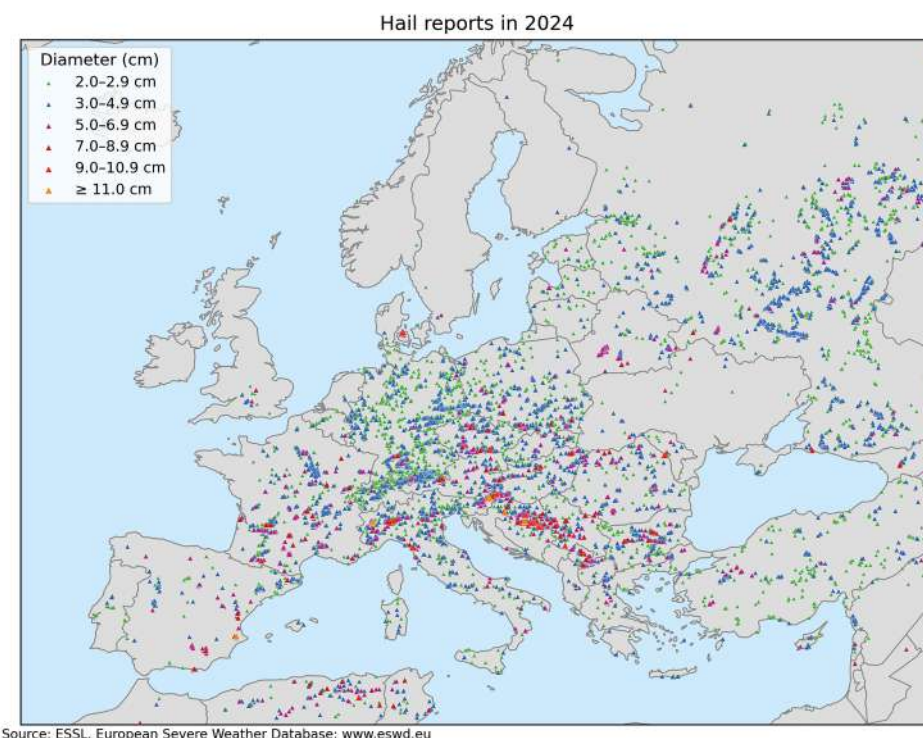
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

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>



63. ábra. A nagy (2+ cm), különösen nagy (5+ cm) és óriási (10+ cm) jégesővel kapcsolatos bejelentések száma és azok napjainak száma 2006 és 2024 között.

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



64. ábra. Nagy jégesőről szóló jelentések térbeli eloszlása Európában és a környező régiókban 2024-ben.

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

Amikor műanyag nanorészecskék jelennek meg a légkörben, a felhők alacsonyabb magasságokban kezdenek kialakulni – általában 2 km alatt. Ezáltal a felhők mozgékonyasága csökken, ami megzavarja a normális csapadékmintázatot. Ennek következtében egyes területeken aszály léphet fel, míg máshol túlzott csapadékmennyiség hullhat.

Az MNM szerepe a bolygó éghajlati egyensúlyának megzavarásában

A sűrűbb felhők elkezdik visszatartani a hőt az atmoszféra alsó rétegeiben, hasonlóan egy takaróhoz, amely elnyeli és visszatükrözi a hősugárzás egy részét a Föld felszínére. Ez csökkenti a hőveszteséget az űrbe, és hozzájárul az atmoszféra felmelegedéséhez. A hőmérséklet emelkedése elősegíti a víz további párolgását az óceánokból, és a légkörben lévő nagyobb mennyiségű nedvesség további felmelegedéshez vezet. Ez egy ördögi kör. Fontos megjegyezni, hogy minden egy fokos felmelegedésnél a levegőben lévő nedvesség mennyisége körülbelül 7 %-kal¹⁷⁴ nő, a villámlás gyakorisága pedig 12 %-kal¹⁷⁵ emelkedik.



Ahogy Kevin Trenberth, az Egyesült Államok Nemzeti Légkörkutató Központjának (NCAR) elismert klimatológusa, az IPCC jelentések vezető szerzője megjegyzi: **„A magasabb hőmérséklet és a légkörben megnövekedett vízgőztartalom kombinációja a légkör nagyobb instabilitását okozza. Ez a konvekció erősödéséhez és a viharok számának növekedéséhez vezet. Néhány közülük, a legerősebbek, zivatarokká alakulnak. Ilyen körülmények között nő a súlyos zivatarok kialakulásának kockázata.**

Amikor a zivatarok egyesülnek és kölcsönhatásba lépnek egymással, ahogyan ez a trópusi viharokban történik, erősebb hurrikánokká alakulhatnak. Mindezek a tényezők összeadódnak, növelve a viharok, erős zivatarok, különösen a jégesőt okozó szupercellás viharok kialakulásának kockázatát, amelyek bizonyos helyeken, megfelelő körülmények között tornádót is okozhatnak.”

Így az óceán extrém felmelegedése, a légkörben lévő túlzott mennyiségű elektromosság és hő súlyosbítja az éghajlati helyzetet, ami pusztítóbb éghajlati jelenségekhez vezet, mint például erős zivatarok, hurrikánok, villámok és spritek.

Az atmoszférában a műanyagok nem csupán a környezetet szennyezik, hanem az éghajlati folyamatokat is megzavarják, mivel befolyásolják a felhőképződést és a csapadékképződést. Fokozzák az elektrosztatikus töltést a légkörben, felgyorsítják a vízgőz kondenzációját, és hatással vannak a felhőzet sűrűségére — ezek a tényezők hozzájárulhatnak a viharok, zivatarok és más szélsőséges időjárási események intenzitásának növekedéséhez. A klímára gyakorolt hatás teljes mértékének megértése küszöbén állunk, ami még sürgetőbbé teszi az átfogó intézkedések szükségességét a műanyagrészeske-szennyezés csökkentésére mind az óceánokban, mind az atmoszférában.

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

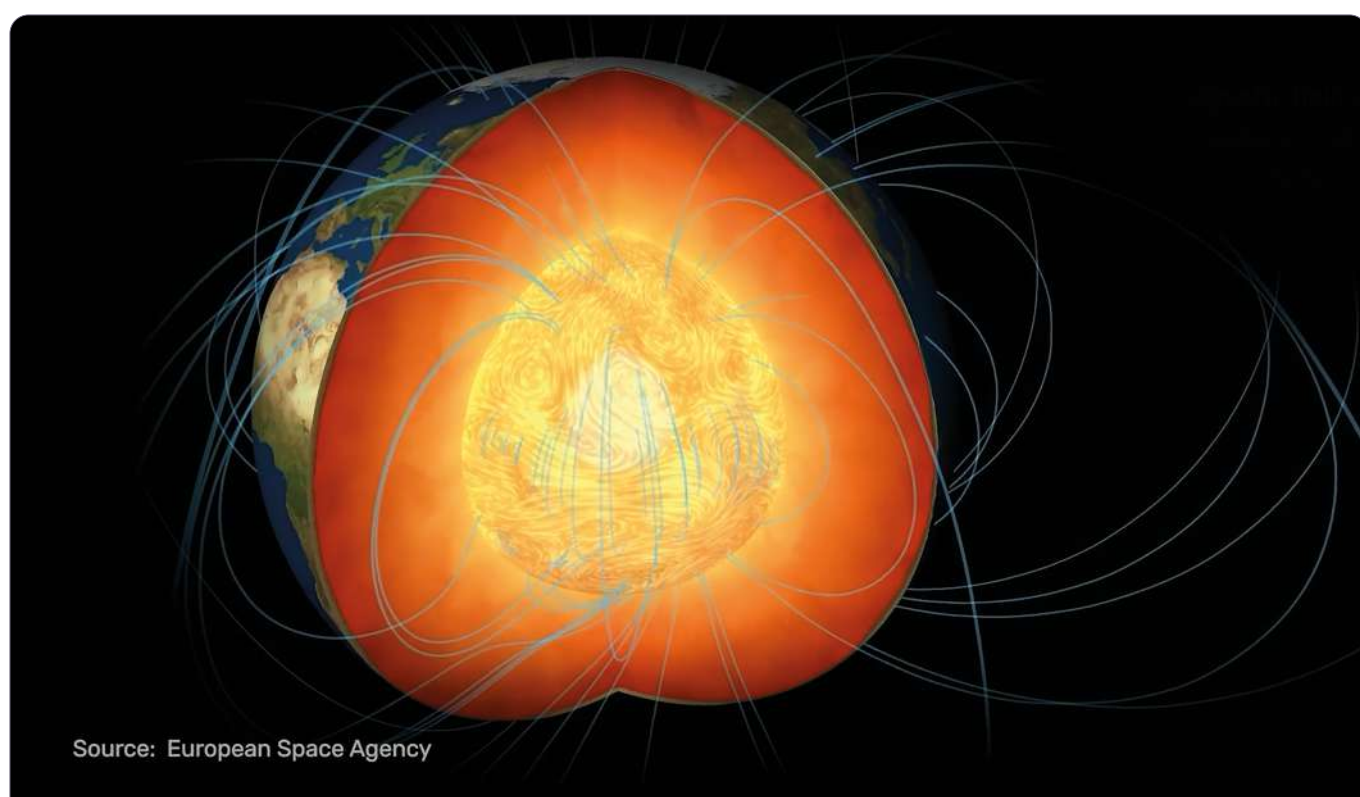
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

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>

Az óceán és a Föld mágneses mezője közötti kölcsönhatás

Az óceánok a Föld felszínének körülbelül 70 %-át borítják, és sokkal többek, mint hatalmas víztározók: döntő szerepet játszanak a bolygó komplex elektromos rendszereiben. Kölcsönhatásba lépnek a Föld mágneses mezőjével, és aktívan részt vesznek annak elektromágneses folyamataiban.

A Föld mágneses mezője természetes pajzsként működik, megvédve a bolygó felszínét a napszél és a kozmikus sugárzás hatásától. Enélkül légkörünk elpusztulna. Ez a geomágneses mező a bolygó mélyén keletkezik, ahol a fémekből álló folyékony külső mag a szilárd belső mag körül mozog, és egy geodinamó néven ismert folyamat révén természetes generátort hoz létre (65. ábra).



65. ábra. A geomágneses mező kialakulásának folyamatát szemléltető sematikus ábra: A Föld folyékony külső magja a szilárd belső mag körül forog, és úgy működik, mint egy természetes generátor, az úgynevezett geodinamó, amely a bolygó mágneses mezőjét hozza létre.

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

A Föld mágneses mezője kölcsönhatásba lép az óceánokban és a légkörben fellépő elektromos jelenségekkel. A sókban és oldott ionokban gazdag tengervíz nagyon jó vezető, és képes elektromos áramot vezetni. Ezek az áramok viszont kölcsönhatásba lépnek a bolygó mágneses mezőjével, és komplex elektromágneses folyamatokat generálnak, amelyek befolyásolják a Föld geomágneses rendszerének dinamikáját.

Mint korábban már említettük, az óceánok szennyezése, különösen a mikro- és nanoműanyagok által, megváltoztathatja a tengervíz kémiai és elektromos tulajdonságait. Minél magasabb a szennyező anyagok koncentrációja, annál jobban zavarják a természetes elektromágneses folyamatokat. A szennyezett víz elpárolgásakor magával vihet fémeket, mikroműanyagokat és más anyagokat, amelyek potenciálisan befolyásolhatják a légköri folyamatokat.

Az elpárolgás során mikroszkopikus cseppek és aeroszolok mikro- és nanoműanyagokat, nehézfémeket¹⁷⁶ és egyéb szennyező anyagokat szállíthatnak a légkörbe, ahol befolyásolhatják a helyi elektromágneses viszonyokat. Ez a folyamat némileg hasonlít ahhoz, amikor egy fémtárgyat mágnes közelébe helyezünk: torzítja a mágneses teret és gyengíti annak erejét bizonyos területeken.

Az óceánok szennyezésének hatása a Föld mágneses terére további vizsgálatot igényel, különösen a globális éghajlatváltozás kontextusában. E folyamatok megértése segíthet felmérni azok potenciális hatását a bolygó éghajlati rendszerére és ökoszisztémáira.



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>

A MIKRO- ÉS NANOMŰANYAG HATÁSA AZ EMBERI EGÉSZSÉGRE



“A műanyagok nem csupán óceánjainkat és vízi útjainkat szennyeznek, valamint pusztítják a tengeri élővilágot – mindannyiunkban ott van, és nem tudjuk elkerülni a fogyasztását. Globális fellépés sürgős és elengedhetetlen a válság kezeléséhez.”

Marco Lambertini
A WWF International főigazgatója

Az MNM mint a 21. századi járványok újonnan felmerülő kockázati tényezője

Az elmúlt 30 évben folyamatosan nőtt a szívinfarktusok, a stroke, a rák, a cukorbetegség, az allergiák és a gyulladásos bélbetegségek száma. Világszerte megfigyelhető az immunrendszer működésének hanyatlása mind gyermekeknél, mind felnőtteknél. A meddőség egyre elterjedtebb. Annak ellenére, hogy a meddő egyének és párok számára vonatkozó adatok korlátozottak, az Egészségügyi Világszervezet becslése szerint a felnőtt népesség körülbelül 17,5%-a¹⁷⁷ – nagyjából minden hatodik ember világszerte – tapasztal meddőséget.

2010 óta az intellektuális képességek hanyatlása figyelhető meg. Még a fejlett országokban is a felnőttek 25%-a küzd alapvető matematikai problémákkal; az Egyesült Államokban ez az arány eléri a 35%-ot. A figyelem, a logikus gondolkodás és az egyszerű feladatok megoldásának képessége romlik. Növekszik a különböző demencia formák és a kognitív károsodás prevalenciája.¹⁷⁸

A mentális egészségi zavarok növekedése felülmúlta a fizikai betegségek terjedését.¹⁷⁹ A szorongásos zavarok, az autizmus, a depresszió, a bipoláris zavar és a figyelemhiányos hiperaktivitási zavar (ADHD) pandémiás szintet érnek el.

Egyre több bizonyíték áll rendelkezésre arra vonatkozóan, hogy a mikro- és nanoműanyag szerepet játszik ezen egészségi állapotok kialakulásában.

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).

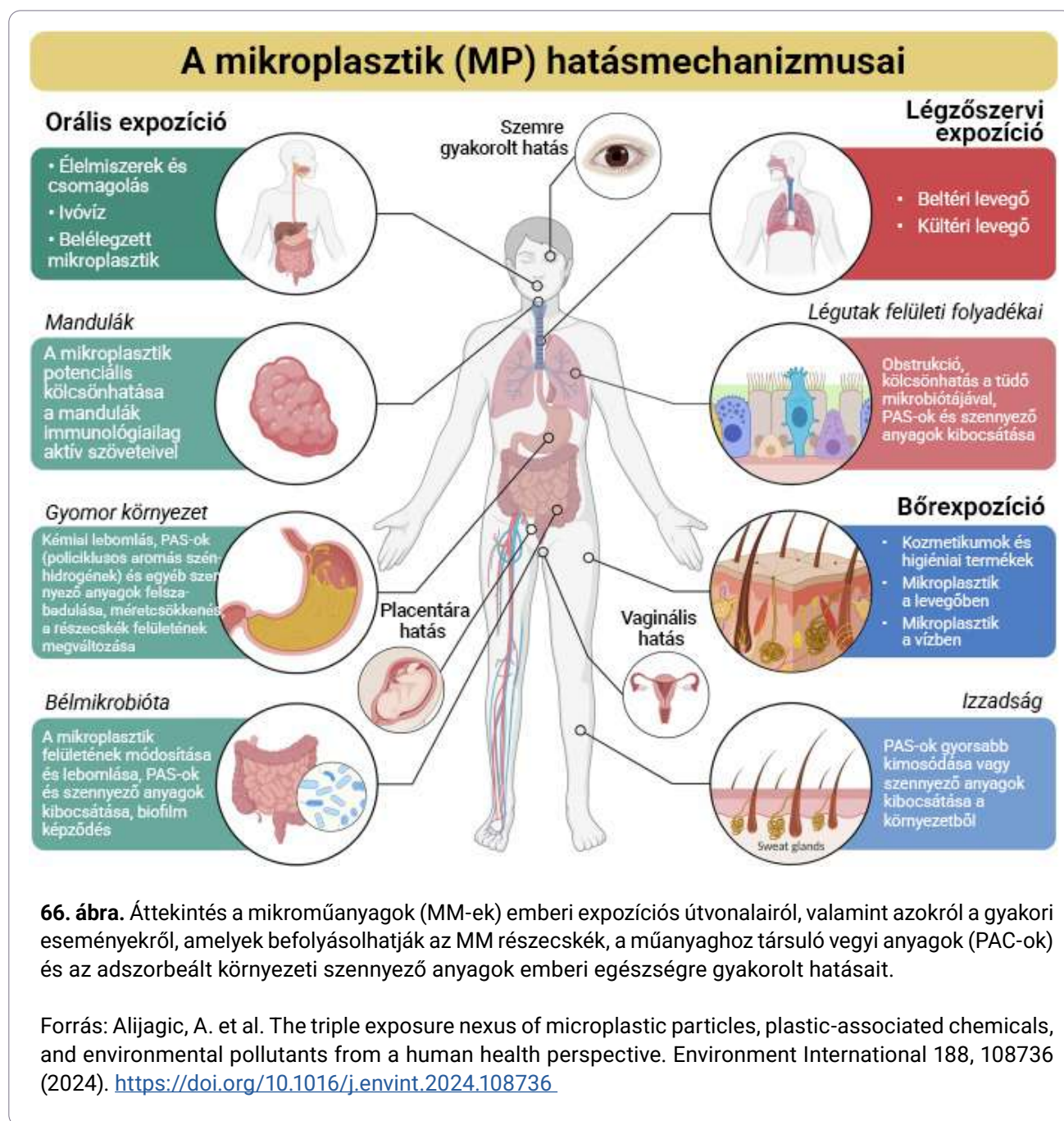
¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).

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).

Az MNM toxicitásának molekuláris mechanizmusai.

A DNS, a mitokondriumok és a sejtmembránok károsítása

A mikro- és nanoműanyagok (MNM-ek) a környezeti antropogén szennyezés egyik legelterjedtebb formái közé tartoznak. Fizikai és kémiai tulajdonságaik révén a műanyag részecskék nagy távolságokat képesek megtenni, átlépve mind a földrajzi, mind az ökológiai korlátokat. A fő útvonalak, amelyeken keresztül a mikro- és nanoműanyagok bejutnak az emberi szervezetbe, a lenyelés (vízzel és élelmiszerrel), a levegőből történő belégzés és a bőrön keresztüli felszívódás¹⁸⁰ (66. ábra).



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>

„A probléma mértéke” című 1. részben említettek szerint a tengeri környezet a másodlagos mikroműanyagok jelentős forrásaként szolgál. Becslések szerint a tengeri szellők évente mintegy 136 000 tonna mikroműanyagot szállítanak a part menti területekre. Ezenkívül a városi területek nyílt vízfelületei – beleértve a szennyvíz- és esővízrendszereket – a műanyag részecskék felhalmozódásának és további terjedésének jelentős gócpontjaivá váltak, olyan koncentrációkkal, amelyek akár 90%-kal is meghaladhatják a korábbi becsléseket.

Az élelmiszerek jelentik az MNM-ek emberi szervezetbe jutásának egyik fő útvonalát. A növények gyökérrendszerükön keresztül képesek nanoműanyagokat felhalmozni: öntözés vagy esőzés során a részecskék bejutnak a talajba, vízzel együtt felszívódnak, a xilémen keresztül mozognak, és felhalmozódnak a levél- és gyümölcscsszövetekben.¹⁸¹ A legmagasabb műanyag részecske koncentrációkat olyan haszonnövényekben mutatták ki, mint az alma, körte, sárgarépa és brokkoli.

A tenger gyümölcsei egy másik útvonalat jelentenek az MNM-ek átvitelére. A mikroműanyagok tengeri szervezetek általi lenyelését minden táplálkozási szinten dokumentálták. A Newcastle-i Egyetem kutatása szerint egy átlagember évente akár 250 gramm mikroműanyagot is elfogyaszthat – ami körülbelül heti 5 gramm, vagy egy műanyag hitelkártya súlya. Ráadásul, amikor a műanyag tartályokat – beleértve a bébiételek csomagolását is – mikrohullámú sütőben melegítik, több mint 2 milliárd nanorészecske és 4 millió mikrorészecske műanyag szabadulhat fel az élelmiszerbe négyzetcentiméterenként.

A mikroműanyagok széles körben elterjedtek az ivóvízben. Tanulmányok azt mutatják, hogy az Egyesült Államokban a csapvízminták akár 90%-a is tartalmaz MNM-et. A szennyeződés fő forrásai közé tartozik a szennyvízelvezetés, az ipari kibocsátások, valamint a levegőben lévő műanyagok atmoszférikus lerakódása. Amikor a szennyezett víz elpárolog, a műanyag részecskék felemelkedhetnek a légkörbe, majd később esővel vagy hóval hullhatnak vissza. Egy 11 amerikai nemzeti parkban végzett tanulmány szerint mindössze 14 hónap alatt több mint 1000 tonna műanyag részecske hullott le a csapadékkal – ez elegendő lenne 120 millió műanyag palack előállításához.

Az MNM-ek aeroszolos átvitele az egyik legveszélyesebb expozíciós útvonalnak számít az ember számára. A műanyag részecskék felemelkednek az óceánok és a víztestek felszínéről, légáramlatok szállítják őket, és az atmoszférikus aeroszolok részévé válnak. Becslések szerint egy nagyvárosban egy felnőtt akár 106 000 mikroműanyag részecskét is belelegezhet egy kétórás séta során. Víztestek közelében ez az érték tízszer magasabb is lehet.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Az *American College of Cardiology* konferenciáján (ACC.25) bemutatott új tanulmány feltárta, hogy a mikroműanyagok – melyek véletlenül lenyelhetők vagy belélegezhetők – nagyobb mértékű expozíciója a krónikus nem fertőző betegségek növekvő gyakoriságával van összefüggésben. A kutatás megállapította, hogy az Egyesült Államok keleti és nyugati partjai, a Mexikói-öböl partvidéke, valamint bizonyos tópartok mentén elhelyezkedő közösségekben magasabb volt a mikroműanyagok környezeti koncentrációja, ami összefüggött az olyan krónikus állapotok gyakoribb előfordulásával, mint a magas vérnyomás (hipertónia), a cukorbetegség és a sztrók.



„Ez a tanulmány kezdeti bizonyítékot szolgáltat arra vonatkozóan, hogy a mikroműanyagoknak való kitettség hatással van a szív- és érrendszeri egészségre, különösen az olyan krónikus, nem fertőző állapotokra, mint a magas vérnyomás, a cukorbetegség és a sztrók” – mondta Sai Rahul Ponnana, MA, az Ohio állambeli Case Western Reserve Orvostudományi Iskola kutatási adatszakiértője és a tanulmány vezető szerzője. **„Amikor 154 különböző szocioökonómiai és környezeti tényezőt is bevontunk az elemzésünkbe, nem számítottunk arra, hogy a mikroműanyagok bekerülnek a krónikus nem fertőző betegségek gyakoriságát előrejelző tíz legfontosabb tényező közé.”**¹⁸²

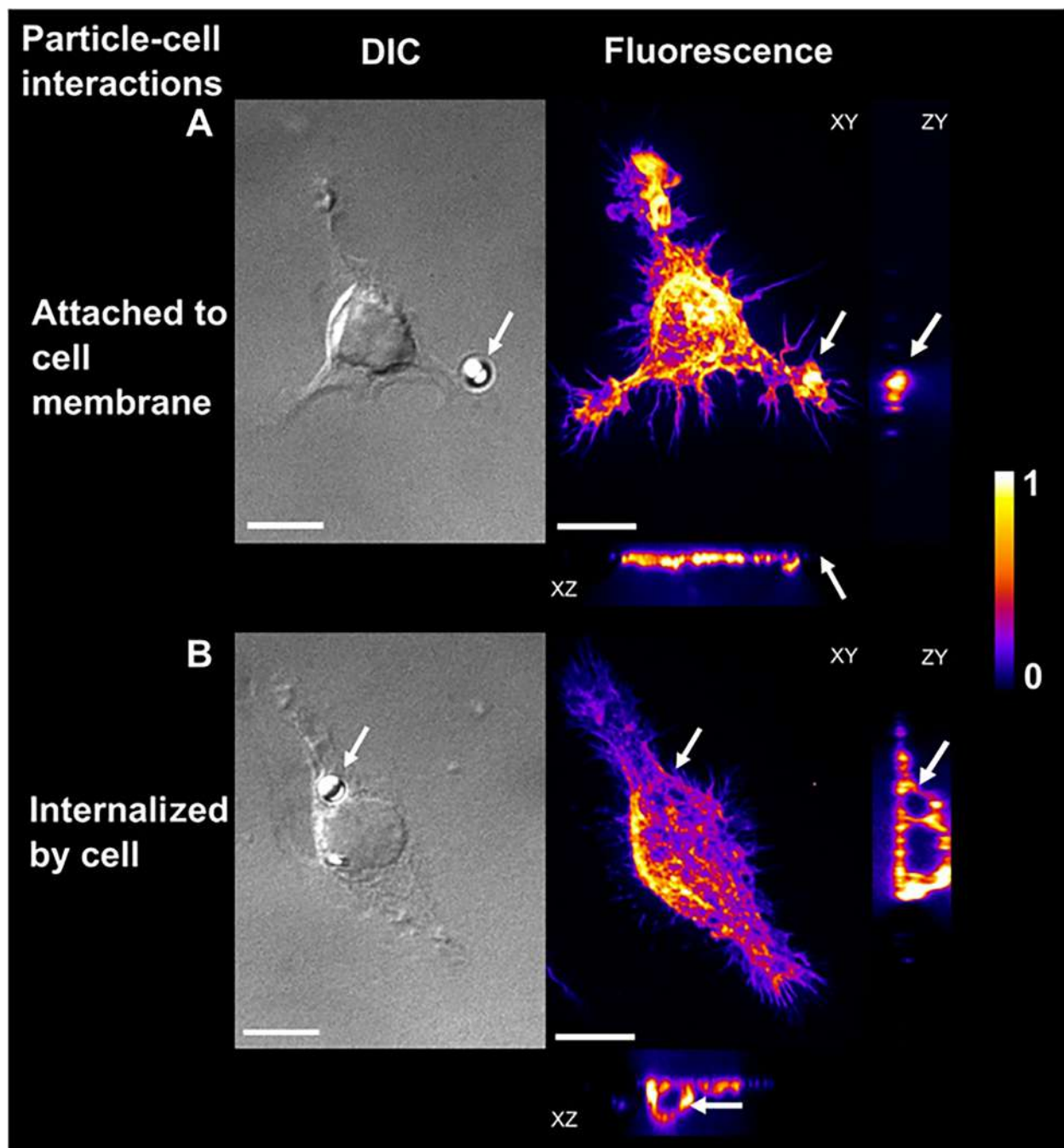
A mikro- és nanoműanyagok képesek áthatolni és átlépni a biológiai gátakat, beleértve a bél, a tüdő, az agy és a méhlepény gátjait is.¹⁸³ A friss- vagy tengervíznek kitett mikroműanyagok könnyebben jutnak be a sejtekbe (67. ábra) a felületükön felhalmozódó biomolekulák miatt. Ezek a biomolekulák egy bevonatot képeznek, amely segíti a mikroműanyagokat az emésztőrendszeren való áthaladásban és a szövetekbe való beépülésben. Ez a bevonat elősegítőként működik, fokozva a részecskék sejtekbe történő bejutását, hasonlóan egy trójai falóhoz.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).

¹⁸³Alqahtani, 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>

¹⁸⁴Ramsperger, 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>



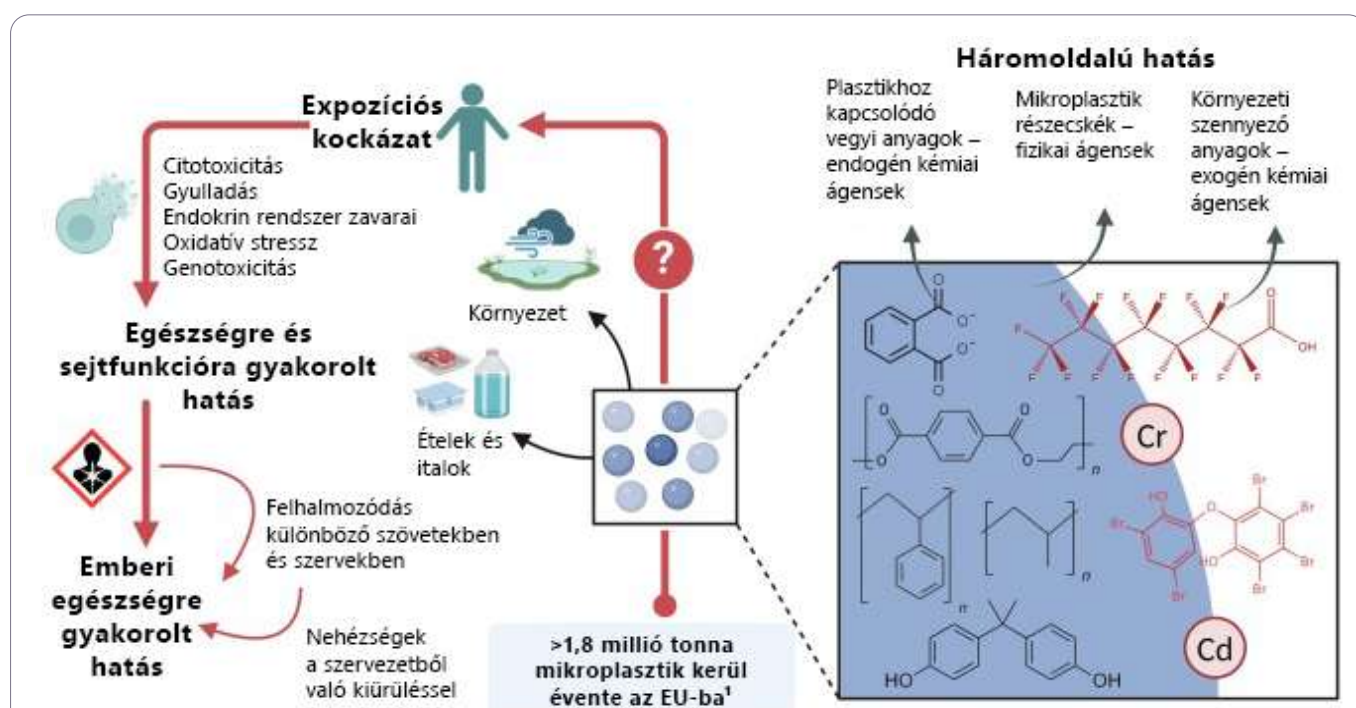
67. ábra. Két héten át édesvíznek kitett mikroműanyag részecskék sejt-részecske kölcsönhatását ábrázoló képek.

DIC: Differenciális interferencia kontraszt mikroszkópos képek a részecske-sejt kölcsönhatásokról. Fluoreszcencia: Rotáló tárcsás (spinning-disk) konfokális képek fluoreszcenssel jelölt fonalas (filamentáris) aktinnal rendelkező sejtekről (álszínes kép, maximális intenzitás projekció, feltüntetve a konvencionális egységeket). A háromdimenziós konfokális képek XY, YZ és XZ projekciói lehetővé teszik a sejtmembránokhoz rögzült mikroműanyag részecskék (A), vagy az internalizálódott mikroműanyag részecskék (B) megkülönböztetését. A nyilak a mikroműanyag részecskék helyzetét jelölik. Léptékvonalak: 10 μm .

Forrás: 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>

A mikroműanyagok toxicitását számos tényező befolyásolhatja, beleértve a méretet, az alakot, a felületi töltést, az időjárási/öregedési folyamatot, az adszorpciót stb.¹⁸⁵ A kisebb részecskék könnyebben hatolnak be a sejtekbe, és hangsúlyosabb oxidatív stresszt okoznak. A mikroműanyagok felületi töltése kulcsfontosságú tényező annak meghatározásában, hogy milyen hatékonyan veszik fel őket a sejtek, mivel ez befolyásolja a tapadást. Ezenkívül a mikroműanyagok polimerekből és különféle kémiai adalékanyagokból állnak, ami tovább növeli káros hatásukat.¹⁸⁶

A mikro- és nanoműanyag részecskék, a műanyagokban használt kémiai vegyületek, valamint a környező szennyező anyagok, amelyeket a műanyagok elnyelnek – mind komplex¹⁸⁷ és káros módon hatnak együtt, jelentős veszélyt jelentve az emberi egészségre (68. ábra).



68. ábra. A mikroműanyag (MM) részecskék, a műanyaghoz társuló vegyi anyagok, valamint a környezeti szennyező anyagok közötti hármás kölcsönhatás és potenciális hatása az emberi egészségre és jólétre.

Forrás: 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>

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>

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).

Egyetlen gramm mikroműanyag akár 24 000 nanogramm perzisztens szerves szennyező anyagot is tartalmazhat.¹⁸⁷ Ezek az anyagok erősen mérgezőek, felhalmozódnak a szervezetekben, és már kis koncentrációban is károsíthatnak.

A mikroműanyagok más szennyező anyagokat is veszélyesebbé tehetnek,¹⁸⁸ mivel maga a műanyag és a felületén lévő kémiai keverék nem csak megtapad más szennyező anyagokon, hanem kölcsönhatásba is lép velük, megváltoztatva azok kémiai tulajdonságait.

Tanulmányok kimutatják, hogy a mikro- és nanoműanyagoknak való kitettség súlyos toxicitást okoz különböző biológiai szervezetekben, beleértve a következőket:

- **Makromolekulák:** DNS és génkárosodás, megváltozott génexpresszió és módosult fehérje transzkripció.
- **Sejtek és organellek:** Megváltozott sejtosztódás, sejttoxicitás, apoptózis, oxidatív stressz reakció, megváltozott anyagcsere, megnövekedett kalciumionok.
- **Szövetek:** Gyulladás, fibrózis és csontszöveti oszteolízis.
- **Szervek:** Immunválaszok, szervi diszfunkció, neurotoxicitás, karcinogenezis, megváltozott táplálkozás, módosult metabolikus igény, és az energiatartalékok újraelosztása.
- **Állat- és Emberi Populációk:** Csökkent termékenység, lassabb növekedés és csökkent populációméret.

Ezek a hatások kiemelik a mikro- és nanoműanyagok többszintű hatását a biológiai rendszerekre.¹⁸⁹

1. A sejtfunkciók zavara

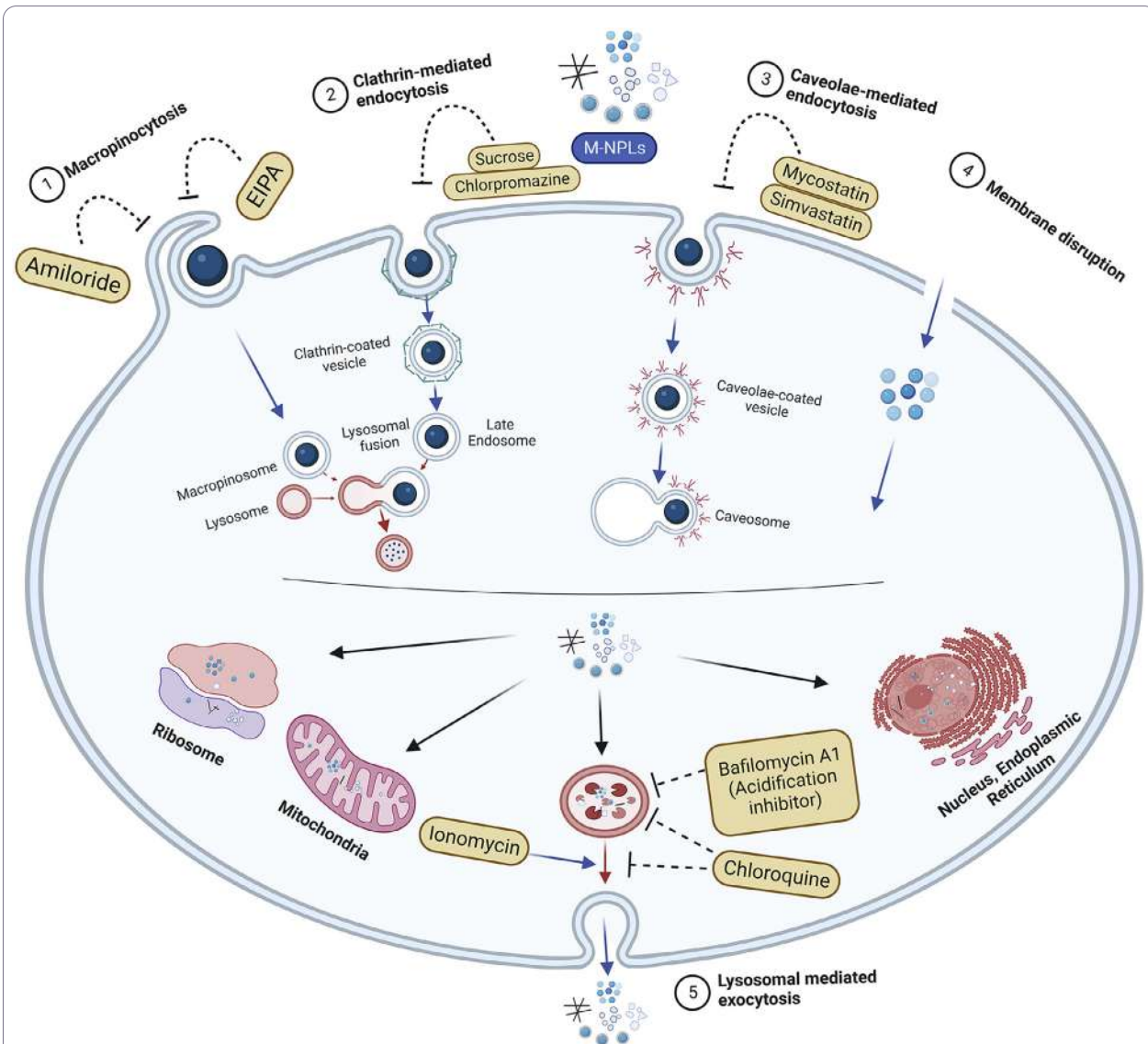
Az emberi szervezet pusztulása a mikro- és nanoműanyagok hatására sejtszinten kezdődik.¹⁹⁰ Az MNM-ek különféle kötések (pl. hidrogénkötés, halogénkötés), vagy hidrofób, van der Waals, illetve elektrosztatikus erők révén lépnek kölcsönhatásba a sejtmembránokkal. Destabilizáló tényezőként működve az MNM-ek megzavarják a sejtmembránok épségét és funkcióját (69. ábra).

¹⁸⁷ 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).

¹⁸⁸ 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>

¹⁸⁹ 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>

¹⁹⁰ 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>



69. ábra. Az M-NPL-ek sejtek általi felvétele és kibocsátása. Az M-NPL-ek az endocitózis különböző típusait használják.

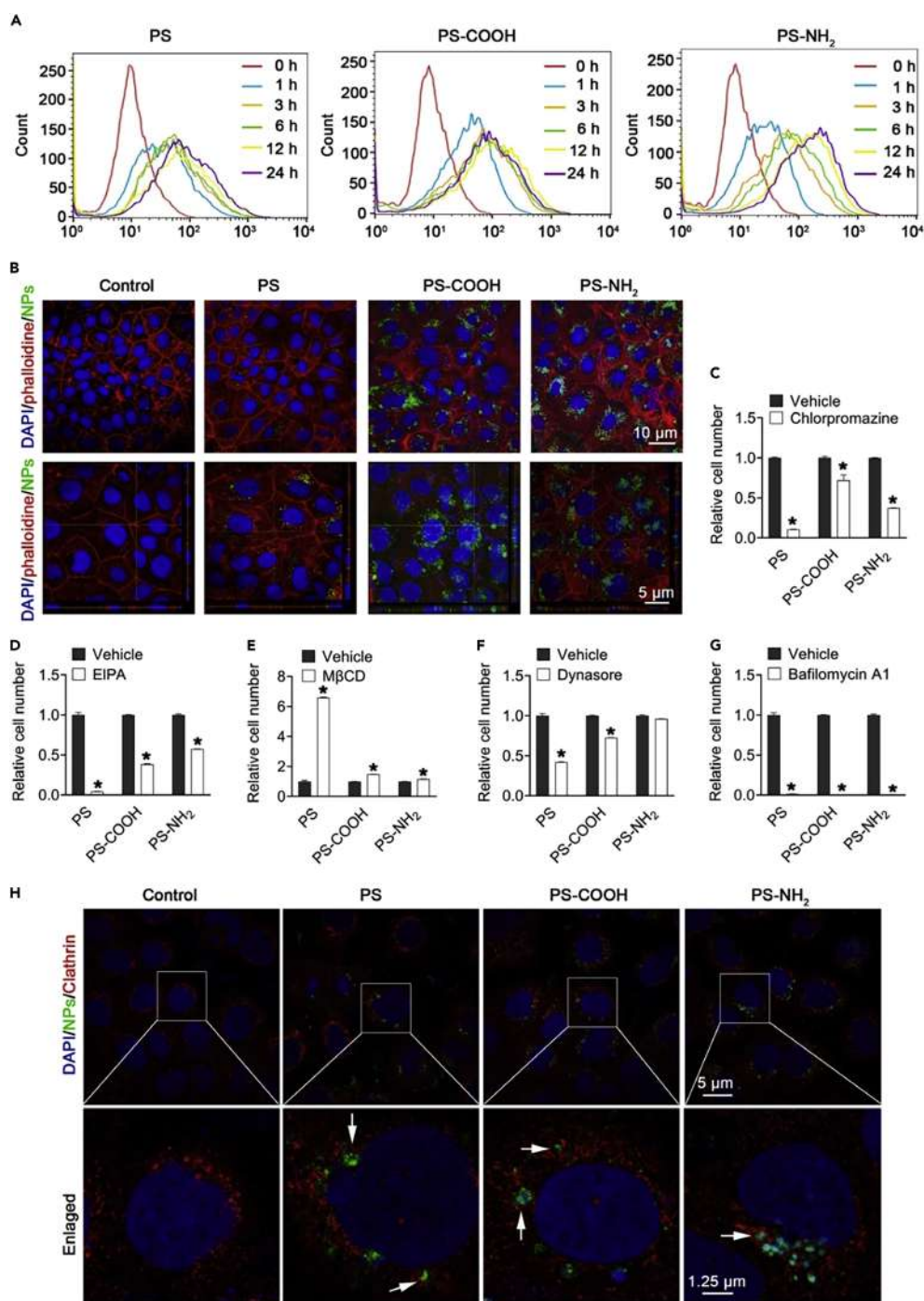
(1) Makropinocitózis, (2) Klatrin-mediált endocitózis, (3) Kaveola-mediált endocitózis, valamint a sejtmembrán áttörése a bejutáshoz. Az M-NPL-ek (4) lizoszóma-mediált exocitózissal szabadulnak ki a sejtekből.

Forrás: 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>

Kisméretük miatt az MNM-ek könnyen behatolhatnak az emberi sejtekbe (70. ábra). Apró méretük és felhalmozott elektrosztatikus töltésük lehetővé teszi, hogy az MNM-ek szisztémás hatást fejtsenek ki az emberi szervezetre.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>



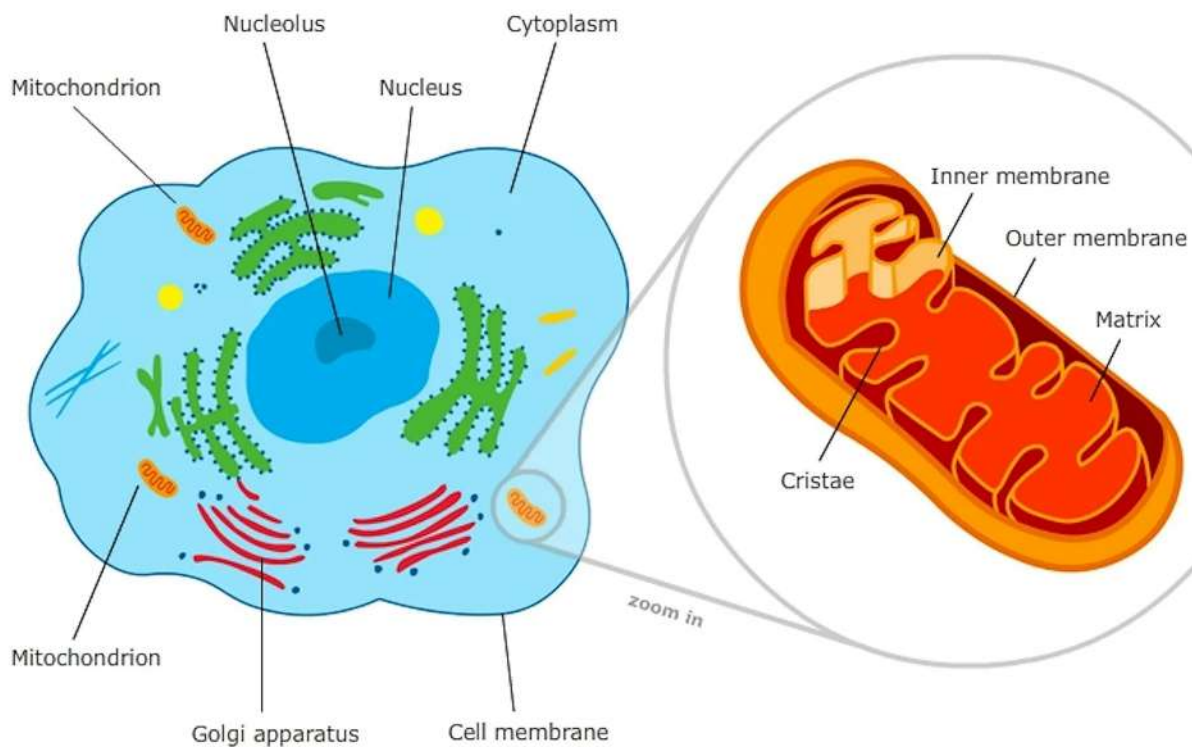
70. ábra. Caco-2 sejtek, amelyek nanoműanyag részecskéket (NPL-ek) internalizálnak.

(A–G) Az NPL-ek Caco-2 sejtek általi internalizációjának analízise áramlási citometriával (A) és konfokális mikroszkópiával (B). Caco-2 sejtek áramlási citometriás analízise, amelyeket 1 órával előkezeltünk klórpromazinnal (C), EIPA-val (D), MβCD-vel (E), dinaszorral (F) és bafilomicin A1-gyel (G), majd 24 órán át NPL-ekkel kezeltünk utólagosan. Az NPL-ek lokalizációja klatrin-mediált vezikulában konfokális mikroszkópiával vizsgálva (H). Az Elsevier engedélyével átvéve.

Источник: 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>

Destruktív hatásuk kulcsfontosságú eleme sejtszinten a sejtmembránok és a mitokondriumok károsítása, valamint a DNS pusztítása. Az elektrosztatikusan töltött mikro- és nanoműanyag részecskék destabilizálhatják a sejtek, különösen az idegsejtek membránpotenciálját, ami spontán elektromos jelekhez, az intercelluláris kommunikáció zavaraihoz vagy sejthalálhoz vezethet.

A sejtben belül a nanoműanyagok destruktív hatásának fő célpontja a mitokondrium – az alapvető organelum, amely felelős a sejt túléléseért és regenerálódásáért (71. ábra). Amellett, hogy a sejt „erőműveiként” működnek, a mitokondriumok multifunkcionális szerepet töltenek be, befolyásolva az általános egészségi állapotot, a stresszel szembeni ellenállást, a krónikus betegségek kialakulását és az öregedési folyamatot.



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

71. ábra. Egy sejt és annak mitokondriuma sematikus ábrázolása.

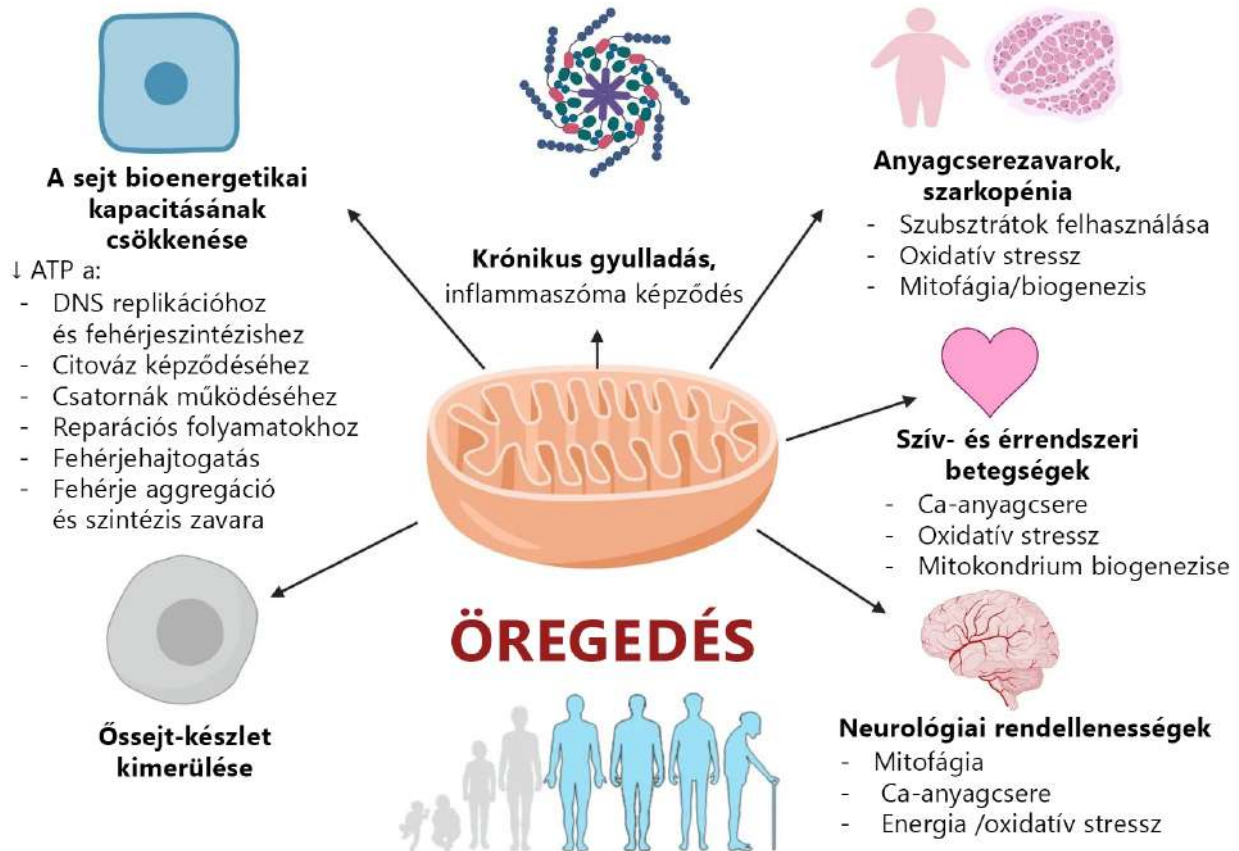
A mitokondriumok megfelelő működése kritikus fontosságú a sejtek túléléséhez, a homeosztázishoz és a bioenergetikához. A mitokondriumok szerkezetét és funkcióját a mitokondriális minőség-ellenőrző rendszer tartja fenn, amely a mitokondriális biogenezis, a mitokondriális dinamika (fúzió és fisszió), a mitofágia és a mitokondriális feltekeredetlen fehérje válasz (UPRmt) folyamataiból áll. A mitokondriális diszfunkció és/vagy károsodás összefüggésbe hozható számos emberi betegség – beleértve a neurodegeneratív, a szív- és érrendszeri, az életkorral összefüggő betegségeket, a diabéteszt és a rákot – kialakulásával és progressziójával. Az ökológiai stressz és a szennyező anyagok növelhetik a mitokondriumok sérülékenységet, mitokondriális diszfunkciót okozva. Egyre több bizonyíték áll rendelkezésre a nanoműanyag és a mikroműanyag mitokondriális egészségre és működésre gyakorolt hatásáról. Beszámoltak arról, hogy az MNM-ek oxidatív stresszt és reaktív oxigénfajták termelődését idézik elő, ami végső soron megváltoztatja a mitokondriális membránpotenciált. Az MNM-ek bejuthatnak az emberi szervezet biológiai gátjain, és felszívódhatnak a sejtekbe, potenciálisan megváltoztatva a mitokondriális dinamikát, a bioenergetikát és a jelátviteli útvonalakat, ezáltal befolyásolva a sejtanyagcserét és a funkciót.

Tekintettel a mitokondriumok kritikus szerepére a sejt- és a szervezeti egészségben, az MNM-ek jelentős veszélyt jelentenek a mitokondriális egészségre és működésre. A jelenlegi adatok aláhúzzák az MNM-szennyezés átfogó problémájának sürgős kezelését, nem csupán a környezet, hanem az emberi egészség védelme érdekében is.¹⁹²

A mitokondriumok ATP-t szintetizálnak – ez az univerzális energia molekula, amely minden biológiai folyamatot ellát: az izomösszehúzódástól és az idegimpulzus továbbításától a hormonszintézisig és a sejtosztódásig. Részt vesznek a szénhidrátok, zsírok és aminosavak anyagcseréjében, és fenntartják a szervezet metabolikus egyensúlyát.

A mitokondriumok kontrollálják az apoptózist – ez egy kritikus fontosságú folyamat, amely megakadályozza a károsodott vagy potenciálisan veszélyes sejtek felhalmozódását. Az e rendszerben bekövetkező zavarok összefüggésbe hozhatók az onkológiai, autoimmun és neurodegeneratív betegségek kialakulásával. A mitokondriumok vezető szerepet játszanak az antioxidáns védelemben, szabályozva a reaktív oxigénfajták (ROS) szintjét. A rendszer hibája esetén felhalmozódnak a károsodások, felgyorsul az öregedés, megnő a krónikus gyulladások és betegségek kockázata (72. ábra).

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>



72. ábra. A környezetszennyezés okozta mitokondriális diszfunkció különféle betegségekhez vezethet.

Forrás: Borisova, O. Mitochondria medicine. Open Longevity. (2019)

https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (Hozzáférés dátuma: 2025.05.01.).

A mitokondriumoknak saját DNS-ük van, amely anyai ágon öröklődik, ezzel egyedülálló szereplőivé válnak az örökletes betegségeknek. Szabályozzák a nukleáris gének aktivitását és a sejtek külső környezeti változásokhoz való alkalmazkodását. Ezenkívül a mitokondriumok részt vesznek a szteroid hormonok – a kortizol, az ösztrogének és a tesztoszteron – szintézisében. Pontosan a nanoműanyag hatása következtében fellépő mitokondriális funkciózavar áll annak a patológiás folyamatkaszádnak a hátterében, amely súlyos és potenciálisan visszafordíthatatlan következményekhez vezethet mind az egyes szervek és rendszerek, mind az egész szervezet működésében (1. táblázat).

Neuropátiás betegségek	Parkinson-kór, Alzheimer-kór, Amiotrófiás laterálszklerózis (ALS), Epilepszia, Migrének, Mitokondriális encefalomiopátiák (pl. MELAS szindróma)
Szív- és érrendszeri betegségek	Kardiomiopátiák, Szívelégtelenség, Ateroszklerózis (oxidatív stressz révén)
Immun- és gyulladásos betegségek	Autoimmun betegségek (pl. szisztémás lupusz eritematózus), Krónikus gyulladásos állapotok (a ROS diszfunkció és a citokin jelátvitel révén)
Anyagcserezavarok	2-es típusú cukorbetegség, Elhízás, Metabolikus szindróma, Zsír- és laktát anyagcserezavarok
Onkológiai betegségek	Mitokondriális diszfunkció esetén megnő a mutációk és a sejtek rosszindulatú átalakulásának (malignus transzformációjának) kockázata
Izombetegségek	Mitokondriális miopátiák, Krónikus izomgyengeség és fáradtság
Érzékszervek betegségei	Pigmentált retinitisz, Leber-féle optikai neuropátia (öröklött látásvesztés)
Genetikai mitokondriális szindrómák	Leigh-szindróma, Kearns-Sayre-szindróma, Barth-szindróma

1. táblázat. Áttekintés a mitokondriális diszfunkcióval összefüggő néhány betegségről

Az MNM részvételének mechanizmusai a korai öregedésben és az onkogenezisben

A nanoműanyag expozíció korai öregedést okozhat azért, hogy beavatkozik a mitokondriumok működésébe és megzavarja a szervezet genetikai programjait. A mitokondriumok károsodása a reaktív oxigénfajták túlzott termeléséhez vezet, ami oxidatív stresszt vált ki. Ez rontja a DNS-t, zavarja a genetikai stabilitást, aktiválja a gyulladást és felgyorsítja a szövetek öregedését. Ezenkívül a nanoműanyag elősegíti a telomerek rövidülését, ami korlátozza a sejtek osztódási képességét.



„Azt is demonstrálni tudtuk, hogy embereknél már a mitokondriális DNS-ben lévő egyetlen nukleotid-változás is, amely a mitokondriumok romló működéséhez és gyermekkori mitokondriális betegségekhez kapcsolódik, felgyorsíthatja az öregedési folyamatokat” – mondta Taosheng Huang, MD, PhD, professzor és a genetikáért felelős vezető az UB Jacobs Orvostudományi és Biomedicinális Tudományok Iskola Gyermekgyógyászati Tanszékén. **„Azt találtuk, hogy a mitokondriumok rossz működéséből származó reaktív oxigénfajták idővel növelik a DNS-károsodást.”**¹⁹³

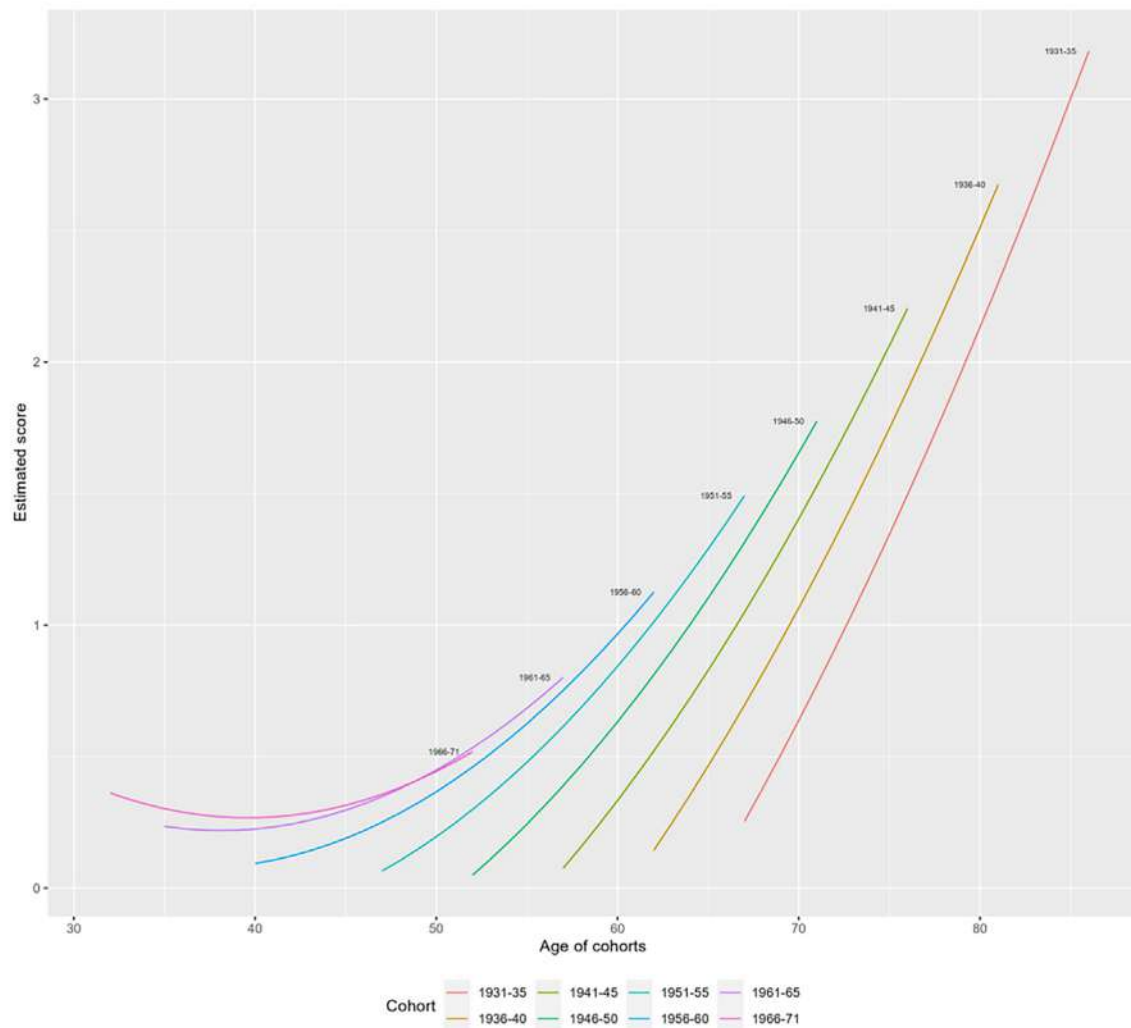
Az *epigenetikai* öregedés a génszabályozás olyan változásait jelenti, amelyek a DNS-módosítások (gén be-/kikapcsolása) szintjén mennek végbe, de magát a DNS-szekvenciát nem módosítják. Ez egy finom „molekuláris időzítő”, amely mérhető, és a normál öregedésnél gyorsabban vagy lassabban járhat. A mitokondriális DNS magas aktivitása összefügg az epigenetikai öregedés gyorsulásával. Egyes embereknél már 20–30 éves korban a sejtek biológiai kora jelentősen meghaladhatja a kronológiai életkort. Ez azt jelenti, hogy a szervezet a kelleténél gyorsabban öregszik.

A mitokondriális rendellenességekkel élők körében fiatal korban is gyakran jelentkeznek olyan életkorral összefüggő betegségek, mint a demencia, szív- és érrendszeri betegségek, aritmiák, szívelégtelenség. Skót tudósok megállapították, hogy minél később született valaki, annál nagyobb a kockázata annak, hogy 50 éves korára megbetegszik. Például az 1956–1960 között születetteknek átlagosan több betegségük van, mint azoknak, akik korábban – 1951–1955 vagy 1946–1950 között – születtek (73. ábra).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>



73 ábra. Előre jelzett multimorbiditási pontszámok kohorsz és életkor szerint.

Forrás: Skót longitudinális tanulmány. 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>

Mitokondriális DNS-mutációk öregedésben és rákban

A kulcsfontosságú mechanizmusok, amelyek az öregedés és az onkológiai (rákos) betegségek kialakulásának hátterében állnak, nagyrészt megegyeznek. Az egyik központi láncszem a mitokondriumok – az energiatermelésért felelős sejtalkotók – működésének zavara. Az emberi szövetekben az életkor előrehaladtával felhalmozódnak a mitokondriális DNS (mtDNS) mutációi, és hasonló elváltozásokat régóta észlelnek a rák különböző formáiban is.¹⁹⁵

Amikor egy sejtben mutáció történik, az megváltoztathatja annak működését. Például, a sejt elkezd gyorsabban növekedni és osztódni, nem pusztul el, még akkor sem, amikor kellene, „láthatatlanná” válik az immunrendszer számára, jobban elviseli az oxigén- vagy táplálékhiányt.

Az ilyen sejtek előnyhöz jutnak a normál sejtekkel szemben – tovább élnek, gyakrabban osztódnak, egyre több helyet foglalnak el, és elkezdik uralni a többit. Amikor az ilyen sejtek nagy számban felhalmozódnak, megkezdődhet a daganat kialakulása.



74 ábra. DNS-károsodás, ami mutációkhoz vezet.

Posztmitotikus sejtek, mint például a neuronok, kardiomiociták és bizonyos izomsejtek, különösen érzékenyek a mitokondriális károsodásra. Mivel ezek a sejtek nem osztódnak, az idővel felhalmozódó mutációk, különösen a mitokondriális DNS-ben lévők (74. ábra), a sejt teljes élettartama alatt a sejtben belül maradnak.

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>

A posztmitotikus sejtek rendkívül anyagcsere-aktívak: a neuronok jelentős energiát igényelnek a jelek továbbításához, és a szívsejtek folyamatosan pumpálják a vért. Következésképpen, mitokondriumaik maximális kapacitással működnek, nagy mennyiségű reaktív oxigénfajt (ROS) termelve. Ezek a reaktív oxigénfajták károsítják a mitokondriumokat, beindítva a fokozott ROS-termelés és további károsodás ciklusát.

Idővel ez az akkumulált károsodás patológias folyamatokat indíthat el, mint például neurodegeneratív rendellenességek, szív- és érrendszeri betegségek, rák, sőt halálhoz is vezethet.

Ez a mechanizmus magyarázhatja, hogy a szív- és érrendszeri betegségek, szívrohamok, stroke-ok és rákos megbetegedések miért a vezető halálokok globálisan. Továbbá, a nanoplasztikok toxikus hatása – amely az elmúlt 10-20 évben drámaian felerősödött – valószínűleg megmagyarázza, hogy ezek a betegségek miért jelentkeznek fiatalabb korban és miért érték el pandémiás méreteket, évente több tízmillió életet követelve. A nanoplasztikok elsősorban a mitokondriális funkciót zavarják, elősegítik az oxidatív stresszt, és mutációkat indukálnak a mitokondriális és nukleáris DNS-ben.

A hormonrendszer destabilizációja MNM-ek hatására

A műanyagok gyártása során olyan vegyi anyagokat használnak, amelyek megzavarják az endokrin rendszer működését és a hormonális egyensúlyt. Ezek képesek utánózni, blokkolni vagy módosítani a természetes hormonok hatását, ami különféle egészségügyi problémákhoz vezethet.

Az emberi szervezetben több mint 3000 csomagolásban használt vegyi anyagot mutattak ki.¹⁹⁶ E vegyi anyagok közül körülbelül 100-at az emberi egészségre nézve „magas kockázatúként” osztályoznak.

Biszfenol A

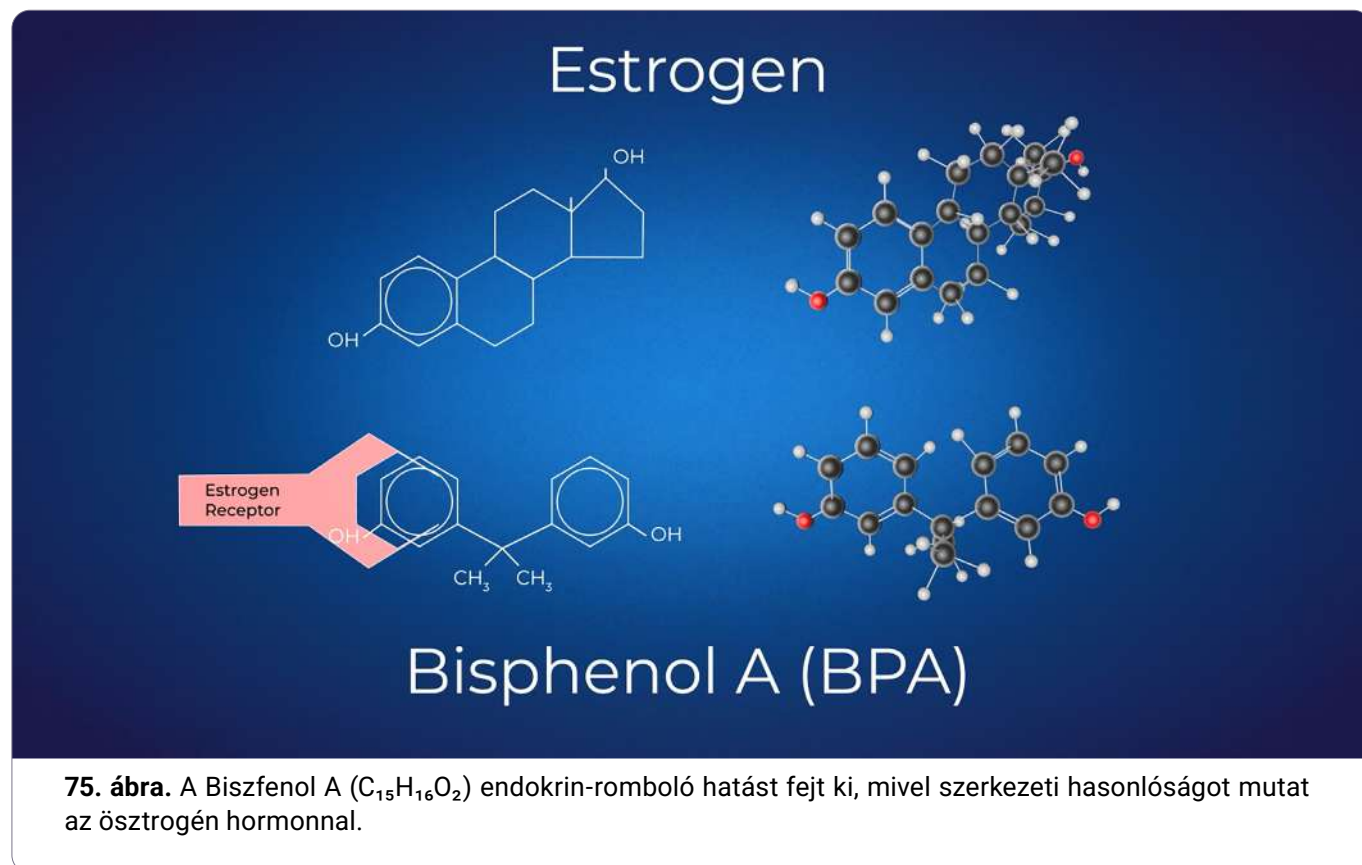
A Biszfenol A (BPA) egy szintetikus lágyító (plasztifikátor), amelyet széles körben használnak a polikarbonát műanyagokban (palackok, tartályok), epoxigyantákban (konzervdobozok bevonata) és orvosi eszközökben.

Melegítés hatására a BPA átvándorol az élelmiszerekbe és italokba.

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>



„A BPA egy «kontrollálatlan» hormonként működik, amely kiszorítja azt a természetes hormont, amely normál esetben részt vesz az adott útvonalban” mondta Ian Rae professzor, a Melbourne-i Egyetem Kémiai Iskolájának környezeti vegyi anyagokkal foglalkozó szakértője.¹⁹⁷ (75. ábra)



Évente több mint 8 millió tonna biszfenol A-t állítanak elő világszerte, és körülbelül 100 tonna jut belőle a légkörbe.¹⁹⁸

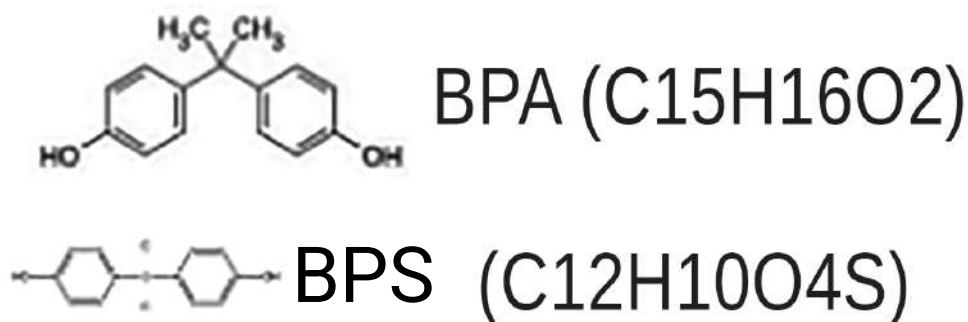
Kutatások azt mutatják, hogy a BPA és annak helyettesítője, a biszfenol S (BPS) is megzavarja az idegrendszerben lévő gerjesztő és gátló jelek koordinációját.¹⁹⁹ Mindkét vegyület hasonló patológiás hatásokat indukál magas koncentrációban (76. ábra). Agysejtekkel végzett kísérletek feltárták, hogy már kis mennyiségű BPA vagy BPS is, ha egy hónapon át hatásként vannak kitéve a sejtek, megváltoztatja a jelek kémiai és elektromos átvitelét a szinapszisokon keresztül.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).



76. ábra. A biszfenol A (BPA) és a biszfenol S (BPS) molekuláris szerkezetei és kémiai képletei.

2023-ban egy tanulmány nagyobb mennyiségű biszfenol A BPA-t és ftalátot talált figyelemhiányos hiperaktivitási zavarban (ADHD) szenvedő gyermekeknél, mint azoknál, akiknél ez az állapot nem állt fenn.²⁰¹

A melbourne-i Florey Idegtudományi és Mentális Egészségügyi Intézet kutatói azt találták, hogy a fiúknál hatszor nagyobb volt a valószínűsége a megerősített autizmus-diagnózisnak 11 éves korukra, mint azoknál, akiknek édesanyja alacsonyabb BPA szintnek volt kitéve a terhesség alatt.²⁰²



„A BPA többféle módon is megzavarhatja a hormonok által kontrollált férfi magzati agyfejlődést, beleértve egy kulcsfontosságú enzim, az aromataz elhallgattatását, amely szabályozza a neurohormonokat, és különösen fontos a hím magzati agy fejlődésében” mondta Ponsonby professzor.

„Úgy tűnik, ez az autizmus-rejtvény része.”¹⁹⁷

Az aromataz enzim elnyomása magyarázatot adhat az autizmus diagnózisok nemi eltérésére: 4-5 fiú jut minden egyes lányra.²⁰³ Míg az autizmus ritkább a lányoknál, ők általában az állapot súlyosabb formáit tapasztalják.²⁰⁴

A Biszfenol A (BPA) hozzájárul a 2-es típusú cukorbetegség kialakulásához is azért, hogy hiperglikémiát és inzulinrezisztenciát okoz.²⁰⁵ A cukorbetegség miatti globális halálozás továbbra is folyamatosan emelkedik (77. ábra).

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>

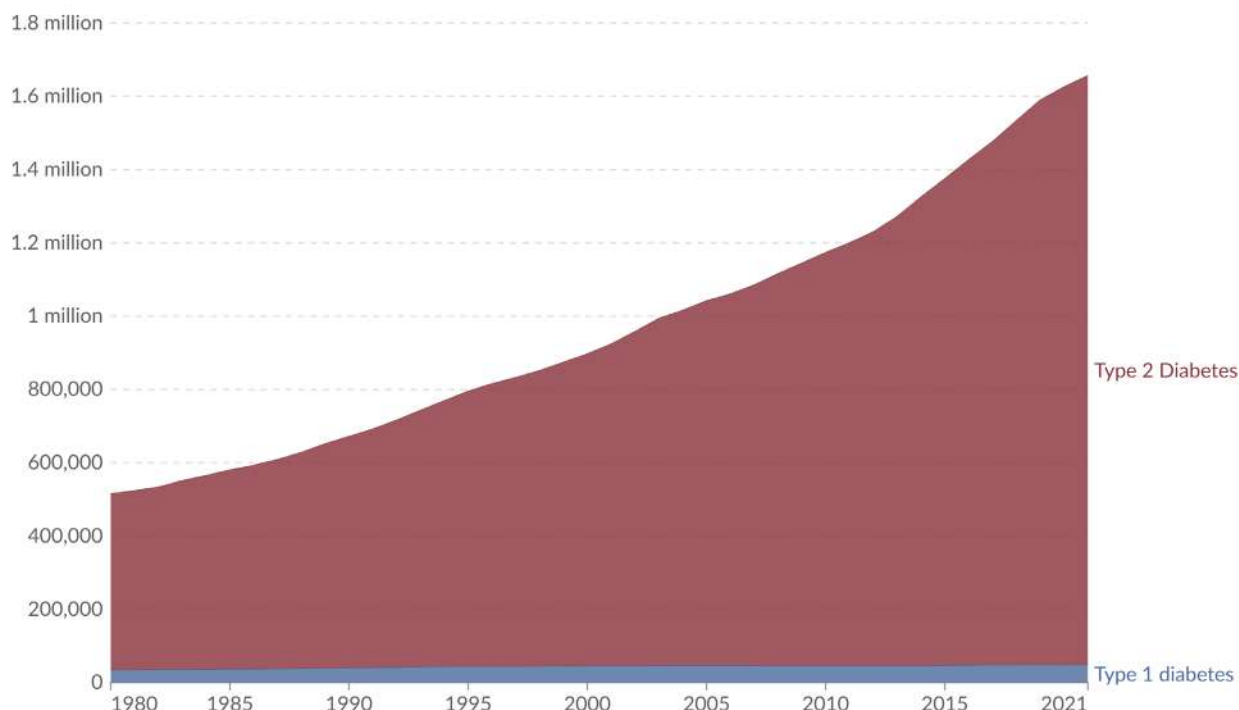
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

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

Our World
in Data

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



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

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

77. ábra. Cukorbetegség okozta halálozás típusonként, világ. 1980–2021.

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

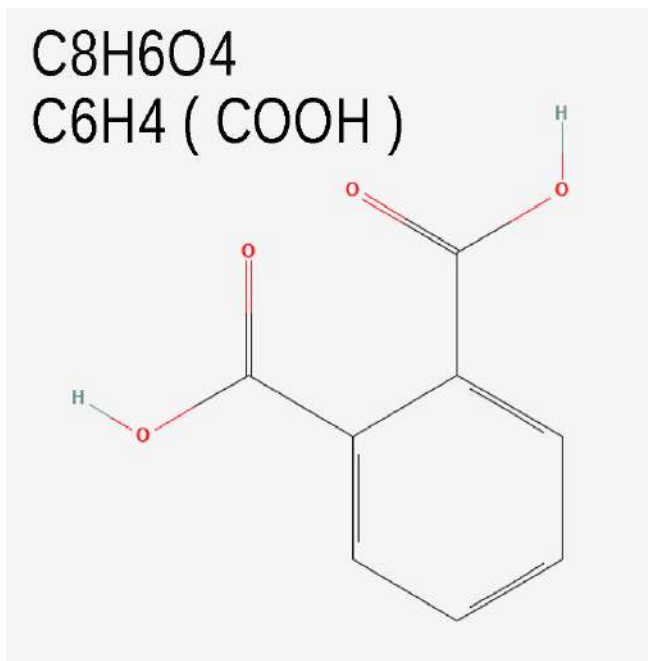
Ftalátok

A ftalátok olyan vegyi vegyületek csoportja, amelyeket főként lágyítóként (plasztifikátorként) használnak, azaz olyan anyagokként, amelyek a műanyagokat, például a polivinil-kloridot (PVC), rugalmasabbá, lágyabbá és tartósabbá teszik.

A ftalátokat széles körben alkalmazzák az iparban és a háztartásokban, de aggodalomra ad okot, hogy képesek beavatkozni az endokrin rendszer működésébe.²⁰⁶

Molekuláris képlet (78. ábra). A ftalátok nem hormonok, de képesek elnyomni az androgének (például tesztoszteron) hatását, ami különösen kritikus a férfiak fejlődése szempontjából. Hatásukra csökken a spermiumok mozgékonyasága, és előfordulhatnak a nemi szervek fejlődési rendellenességei (például kriptorchizmus az újszülötteknél). A meddőnek nyilvánított férfiaknál magasabb ftalát koncentrációt mutattak ki.

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>



78. ábra. Kémiai szerkezet ábrázolása.

Forrás: PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure>
(Hozzáférés dátuma: 2025.05.01.).

Nőknél megzavarodik a menstruációs ciklus, és megnő a vetélés és a koraszülés kockázata. A magzatra gyakorolt expozíció a terhesség alatt az agy fejlődésének késleltetéséhez, alacsonyabb IQ-hoz, valamint viselkedési problémákhoz vezethet.²⁰⁷

Tudósok ok-okozati összefüggést mutattak ki a környezeti ftalátok (a mindennapi fogyasztási cikkekben található toxikus vegyi anyagok) és a méh leiomyoma gyakoribb előfordulása között, amelyek a nők leggyakoribb daganatai.²⁰⁸

A műanyagokban lévő ftalátoknak való kitettség 20%-kal növeli a gyermekkori onkológiai megbetegedések kialakulásának kockázatát, háromszoros növekedést mutatva a rosszindulatú csontdaganatok esetében és kétszeres növekedést a limfóma előfordulásában.²⁰⁹

Egy több mint 5000 amerikai anya részvételével készült kutatás kimutatta, hogy a ftalátok összefüggésbe hozhatók az alacsony születési súlyú és koraszülött csecsemők születésének kockázatával.²¹⁰ Ezek a tényezők mérsékelten növelik a csecsemőhalálozás valószínűségét, valamint befolyásolhatják a gyermekek iskolai teljesítményét, és növelhetik a szívbetegségek, a cukorbetegség, valamint az olyan mentális zavarok kockázatát, mint az autizmus és az ADHD a gyermekeknél.²¹¹

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>

²⁰⁸ 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>

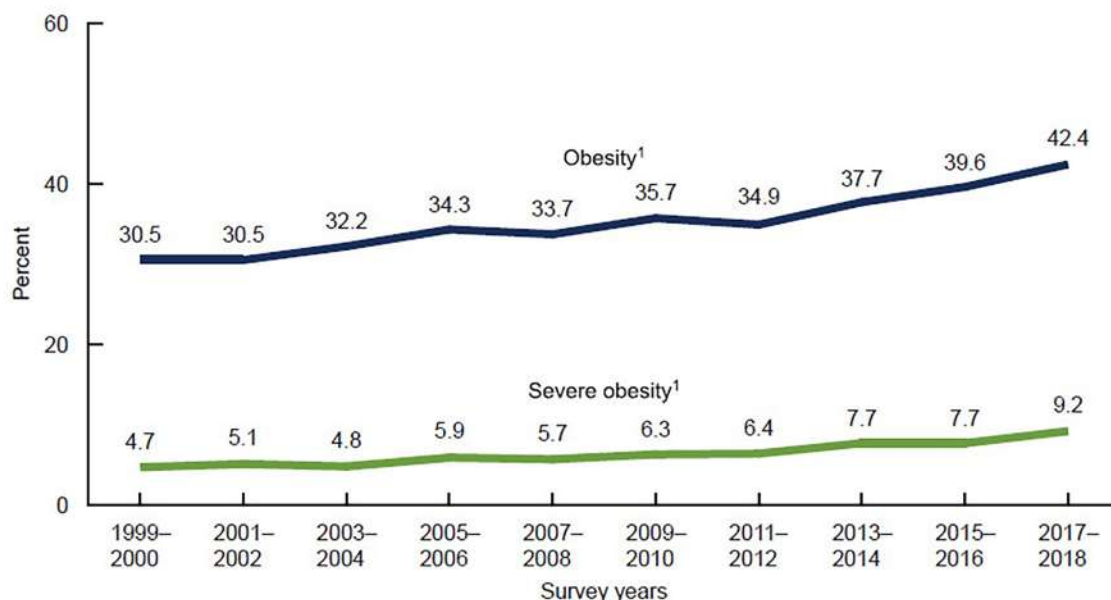
²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ 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)

²¹¹ 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>

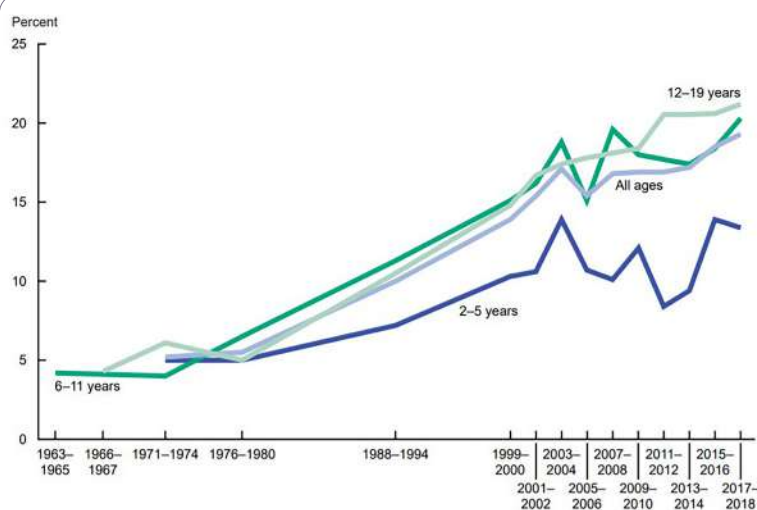
A műanyagok kémiai adalékanyagai hozzájárulnak az elhízás kialakulásához.²¹² A WHO adatai szerint 1990 és 2020 között az elhízás szintje világszerte több mint kétszeresére nőtt a felnőttek körében, és négyszeresére a serdülők körében.²¹³

Az elhízás trendjei az amerikai felnőttek és fiatalok körében (79–80. ábra).



79. ábra. Az elhízás és a súlyos elhízás prevalenciájának tendenciái a 20 éves és idősebb felnőttek körében, kor szerint korrigálva: Egyesült Államok, 1999–2000 és 2017–2018.

Forrás: 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> (Hozzáférés dátuma: 2025.05.01.).



80. ábra. Az elhízás trendjei a 2–19 éves gyermekek és serdülők körében, korcsoportok szerint: Egyesült Államok, 1963–1965 és 2017–2018.

Forrás: 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> (Hozzáférés dátuma: 2025.05.01.).

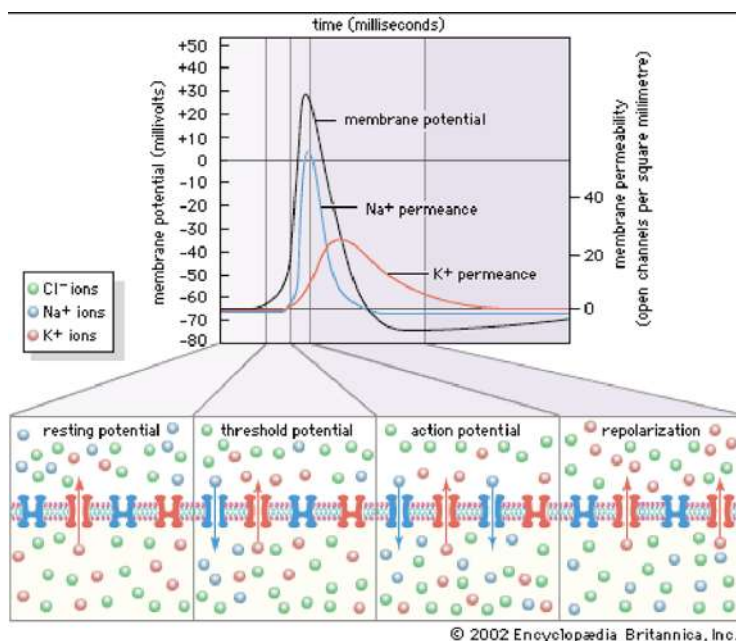
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

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).

A nanoműanyag elektrosztatikus töltése, mint az emberi szervezetre gyakorolt fokozott toxicitásának kulcsfontosságú tényezője

Az emberi szervezet folyamatosan termel bioelektromos energiát. Minden fiziológiai folyamat – a szív működéstől és az érzékszervi észleléstől a magasabb kognitív funkciókig – elektromos töltések mozgása által kezdeményezett kémiai reakciók eredménye. A fehérjéket tartalmazó sejten belüli és sejten kívüli folyadékok főként elektropoláris tulajdonságokkal rendelkező vízből állnak. Ezzel összefüggésben az elektrosztatikus kölcsönhatások, beleértve a hidrogénkötéseket, az ionos kötéseket és a hidrofób kölcsönhatásokat, kulcsfontosságú szerepet játszanak a sejt fehérjék működésükhöz szükséges szerkezetének kialakításában, és ebből következően a szervezet életképességének fenntartásában.²¹⁴

A bioelektromosság az ioncsatornák és a membránpotenciálok kölcsönhatása révén közvetlenül részt vesz a sejtek működésében. Minden sejt fenntart egy elektromos potenciálkülönbséget a belső és külső környezete között – a nyugalmi membránpotenciált –, amelyet a sejten belüli és kívüli ionkoncentráció különbsége biztosít (81. ábra). Az emberi szervezetben jelen lévő fő ioncsatorna-típusok közé tartoznak a nátrium-, kálium-, kalcium- és kloridcsatornák. Ezek a csatornák a membránpotenciállal együtt biztosítják a különböző sejt típusok kulcsfontosságú funkcióit (82–83. ábra).



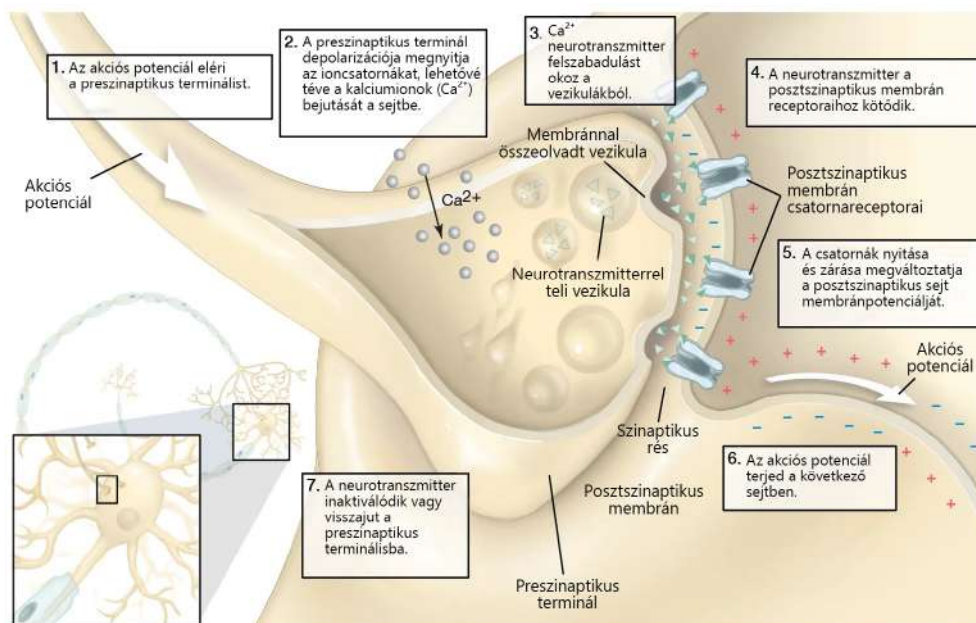
81. ábra. Ionos permeabilitás és akciós potenciál.

Az akciós potenciál alapját képező ionos áteresztőképesség változásai. Az elektromos potenciál a bal oldalon, millivoltban (mV) van beosztva, az ionos permeabilitás a jobb oldalon, négyzetmilliméterenkénti nyitott csatornák számában. Nyugalmi potenciál esetén a membránpotenciál közel van EK-hoz, a K⁺ egyensúlyi potenciáljához. Amikor a nátriumcsatornák megnyílnak, a membrán depolarizálódik. Amikor a depolarizáció eléri a küszöbpotenciált, akciós potenciált indít el. Az akciós potenciál generálása közelíti a membránpotenciált ENa-hoz, az Na⁺ egyensúlyi potenciáljához. Amikor a nátriumcsatornák bezáródnak (csökkentve az Na⁺ permeabilitást), és a káliumcsatornák megnyílnak (növelve a K⁺ permeabilitást), a membrán repolarizálódik.

Forrás: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025).

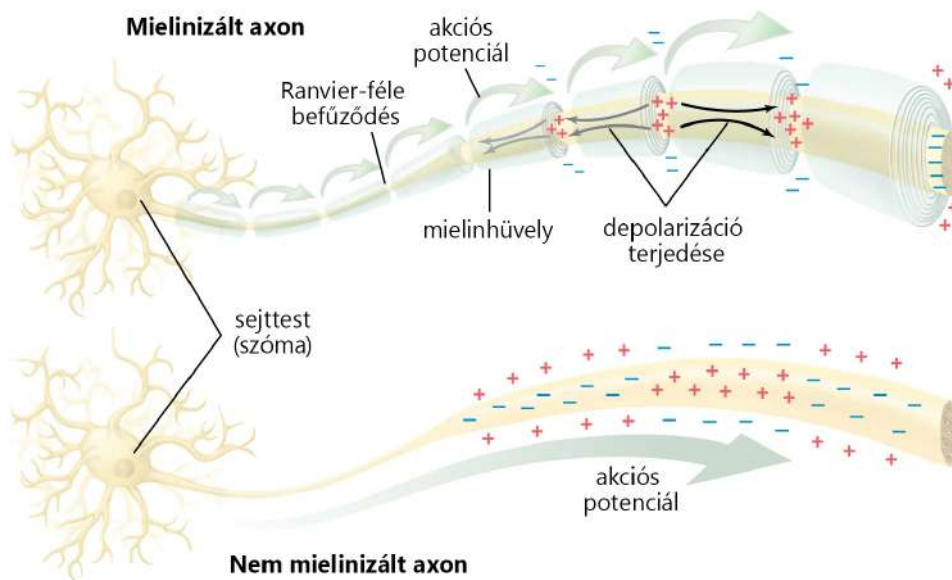
<https://www.britannica.com/science/neuron>

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).



82. ábra. Szinapszis. Az idegimpulzus kémiai átvitele a szinapszisban. Az idegimpulzus megérkezése a preszinaptikus végződésbe stimulálja a neurotranszmitterek felszabadulását a szinaptikus részbe. A neurotranszmitterek kötődése a posztzinaptikus membránon lévő receptorokhoz serkenti az akciós potenciál újragenerálódását a posztzinaptikus neuronban.

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



83. ábra. Neuron; akciós potenciál vezetése. A mielinizált axonban a mielinhüvely megakadályozza a lokális áram (kis fekete nyilak) átfolyását a membránon. Ez arra kényszeríti az áramot, hogy a Ranvier-féle befűződések felé haladjon lefelé az idegrost mentén, ahol magas az ioncsatornák koncentrációja. Gerjesztés hatására ezek az ioncsatornák továbbterjesztik az akciós potenciált (nagy zöld nyilak) a következő csomóponthoz. Ily módon, az akciós potenciál végigugrál a roston, mivel minden csomópontban regenerálódik; ezt a folyamatot szaltatórikus vezetésnek nevezzük. A nem mielinizált axonban az akciós potenciál a teljes membrán mentén terjed, elhalványulva, miközben diffundál vissza a membránon keresztül az eredeti depolarizált területre.

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

Az emberi szervezetben keletkező bioelektromosság (pl. az izomműködés vagy az idegimpulzusok átvitele során) nem káros az emberre, mivel a fiziológiai folyamatok természetes része. A szervezetbe jutó mikro- és nanoműanyagok azonban magukkal hozzák az elektrosztatikus töltést, amelyet hosszú ideig képesek megtartani. És pontosan ez a töltés károsíthatja az egészséget, beavatkozva az összes biológiai folyamatba.

A nanoműanyag 1 mikrométernél kisebb műanyag részecskékből áll, amelyek egyedi szerkezetüknek köszönhetően képesek elektrosztatikus töltéseket felhalmozni, ami a tudósok fokozott figyelmének tárgyává teszi őket.

Amikor a mikro- és nanoműanyag részecskék a triboelektromos hatás (más felületekkel való érintkezés és súrlódás) eredményeként elektromosan feltöltődnek, elektrosztatikus töltést vesznek fel – pozitívat vagy negatívat. Ez a töltés befolyásolja, hogyan viselkednek a részecskék a szervezetben és a környezetben.

A nanoműanyag részecskék egyedi szerkezete lehetővé teszi számukra a szennyező anyagok, ionok és szerves molekulák adszorbeálását, ami felerősíti toxintovábbító szerepüket az ökoszisztémákban.^{215, 216}

A nanoplasztik kémiai összetétele kulcsfontosságú szerepet játszik elektrosztatikus tulajdonságainak kialakulásában: az olyan polimerek, mint a polisztirol (PS), a polietilén (PE) vagy a polipropilén (PP), gyakran tartalmaznak funkcionális csoportokat – karboxil (-COOH), szulfát (-SO₃H) vagy aminocsoportokat (-NH₂) tartalmaznak, amelyek a környezeti feltételektől függően ionizálódhatnak. Például a Langmuir folyóiratban közzétett tanulmány kimutatta, hogy a karboxilcsoportokat (PS-COOH) tartalmazó polisztirol nanorészecskék negatív zeta-potenciállal rendelkeznek, míg az aminocsoportokat (PS-NH₂) tartalmazók pozitív zeta-potenciállal rendelkeznek, ami megerősíti a funkcionális csoportok hatását a nanoplasztik töltésére.²¹⁷

A töltés felhalmozódásának folyamata nem korlátozódik csak a kémiai tulajdonságokra. A gyártás során vagy mechanikai hatások, például dörzsölés hatására a nanoplasztik kontakt elektromos töltést vehet fel. A műanyag konténereken végzett kutatások kimutatták, hogy a polisztirol képes -10 kV-os töltést felhalmozni, amely hosszú ideig megmarad, és vonzza az ellenkező töltésű részecskéket, például a port vagy a baktériumspórákat.²¹⁸ Sőt, a polimer szerkezetének változásai – például a poláros csoportok jelenléte – lehetővé teszik, hogy a nanoplasztik a környezet pH-értékétől függően mind pozitív, mind negatív töltést mutasson. Savanyú környezetben az aminocsoportok pozitív töltést adhatnak a részecskéknél, míg lúgos környezetben a karboxilcsoportok miatt a negatív töltések dominálnak, amit az *Arabidopsis thaliana* növényeken végzett kutatások is megerősítenek.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, X.D., Yuan, X.Z., 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>

Így a nanoplasztik szerkezetének és elektrosztatikus tulajdonságainak megértése nemcsak fizikai természetét tárja fel, hanem alapot is teremt annak elemzéséhez, hogy ezek a részecskék hogyan befolyásolhatják az ökoszisztémákat és az organizmusokat, amit a továbbiakban a patogén mechanizmusok kontextusában fogunk megvizsgálni.

Magas dielektromos permeabilitásának (elektromos töltés megtartó képességének) köszönhetően a nano-műanyag, miután bekerül a szervezetbe, továbbra is új káros töltéseket halmoz fel, amelyeket normális esetben a szervezet természetes vezető rendszerei semlegesítenek vagy eloszlatnak.

Ez megzavarja a szervezet önszabályozó folyamatait, és a rendellenes elektrosztatikus energia hosszú távú hatása miatt kockázatot jelent a sejtstruktúrák számára.

A szervezetbe kerülő nanoplasztikok jelentette veszély mértékének felméréséhez ismét a szervezet bioelektromos rendszereihez kell fordulnunk – ezek komplex mechanizmusok, ahol az elektromos impulzusok az intercelluláris kommunikáció nyelvét jelentik.

Minden mozdulat és gondolat láthatatlan jeleknek köszönhető, amelyek parancsokat továbbítanak a sejteknek. Az idegsejtek elektromos impulzusok révén cserélnek információt, az izmok ezekre a jelekre reagálva összehúzódnak, az agy pedig bioelektromos és kémiai folyamatok kombinációjával dolgozza fel az adatokat. Még a légzés, a reflexek, a látás és a hallás is apró elektromos kisülésektől függ, amelyek szabályozzák a szervek működését.

Ezek a láthatatlan áramlatok, amelyeket millió évek evolúciója csiszolt, a bioelektromos impulzusokat az élet nyelvéné alakítják. De harmóniájukat idegen elemek – mikroszkopikus nanoplasztik részecskék – zavarják meg.

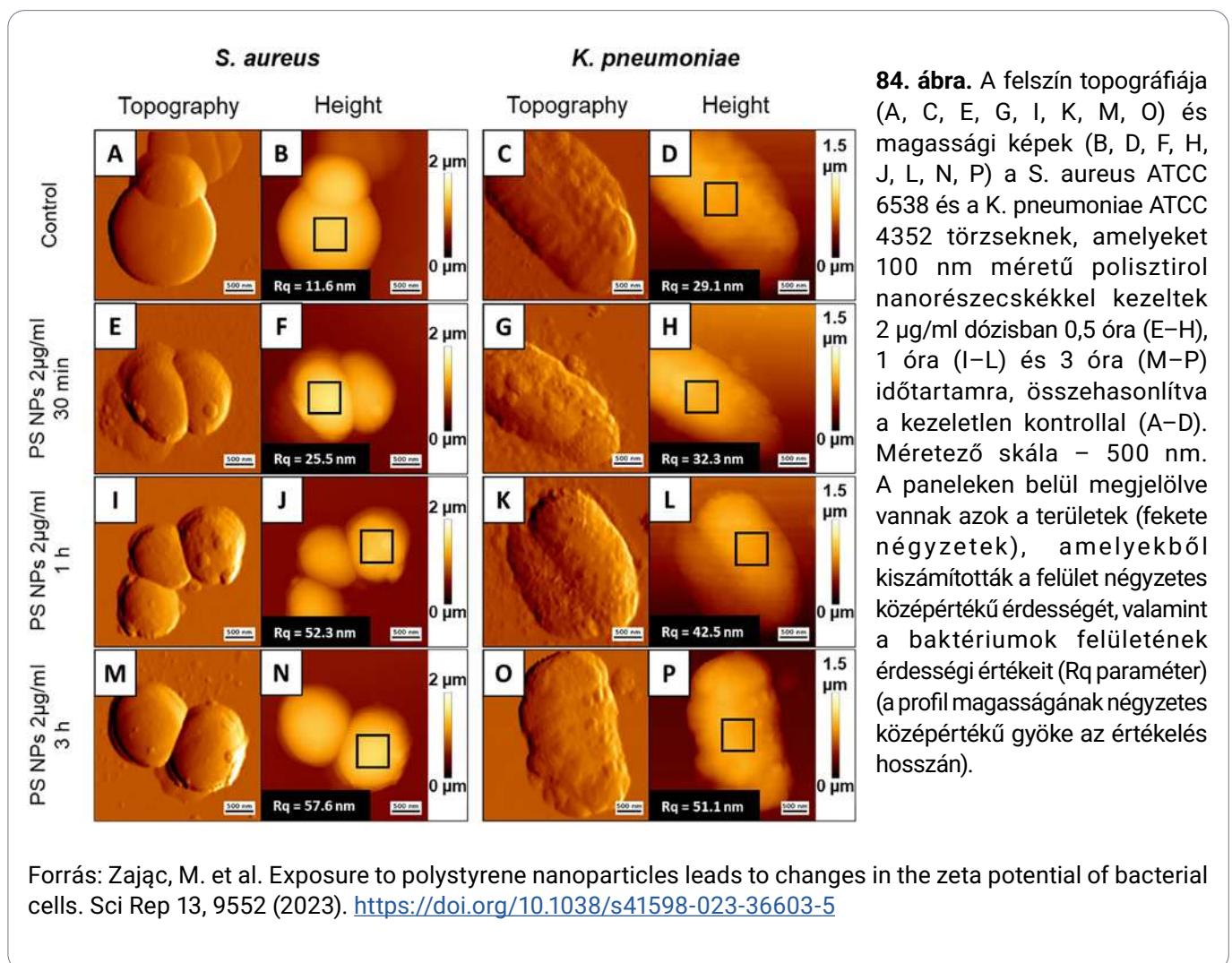
A nano-műanyagok, ha bekerülnek a szervezetbe, képesek ionokat adszorbeálni és abnormális elektromos vezetőképességű zónákat kialakítani, megzavarva a természetes ionegyensúlyt és a helyi töltések semlegesítésének folyamatait, amelyeket az intercelluláris folyadék szabályoz. Az ionok adszorpciója a nanoplasztikok felületén elektrosztatikus töltés felhalmozódásához vezet ezeken a részecskéken. Ez a jelenség oxidatív stresszt válthat ki az aktív oxigénformák (AFK) generálása révén, valamint megzavarhatja az elektrokémiai kommunikációt a sejtek között, ami negatívan befolyásolja azok működését.

Ezt igazolja a tanulmány,²²⁰ amelyben a 100 nm méretű polisztirol részecskék még nátriumionok (Na⁺) jelenlétében is stabilak maradtak és a baktériumok felületén adszorbeálódtak, annak ellenére, hogy azok negatív töltésűek voltak. Például a *Staphylococcus aureus* és a *Klebsiella pneumoniae* kísérletek kimutatták, hogy a nanoplasztik jelentősen megváltoztatja a sejtek zeta-potenciálját, negatívabbá téve felületüket, ami megzavarja a természetes elektrosztatikus egyensúlyt.

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>

A nanoplasztik töltött részecskéi befolyásolhatják a sejtek körüli elektromos mezőket, torzítva a jelátvitelt. Ez hasonló a rádiós kommunikáció zavarásához: a világos parancsok helyett kaotikus zaj keletkezik, amely megakadályozza a sejtek közötti információcserét. Bár a kutatásban nem vizsgálták a nervsejtekre gyakorolt közvetlen hatást, és a humán hatásra vonatkozó következtetések előzetes jellegűek és további kutatásokat igényelnek, a baktériumok felületi töltésének változása arra utal, hogy a nanoplasztik képes módosítani a membránok elektrokémiai tulajdonságait. Például 64 mikrogramm/milliméter feletti koncentrációknál a polisztirol részecskék jelentős eltolódásokat okoztak a zeta-potenciálban, ami potenciálisan zavarhatja az ioncsatornák vagy receptorok működését, amelyek kritikusak az intercelluláris kommunikációban.

A nanorészecskék felületekhez való „tapadási” képessége, amint azt a fent említett tanulmányban készült atom-erő mikroszkópos felvételek is mutatják (84. ábra), hosszú távú hatások kockázatát jelenti. A szövetekben lerakódó részecskék tartós elektrosztatikus anomáliákat képezhetnek, amelyeket a nátrium- és káliumionok nem tudnak teljesen semlegesíteni, különösen akkor, ha a nanoplasztik behatol a sejtekbe, megkerülve az intercelluláris folyadék védelmi mechanizmusait.



A nanoplasztikonon felhalmozódott patogén töltés veszélye abban is rejlik, hogy elektromos zavarokat okozhat az immunsejtek körül, amit a tanulmány²²¹ is megerősít, amely kimutatja, hogy a pozitív töltésű nanoplasztikonok (PS-NH²) jelentősen csökkentik az immunsejtek életképességét és a lizoszomális membránok stabilitását a negatív töltésűekhez (PS-COOH) képest, ami rámutat a töltés fontosságára a sejtekkel való kölcsönhatásukban.

Az elektrosztatikusan töltött MNP-részecskék fokozottan képesek adszorbeálódni a sejtmembránokon, szöveteken és más biológiai felületeken, szó szerint hozzátapadva azokhoz – ez növeli a sejtek mechanikai és kémiai károsodásának kockázatát, megzavarva azok szerkezetét és funkcióit.

Az elektrosztatikus töltés megkönnyítheti az MNM részecskék áthatolását olyan komplex biológiai géteken, mint a hematencefal és a hemotoplaszta. Ennek eredményeként a toxinok eljuthatnak az agyba vagy a magzatba, ami növeli a neurotoxikus hatások és a magzati fejlődés zavarainak kockázatát.

A nanoplasztik elektrosztatikus hatása megzavarhatja a fehérjék, ioncsatornák és sejtreceptorok szerkezetét és működését, ami viszont zavarokat okozhat a sejtek közötti jelátvitelben, oxidatív stresszt indíthat el és gyengítheti a szervezet immunvédelmét.

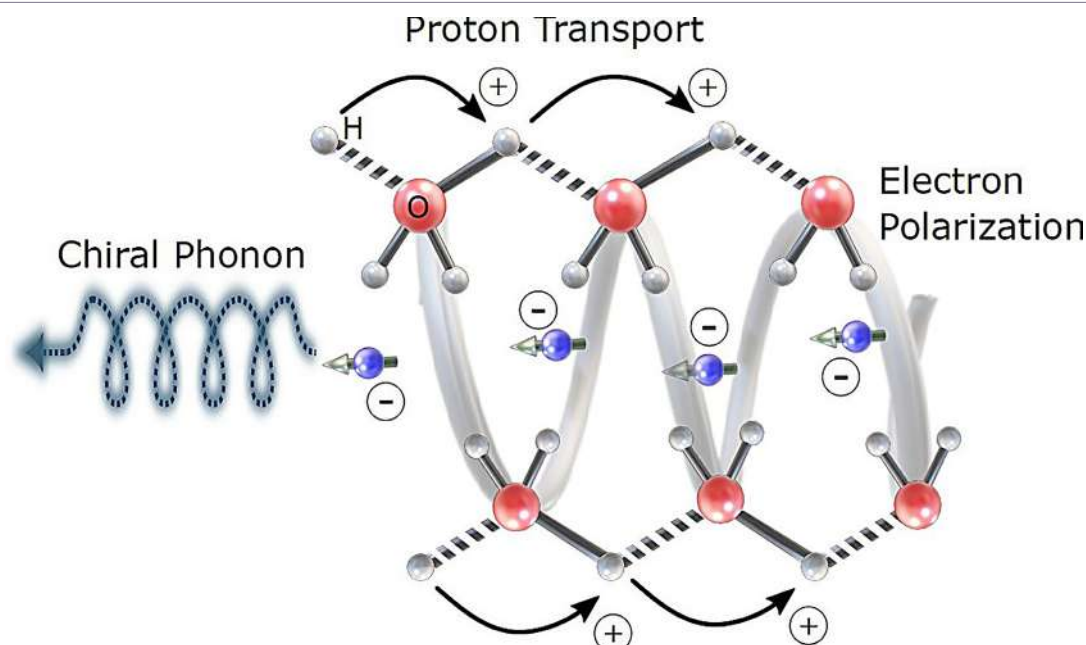
Ezek a változások patológias folyamatok sorozatát indíthatják el, beleértve a krónikus gyulladást, a neurodegeneratív rendellenességeket, a rosszindulatú daganatok kialakulását és a szervezet szisztémás diszfunkcióját, jelentősen növelve a súlyos betegségek kockázatát.

Így a nanoműanyagokon történő elektrosztatikus töltés felhalmozódása nem csupán fizikai jelenség, hanem a MNM veszélyességét fokozó mechanizmus. Különösen figyelembe véve azt a tényt, hogy a MNM-n az elektrosztatikus töltés nagyon hosszú ideig képes megmaradni, és maguk a mikro- és nanoműanyag részecskék gyakorlatilag nem ürülnek ki a szervezetből.

Ennek a jelenségnek a tanulmányozása jelenleg rendkívül fontos, mivel segít megérteni, hogy a nanoplasztikon felhalmozódott kórokozó elektromos töltések hogyan válhatnak makroszkopikus fenyegetéssé az emberi faj életére nézve.

A közelmúltig úgy vélték, hogy a sejtek energiaellátásának alapja – a protonok transzportja – kizárólag kémiai folyamatok által meghatározott: hogy a protonok mintha „átugranának” egyik vízmolekuláról a másikra. Azonban egy új, a *Proceedings of the National Academy of Sciences* folyóiratban megjelent tanulmány radikálisan megváltoztatja ezt a nézetet. Kiderült, hogy a protonok továbbítása az élő szervezetekben nemcsak a kémiai tulajdonságoktól függ, hanem a kvantumtulajdonságoktól is – különösen az elektronok spinjétől és a biológiai molekulák kiralitásától (85. ábra).

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>



85. ábra. Sematikus játékmódel. A protonok transzportját elektronpolarizáció kíséri a királis közegekben. A CISS-effektus miatt ez az elektromos polarizáció spinpolarizációt eredményez. A szögimpulzus megőrzése királis fononokat generál, amelyek erősítik a protonok áramlását.

Forrás: 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>

Az izraeli Zsidó Egyetem tudósai által végzett kutatás kimutatta, hogy olyan fehérjékben, mint a lizocim, a protonok átvitele jelentősen felgyorsul, ha „helyes” spinű elektronokat vezetnek be, és fordítva, lelassul, ha ellenkező spinűeket. Ez azzal függ össze, hogy az élő rendszerekben a protonok és az elektronok összehangolt kvantummechanizmusként viselkednek. Még a legkisebb változások is a spin orientációjukban befolyásolhatják az alapvető folyamatokat – az energia termelést, az anyagcserét, a sejten belüli szabályozást.

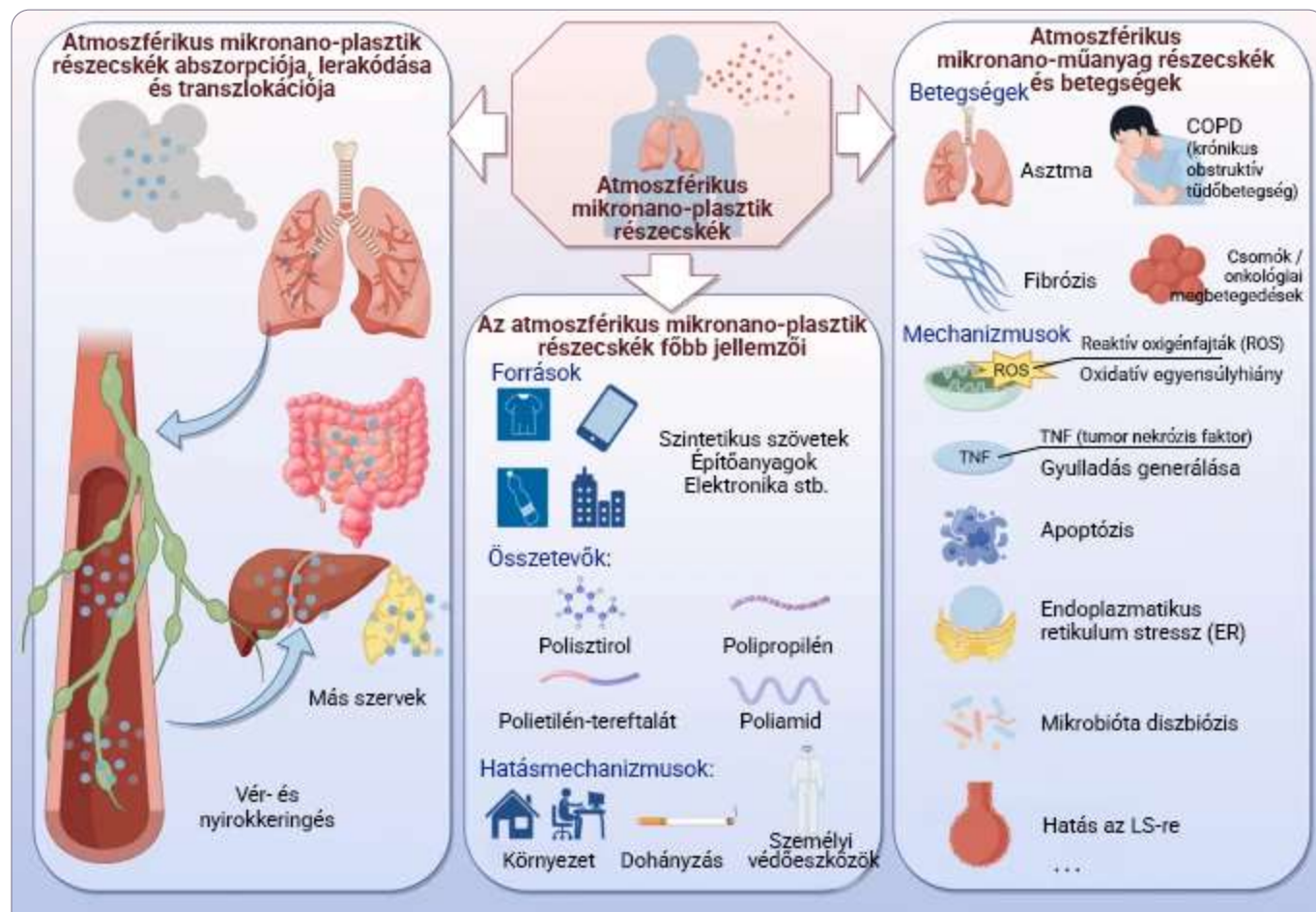


Ahogy a kutatás vezetője, Naam Goren megjegyezte: **„Eredményeink azt mutatják, hogy a protonok mozgásának módja a biológiai rendszerekben nemcsak a kémiát, hanem a kvantumfizikát is érinti”**. Ez azt jelenti, hogy még a legkisebb zavarok az elektromos töltésben vagy a mágneses orientációban is befolyásolhatják a sejtek anyagcseréjét, az energia termelést és az általános egészségi állapotot.²²²

²²²[Phys.org](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html). 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).

Az MNM rendszerszintű hatása az emberi szervekre és funkcionális rendszerekre

Miután az emberi szervezetbe kerültek, az MNM-ek a vérárammal minden szervbe és szövetbe bejutnak (86. ábra). Műanyag részecskéket találtak az emberi vérben, a szív- és csontszövetekben, az agyban, a placentában, a tüdőben, a májban és más szervekben.²²³



86. ábra. Az MNM belégzéssel jut az emberi szervezetbe és a toxikus hatások.

Forrás: 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>

A légzőrendszer károsodásának mechanizmusai az MNM belégzése esetén

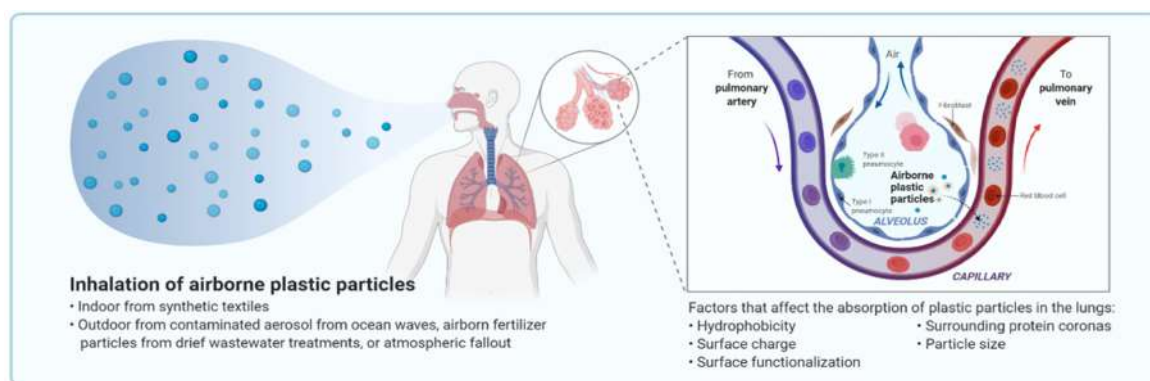
Az egyik fő út, amelyen a mikroműanyagok az emberi szervezetbe kerülnek, a légzés.

Kínai tudósok²²⁴ kutatási eredményei szerint két óra aktív szabadtéri tevékenység során a felnőttek körülbelül 106 000 mikroműanyag-részecskét, a gyermekek pedig körülbelül 73 700-at lélegeznek be.

A 0,1 mikrométernél kisebb részecskék termodinamikai tulajdonságaiknak köszönhetően hatékonyan lerakódhatnak a légutak egészében (a felső légutaktól az alveolusokig).²²⁵

A tüdő hatalmas alveoláris felülettel (körülbelül 150 m²) és vékony szöveti gáttal (kevesebb mint 1 mikrométer) rendelkezik, ami lehetővé teszi a mikroműanyagok könnyű bejutását a véráramba (87. ábra).

20 emberi tüdőszövet-mintából 13-ban mikroplasztikát (MP) találtak.²²⁶



87. ábra. A műanyag részecskék inhalációs úton történő bejutása az emberi szervezetbe.²²⁷

A kutatás adatai szerint 22 tüdőbetegségben szenvedő páciensnél minden köpetmintában mikroműanyagot találtak²²⁸: 18,75-től 91,75 részecske/10 ml-ig.²²⁹ Emellett megállapították az allergiás rhinitis és a mikroműanyagok közötti kapcsolatot is.²³⁰

Az MNM-ek szorosan összefüggenek különböző légúti megbetegedések, köztük az asztma, a tüdőfibrózis, a krónikus obstruktív tüdőbetegségek és a daganatok kialakulásával és fejlődésével.²²⁹ A kutatások kimutatták, hogy a rosszindulatú tüdőtumorok 97%-ában mikroplasztik szálak voltak jelen.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>

A lehetséges mechanizmusok között szerepel az oxidatív stressz, a gyulladás és a tüdő mikrobióta egyensúlyának felborulása. Az MNM-ek tüdőgyulladásához vezethetnek.²³²

A WHO jelentése szerint jelenleg az alsó légúti fertőzések továbbra is a világ leghalálosabb fertőző betegségei közé tartoznak, és az összes halálozási ok közül az ötödik helyet foglalják el.²³³ A trachea, a hörgők és a tüdő rákos megbetegedései miatt bekövetkező halálesetek száma pedig emelkedett, és a vezető halálozási okok között a hatodik helyet foglalja el.

Az MNM neurotoxikus hatása.

A központi és perifériás idegrendszer károsodása

A kutatások megerősítik, hogy a neurológiai rendellenességek a fizikai és kognitív fogyatékoság fő okai világszerte, jelenleg körülbelül 3,4 milliárd embert érintve. Az abszolút betegszám az elmúlt 30 évben jelentősen nőtt.²³⁴ Ráadásul a krónikus neurodegeneratív betegségek terhe várhatóan a következő két évtizedben minimum megduplázódik. A WHO adatai szerint a világon minden nyolcadik ember mentális zavarban szenved.²³⁵

A bipoláris zavarok előfordulása a serdülők és fiatalok körében világszerte 79,21/100 000 főről 1990-ben 84,97/100 000 főre emelkedett 2019-ben.²³⁶ Az elmúlt három évtizedben mind a férfiak, mind a nők körében növekedett a megbetegedések száma (88. ábra). A kutatások szerint az elmúlt években nőtt a mentális zavarok előfordulása gyermekek és serdülők körében. A 2022-es jelentés szerint, amely a nemzeti egészségügyi ellátás minőségéről és egyenlőtlenségeiről szól, 2016 és 2019 között a 0–17 éves gyermekek körében a mentális egészségügyi okok miatt a sürgősségi osztályokra érkező esetek száma 100 000 főre vetítve 784,1-ről 869,3-ra emelkedett. Ezenkívül 2008 és 2020 között a 12 éves és idősebbek körében az öngyilkosságok miatti halálozási arány 16%-kal, 14,0-ről 16,3-ra nőtt 100 000 főre vetítve.²³⁷

A *Blue Cross Blue Shield* egészségbiztosító társaság jelentése szerint 2013 óta a klinikai depresszió, más néven súlyos depresszió diagnózisainak száma 33%-kal nőtt. Egyes források máris azt jósolják, hogy 2030-ra a depresszió lesz a legfőbb oka a hosszú élettartam vagy az élet elvesztésének. A depresszióban szenvedő nők és férfiak átlagosan akár 9,6 évnyi egészséges életet is elveszíthetnek, áll a jelentésben.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).

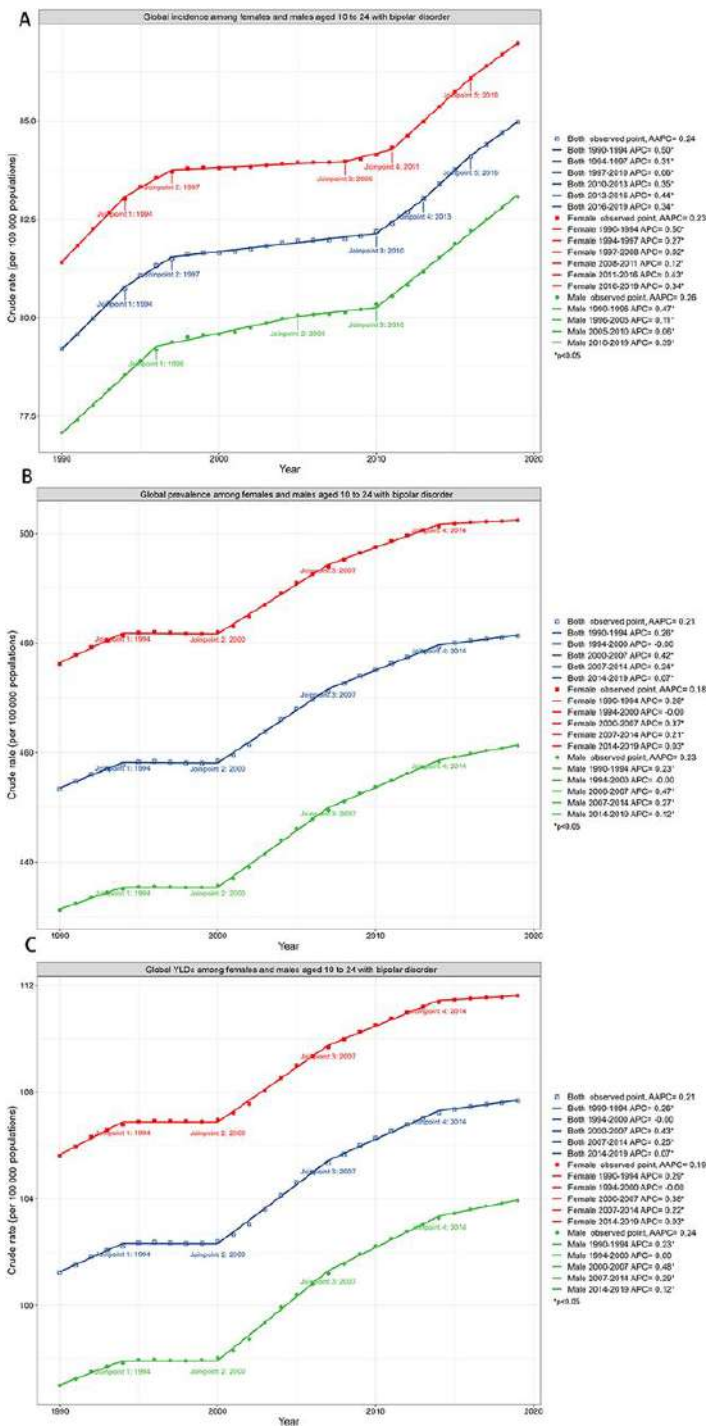
²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

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>



88. ábra. Regressziós elemzés a bipoláris zavar globális előfordulási gyakoriságának, prevalenciájának és a fogyatékkal élőkkel együttélés (YLD) a 10–24 éves serdülők és fiatalok körében 1990 és 2019 között. * $p < 0,05$; AAPC – átlagos éves százalékos változás; APC – éves százalékos változás; YLDs – fogyatékkal élőkkel együttélés.

Forrás: 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>

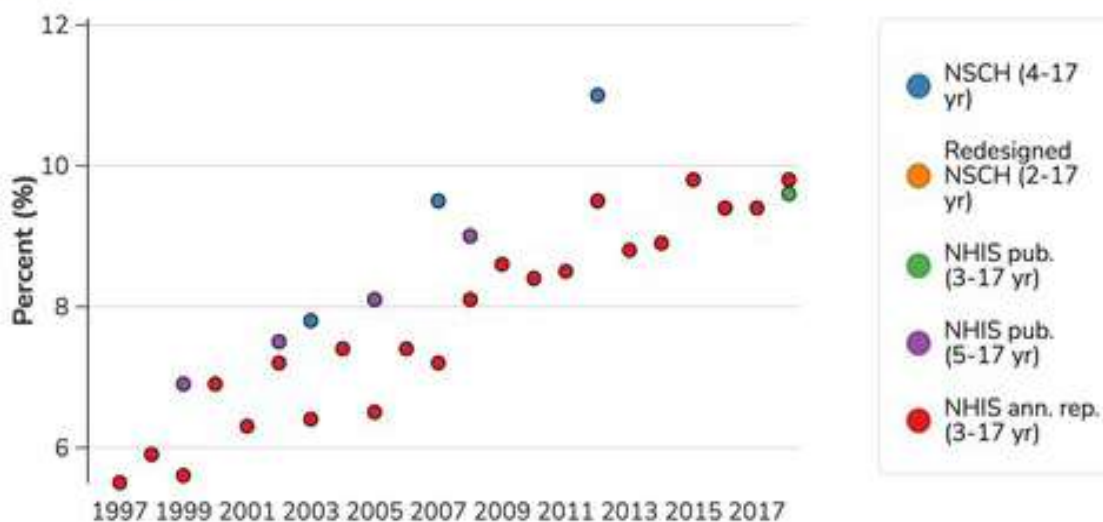
Az elmúlt évtizedekben az attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) diagnózisok száma folyamatosan növekszik. Az Egyesült Államok lakosságát érintő országos felmérések a prevalencia növekedését tükrözik 6,1 %-ról 10,2 %-ra a 1997 és 2016 közötti 20 éves időszakban (89. ábra).²³⁹

A 31 országot felölelő 2023-as felmérés kimutatta, hogy az írástudás és a számolási készségek szintje csökken (90. ábra).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).

A szülők jelentései alapján ADHD-val diagnosztizált gyermekek százaléka



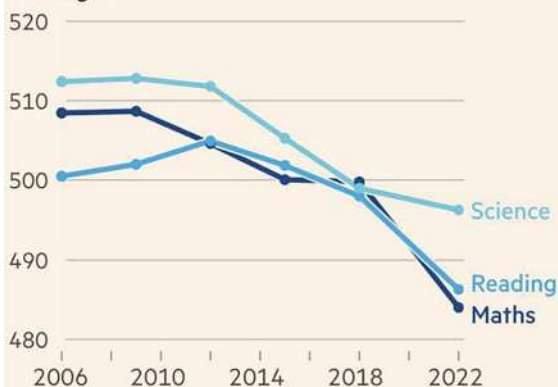
89. ábra. Az ADHD előfordulásának növekedése 1997 és 2016 között.

Forrás: 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)

Teenagers



Adults



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

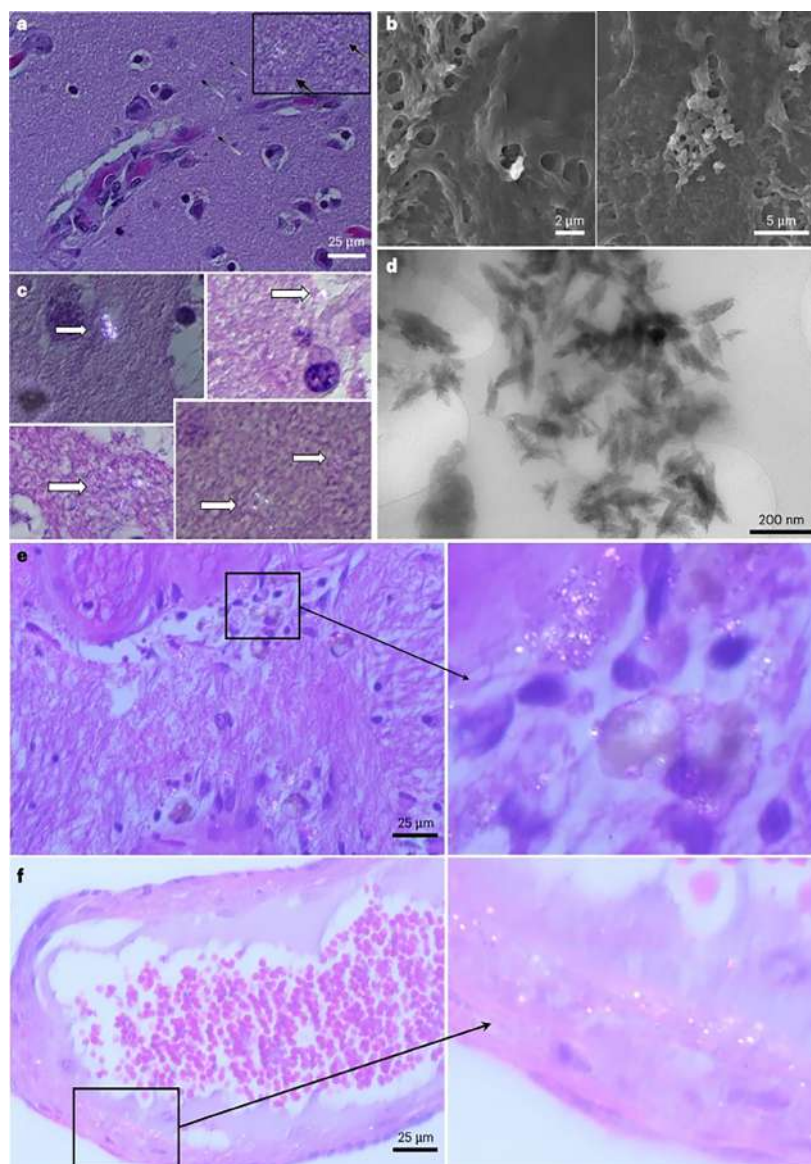
90. ábra. A logikai és problémamegoldó tesztekben elért eredmények romlása.

Forrás: OECD PISA, PIAAC és Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT grafikon: John-Murdoch / @jburnmurdoch

A neurodegeneratív és neuropszichiátriai betegségek növekedési tendenciái egyértelműen korrelálnak a környezetben található műanyagok növekedési tendenciájával (96-97. ábra).

A legmagasabb NP-koncentrációkat az emberi agy szövetében találták – 7-30-szor magasabbak, mint a májban vagy a vesékben, és az agy szövetének mintái azoknál az embereknél, akiknél demenciát diagnosztizáltak, még nagyobb MNCH-koncentrációt mutattak – akár 10-szer többet, mint a demenciával nem rendelkező emberek agyszöveteiben (91. ábra).²⁴¹

Az agyban a leggyakrabban előforduló részecskék apró darabkák vagy pelyhek voltak polietilénből – az egyik legnépszerűbb, csomagolásban használt műanyagból.



91. ábra. Polarizációs hullámú mikroszkópia (a, a fekete nyilak a nehezen olvadó zárványokat jelzik; a betét a jobb érthetőség érdekében digitálisan nagyított) és SEM (b, a látómezők szélessége 15,4 és 20,1 mikrométer) mikroszkópiát alkalmaztak elhunyt emberek agyának metszeteinek vizsgálatára.

c, Nagy (> 1 mikrométer) zárványok nem voltak megfigyelhetők; további példák polarizációs hullámmal kiemelve (a fehér nyilak szubmikronos, nehezen olvadó zárványokat jelölnek). Ezeknek a technológiáknak a felbontási korlátai miatt TEM-et használtak a Py-GC/MS-hez használt granulátumok kivonatainak vizsgálatához.

d, A TEM-képek számtalan szilárd részecskét mutattak be, amelyek diszperzió után szilánkok vagy pelyhek formájában jelentek meg, méretük többnyire <200 nm hosszúságú és <40 nm szélességű volt.

e, f, A polarizációs hullámú mikroszkópia jelentősen több refraktív zárványt mutat ki demencia esetén, különösen az immunsejtek társult felhalmozódásával járó területeken (e) és az érfalak mentén (f).

Az összes képet egy kis alcsoporttól (n = 10 normál agy esetén; n = 3 demencia esetén) vizuális bizonyítékok szolgáltatása céljából az analitikai kémia alátámasztására.

Forrás: 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>

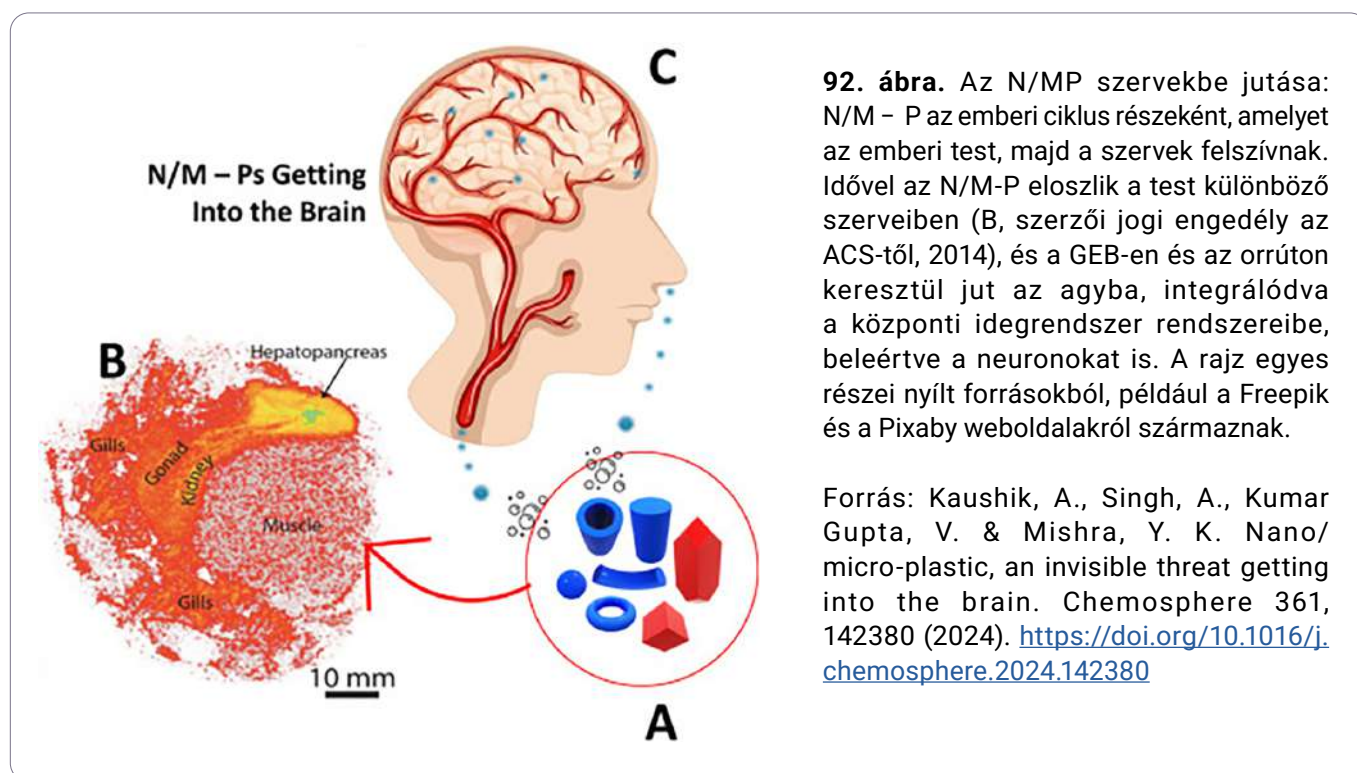
Új adatok igazolják, hogy 2016 és 2024 között, azaz 8 év alatt, a műanyag tartalom az agyban 50 %-kal nőtt.²⁴¹



„45 és 50 év közötti egészséges embereknél átlagosan 4900 mikrogramm műanyag részecskét találtunk grammonkénti agyszövetben. (...) Egy egész műanyag kanál. Körülbelül ennyi mikroműanyag található az agyunkban. Ez azt jelenti, hogy agyunk ma 99,5 %-ban agyból áll, a többi pedig műanyagból” – mondta Matthew Kampen, a New Mexico Egyetem vezető kutatója.²⁴²

Figyelembe véve a műanyag részecskék tartalmának növekedését a légkörben, a vízben és az élelmiszerekben, biztosan állítható, hogy a nano-műanyagok mennyisége a szervezetünkben csak növekedni fog. Ha ez a tendencia folytatódik, akkor 4 év múlva a műanyagok szintje az agyban további 50 %-kal fog növekedni.

A nanoműanyagok a véráramon keresztül jutnak az agyba, áthatolva a vér-agy gáton (VAG), valamint a belélegzett levegővel az illatidegeken keresztül (92. ábra).



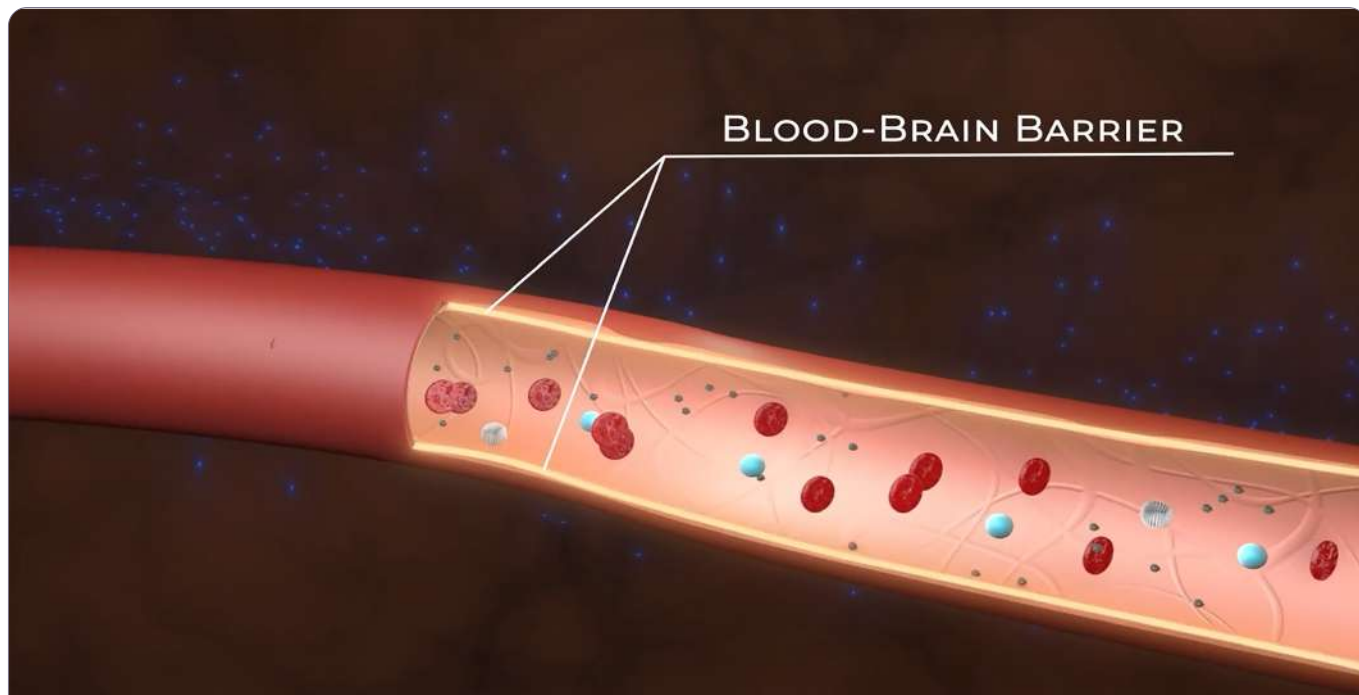
92. ábra. Az N/MP szervekbe jutása: N/M – P az emberi ciklus részeként, amelyet az emberi test, majd a szervek felszínnek. Idővel az N/M-P eloszlik a test különböző szerveiben (B, szerzői jogi engedély az ACS-től, 2014), és a GEB-en és az orrúton keresztül jut az agyba, integrálódva a központi idegrendszer rendszereibe, beleértve a neuronokat is. A rajz egyes részei nyílt forrásokból, például a Freepik és a Pixaby weboldalakról származnak.

Forrás: 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>

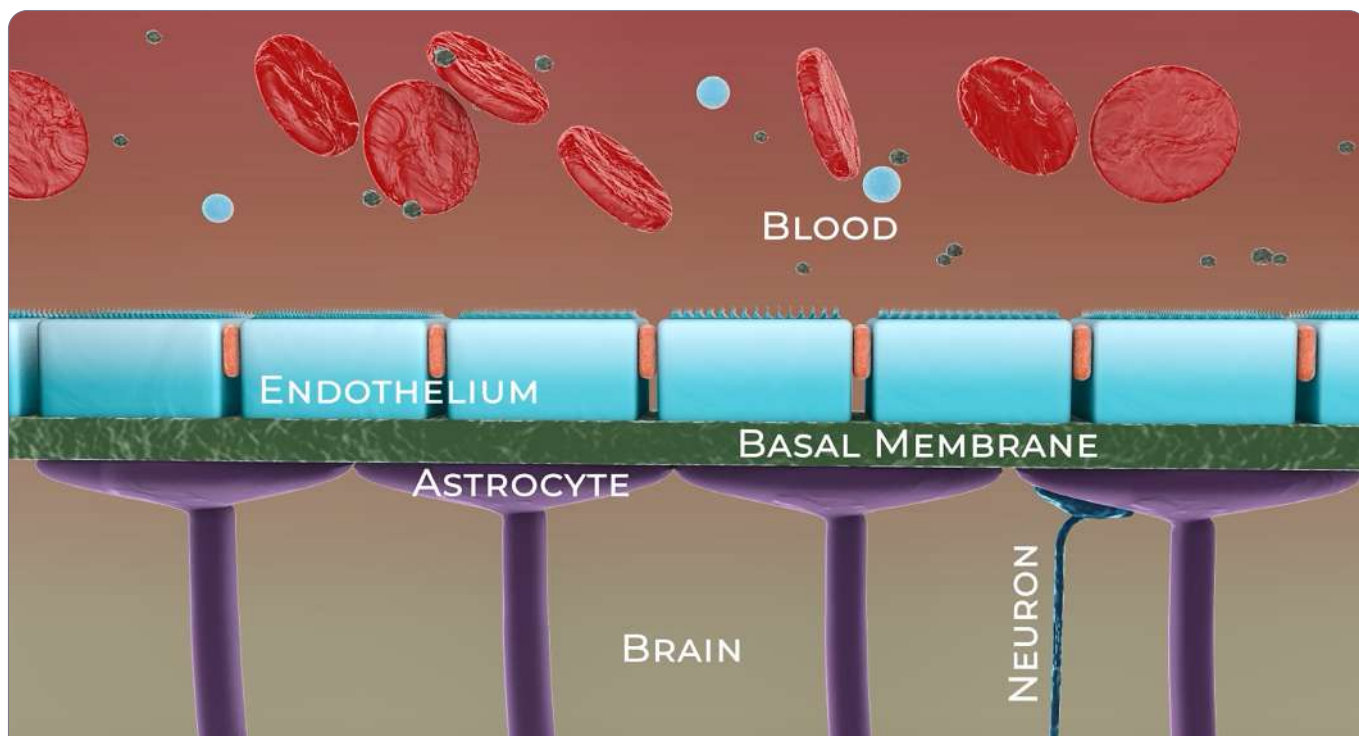
²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

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).

A vér-agy gát egy speciális fiziológiai rendszer, amely szabályozza az anyagok átjutását a véráramból a központi idegrendszerbe (93. ábra). Szelektíven átengedi a tápanyagokat és az oxigént, miközben blokkolja a toxinok és kórokozók bejutását (94. ábra). Ez a mechanizmus kritikus védelmet biztosít az agynak, fenntartva a neuronális környezet homeosztázisát.



93. ábra. Az agyér vázlatos ábrázolása.



94. ábra. A vér-agy gát sematikus ábrázolása.

A műanyag nanorészecskék szubmikronos méretüknek és fizikai-kémiai tulajdonságaiknak köszönhetően mindössze 2 órával a szervezetbe jutásuk után bejutnak az agyba.²⁴³

Belégzéskor a műanyag nanorészecskék az illatidegeken keresztül közvetlenül az agy illatérzékelésért felelős területére jutnak (95. ábra).²⁴⁴ Ennek eredményeként rövidebb és egyenesebb utat tesznek meg az agyig, mint más szervekig.



95. ábra. A NM-ek behatolása a szaglóidegeken keresztül az agyba.

Az agyba behatolva a nanoplasztik megzavarja az agysejtek – a neuronok – működését. Kiderült, hogy a nanorészecskék felülete és elektromos töltése jelentősen befolyásolhatja a neuronokkal való kölcsönhatást és az idegi impulzusok átvitelét.

A nanoplasztik elektrosztatikus töltése lehetővé teszi, hogy akadálytalanul megzavarja az emberi szervezet minden sejtjének működését, behatolva azokba, oxidatív stresszt és krónikus gyulladást okozva, megzavarva a mitokondriumok működését, egészen azok teljes megsemmisüléséig és a sejtek elhalásáig.

A tanulmány²⁴⁵ kimutatta, hogy a negatív töltésű nanorészecskék képesek a neuronok membránjának depolarizációját okozni, ami elektromos aktivitásuk megváltozásához vezet.

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>

A kísérlet eredményeként kiderült, hogy a negatív töltésű nanoplasztik részecskék szelektíven kötődtek az idegimpulzusok átvitelében aktívan részt vevő idegsejtekhez. A részecskék a neuronok testéhez, axonjaihoz, dendritjeihez és szinaptikus résekhez tapadtak, míg az elektromos aktivitással nem rendelkező glia sejtek nem léptek velük kölcsönhatásba.

Vagyis, a neuronok elektromos aktivitása a fő kiváltó mechanizmus a negatív töltésű nanoplasztik és a sejtmembrán közötti kötődéshez.

A kutatások szerint a mikro- és nanoplasztik hajlamos felhalmozódni az agy lipidekben gazdag mielinhüvelyében, amely az idegsejteket veszi körül és biztosítja az idegi jelek továbbítását.²⁴⁶ A nanoplasztik anyagok az axonok^{247, 248} mielinhüvelyének pusztulását idézik elő, ami megzavarja az idegimpulzusok átvitelét a neuronok között.

A nanoplasztik hatása az idegsejtekre

A nanoplasztik hatása az idegsejtekre a következő pontokon keresztül érvényesülhet:

1. Az idegsejtek membránpotenciáljára gyakorolt hatás

A neuronok a membránon kialakuló potenciálkülönbségnek (nyugalmi állapotban körülbelül -70 mV) köszönhetően működnek, amelyet az iongradiensek (Na^+ , K^+ , Cl^- stb.) és az ioncsatornák aktivitása hoz létre. Ha a neuron membránja közelében elektromos töltésű nanoplasztik részecske található, az megváltoztathatja az elektromos mezőt és destabilizálhatja a membránpotenciált. Ez depolarizációhoz vagy hiperpolarizációhoz vezethet, és a legrosszabb esetben a neuron spontán aktiválásához vagy a jel blokkolásához.

2. Elektrosztatikus kölcsönhatás az ioncsatornákkal

Az idegsejt membránjában található ioncsatornák töltött aminosavakat tartalmaznak, különösen a csatorna „kapujában”. Az erős negatív vagy pozitív töltésű részecskék elektrosztatikusan kölcsönhatásba léphetnek ezekkel a területekkel, ami megváltoztatja a csatorna konfigurációját. Ez blokkoláshoz vagy helytelen aktiváláshoz vezethet, megzavarva az idegsejt normális működését.

3. A szinapszisok működésének zavara

A szinapszisok a Ca^{2+} , Na^+ ionok és a neurotranszmitterek pontos működésétől függenek.²⁴⁹ Az elektrosztatikusan töltött nanoplasztik részecskék megzavarhatják a neurotranszmitterek felszabadulását vagy hamis jelet kelthetnek, ami az idegimpulzusok átvitelének zavarához vezethet.

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. Oxidatív stressz és gyulladás

A feltöltött nanoplasztikok képesek az aktív oxigénformák szintjének emelkedését okozni, ami oxidatív stresszhez vezet. Az oxidatív stressz a neuronokban akkor jelentkezik, amikor az aktív oxigénformák szintje meghaladja a sejtek semlegesítési képességét. Ez a DNS, valamint a sejtstruktúrák, például a membránok, fehérjék és mitokondriumok károsodásához vezet, ami megzavarja a neuronok normális működését. Ennek eredményeként a sejt elveszíti képességét az idegimpulzusok hatékony továbbítására, ami a sejt lebomlásához és végül elhalásához vezet. Mivel az idegsejtek regenerációs képessége korlátozott, az oxidatív stressz által okozott károsodások gyakran visszafordíthatatlanok, és a memória, a figyelem és más kognitív funkciók fokozatos romlásához vezethetnek.

5. A mitokondriális funkcióra gyakorolt hatás

Az elektrosztatikusan pozitív töltésű nanoplasztikok a sejt belsejébe hatolva felhalmozódhatnak a mitokondriumokban, megzavarva azok membránpotenciálját. Ennek eredményeként megzavarodik a légzési lánc működése, elektronok szivárognak ki, amelyek kölcsönhatásba lépnek az oxigénnel és aktív oxigénformákat, különösen szuperoxid-anionokat képeznek. Ezek túlzott felhalmozódása fokozza az oxidatív stresszt és károsíthatja a sejtszerkezeteket.

6. Mitokondriális mutációk

A műanyag nanorészecskék képesek a mitokondriális DNS károsodását okozni, ami megzavarja a mitokondriumok normális működését. Ez hatással van a kulcsfontosságú sejt folyamatokra – az energia termelésre, az oxidatív stressz szabályozására, a programozott sejthalálra és az anyagcserére. Ezeknek a rendszereknek a zavara olyan körülményeket teremthet, amelyek elősegítik a betegségek kialakulását.

7. A nanoplasztikok felületének reaktív tulajdonságai

A nanoplasztikok nagy fajlagos felülete az egyik fő tényező, amely meghatározza azok magas kémiai aktivitását és képességét aktív oxigénformák képződésének kiváltására. A mikroműanyagokhoz képest a nanorészecskék tíz- vagy akár százszoros felületet is rendelkeznek tömegegységre vetítve, ami jelentősen fokozza kölcsönhatásukat a biomolekulákkal és a környezettel.

A műanyag részecskék elektrosztatikus töltése zavarhatja az idegsejtek működését, blokkolva vagy torzítva az idegi impulzusok átvitelét. Ez az idegrendszer működésének zavarához vezet, és a szervezetben számos kóros állapotot okozhat. Ez különböző neurológiai, vegetatív, kognitív és pszichés rendellenességekben nyilvánul meg. (2. táblázat).

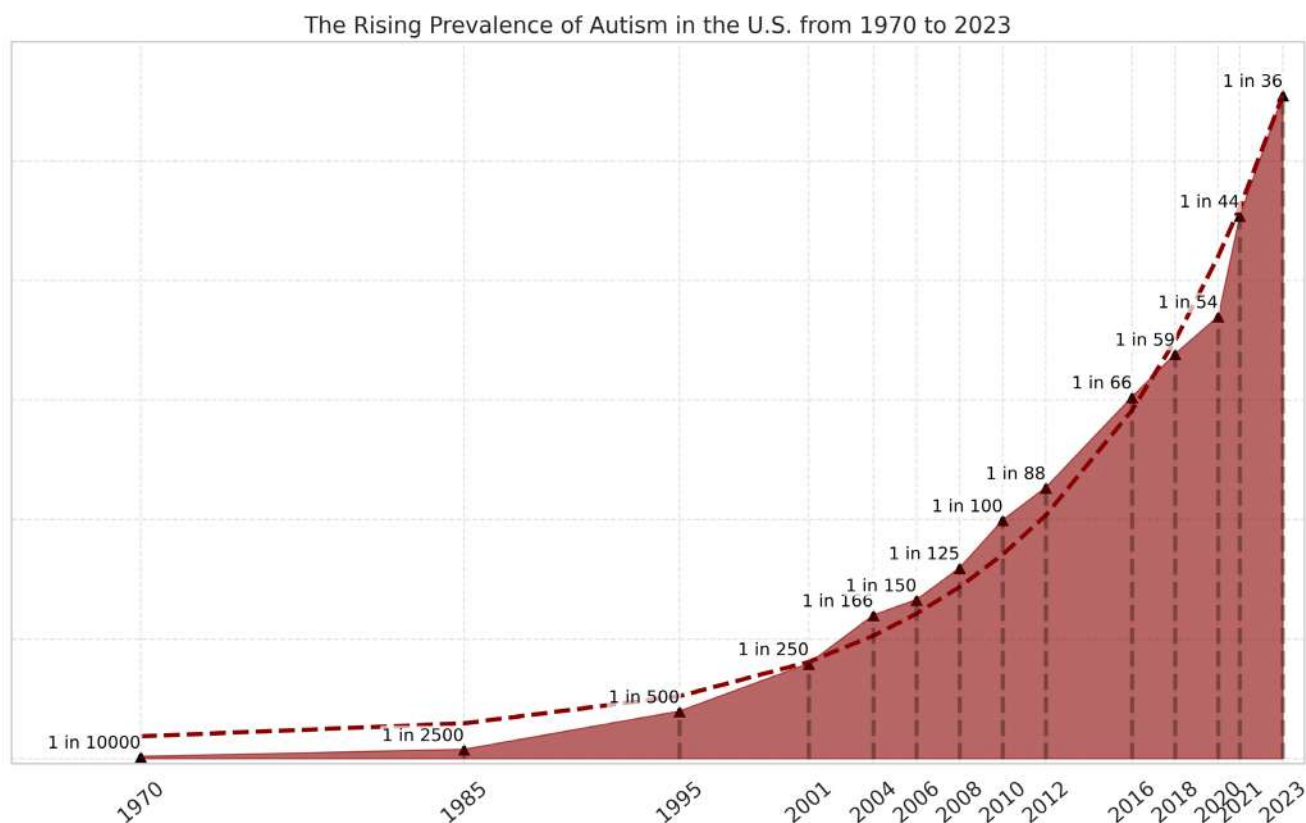
A nanoplasztik idegsejtekre gyakorolt hatása betegségek széles köréhez vezet: sclerosis multiplex és amyotrófiás laterálszklerózis, Alzheimer-kór és Parkinson-kór, autoimmun betegségek, epilepszia, ischaemiás és haemorrhagiás stroke, depresszió, szorongásos és kognitív zavarok, skizofrénia, bipoláris zavar, autizmus stb.

Kategória	Tünetek	Ok / Mechanizmus
Mozgási rendellenességek	Bénulás	A központi idegrendszerből az izmokba történő motoros impulzusok átvitelének zavara
	Görcsös állapotok	Az izgató és gátló idegjelek közötti egyensúlyhiány
	Érzékenységvesztés	Az érzékszervi idegpályák működésének zavara, amelyek az információt a receptoroktól az agyba továbbítják
	Mozgáskoordinációs zavarok	A kisagy vagy a gerincvelő vezetőképességének károsodása
Érzékszervi rendellenességek	Beszéd-, látás- és hallászavarok	Az agy érzékszervi és motoros központjaival kapcsolatos idegpályák károsodása
Vegetatív rendellenességek	Légzési, szívverési és emésztési zavarok	Az autonóm (vegetatív) idegrendszer működésének zavara
	Hőszabályozási zavarok és a belső szervek működésének zavara	A vegetatív szabályozó központok diszfunkciója
Kognitív rendellenességek	Memória- és figyelemzavarok	Agykéreg szerkezeti vagy funkcionális változásai
	Tudatzavarok, kóma	Agy retikuláris formációjának károsodása, amely kulcsszerepet játszik az ébrenlét és a tudatosság szintjének szabályozásában
Pszicho-emocionális rendellenességek	Szorongás, depresszió, hangulatzavarok	Neurotranszmitterek egyensúlyhiánya, az agy érzelmi központjainak károsodása

2. táblázat. A nanoplasztik neuronokra gyakorolt hatása által kiváltott kóros állapotok spektruma

Mikro- és nanoplasztikok mint az autista spektrum zavarok kockázati tényezői

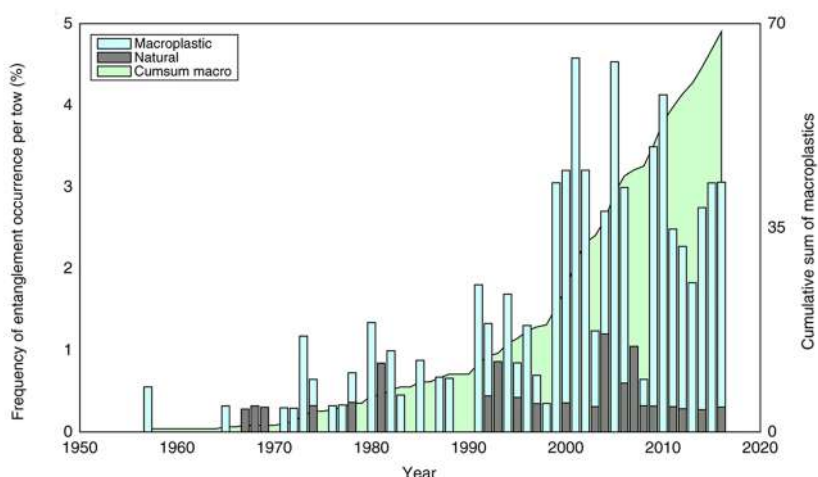
A környezet műanyaggal való szennyezettségének növekedésével párhuzamosan az autista spektrum zavarok (ASZ) előfordulási gyakoriságának növekedése is megfigyelhető (96., 97. ábra).



96. ábra. Az autizmus előfordulásának növekedése az Egyesült Államokban 1970 és 2023 között.

Adatforrás: Rogers, T. The political economy of autism. Substack.

<https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Hozzáférés: 2025.05.01.).



97. ábra. A műanyagok mennyiségének növekedése az óceánokban 1957 és 2020 között.

Forrás: 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>

Az Egyesült Államokban minden 36. gyermeknél diagnosztizáltak autizmust (az Autizmus és Fejlődési Zavarok Megfigyelő Hálózat (ADDM) becslései alapján). A 2020-as adatok szerint az autizmos esetek száma 317%-kal nőtt 2000-hez képest.^{250, 251}

Az emberi idegrendszer az embrionális időszakban és az élet első éveiben alakul ki. A kutatások rámutatnak a mikro- és nanoplasztik hatásának és az ASZ (autizmus spektrum zavarok) kialakulásának lehetséges összefüggésére. Koreai tudósok kísérleti adatai azt mutatják, hogy a prenatális és posztnatális MNM-hatás hozzájárulhat a neurofejlődési rendellenességek kialakulásához.²⁵²

A polisztirol nanoplasztikok molekuláris hatásainak vizsgálata az emberi idegszöveti őssejtekre kimutatta, hogy a nanoplasztikok hatása szöveti károsodáshoz és a neurológiai fejlődéssel kapcsolatos betegségekhez vezethet.²⁵³

Rágcsálókön végzett kutatások²⁵⁴ kimutatták, hogy a mikro- és nanoplasztikok hatása az anyára terhesség és szoptatás alatt zavarhatja az utódok hippokampuszában a neurogenezist, valamint az agy struktúráinak, többek között a motoros kéreg, a hippocampus, a hipotalamusz, a hosszanti agy és az illatmirigy.

Ismert, hogy az idegszövetek fehérjeinek szerkezetének és működésének változása különösen fontos szerepet játszik számos betegség, köztük az autizmus kialakulásában.²⁵⁵

A legújabb kutatások kimutatták, hogy a nanoplasztikák főként gyenge kötések, például hidrofób kölcsönhatások, hidrogénkötések, Van der Waals-erők és elektrosztatikus erők révén hatnak a fehérjékre.²⁵⁶ Ez a fehérjemolekulák szerkezeti deformációjához vezet, megzavarva azok működését. Figyelembe véve a fehérjék szerepét a neurális hálózatok kialakulásában és a szinaptikus átvitelben, ezek a változások befolyásolhatják a ASZ kialakulását.

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 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>

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>

A MNM szerepe a szív- és érrendszeri betegségek kialakulásában

A műanyag részecskék nemcsak a véráramban keringhetnek, hanem az érfalakon is lerakódhatnak, ami egy sor kóros változást indít el. Különösen aggasztó a mikroplasztikok jelenléte az érlemezsedéses plakkokban. Egy nemrégiben végzett tanulmány kimutatta,²⁵⁷ hogy a mikroplasztikával rendelkező betegeknek 4,5-szer nagyobb volt a szívinfarktus, a stroke és a halál kockázata. Ez azt bizonyítja, hogy a műanyag fragmensek aktívan részt vesznek az atheroscleroticus plakkok kialakulásában és destabilizálásában, provokálva azok szakadását és a trombusképződést.²⁵⁸ Az MNM-ek megzavarják az endotélium integritását is, amely a vaszkuláris tónus szabályozásáért, a trombusképződés és a gyulladásos reakciók megelőzéséért felelős, a vaszkuláris belső felületét borító kulcsfontosságú sejtréteg. Az endotélium károsodása a műanyag részecskék hatására krónikus gyulladásához és a trombusképződés kockázatának növekedéséhez vezet, ami különösen veszélyes a szívét és az agyat tápláló artériákban.²⁵⁹ A mikroműanyag kölcsönhatásba lép a vér formális elemeivel, mint például a vérelemezkek és a vörösvérsejtek. Elősegíti a vérelemezkek aggregációját, elindítva a vérrögképződés folyamatát. Ezenkívül, a mikroműanyag felülete mechanikai károsodást okozhat a sejtekben és aktiválhatja a véralvadási kaskádokat, ami hosszú távon krónikus hiperkoagulációhoz és mikrovaszkuláris rendellenességekhez vezethet.

Az immunsejtek képesek felszívni a műanyag mikrorészecskéket, de nem rendelkeznek a teljes lebontásukhoz szükséges mechanizmusokkal. Ez a sejtek deformálódásához és méretük növekedéséhez vezet. Az ilyen megváltozott sejtek felhalmozódása az agy kis ereiben elősegíti a mikrotrombusok kialakulását, ami megzavarja az agy vérellátását és növeli a stroke kockázatát, beleértve a fiatal korban előforduló eseteket is.²⁶⁰ Az agy oxigénellátásának krónikus csökkenése (hipoxia) neuronok elhalásához és neurodegeneratív változások kialakulásához vezet, beleértve az agyszövet atrofiját.²⁶¹ Hosszú távú hatásra ezek a folyamatok az agy egyes struktúráinak térfogatának csökkenését okozhatják.

Elektrosztatikus töltésüknek köszönhetően az MNM-ek aktívan kölcsönhatásba lépnek a sejtmembránokkal, megzavarva azok elektromos potenciálját. Ez viszont befolyásolja az erek összehúzódó képességét, a jelek átvitelét a szívizomsejtekben és a szívritmust.

A szív- és érrendszeri betegségek miatti halálozás világszerte folyamatosan növekszik (98. ábra). Különös figyelmet kell fordítani a 25–44 éves fiatalok körében előforduló hirtelen szívhalál szindrómára²⁶² (99. ábra). Az Egyesült Államokban ez a fő halálok. Az elmúlt két évtizedben az esetek száma meredeken emelkedett. Figyelembe véve az MNM széles körű elterjedtségét, nem zárható ki, hogy ezeknek is szerepük van ezekben a tragikus eseményekben.

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>

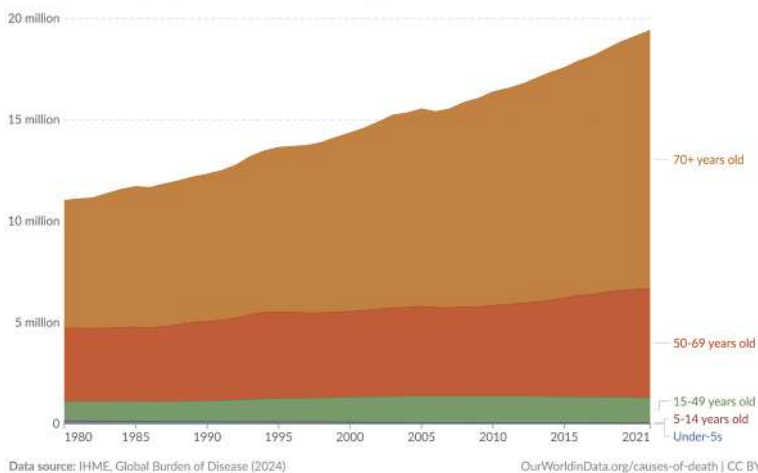
²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

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>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

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

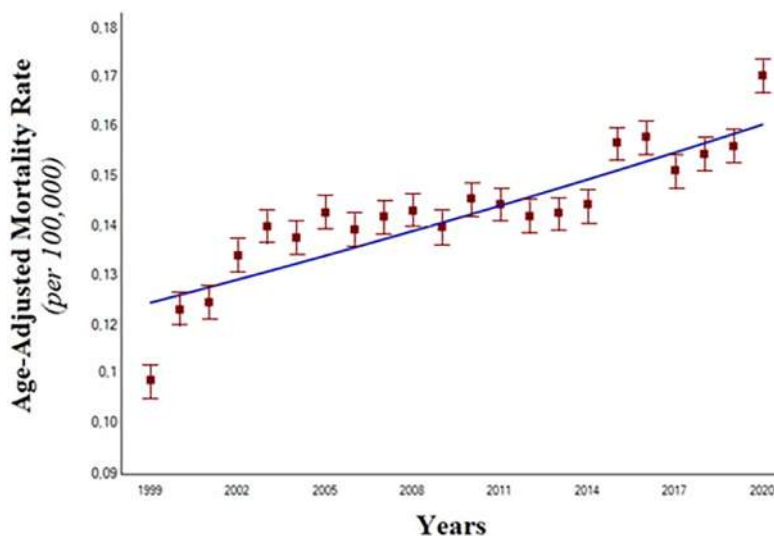


1. Cardiovascular disease: Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially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

98. ábra. A szív- és érrendszeri betegségek okozta halálozások száma életkor szerint. Világ.

Forrás: Our World in Data

<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>



99. ábra. Az életkor szerint kiigazított hirtelen szívhalál okozta halálozási arányok alakulása a 95% BI-vel együtt a 25–44 éves fiatal felnőttek körében az Egyesült Államokban, 1999 és 2020 között.

Forrás: 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. JAMA 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Egy másik súlyos probléma a hirtelen gyermekhalálozás (SIDS) növekedése. Csak az Egyesült Államokban ez a szindróma 15%-kal nőtt 2019 és 2020 között, és a gyermekhalálozás okai között a negyedik helyről a harmadikra került.²⁶³ Annak ellenére, hogy a SIDS okai még nem teljesen tisztázottak, sok tudós feltételezi, hogy kulcsszerepet játszhatnak azok a tényezők, amelyek megzavarják a csecsemők szívritmusának és érrendszeri tónusának szabályozását. A placentán átjutó és a fejlődő szervezet szöveteiben felhalmozódó nanoplasztik az egyik lehetséges kockázati tényező. Egyre több tudós egyetért abban, hogy a nanoplasztik az egyik legfontosabb jelölt a „láthatatlan gyilkos” szerepére.

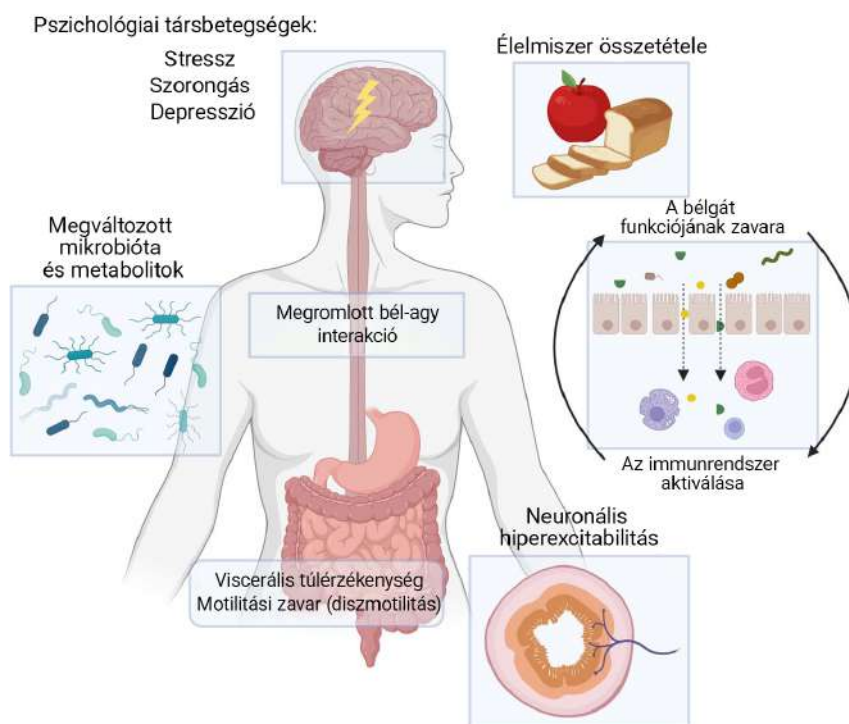
²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

A szív, mint az egyik legnagyobb energiaigényű szerv, kritikus mértékben függ a mitokondriumok hatékony működésétől, amelyek energiával látják el. A mikroműanyag részecskék hatása megzavarja a mitokondriális folyamatokat, ami energiadeficithoz vezethet a szívizomban, és ennek következtében a szívműködés zavarához.

A gyomor-bél traktus működésének zavara, amelyet az MNM okoz

A bél – az ember legnagyobb immunszerve. Körülbelül 70% -a az összes immunsejtnek, körülbelül 500 millió idegsejtnek és több mint 100 billió mikroorganizmusnak koncentrálódik benne.²⁶⁴ A bélmikrobiota kulcsszerepet játszik az immunrendszer fenntartásában. A mikrobiota egyensúlyhiánya gyengítheti az immunitást és elősegítheti különböző betegségek kialakulását.

A beleket gyakran „második agynak” nevezik a sűrű idegsejt-hálózat és a központi idegrendszerrel való interakciós képessége miatt.²⁶⁵ A bonyolult biokémiai jelek cseréje az agy és a bél között „agy-bél tengely” néven ismert, és fontos szerepet játszik mind a fizikai, mind a pszicho-emocionális állapot szabályozásában (100. ábra).



100. ábra. Patofiziológiai mechanizmusok a bél és az agy közötti interakció zavaraiiban.

Forrás: 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>

²⁶⁴Yu, 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>

²⁶⁵Sofield, 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>

Az egészséges bélbarrier megakadályozza a mikrobák és idegen részecskék bejutását a bélrendszerből a véráramba.²⁶⁵ A mikro- és nanoplasztikok megzavarják ezt a védelmet, növelve a bélfal permeabilitását. Ennek eredményeként gyulladás alakul ki mind a bélben, mind más szervekben, ami hozzájárul az immunrendszer gyengüléséhez.²⁶⁶ Ugyanakkor, az MNM befolyásolja a bélmikrobiota összetételét, ami egyensúlytalanságot okoz a hasznos és kórokozó mikroorganizmusok között. Ez megzavarja az emésztési folyamatokat, csökkenti a szervezet képességét az élelmiszer-allergének lebontására, és növeli az élelmiszer-allergia kialakulásának kockázatát.²⁶⁷

Így, egy ördögi kör alakul ki: a műanyag megzavarja a mikrobiótát, fokozza a gyulladást és a bélfalak átteresztő képességét, amelyeken keresztül toxinok, baktériumok és maga a műanyag is bejut a vérbe. Ezeknek az anyagoknak a vérbe jutása immunválaszt indít el, amely krónikus gyulladásához vezet az egész szervezetben. A vérből a toxinok, baktériumok és a nano-műanyag a vér-agy gáton keresztül jutnak az agyba, és gyulladásos reakciókat váltanak ki az agyban. Ezek a folyamatok viszont még jobban megzavarják az immunválasz szabályozását, fokozzák a szervezet stresszreakcióját, és negatívan befolyásolhatják a mikrobiota állapotát a neuroendokrin mechanizmusok révén, ezzel bezárva a „bél-agy” tengelyen kialakuló ördögi kört.

A bélmikrobióma és a központi idegrendszer közötti interakció zavara közvetlenül összefügg a neurológiai rendellenességekkel. Így, az autista spektrumú rendellenességekkel küzdő gyermekeknél kifejezett mikrobióta-egyensúlyhiányt állapítottak meg, amit mind a mikrobiológiai elemzés, mind az emésztőrendszer funkcióinak értékelése megerősít.²⁶⁸

A gyulladásos bélbetegségben szenvedő betegek vizsgálata pozitív összefüggést mutat a betegség súlyossága és a székletben található mikroműanyagok koncentrációja között. Gyulladásos bélbetegségben szenvedő betegeknél ez a koncentráció magasabb (41,8 db/g), mint egészséges embereknél (28,0 db/g). Ezen betegeknél jelentős mikroműanyag-felhalmozódást is kimutattak a végbél nyálkahártyájának fekélyes elváltozásaiban.²⁶⁹

Ezenkívül a bélben maradó mikroműanyagok még hosszú idő után is káros hatást gyakorolnak, miután először bekerültek a szervezetbe.

²⁶⁵Sofield, 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>

²⁶⁶Winiarska, 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>

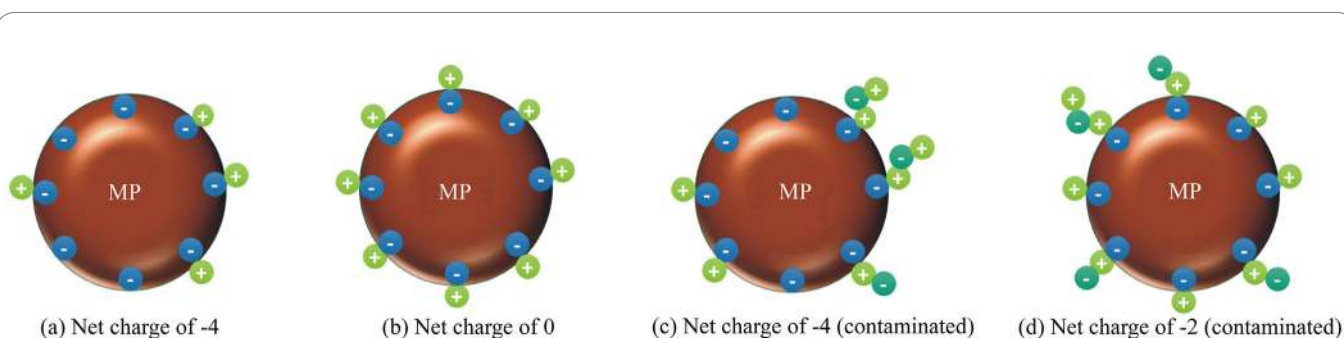
²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

²⁶⁸Su, 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>

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

A MNM hatása az immunrendszerre

A MNM megzavarja a szervezet immunválaszát, megteremtve a kórokozók szaporodásának feltételeit. A MNM töltött részecskéi könnyebben vonzzák magukhoz más molekulákat – például toxinokat, nehézfém-sókat, baktériumokat és vírusokat (101. ábra). Ez egyfajta „szállítóplatformmá” teszi őket a toxikus vegyületek számára, fokozva azok biológiai aktivitását és toxicitását. A nanoplasztik elektrosztatikus töltése egyfajta táplálék vagy „feltöltés”, amelynek köszönhetően a baktériumok és vírusok hosszabb ideig megőrzik életképességüket.



101. ábra. A víz szennyező anyagai által okozott mikroműanyagok felületi töltésének hatásának illusztrációja.

Forrás: 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>

Végül, a mikro- és nanoplasztik töltött részecskéi hosszabb ideig maradnak a vízben és a levegőben, könnyebben emelkednek az aeroszolokba és jutnak a légutakba, ami növeli a szervezetbe való bejutásuk kockázatát.

A mikrobiómra, a kórokozókra és az immunrendszerre gyakorolt összesített hatása komplex egészségügyi kockázatokat jelent.

A mikroműanyaggal érintkező immunsejtek körülbelül háromszor gyorsabban pusztulnak el, mint azok, amelyek nem kerülnek vele kapcsolatba.²⁷⁰

A mikroműanyag részecskék elektrosztatikus és hidrofób kölcsönhatások révén képesek vírusokat adszorbeálni a felületükön, ezáltal meghosszabbítva azok életképességét.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>

A mikroműanyag felületén lévő vírusok akár három napig is aktívak maradnak – ez elegendő ahhoz, hogy például a szennyvíztisztító telepektől a strandokig eljussanak.²⁷²

A mikroműanyag megkönnyíti a kórokozók terjedését és elősegítheti azok genetikai rekombinációját. Egy tanulmány kimutatta, hogy a műanyag részecskék nemcsak rontják a gyógyszerek hatását, hanem elősegíthetik az antibiotikumokkal szemben rezisztens baktériumok kialakulását is.²⁷³

A feltöltött MNM részecskék platformként szolgálnak a mikroorganizmusok kolonizációjához.²⁷⁴ A baktériumok és gombák a nanoplasztik elektrosztatikus mezőit kihasználva gyorsított növekedést mutatnak. A dafniákon végzett kutatások kimutatták, hogy a nanoplasztik hatása oxidatív stresszt okoz és 11-szeresére növeli a gombás fertőzések szintjét (*Metschnikowia* faj).²⁷⁵ Ez összhangban van a gombás betegségek globális elterjedésével és rezisztenciájával, amelyet a WHO a közegészségre jelentett növekvő fenyegetésként jelölt meg.



„A baktériumok antimikrobiális szerekkel szembeni rezisztenciájának világjárványából kilépve a gombás fertőzések terjednek és egyre rezisztensebbek lesznek a kezelésre, ami világszerte közegészségügyi problémává válik” – mondta Dr. Hanan Balkhi, a WHO antimikrobiális szerekkel szembeni rezisztenciáért felelős főigazgató-helyettese.²⁷⁶

A gombás metabolitok, amelyek MNM jelenlétében szabadulnak fel, összefüggésbe hozhatók a tumorok növekedésével²⁷⁷ és a krónikus gyulladással. Gombák DNS-ét találtak egyes rákfajtákban, ami az MNM potenciális szerepét jelzi az onkogenezisben.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>

Az MNM onkogén hatása.

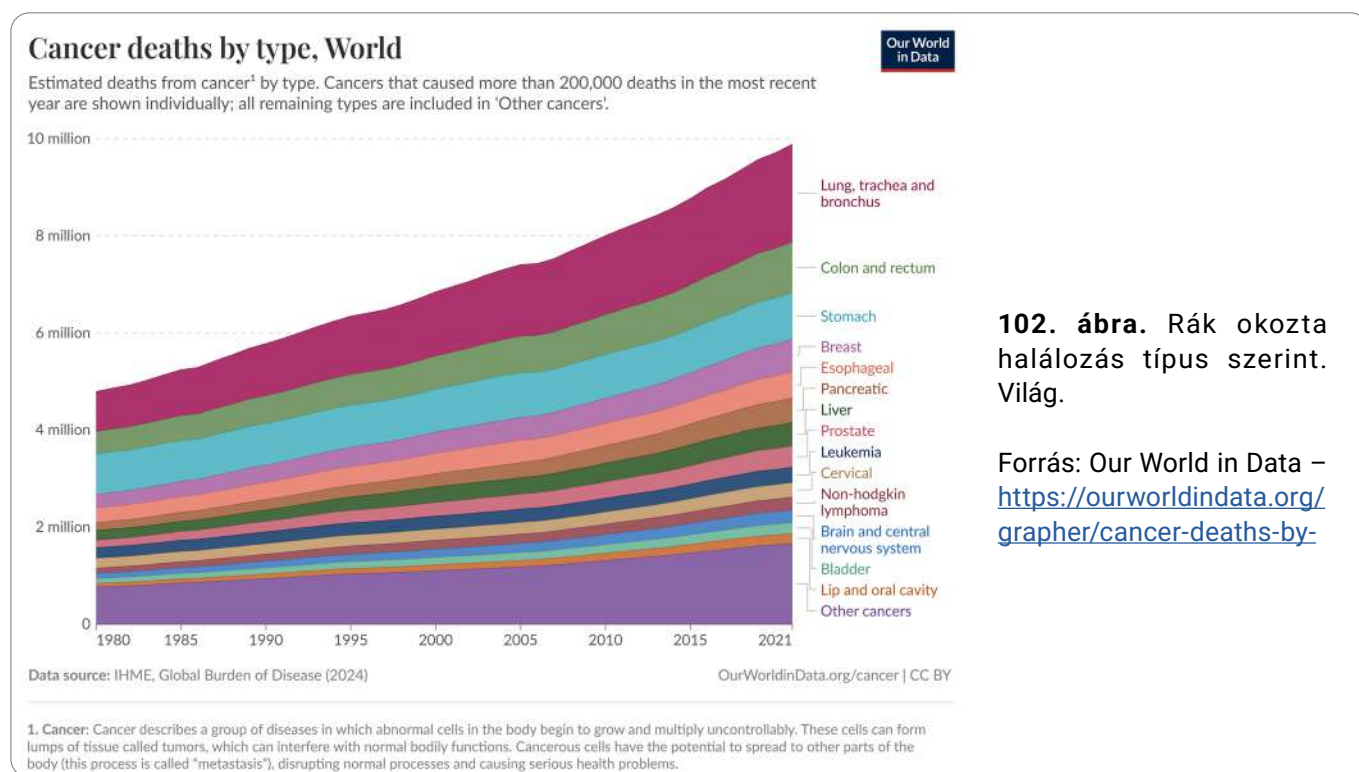
A mutációk és a metasztázisok kialakulásának mechanizmusai

A fentiek alapján a mikro- és nanoplasztikok jelentős tényezők a rosszindulatú daganatok kialakulásában, tekintettel negatív hatásaikra sejt- és szisztémás szinten.

A kutatások azt mutatják, hogy a mikroműanyagok és a nanoműanyagok rejtett katalizátorokként játszhatnak szerepet a rák kialakulásában, fokozva a sejtek migrációját és elősegítve a metasztázisokat.²⁷⁹ Azt is kimutatták, hogy az MNM részecskék hosszú ideig megmaradhatnak a sejtekben, és osztódáskor átadódhatnak a leánysejteknek.

Jelenleg a rákos megbetegedések miatti halálozás világszerte továbbra is növekszik (102. ábra).

Az előrejelzések szerint 2050-re az új rákos megbetegedések száma 77%-kal fog emelkedni.²⁸⁰



²⁷⁹Brynzak-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>

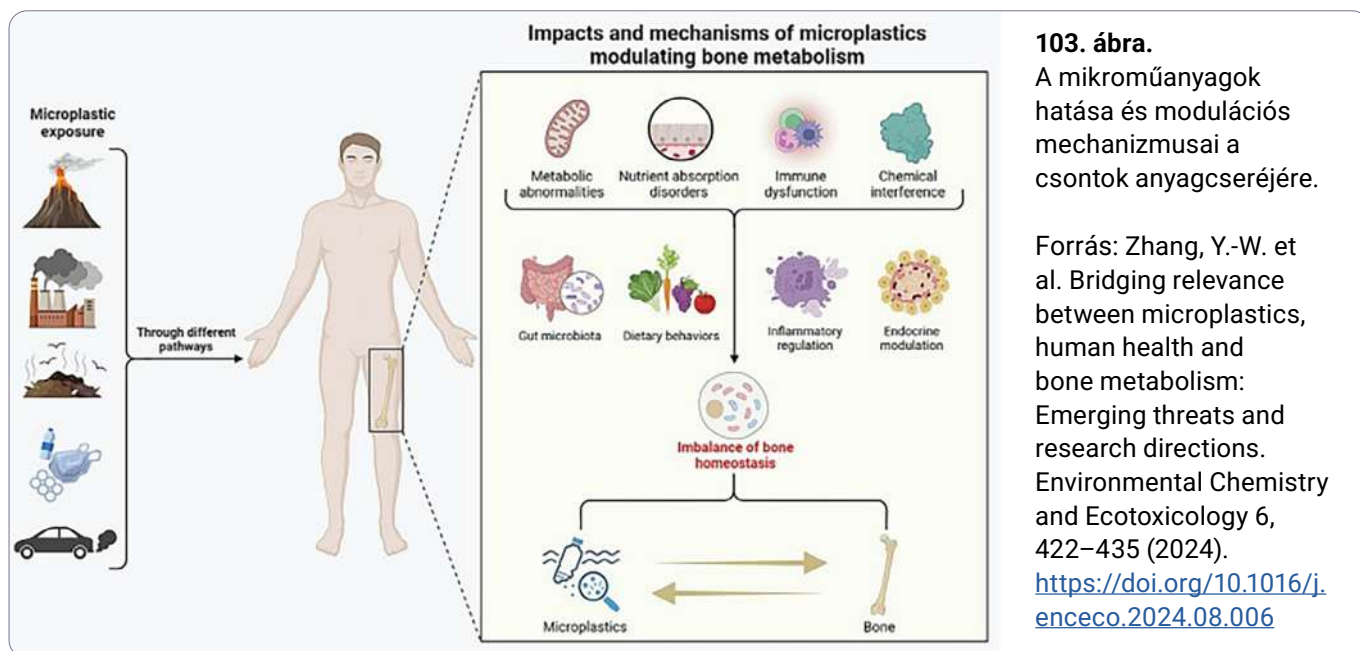
²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

Az MNM hatása a kalciumcserére és a csontok szerkezetére

A műanyag részecskék még a mozgásszervi rendszerbe is bejuthatnak, amely az emberi fizikai működés alapja (103. ábra). Ott, ahol pontos egyensúly uralkodik a lebontás és az építés között, ahol a csontok naponta megújulnak, az ízületek csillapítják a sűrűlődést, és az izmok támogatják a mozgást és a hőt, a mikroműanyag – többek között elektrosztatikus töltésének köszönhetően – képes helyettesíteni az építőmolekulákat és lassú, romboló folyamatokat indítani.

Kutatások szerint a mikroműanyag behatolhat a csontszövetbe, ahol molekuláris szerkezete lehetővé teszi, hogy utánozza a csontanyagcseréhez szükséges kalciumot és más ásványi anyagokat. Ennek eredményeként a műanyagot a szervezet tévesen csontépítő anyagként értelmezheti. A szervezet szó szerint elkezd „építeni” a csontokat műanyagból.

Ez a molekuláris felismerés zavara számos negatív következménnyel jár: a mikroműanyag képes megzavarni az oszteoblasztok és oszteoklasztok működését, megzavarni a kalcium és foszfor anyagcserét, ezáltal elősegítve az osteoporózis kialakulását. Gyulladásos kaszkádok indulnak be, a génexpresszió zavart szenved, a csontszövet pedig elveszíti sűrűségét és szilárdságát. Ezenkívül, a nanoplasztik jelenléte krónikus gyulladást okozhat, amely károsítja az ízületi porcot és a csontszövetet, ami fokozott osteoarthritis, fájdalomszindróma és mozgáskorlátozottság kockázatával jár.^{281, 282}



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).

Rágcsálókön végzett kutatás bebizonyította, hogy az oszteoblasztok száma jelentősen csökkent a polisztírol mikroműanyaggal kezelt egerekben.²⁸⁰

A műanyag nem kisebb fenyegetést jelent a vázizomzatra sem. Kutatások azt mutatják, hogy a nanoműanyagok képesek behatolni az izomsejtekbe, megzavarva a mitokondriumok munkáját. Energiahiány lép fel, aktiválódnak az aktív oxigén agresszív formái, ami gyorsítja a sejtek öregedését, zavarja az izmok terhelés utáni regenerálódását, és hozzájárul az atrófiájukhoz. Különösen sérülékenyek az idős emberek és a krónikus betegek.

A mikro- és nanoműanyag felhalmozódik a csontvelőben,²⁸³ zavarva az őssejtek hematopoetikus és mezenchimális képződését,²⁸⁴ amelyekből eritrociták, leukociták, trombociták, oszteociták, kondrociták és adipociták képződnek. Ezeknek a sejteknek a diszfunkciója szisztémás károsodásokat okoz a szervezetben.

Az MNM expozícióval összefüggő reprodukív rendellenességek. Meddőség és erekciós diszfunkció

A termékenység csökkenése

Előrejelzések szerint 2045-re a világ teljesen meddővé válhat.²⁸⁵

Már 2018-ban is vezető orvosok és tudósok egy csoportja a **XIII. Nemzetközi Spermatológiai Szimpóziumon**, Stockholmban, arra szólították fel a kormányokat, hogy ismerjék el a férfi termékenység csökkenését súlyos közegészségügyi problémának, és ismerjék el a férfi reprodukív egészség fontosságát az emberi faj fennmaradása szempontjából.²⁸⁶

A reprodukív egészséget, a közhiedelemmel ellentétben, nem csak a hormonális egyensúly, az öröklődés és az életmód határozza meg. Egyre több tudományos kutatás mutat rá a mitokondriumok kritikus szerepére a fogantatás és az embriófejlődés folyamataiban. Ezek az apró organellumok, amelyek a minden életfolyamathoz szükséges energia előállításáért felelősek, döntő szerepet játszanak a termékenységben mind a férfiak, mind a nők esetében, és jelentőségük az emberi reprodukív funkció szempontjából sokkal mélyebbnek bizonyul.

A mitokondriumok működési zavarai a meddőség okai lehetnek mind a nőknél, mind a férfiaknál. A férfiaknál a spermiumok farki részében lévő mitokondriumok felelnek a megtermékenyítéshez szükséges mozgékonyaságért. Működési zavarai csökkentik a spermiumok mozgékonyaságát és anomáliákat okozhatnak.

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)

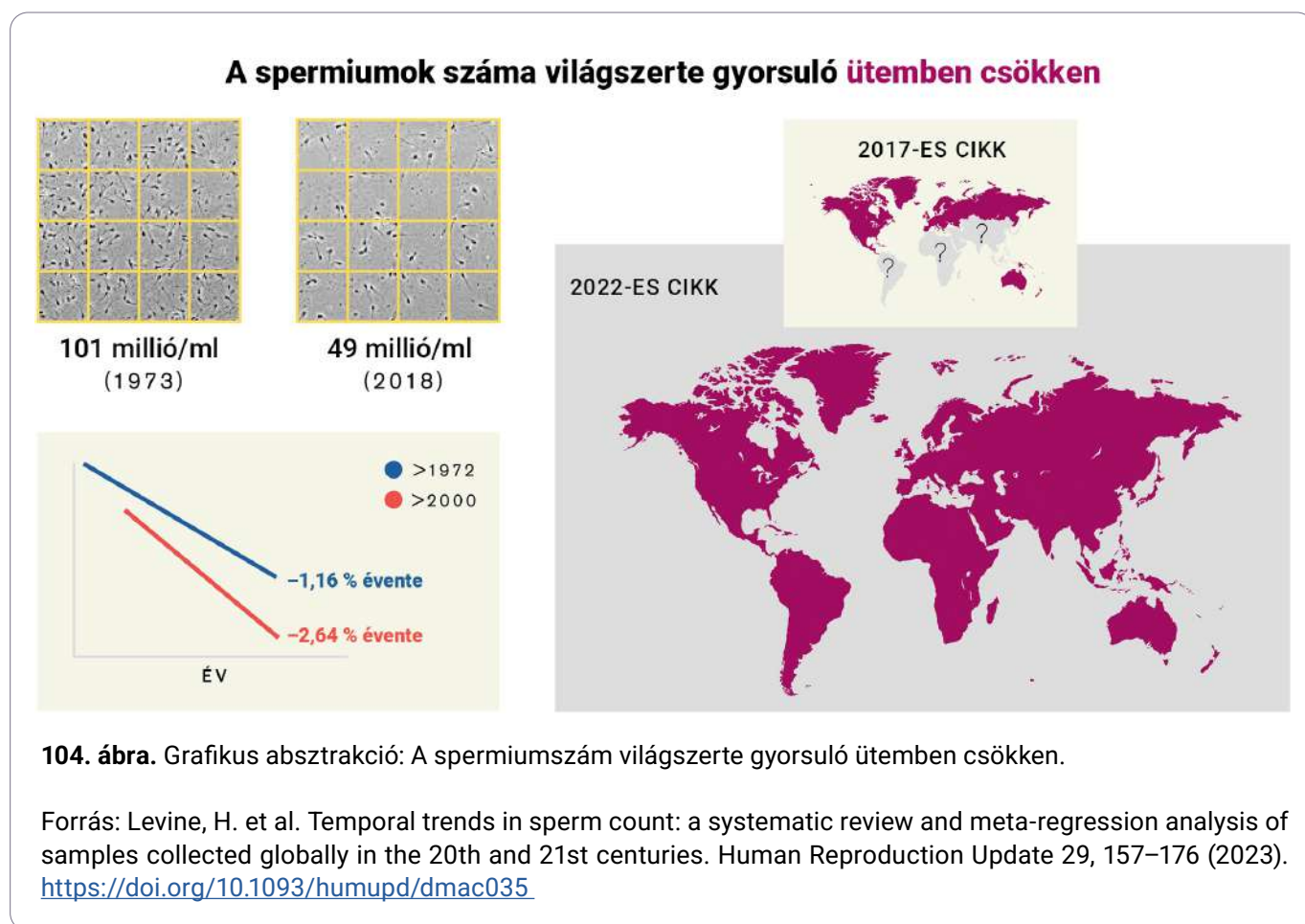
<https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

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>

Kínai tudósok által végzett kutatásokban mikroműanyagot találtak az összes spermamintában – átlagosan két, legfeljebb 7 µm nagyságú részecskét, leggyakrabban polisztirolt.²⁸⁷ Jelenléte összefügg a spermiumok morfológiai rendellenességeivel és a telomerek rövidülésével.

Mikroszkopikus méretének és töltésének köszönhetően a nanoműanyag képes áthatolni a vér-here gáton és bejutni a nemi szervekbe, megzavarva azok működését.

Különös aggodalomra ad okot a férfiak teljes spermiumszámának megfigyelt csökkenési tendenciája: 62,3%-kal csökkent 1973 és 2018 között²⁸⁸ (104. ábra).

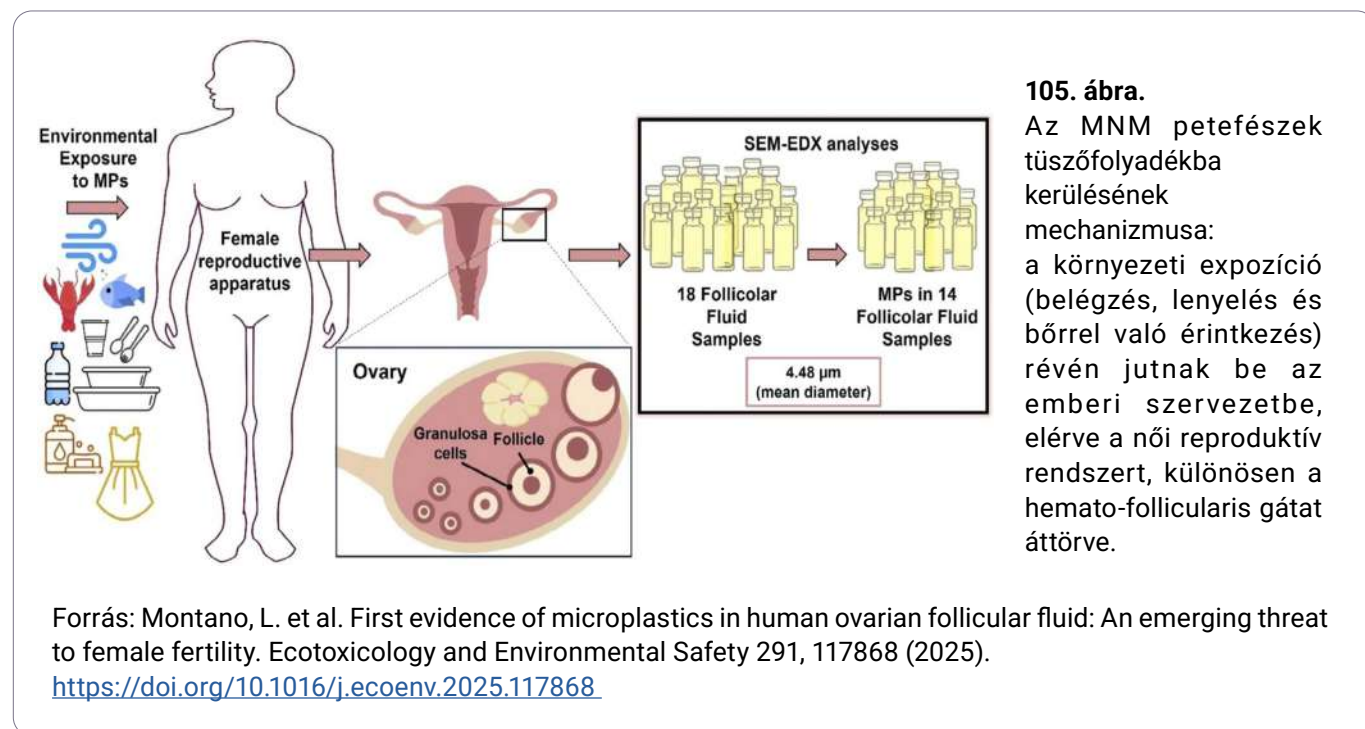


Bár a termékenységet számos tényező befolyásolja, egyre több tudós hajlik arra, hogy a műanyagban lévő kémiai vegyületek kulcsszerepet játszanak ebben a folyamatban. A műanyag rugalmasságának biztosítására használt ftalátok megzavarják a hormonális egyensúlyt, csökkentik a libidót, és hozzájárulhatnak a korai nemi éréshez és a herefunkciók zavarához.

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>

Nem kevésbé aggasztó a helyzet a női termékenység tekintetében sem. Egy 2025-ös tanulmány mikroplasztik részecskék jelenlétét mutatta ki 18 nő közül 14-nek a petefészek tüszőfolyadékában, átlagosan több mint 2000 részecskét milliliterenként, amelyek többsége 5 µm-nél kisebb átmérőjű volt²⁸⁹ (105. ábra).



Ezek az adatok arra utalnak, hogy a műanyag részecskék képesek átlépni a petefészkekben lévő hemato-follicularis gátat. Sejt szinten a mikro- és nanoműanyagok károsíthatják a DNS-t, megzavarhatják a sejtosztódást és gyulladást okozhatnak. Kimutatták, hogy beavatkoznak a hormonális szabályozásba, megzavarják a méhlepény funkcióit, befolyásolják az angiogenezist, és kapcsolatban állnak a méhmióma kialakulásával.

Erekciós diszfunkció

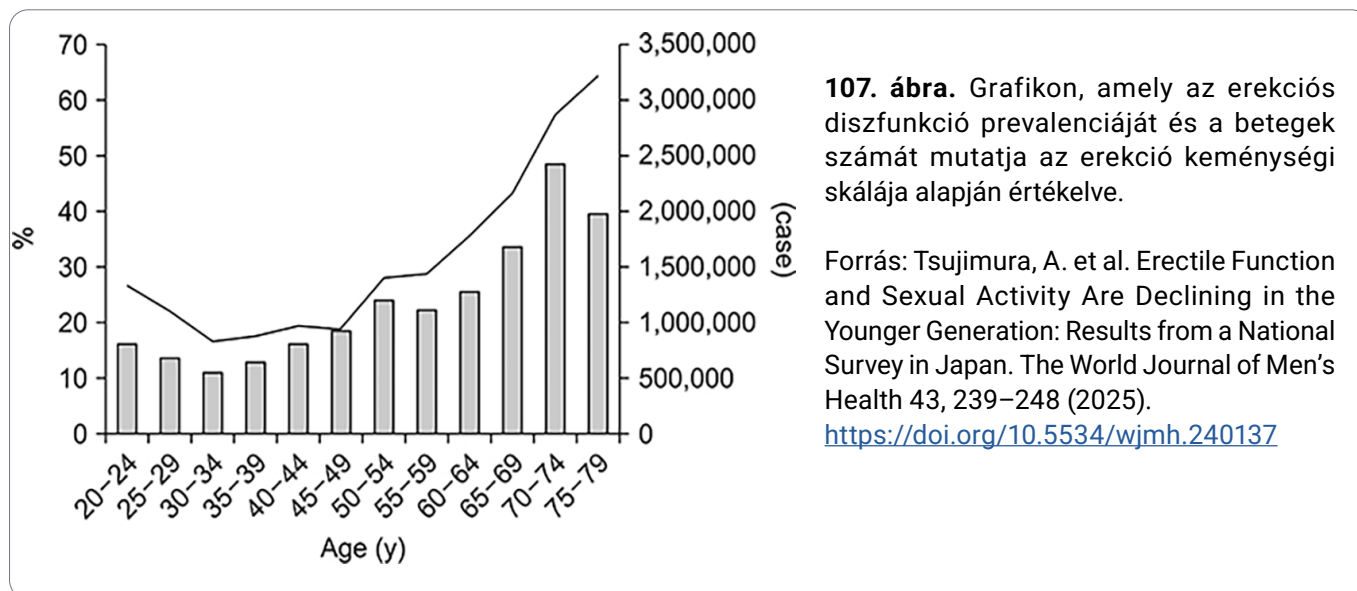
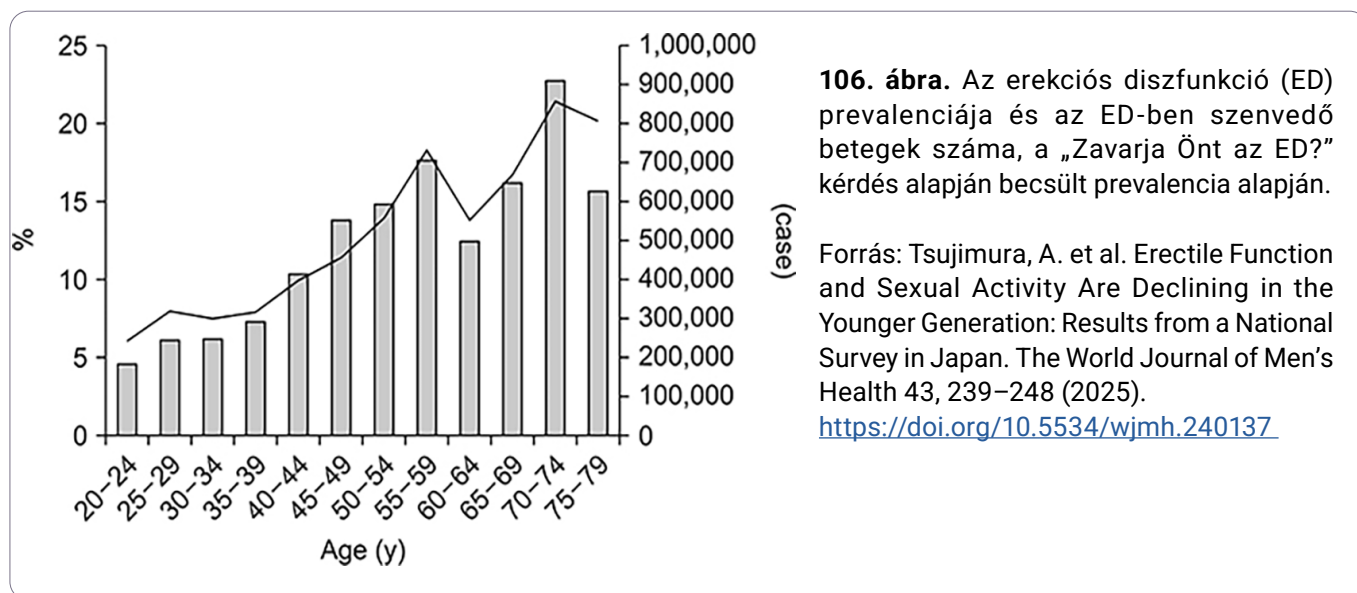
Japánban végzett nemzeti kutatások eredményei azt mutatták, hogy az erekciós funkció és a szexuális aktivitás csökken a fiatal generáció körében.²⁹⁰ Az EHS (Erection Hardness Score) skála alapján végzett felmérés 30,9%-os ED prevalenciát tárt fel, amely körülbelül 14 millió férfit érintett, és kimutatta, hogy a szexuális vágy, az erekció keménysége, az orgazmusok és az elégedettség alacsonyabb volt a vártnál a fiatal japán férfiak körében, különösen a 20-24 éves korosztályban, bár ezek a tényezők hajlamosak voltak romlani az életkorral. Valójában a 20–24 éves korcsoportban a prevalencia aránya 26,6% volt, ami majdnem megegyezett az 50–54 éves korcsoport arányával (27,8%) (106., 107. ábra).

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>

Ezenkívül egy másik, világszerte végzett kutatás arról számol be, hogy a férfiak háromnegyede tapasztal ED tüneteket, ami arra utal, hogy az ED nem ritka, és bármely férfit érinthet. Az erekciós diszfunkció (ED) témájában Japánban 1998-ban végzett első hivatalos nemzeti felmérés becslése szerint mintegy 11,3 millió páciens küzdött mérsékelt vagy teljes ED-vel. Ezen túlmenően a férfi meddőséggel kapcsolatos Japánban 1996-ban és 2015-ben végzett nemzeti kutatások megdöbbentő adatokat tártak fel. A 2015-ös vizsgálatban a férfiak 13,5%-a szembesült férfi meddőséggel, amelynek fő oka az ED volt, ami közel négyszerese az 1996-os adatoknak.

A modern tudományos adatok összessége arra utal, hogy a szervezetben lévő mikro- és nanoműanyag a reprodukív egészség romlásának egyik rejtett, de jelentős oka. Ezek a részecskék behatolnak a nemi szervekbe, megzavarják a mitokondriumok funkcióit, gyulladásokat, hormonális zavarokat és DNS-károsodást okoznak, valamint csökkentik a spermiumok mozgékonyosságát és morfológiai minőségét. Kimutathatók a spermában és a follikuláris folyadékban, ami a biológiai gátak áttörésére és a mélyreható szisztémás hatásra utal. Mindez nem csupán az egyén egészségét, hanem az emberiség reprodukív képességének jövőjét is veszélyezteti.



Az MNM bejutása a méhlepényi gáton keresztül és hatása a fejlődő szervezetre

Mikro- és nanoműanyagok prenatális hatása a magzatra

A terhes nők különösen érzékenyek a mikroműanyagok hatására.²⁹¹ A műanyag részecskék az anya szervezetébe bejutva a méhlepényen keresztül eljuthatnak a magzathoz, beavatkozhatnak a terhességet szabályozó hormonok szekréciójába, és növelhetik a koraszülés, a vetélés és a magzati fejlődési zavarok kockázatát (108. ábra). Becslések szerint 2020-ban 13,4 millió gyermek (minden 10. gyermekből 1) született koraszülöttként (<37 hét), ami a gyermekhalandóság vezető oka. A túlélő gyermekeknél fokozott a súlyos betegségek és krónikus állapotok kockázata.²⁹²

A gyermekek fejlődő endokrin rendszere szintén rendkívül érzékeny a műanyagokban lévő kémiai anyagokra, amelyek utánozhatják vagy blokkolhatják a hormonokat²⁹³ (109. ábra). A csecsemők expozíciója még az anyatejen keresztül is megtörténhet. Ezenkívül, a nanoműanyag késleltetett hatást fejthet ki, megzavarva a nemi sejtek kialakulásának folyamatát gyermek- és serdülőkorban, és csökkentve a felnőttkori termékenységet.

A hemato-placentális gát (HPG) kulcsszerepet játszik az anya és a magzat közötti anyagcsere (metabolizmus) szabályozásában, védve a magzatot a káros anyagoktól. A kutatások azonban azt mutatják, hogy a mikro- és nanoműanyag képes áthaladni a HPG-n.

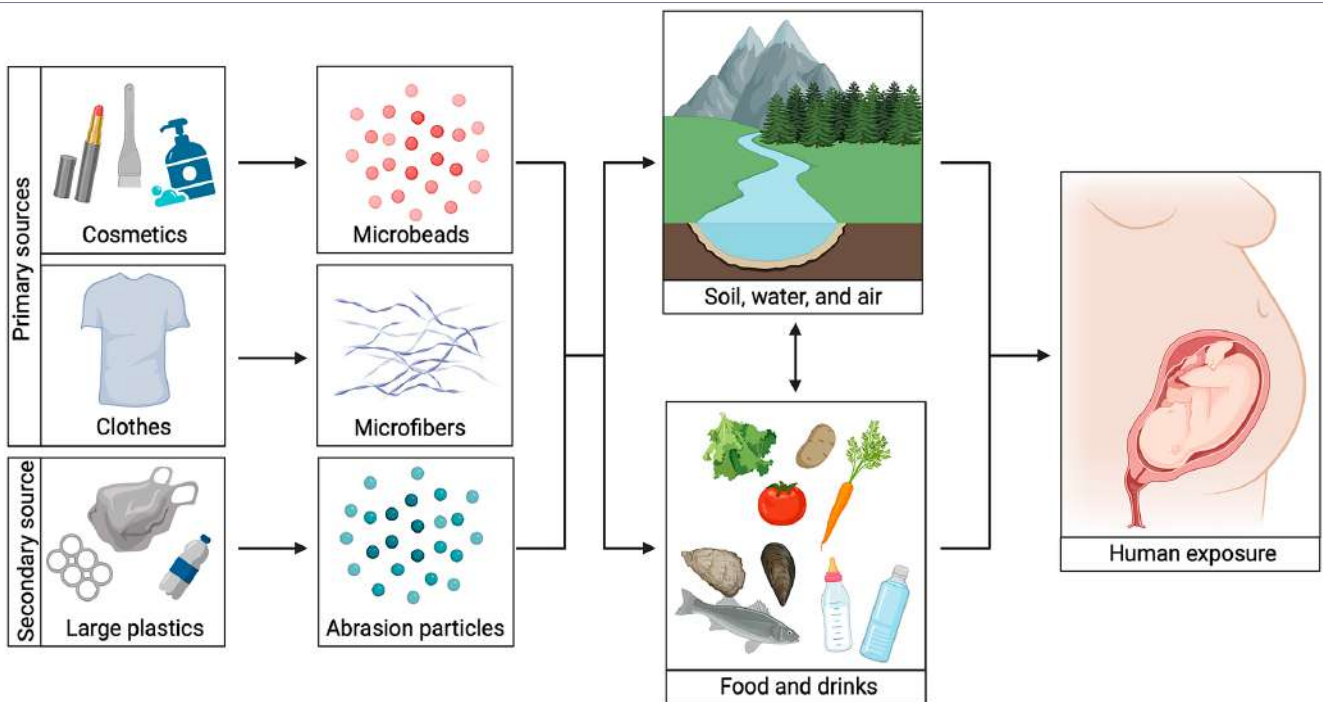
2020-ban Antonio Ragusa vezetésével készült vizsgálat Raman-mikrospektroszkópia (egy olyan módszer, amely a fényszórás elemzésén alapul az anyagok kémiai összetételének meghatározására) segítségével kimutatta a mikroműanyag jelenlétét a vizsgált hat, normális terhességű nő közül négynek a méhlepényében (placentájában). A mintákban 12 darab, 5–10 µm méretű részecskét találtak, köztük polipropilént és a kozmetikumokban, festékekben, ragasztókban és higiéniai termékekben használt pigmenteket.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/advs.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).

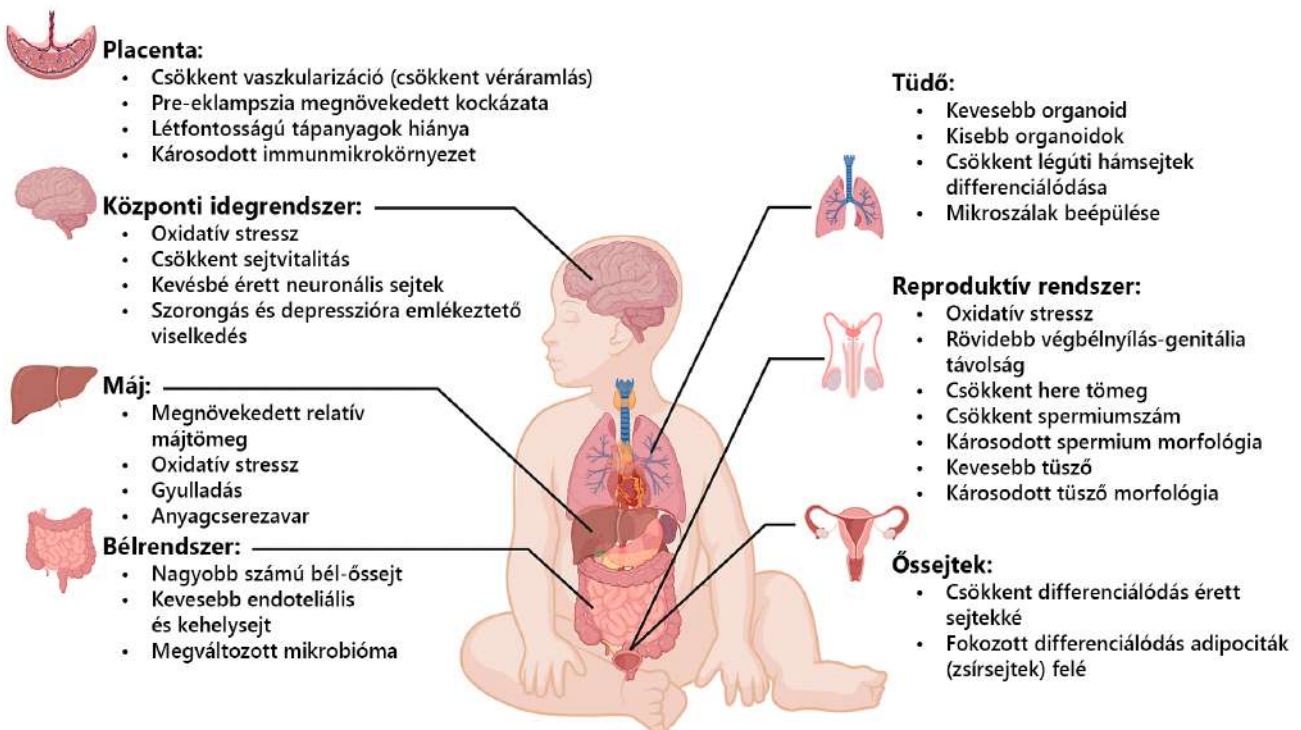
²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Placententa: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>



108. ábra. Az MM bejutása az anya szervezetébe.

Forrás: 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>



109. ábra. A mikroműanyagok hatása a fejlődő magzat különböző szerveire és szöveteire.

Forrás: 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>

Az Új-Mexikói Egyetem által végzett kutatás kimutatta, hogy a mikroműanyag és a nanoműanyag koncentrációja a koraszülött csecsemők méhlepényében magasabb, mint a kihordott gyermekek esetében. 158 méhlepény tömegspektrometriás elemzése feltárta, hogy a koraszülést tapasztaló nőknél a műanyag részecskék felhalmozódása nagyobb mértékben történt meg.²⁹⁵



„Úgy tűnik, a nanorészecskék közvetett hatást gyakorolnak a méhen belüli csecsemőre, közvetítő anyagokon keresztül elnyomva a vérerek képződését” – mondja Tina Bürki biológus.²⁹⁶

A nanoméretű polisztirol részecskék agyi fejlődési rendellenességeket, különösen kognitív deficitet okozhatnak a magzatnál.²⁹⁷

Kutatások szerint, az MNM-eknek való kitettség a terhesség alatt és az élet első hónapjaiban visszafordíthatatlan változásokhoz vezethet a különböző fajok utódainak reprodukív és központi idegrendszerében.²⁹⁸

Postnatális mikro- és nanoműanyag expozíció csecsemőknél

Az újszülöttek folyamatosan ki vannak téve az MNM-ek külső környezetből történő bejutásának.

Egy 2020-as kutatás szerint a csecsemők naponta akár 4,5 millió műanyag részecskét is lenyelhetnek, pusztán a polipropilén cumisüvegből történő etetés során.²⁹⁹ Ez a cumisüvegek világszerte használt teljes mennyiségének nagy részét jelenti.

A csecsemők az anyatejjel is lenyelhetnek mikroműanyagot. Egy 34 egészséges nő anyatejének 2022-es elemzése az minták 76%-ában mutatott ki mikroműanyagot.³⁰⁰ (110. ábra) Az MNM késleltetett hatást fejthet ki, megzavarva a nemi sejtek kialakulásának folyamatát gyermek- és serdülőkorban, és csökkentve a felnőttkori termékenységet.

²⁹⁵ 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>

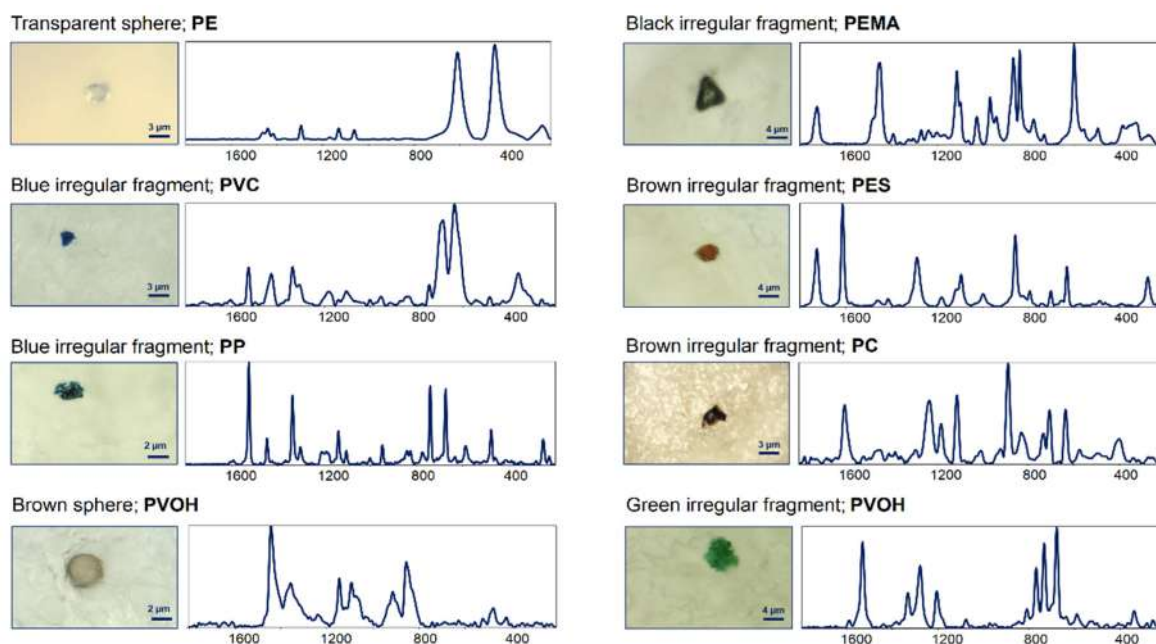
²⁹⁶ Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

²⁹⁷ 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>

²⁹⁸ 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>

²⁹⁹ 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>

³⁰⁰ Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>



110. ábra. Az elemzett anyajemintákban kimutatott néhány kiválasztott MNM mikrofotói és Raman-szórási spektrumai (hullámszám, cm⁻¹). PE: polietilén; PVC: polivinil-klorid; PP: polipropilén; PVA: polivinil-alkohol; PEVA: poli(etilén-ko-vinil-acetát); PEMA: poli(etil-metakrilát); PES: poliészter és PC: polikarbonát.

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

Kiegészítő adatok azt mutatják, hogy az MNM szintje a csecsemők székletében 14-szeresen meghaladja a felnőtteknél mért hasonló értékeket.³⁰¹

A nanoműanyagok és a hozzájuk kapcsolódó kémiai anyagok megzavarják az anyatej molekuláris szerkezetét és funkcionalitását. Ezek a vegyületek megváltoztathatják az emberi anyatejben és a tápszerekben található fehérjét, ami a későbbiekben fejlődési problémákhoz vezethet.^{302, 303}

Az MNM magas koncentrációi kumulatív toxikus hatást fejtenek ki a fejlődő szervezetre. A sejtekbe behatoló nanoműanyag szerkezeti károsodást okozhat a DNS-ben, és megzavarhatja a metabolikus folyamatokat. Ezek a hatások növelik a genetikai mutációk és a hosszú távú patológiák kockázatát, veszélyeztetve a jövő generációk egészségét.

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>

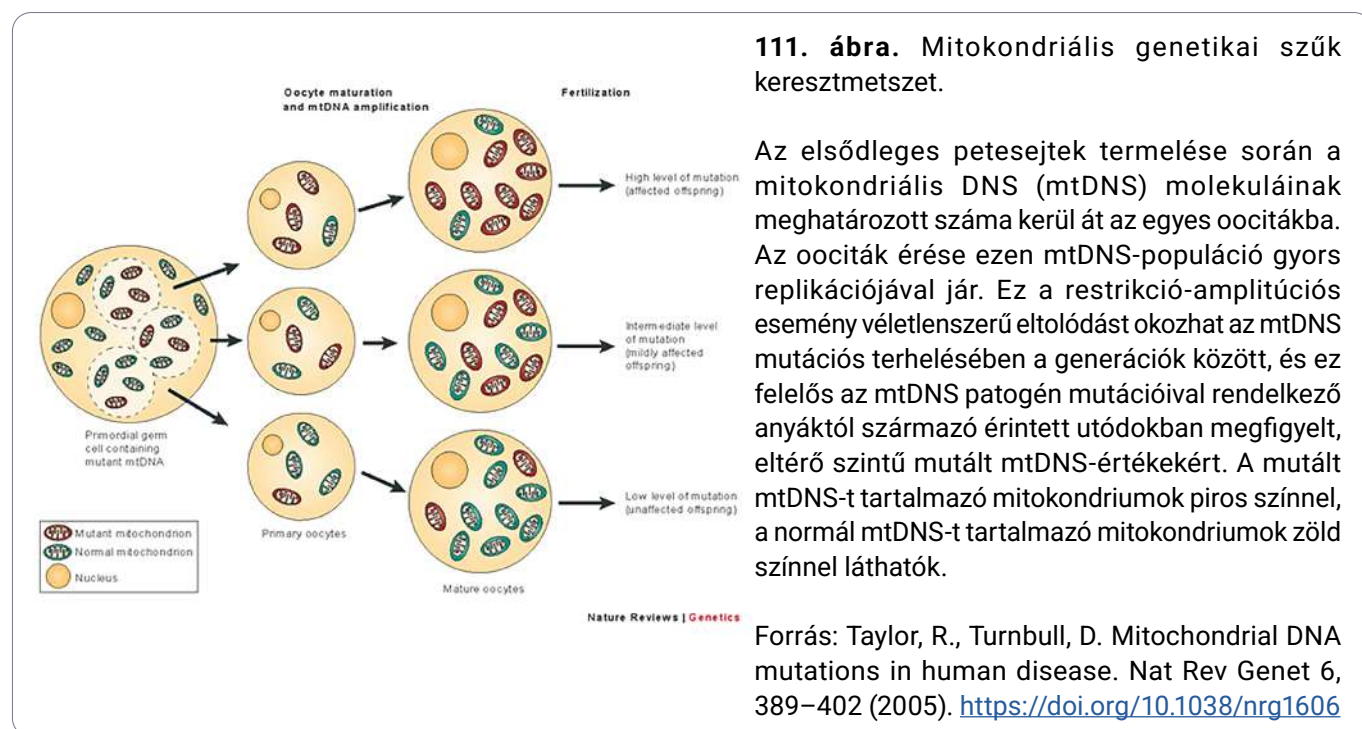
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Az MNM hatásainak következményei és kapcsolata a veleszületett rendellenességekkel

Az MNM szövetekbe és sejtekbe való mindent átható tulajdonsága mellett rendelkezik egy másik meglehetősen veszélyes képességgel is: „örökölhető” a jövő generációi számára. A sejtek osztódásakor a mikro- és nanoműanyag fragmentumok sejtről sejtre vándorolnak át. Ráadásul, kis méretüknek és a statikus elektromos töltés jelenlétének köszönhetően könnyen átjutnak a hemato-placentális gáton és behatolnak a magzat szöveteibe és sejtjeibe, pusztító hatást gyakorolva a fejlődő szervezetre. És elsősorban, ahogy a jelentésben már többször is hangsúlyozásra került, a mikro- és nanoműanyagok mitokondriális diszfunkcióhoz vezetnek.

Egy nemrégiben végzett Mendeli Randomizációs (MR) vizsgálat meggyőző bizonyítékot szolgáltatott a mitokondriális fehérjék expressziója és a veleszületett rendellenességek kockázata közötti ok-okozati kapcsolatra vonatkozóan. A vizsgálat genetikai variánsokat használt instrumentális változóként az obszervációs adatokra jellemző torzítások minimalizálására. A 66 mitokondriális fehérje jellemzője közül szignifikáns asszociációkat találtak a szív, a fül, az idegrendszer, a húgyúti rendszer és a végtagok fejlődési rendellenességeivel. Ez megerősíti azt a hipotézist, hogy a mitokondriális aktivitásnak kulcsfontosságú szerepe van az embrionális morfogenezisben.³⁰⁴

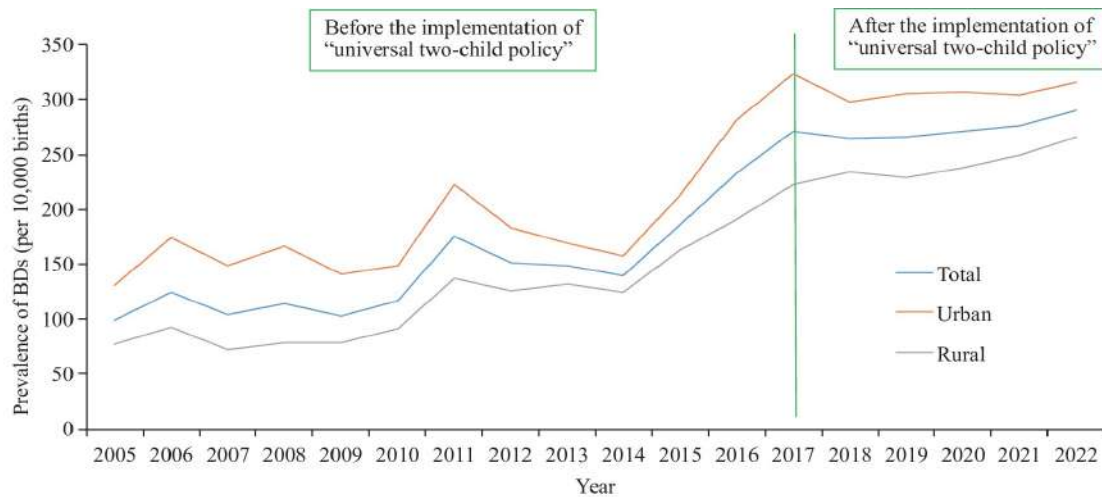
A mitokondriális DNS (mtDNS) mutációk, legyenek azok örökölték vagy de novo, klinikai szindrómák széles skáláját okozzák: MELAS, MERRF, NARP, Leigh-szindróma és mások. Ezek főként a magas energiafelhasználású szerveket érintik – a szívet, az agyat, az izmokat és a szemet. Az átvitel kizárólag anyai ágon történik, ami az oocita mitokondriális eredetéből adódik (111. ábra). Az ilyen rendellenességek gyakran már korai életkorban megnyilvánulnak, és súlyos neurológiai és anyagcsere zavarok jellemzik őket.



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>

A mitokondriális rendellenességekkel küzdő gyermekek gyakran szembesülnek fejlődési késésekkel, izomgyengeséggel, kognitív károsodással és koordinációs zavarokkal. A Kearns-Sayre-szindróma, a Barth-szindróma, az Alpers-kór és más betegségek súlyos következményekhez, egészen a rokkantsághoz vagy halálhoz vezethetnek.

Az elmúlt két évtizedben az orvosok a veleszületett fejlődési rendellenességek riasztó növekedését észlelik az újszülötteknél. Csak Kínában az ilyen rendellenességek gyakorisága majdnem háromszorosára nőtt – a 2005-ös 10 000 születésre jutó 99,15-ről 2022-ben 290,27-re emelkedett³⁰⁵ (112. ábra). Hasonló dinamika figyelhető meg más országokban is. Ennek a hirtelen növekedésnek az okai többtényezősök, de egyre több tudományos adat utal egy új, gyorsan növekvő fenyegetésre: a mikroműanyag és különösen a nanoműanyag képes behatolni az embrionális szövetekbe és beavatkozni a szervek és rendszerek kialakulásának folyamataiba.



112. ábra. A veleszületett rendellenességek prevalenciája városi és vidéki területek között 2005 és 2020 között.

Forrás: 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>

A nanoműanyag által hordozott elektrosztatikus töltés különösen veszélyes az embrionális szövetekben, ahol minden hiba potenciális rendellenességet jelent. Az ilyen részecskék fokozott sejtfelszíni tapadást mutatnak, beleértve az idegredő sejteket is – amelyek kritikus résztvevői a szív, az erek és a koponya-arc struktúrák kialakulásának. Kísérletekben, csirke embriókon, a nanoműanyag súlyos rendellenességeket okozott, beleértve a szív és a nagyerék fejlődési hibáit.

Az egyik leggyorsabban terjedő anomália a gastroschisis lett – a hasi elülső fal fejlődési rendellenessége, amely során a magzat szervei a bőrön és az izomzaton lévő defektuson keresztül kijutnak a testen kívülre (113., 114., 115. ábra). Nemzetközi adatok szerint az előfordulása 161%-kal nőtt az elmúlt három évtizedben, a 20 év alatti anyák körében pedig többszörösére.³⁰⁶ Feltételezhető, hogy a nanoműanyag beavatkozik a hasfal fejlődésébe a terhesség korai szakaszában (4–8. hét), gyulladást és zavart okozva a test elülső részének záródásában.

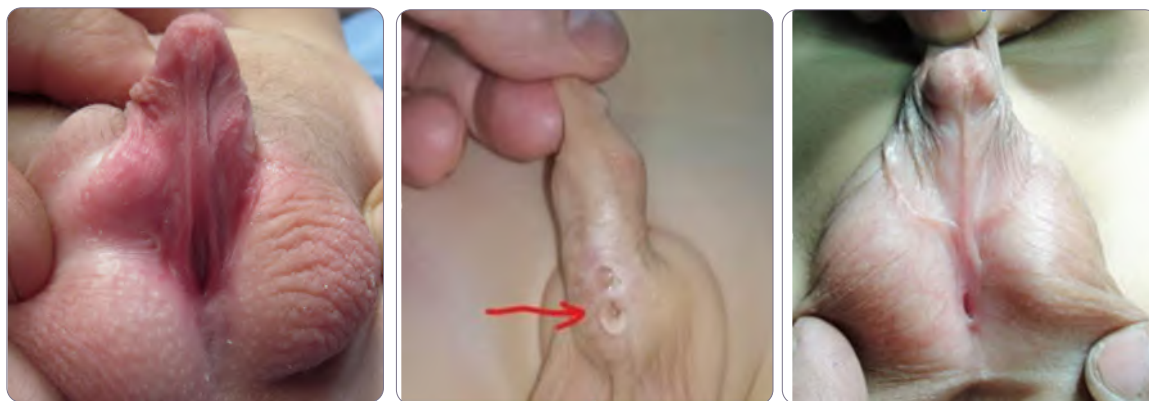
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

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>



113., 114., 115. ábra. Gastroschisis (hasfalzáródási rendellenesség)

Egy másik rendellenesség, a hypospádia – olyan anomália, amely során a fiúknál a húgycső a normális helytől eltérő ponton nyílik³⁰⁷ – szintén folyamatos növekedést mutat (116., 117., 118. ábra). Például az Egyesült Államokban 1997 és 2018 között az esetek száma körülbelül 1,06-tal nőtt 1000 élve született fiúra vetítve (1000-ból 6,1-ről 7,16-ra), a százalékos növekedés pedig elérte a megközelítőleg 17%-ot.³⁰⁸ Állatmodelleken végzett kutatások kimutatták, hogy a mikroműanyagban gyakran jelen lévő ftalátoknak való kitettség megzavarja a tesztoszteron szintézisét a hím magzatoknál.



116., 117., 118. ábra. Hypospádia

Ezek az anyagok, amelyek a nanoműanyag töltött felszínén rögzülnek, könnyen átjutnak a véráramba és a méhlepénybe, felerősítve a hormonális eltolódásokat a nemi differenciálódás kritikus időszakaiban. Ennek fényében a Down-szindróma, a triszómia, az atrioventrikuláris szívfejlődési rendellenességek és más súlyos zavarok gyakoriságának növekedése figyelhető meg: az 1999–2001-es 10 000 élve születésre jutó 12,78-ról 2016–2020-ban 10 000 élve születésre jutó 15,55-re nőtt a számuk.³⁰⁹

Ezzel egyidejűleg növekszik a gyermekek pszichoneurológiai problémáinak száma is, beleértve a szorongásos zavarokat és a kognitív deficitet. Bár a mikroműanyaggal való közvetlen ok-okozati összefüggést még vizsgálják, az ismert mechanizmusok – mint a gyulladás, az epigenetikai moduláció és a mitokondriális diszfunkciók – alapos gyanút adnak arra, hogy a műanyag is az egyik tényező.^{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>

Következtetések és kilátások.

Lehetséges-e csökkenteni az MNM hatását az emberi egészségre?

Az összesített adatok elemzése azt mutatja, hogy a mikro- és nanoműanyag jelentős és alábecsült kockázati tényezőt jelent az emberi egészségre. A modern tudományos adatok meggyőzően tanúskodnak arról, hogy a mikro- és nanoműanyag az emberi szervezetre nehezedő globális toxikus nyomás elválaszthatatlan része. Képességük révén, hogy átlépik a biológiai gátakat és felhalmozódnak különböző szövetekben, beleértve az agyat, a szívet, a tüdőt és a méhlepényt, az MNM-ek toxikus hatást fejtenek ki molekuláris, sejtes és szisztémás szinten. A kémiai adalékanyagokkal és az adszorbeált környezeti szennyező anyagokkal együtt a műanyag olyan tényezővé válik, amely krónikus gyulladást, oxidatív stresszt, mitokondriális diszfunkciót és DNS-mutációkat okozhat – olyan folyamatokat, amelyek a betegségek széles skálájának, beleértve a neurodegeneratív, onkológiai, szív- és érrendszeri, endokrin és autoimmun rendellenességeket, alapját képezik. Különösen aggasztó az a tény, hogy az MNM részecskék gyakorlatilag nem ürülnek ki a szervezetből, felhalmozódva az életkor előrehaladtával és súlyosbítva hatásuk kumulatív effektusát.

A rendelkezésre álló adatok megerősítik, hogy az MNM-mel való érintkezés elkerülése nem lehetséges: jelen van a levegőben, a vízben, az élelmiszerben, sőt még az általunk fogyasztott állatok és növények sejtjeiben is. Ebből adódóan a műanyag részecskék hatása mindenütt jelenlévővé és folyamatossá válik – a méhen belüli fejlődéstől egészen a késői életszakaszokig. Különösen veszélyes a belégzéses bejutási útvonal, amely során a nanorészecskék, megkerülve a vér-agy gátat, közvetlenül az agyszövetekbe hatolnak, így a központi idegrendszert teszik az egyik legsebezhetőbb célponttá.

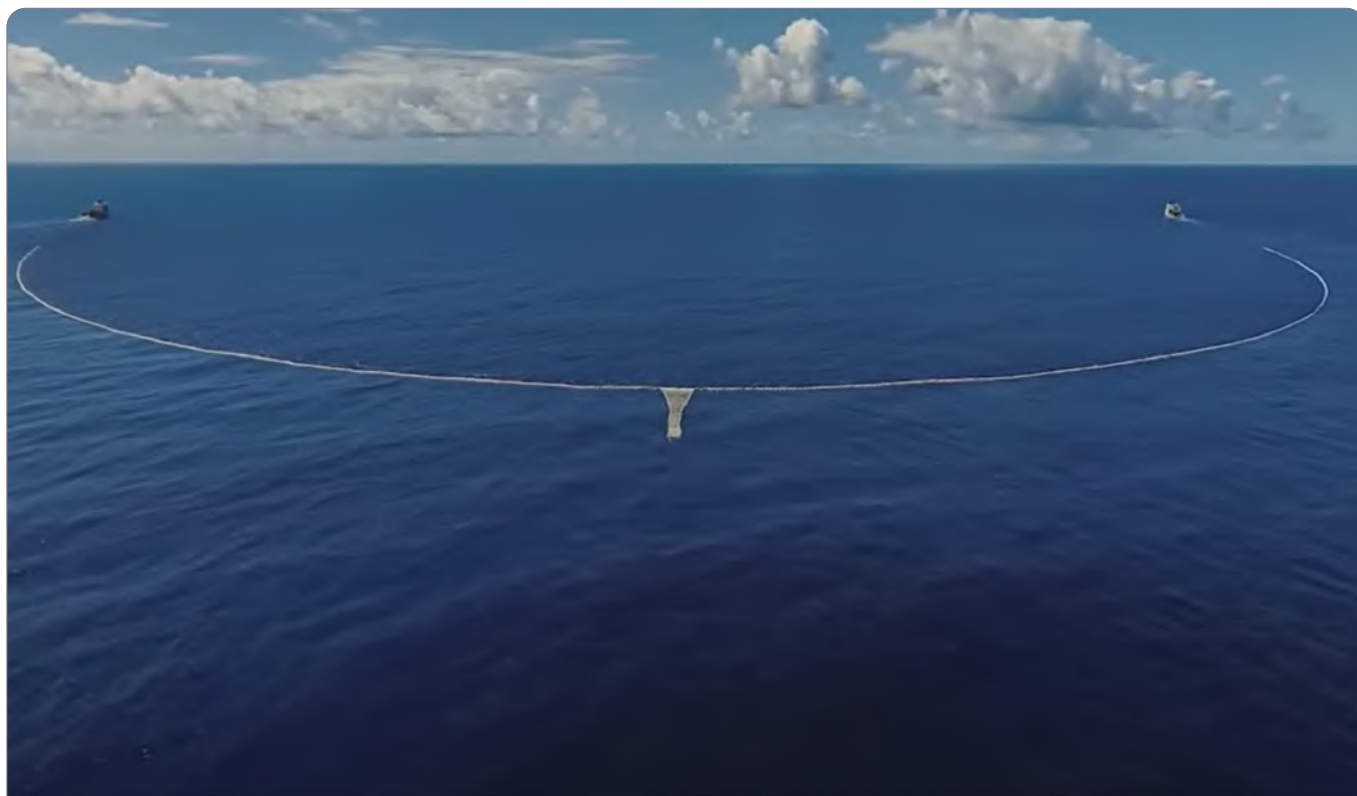
A további biológiai kockázatot az MNM részecskék elektrosztatikus aktivitása okozza, amely felerősíti biológiai struktúrákkal való kölcsönhatásukat és elősegíti a homeosztázis felbomlását. Megjegyzendő továbbá potenciális szerepük a patogének és az antibiotikum-rezisztens mikroorganizmusok szállításában is, ami a mikro- és nanoműanyag-szennyezés problémáját interdiszciplináris jellegűvé teszi, érintve az ökológiát, toxikológiát, immunológiát, neurológiát és reprodukív orvostudományt. Ezzel összefüggésben az MNM fenyegetésével szembeni stratégia keretein belül az „ALLATRA” által javasolt egyik stratégiai irány a nanoműanyag elektrosztatikus töltésének semlegesítésére vagy árnyékolására szolgáló módszerek kidolgozása. Az ilyen részecskék elektrosztatikus aktivitásának csökkentése jelentősen mérsékelheti azok ártalmasságát, és lelassíthatja a szervezetben való felhalmozódásukat. A jelentés szerzőinek becslése szerint az árnyékolási vagy töltésszemlegesítési módszerek legalább 50%-kal képesek csökkenteni az MNM-mel kapcsolatos potenciális kockázatot. Ez lehetővé teszi, hogy időt nyerjünk az MNM-ek diagnosztizálására, megelőzésére és a szervezetből történő kivonására vonatkozó komplexebb stratégiák kidolgozásához. Ebben az összefüggésben különös jelentőséget kapnak a biofizika, a nanotechnológia és a molekuláris toxikológia területén végzett további kutatások.

A témában megjelenő tudományos publikációk növekvő száma ellenére az MNM-ek emberi egészségre gyakorolt hatása továbbra is alulvizsgált és az egészségügyi és környezetvédelmi stratégiák kialakításakor gyengén figyelembe vett tényező marad. Figyelembe véve a műanyagszennyezés mértékét, a részecskék biológiai aktivitását és a hatásuk potenciálisan visszafordíthatatlan következményeit, ez az irány kiemelt figyelmet igényel a tudományos közösség és az egészségügyi hatóságok részéről, valamint adatszisztematizálást, kockázatértékelési szabványok kidolgozását, és az államközi, illetve nemzetközi tudományos együttműködés szélesítését.

A MŰANYAGHULLADÉKOK MINIMALIZÁLÁSÁRA IRÁNYULÓ MODERN MEGKÖZELÍTÉSEK ELEMZÉSE

A nagy méretű műanyag hulladékok vízi ökoszisztémákból való eltávolítására szolgáló technológiák

Az óceánszennyezés következményeinek enyhítésére irányuló kezdeményezések elsősorban a víz felszínéről látható nagy méretű hulladékok eltávolítására összpontosítanak. Jelenleg az egyik legnagyobb léptékű projekt, amely a műanyagok és más típusú úszó hulladékok gyűjtésére irányul, az Ocean Cleanup kezdeményezés. Úszó rendszereik a felszíni hulladékot gyűjtik össze (119. ábra), amelyet aztán válogatnak és csomagolnak további feldolgozás vagy ártalmatlanítás céljából.



119. ábra. A képen az Ocean Cleanup technológia működése látható. A hosszú, U alakú, tartós anyagból készült úszó gát gyűjti össze a műanyag hulladékot az óceán felszínén.

Forrás: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans.
<https://theoceancleanup.com> (Hozzáférés: 2025.05.01.).

Bár ez a módszer ígéretesnek tűnik, fontos figyelembe venni néhány szempontot, amelyekre figyelmet kell fordítani:

1. A hulladékgyűjtés folyamat nem szelektív, és a műanyaggal együtt élő szervezetek, például mikroszkopikus algák, halivadékok és medúzák is a csapdába kerülnek. Jelenleg nincsenek mennyiségi becslések a járulékos fogás mennyiségéről, azonban ezeknek az organizmusoknak a potenciálisan nagyméretű eltávolítása negatív hatással lehet a tengeri ökoszisztémákra, megzavarva a természetes táplálékláncokat. A tengeri élőlények biztonságának biztosítására tett intézkedések ellenére a probléma továbbra is megoldatlan.

2. Az aktivisták őszintén törekszenek az óceán megtisztítására, azonban a meghozott intézkedések nem elegendőek a jelentős eredmények eléréséhez.

2024 novemberéig a *The Ocean Cleanup* kezdeményezés keretében körülbelül 20 000 tonna műanyag hulladékot gyűjtöttek össze a világ óceánjaiból. Ez kétségtelenül jelentős eredmény. A globális probléma kontextusában azonban ez csak a világtengerben található műanyag hulladék teljes mennyiségének 0,01%-át teszi ki, amely körülbelül 200 millió tonnára becsülhető. Ugyanakkor, figyelembe kell venni az új hulladékok mennyiségét is, amely évente körülbelül 11 millió tonna (120. ábra). Ezek az adatok rávilágítanak arra, hogy a tisztítási erőfeszítések nem állnak arányban a probléma mértékével.



120. ábra. A grafikon három kulcsfontosságú mutatót hasonlít össze az óceánok műanyag hulladékkal való szennyeződésével kapcsolatban: a lebegő műanyag hulladék mennyiségét, az óceánba évente kibocsátott műanyag mennyiségét és az Ocean Cleanup vállalat által eltávolított mennyiséget.

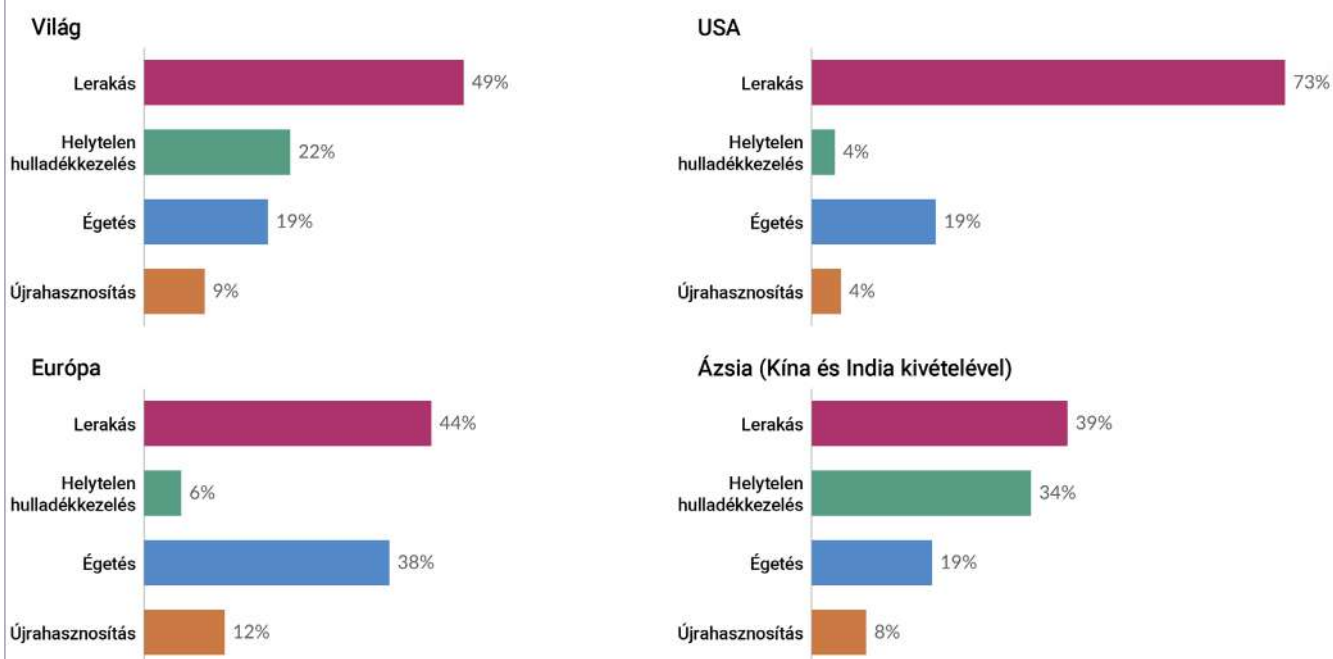
Adatforrás: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Hozzáférés: 2025.05.01.).

3. A legfontosabb kérdés továbbra is a begyűjtött műanyagok sorsa. A műanyag hulladékok jelenlegi globális újrahasznosítási aránya nem haladja meg a 9%-ot (121. ábra). Ezzel összefüggésben fennáll annak a valószínűsége, hogy a begyűjtött műanyag jelentős része hulladéklerakókba kerül, ami hosszú távon nem oldja meg a szennyezés problémáját.

A műanyag hulladékok aránya, amelyek újrahasznosításra, lerakásra, elégetésre kerülnek és helytelenül kerülnek kezelésre. 2019.

Our World in Data

A helytelenül kezelt műanyag hulladékok magukban foglalják a nyílt gödrökben elégetett, a tengerbe vagy nyílt vizekbe dobott, illetve egészségtelen hulladéklerakókba és szeméttelpekre került anyagokat.



Adatforrás: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Megjegyzés: A régiók kumulált értékeit az Our World in Data projekt számolta ki az OECD által szolgáltatott adatok alapján.

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

121. ábra. A műanyag hulladékok aránya, amelyek újrahasznosításra, hulladéklerakókba, égetésre és nem megfelelő ártalmatlanításra kerülnek, 2019. A nem megfelelően ártalmatlanított műanyag hulladékok közé tartoznak a nyílt karbantartási területeken égetett, a tengerbe vagy nyílt víztestekbe dobott, illetve nem megfelelő hulladéklerakókban és hulladéklerakó telepeken ártalmatlanított anyagok.

Adatforrás: a regionális összesített adatokat az Our World in Data számította ki, az OECD által megadott adatok alapján.

[OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY

<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

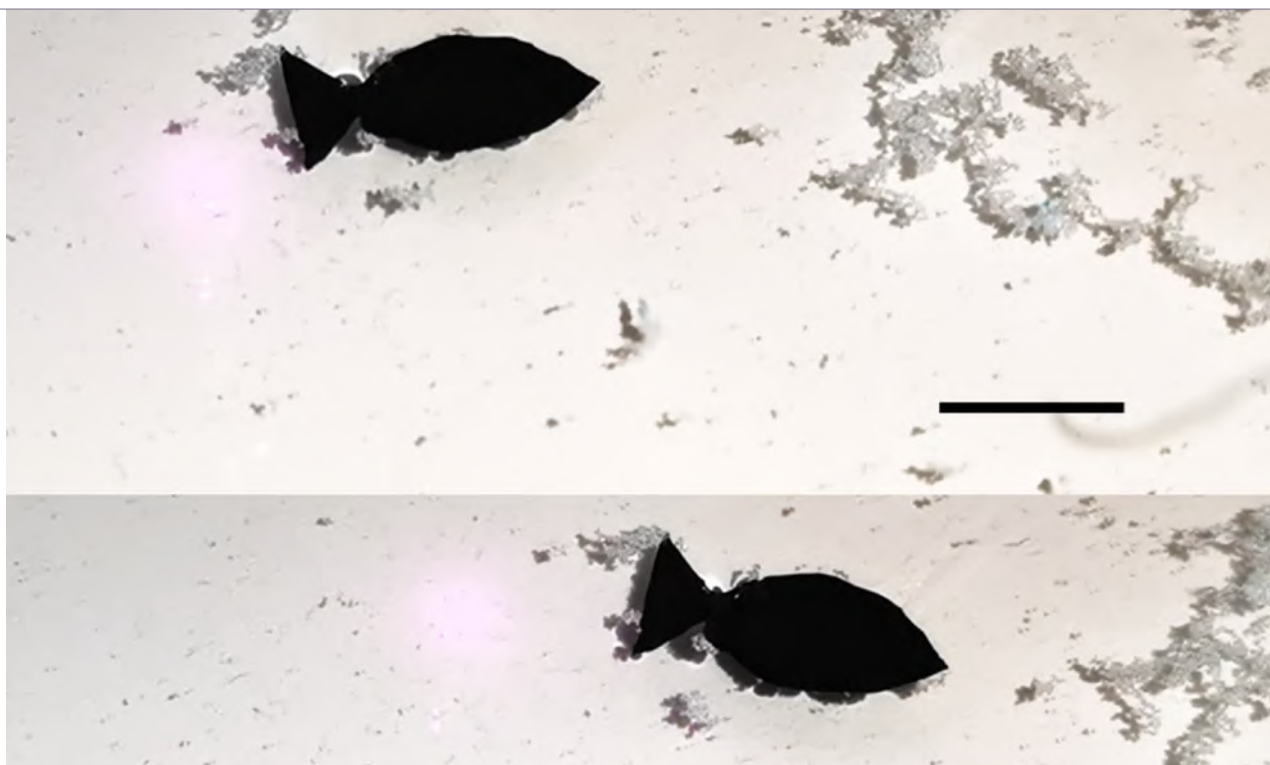
Ráadásul, az óceán tisztítási műveletei jelentős pénzügyi költségekkel járnak. Például, a Csendes-óceáni szemétsziget távolsága bármely állam felségvizeitől olyan helyzetet teremt, amelyben a tisztítási tevékenységek finanszírozásának és végrehajtásának felelőssége nem meghatározott. Charles Moore, oceanográfus, kutató és a Csendes-óceáni szemétsziget felfedezője szerint a Csendes-óceáni szemétsziget teljes körű megtisztítása „bármelyik országot csődbe taszítana”, amely ilyen erőfeszítéseket tenne. Meg kell jegyezni, hogy az óceánban öt hasonló hulladékhalom azonosítottak (122. ábra), ami tovább súlyosbítja a problémát.



122. ábra. Az öt fő hulladékhalom elhelyezkedésének sematikus ábrázolása a világtengeren.

Fontos megjegyezni, hogy a látható nagy hulladékok csak egy részét képezik az óceánok műanyag hulladék-szennyezésének általános problémájának. Melanie Bergmann, az Alfred Wegener Intézet tengeri biológusa szerint „ez csak az óceán felszínén található műanyagokról szól, és ez is csak egy kis rész, kevesebb mint 1% annak, ami valójában az óceánban található”.

Ahogy a műanyag mikrorészecskékre és nanorészecskékre bomlik, az óceán megtisztítása ettől a fajta szennyezéstől jelentősen bonyolultabbá válik. Már léteznek néhány kísérleti technológiák a mikroműanyagok eltávolítására a vízből. Például, a Szecsuáni Egyetem kutatói kifejlesztettek egy miniatűr robothalat (123. ábra), amely képes úszni a vízi környezetben és felszívni a közelben szabadon úszó mikroműanyag-darabkákat.³¹¹ Ez a 13 mm hosszú bionikus robot hatékonyan gyűjti össze a mikroműanyag részecskéket a testének anyagai és a mikroműanyag komponensei, például szerves színezékek, antibiotikumok és nehézfémek közötti erős kémiai kötések és elektrosztatikus kölcsönhatásoknak köszönhetően.



123. ábra. A képen egy miniatűr robothal látható, amelyet a Szecsuáni Egyetem kutatói fejlesztettek ki. A kompakt eszköz, amely valódi halra emlékeztet, vízi környezetben úszik, és aktívan felszívja a szabadon úszó mikroműanyag-darabkákat.

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

Az ilyen innovációk ellenére azonban a hasonló technológiák gyakorlati alkalmazása globális szinten jelenleg korlátozott. A miniatűr robotok a közvetlen közelükben található mikroműanyagokat adszorbeálják, ami a folyamatot lokális szintre korlátozza, és még nagy számban sem képesek lefedni a világóceán teljes területét. Ezenkívül maguk is részévé válhatnak az élelmiszerláncnak. Bizonytalanságok vannak továbbá a robotok képességét illetően, hogy az óceán komplex körülményei között (áramlatok, nyomás, sótartalom) működjenek. Következésképpen, a meglévő megoldások még nem elég hatékonyak, és méretezési nehézségekkel küzdenek.

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>

A mikro- és nanoműanyagok eltávolításának jelenlegi módszerei

Egyre intenzívebben vizsgálják a mikroorganizmusok, különösen a baktériumok alkalmazásának lehetőségét a szintetikus polimerek, elsősorban a polietilén-tereftalát (PET) enzimatis leontásában. Ezt a technológiát potenciálisan környezetbarát alternatívaként pozicionálják a műanyag hulladékok hagyományos ártalmatlanítási módszerével, az égetéssel szemben. Az eddig összegyűjtött empirikus adatok azonban kétségbe vonják hatékonyságát, biztonságosságát és ipari méretű alkalmazhatóságát.

2016-ban egy japán tudóscsoport, Sōsuke Oda vezetésével, felfedezte az *Ideonella sakaiensis* baktériumot, amely két enzim, a PETáz és a METáz termelésével képes lebontani a polietilén-tereftalátot. Ez fontos esemény volt a mikrobiológia történetében.³¹² A laboratóriumi vizsgálatok azonban kimutatták, hogy a lebontási folyamat rendkívül lassú: a baktériumok optimális körülmények között körülbelül hét hét alatt bontották le a 20 g tömegű műanyag fóliát. Nyilvánvaló, hogy ez a lebontási sebesség nem tekinthető kielégítőnek a műanyag hulladék-probléma megoldásához. A globális szennyezés mértékét tekintve, ahol évente több millió tonna műanyag kerül a természetbe, ez a sebesség olyan, mintha egy teáskanállal akarnánk kiüríteni az óceánt.

A tudományos erőfeszítések a PET-áz enzim módosítására összpontosultak, amelyet a baktérium a műanyag lebontásához használ. Azonban, ahogyan a kutatók maguk is elismerik, az *Ideonella sakaiensis* enzim még az evolúció korai szakaszában van. Hatékonysága alacsony, stabilitása korlátozott, és a reakció felgyorsításához a természetes környezetben nem jellemző hőmérsékletekre van szükség. Még a géntechnika sem képes megjósolni, hogy mely mutációk vezetnek valóban javuláshoz. Ez „két lépés előre, egy lépés vissza” helyzet, ahogy Elizabeth Bell, az Egyesült Államok Nemzeti Megújuló Energia Laboratóriumának munkatársa fogalmazott.

Ráadásul az enzimatis leontás korántsem univerzális. Csak bizonyos típusú műanyagok (például a PET) alkalmasak elméletileg ilyen lebontásra. A polietilén, a polipropilén és más széles körben használt anyagok gyakorlatilag lebomolhatatlanok a mikroorganizmusok számára. A Nature tudósai pedig azt állítják, hogy a legtöbb műanyag túl energiaigényes ahhoz, hogy hatékonyan biokémiaileg lebomoljon.

Még ha elképzeljük is, hogy megjelenik egy ilyen hatékony mikroba, akkor is felmerül egy sokkal aggasztóbb kérdés: biztonságosan kibocsáthatjuk-e a környezetbe? **Bármely génmódosított baktérium potenciális forrása lehet egy ökológiai katasztrófának. Jelenleg szinte minden ország szigorúan szabályozza vagy teljesen tiltja az ilyen organizmusok kibocsátását a vadonba.**

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>

Az okok nyilvánvalóak: nem tudni, hogyan fog viselkedni a baktérium, miután „teljesítette küldetését”. Nem fog-e más fontos szerves vegyületeket elpusztítani? Nem fog-e kiszorítani más mikroorganizmusokat? Nem fog-e még előre nem látható következményekkel járó mutációkhoz vezetni?

Így, egy ökológiai probléma könnyen helyettesíthető egy másik, sokkal kiszámíthatatlanabb és pusztítóbb problémával.

A bakteriális műanyag-feldolgozás területén végzett alap kutatások kétségtelen jelentőségének ellenére a jelenlegi szakaszban ez a technológia nem tekinthető hatékony, méretezhető és biztonságos megoldásnak a műanyag hulladék-problémára.

A víz forralásának hatása a mikroműanyagok eltávolítására: hatékonyság és kockázatok

A biomérnöki és mikroműanyag-kutatási szakértők a Guangzhou Orvostudományi Egyetemről és a Jinan Egyetemről (Kína) végeztek egy kutatást.³¹³ A kísérlet célja az volt, hogy megvizsgálják a magas kalcium-sótartalmú (kemény) víz forralásának hatását a mikroműanyagok eltávolítására.

A vizsgálathoz különböző keménységű csapvíz mintákat vettek Guangzhou városából. A vízhez háromféle műanyag részecskét adtak: polisztirolt, polietilént és polipropilént, amelyek mérete 0,1 és 150 mikrométer között volt. A mintákat 5 percig forralták, majd lehűtötték és megmérték a mikroműanyagok maradék tartalmát.

Kemény, kalcium-sókkal telített vízben forralás közben oldhatatlan kalcium-karbonát (CaCO_3) képződik, amely vízkő néven ismert. A kutatók feltételezték, hogy a mikroműanyag részecskék kötődhetnek a kalcium-karbonát kristályokhoz és kicsapódhatnak, ami magyarázza a mikroműanyag koncentrációjának csökkenését a forralt vízben.

A tisztítás hatékonysága a legnagyobb volt a magas keménységű mintákban (300 mg CaCO_3 literenként), ahol a forralás révén a mikroműanyagok 90%-a eltávolítható volt. A lágy vízű mintákban (kevesebb mint 60 mg CaCO_3 literenként) a hatás jelentősen alacsonyabb volt: csak a műanyag részecskék 25%-a volt eltávolítható.

Azonban, annak ellenére, hogy a kemény víz forralása bizonyos pozitív hatással jár, felmerül egy fontos kérdés: a mikro- és nanoplasztik levegőbe jutásának lehetősége. A víz forralásakor vízgőz szabadul fel, amellyel a mikroműanyag részecskék a levegőbe kerülnek. Az ilyen részecskék belélegzése komolyabb veszélyt jelent, mint azok étellel vagy vízzel történő fogyasztása.

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>

Kutatások szerint, a belélegzett nanoplasztik 2 óra alatt bejuthat az agyba, míg az emésztőrendszerbe jutó mikroplasztik részben kiválasztódik a szervezetből. A műanyag agyba jutása hosszú távú kockázatokkal jár, mivel ezek a részecskék nem távolíthatók el az agyszövetekből.

Így, a víz forralása potenciálisan növeli a levegő mikroműanyaggal való szennyezésének kockázatát, ami veszélyesebb lehet az emberi egészségre. Ez hangsúlyozza a biztonságosabb és hatékonyabb víztisztítási módszerek kidolgozásának szükségességét.

A pirolízis mint műanyag-újrahasznosítási módszer: hatékonyság és kockázatok

A pirolízis a műanyag újrahasznosításának egyik technológiája, amely a műanyag magas hőmérsékleten, korlátozott oxigénellátású környezetben történő termikus bomlásán alapul. A folyamatot általában 300 és 800 °C közötti hőmérsékleten végzik, és gázhalmazállapotú és folyékony szénhidrogénvegyületek, valamint szén formájában szilárd maradékot eredményez.

Magas hőmérsékleten a műanyag polimer láncai lebomlanak, és egy szénhidrogénekből álló keveréket képeznek, amely üzemanyagként felhasználható. Ez a módszer azonban, a hagyományos műanyagégetéshez hasonlóan, jelentős környezeti kockázatokkal jár, amelyek a nanoműanyagok kibocsátásával kapcsolatosak.

Magas hőmérséklet hatására a műanyag apró részecskékre bomlik, beleértve a nanoplasztikot (mérete kevesebb, mint 100 nanométer). Ezek a részecskék olyan kicsik, hogy a modern szűrőrendszerek nem képesek teljesen visszatartani őket, így azok a légkörbe kerülnek.

A műanyagok égetése során dioxinok és furánok is keletkeznek, amelyek rendkívül mérgező, rákkeltő hatással rendelkező vegyületek.³¹⁴

Így, a pirolízis és a műanyagok égetése üzemanyag előállítás céljából jelentős kockázattal jár a légkörbe történő kibocsátás szempontjából, ami nemcsak az ökológiát, hanem az emberi egészséget is veszélyezteti. Ez a műanyagok ártalmatlanítási módszere nem tekinthető biztonságos és fenntartható megoldásnak a környezetszennyezés problémájára. Az ilyen üzemanyag ára az emberek életének és egészségének veszélyeztetése.

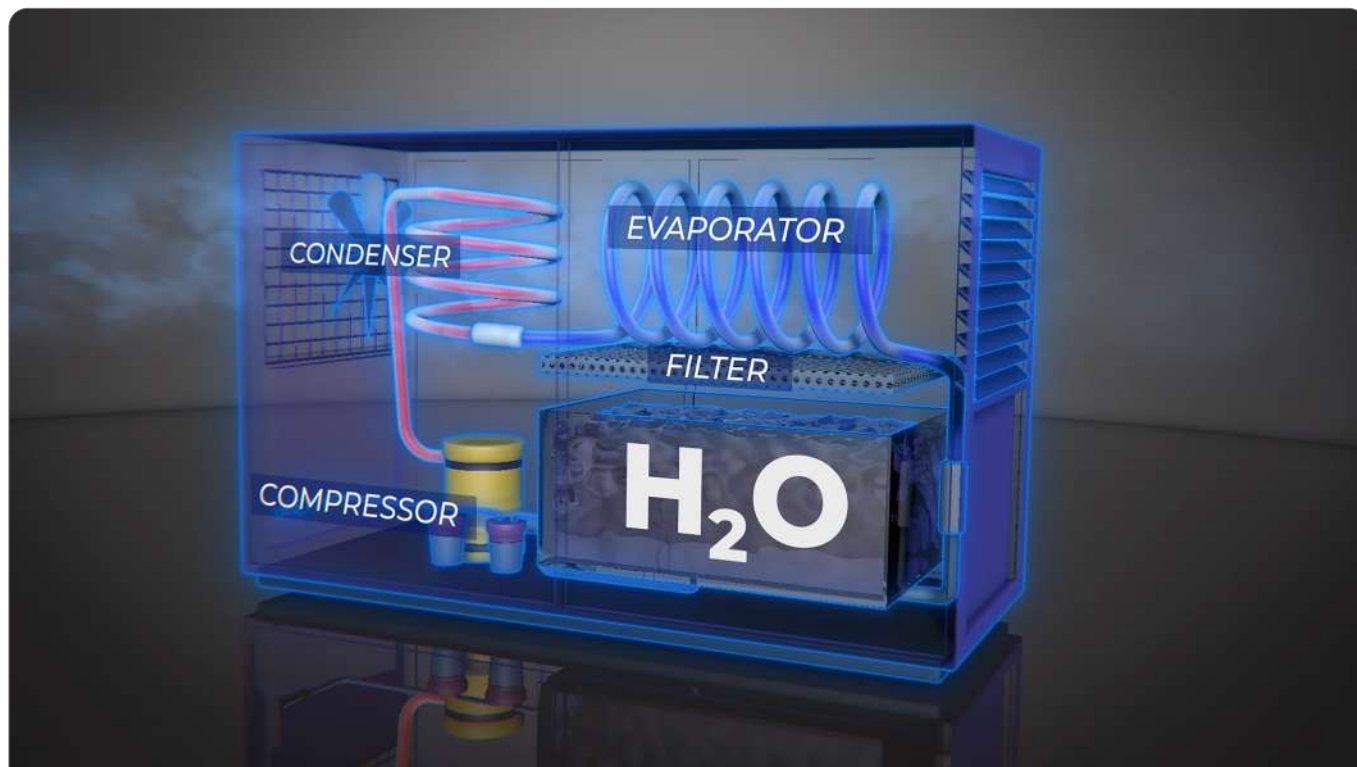
³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

AZ ALLATRA TUDOMÁNYOS KÖZÖSSÉG MEGKÖZELÍTÉSEI A MIKRO- ÉS NANOMŰANYAGOK JÁRVÁNYÁNAK LEKÜZDÉSÉRE

Az légköri vízgenerátorok (LVG) technológiája az óceán megtisztítására az MNM-től

Az ökológiai egyensúly helyreállítása innovatív technológiák, például a légköri vízgenerátorok (LVG) tömeges bevezetését igényli. Ma már ilyen berendezések széles választéka áll rendelkezésre, a háztartási modellektől az ipari modellekig. Ezek az eszközök képesek ivóvizet előállítani a levegőből, hatékonyan eltávolítva a szennyező anyagokat, beleértve a mikroműanyagokat is (124. ábra). Az íz és a minőség javítása érdekében a víz mineralizálható is.

A generátorok működési elve a levegőben található nedvesség kondenzációján alapszik.



124. ábra. A képen egy légköri vízgenerátor vázlatos ábrázolása látható, amely bemutatja annak alkotóelemeit és működési elvét.

Az LVG-ék két fő technológiával működnek:

1. **Kondenzáción alapuló technológia.** Ez a módszer a környező levegőt beszívja a készülékbe, és hideg felületnek/hűtőspirálnak teszi ki, aminek eredményeként a vízgőz folyadékká kondenzálódik. Ez a folyamat hasonló ahhoz, ahogyan a nedvesség képződik egy fagyasztóból kivett hideg tárgyon. A kondenzációs LVG-ék legjobban meleg és nedves környezetben működnek.

2. **Adszorpció technológia.** A levegőből a nedvességet nedvszívó anyagok, például szilikagél, ceolitok vagy fémorganikus vázak segítségével vonják ki. Az abszorbeált víz az anyag melegítésével szabadul fel.

Ma ilyen berendezéseket használnak helyileg a lakosság ivóvízellátásának biztosítására, többek között éghajlati katasztrófákkal kapcsolatos helyzetekben.

Az LVG-ék széles körű alkalmazása az ipar és a lakosság igényeinek kielégítésére néhány éven belül jelentősen csökkentheti az óceánok szennyezettségi szintjét.

Jelenleg a háztartási célokra, többek között az ételkészítéshez szükséges vízforrások olyan víztározók, amelyek gyakran magas mikro- és nanoplasztik-szintet tartalmaznak. Ez a víz hozzájárul a műanyag felhalmozódásához az emberi szervezetben. Az átállás a szennyezett források helyett a levegőből történő víztermelésre jelentősen javíthatja a fogyasztott víz minőségét.

Az ökoszisztémák helyreállítása természetes szűréssel és légköri vízgenerátorokkal

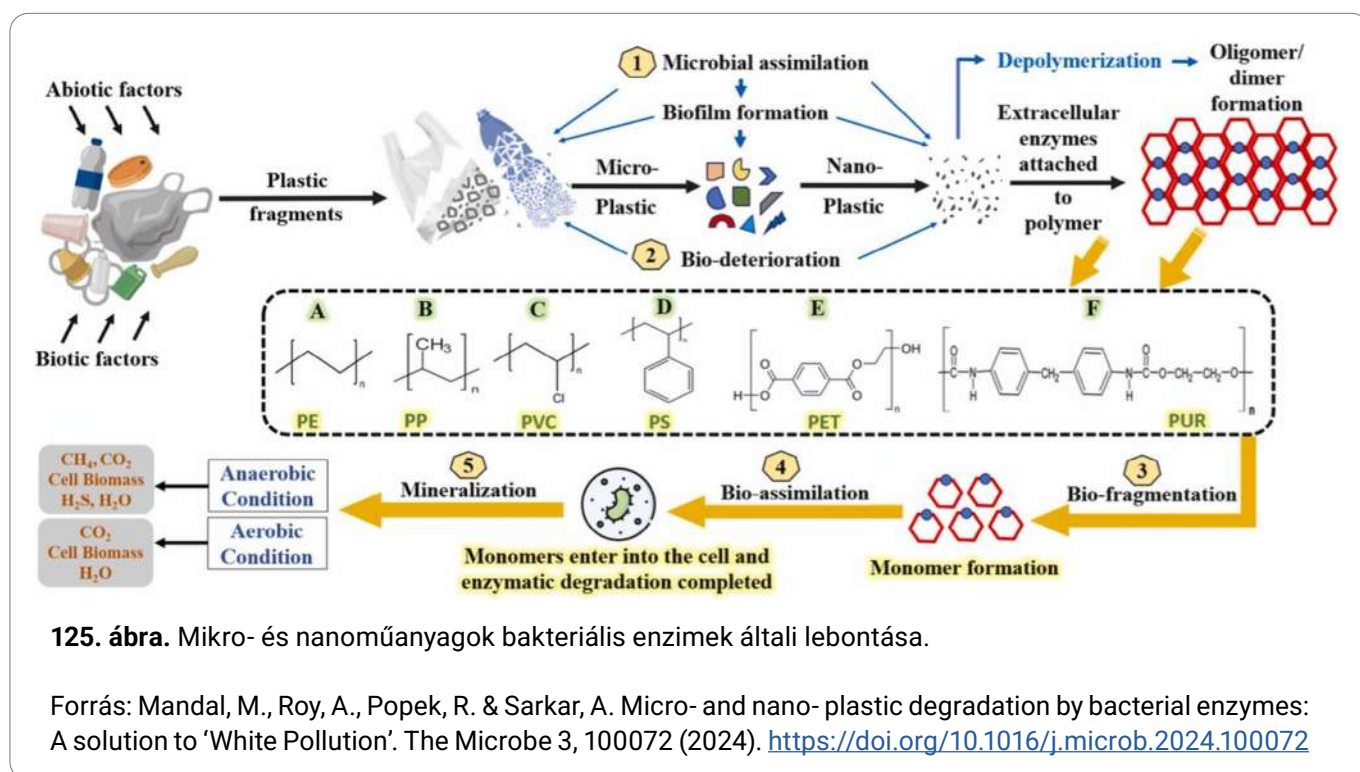
A mikroplasztik hatékony eltávolításához a használt vízből innovatív technológiákat, modern szűrő- és asszimilációs rendszereket kell alkalmazni. Ezenkívül, fontos a tisztítóberendezéseket úgy átalakítani, hogy a használt víz tisztítás után ne kerüljön víztározókba, hanem a talajba, mivel a talajban mikroorganizmusok élnek, amelyek természetes módon képesek a műanyagok feldolgozására.³¹⁵

Ezek az organizmusok jelentősen különböznek a genetikailag módosított vagy laboratóriumi körülmények között mesterségesen létrehozott organizmusoktól. Jelenlétük az ökoszisztémákban természetes marad, és nem mutatnak invazív fajok jeleit ebben a környezetben.

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>

A kutatások³¹⁶ azt mutatják, hogy számos, a természetes környezetben élő talajmikroba³¹⁷ jelentős hatékonysággal bomlasztja le a polimereket,³¹⁸ mint például a polietilént³¹⁹ és a polietilén-tereftalátot.³²⁰ Például, a legnagyobb gombás lebontási aktivitás – a polietilén tömegének átlagos 36,4±5,53 %-os csökkenése 16 hét alatt – az *Aspergillus oryzae* A5, 1 törzsnél volt megfigyelhető.

A mikroorganizmusok polimerek biológiai lebontására való képessége abból adódik, hogy olyan enzimeket termelnek, amelyek lehetővé teszik a műanyagok komplex molekuláris szerkezetének lebontását.³¹⁷



Ezek az adatok, amelyeket kísérleti megfigyelések is megerősítenek, rámutatnak arra, hogy a természetes mikrobiális közösségek felhasználásával csökkenthető a mikro- és nanoműanyagok által okozott környezetszennyezés.

„A jelenleg rendelkezésre álló számos rekultivációs módszer közül a mikrobiális rekultiváció mutatja a legjobb kilátásokat a mikroműanyagok lebontására vagy a környezetből való tartós eltávolítására” – áll a áttekintő tanulmányban.³¹⁷

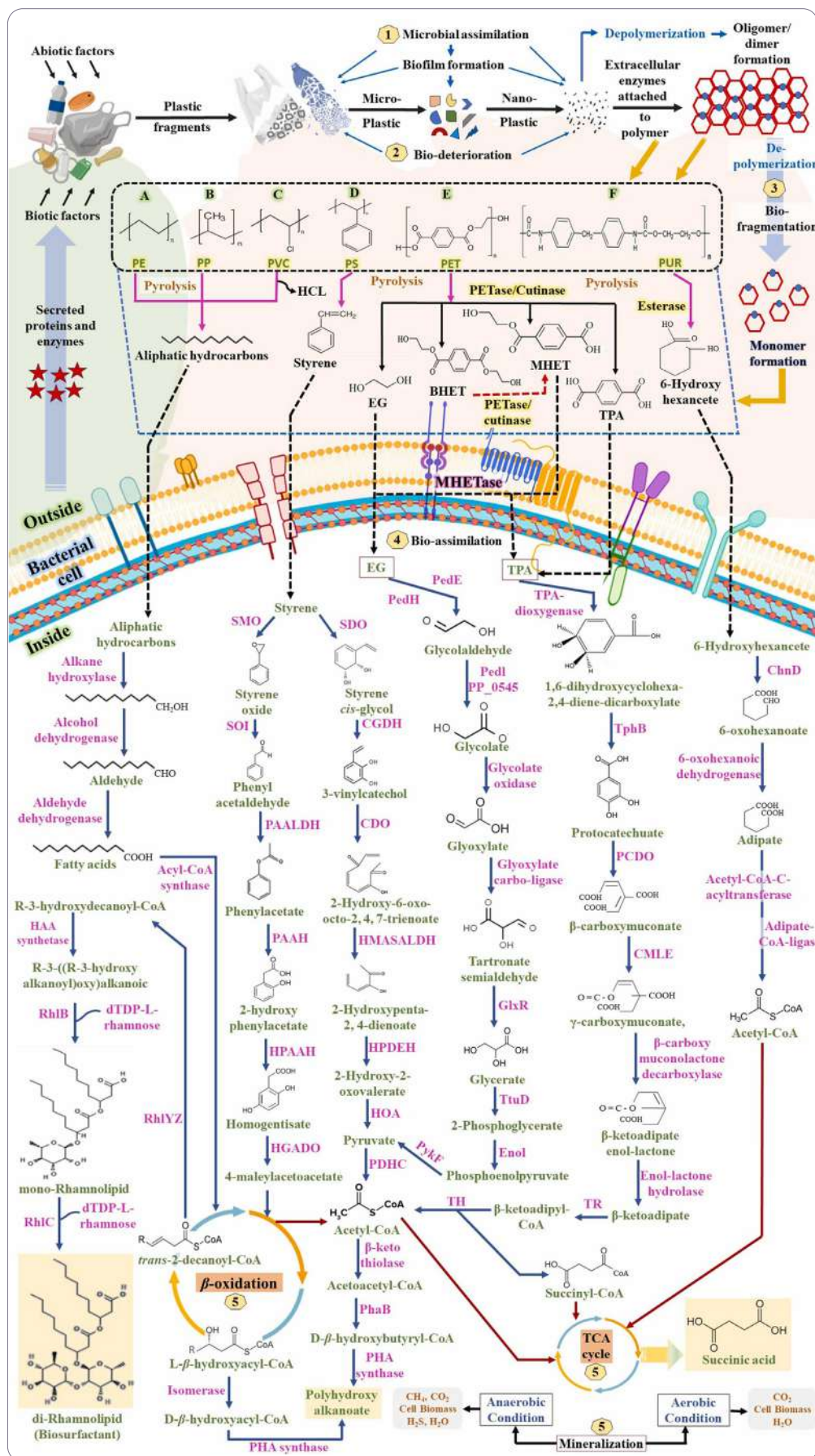
³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

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>

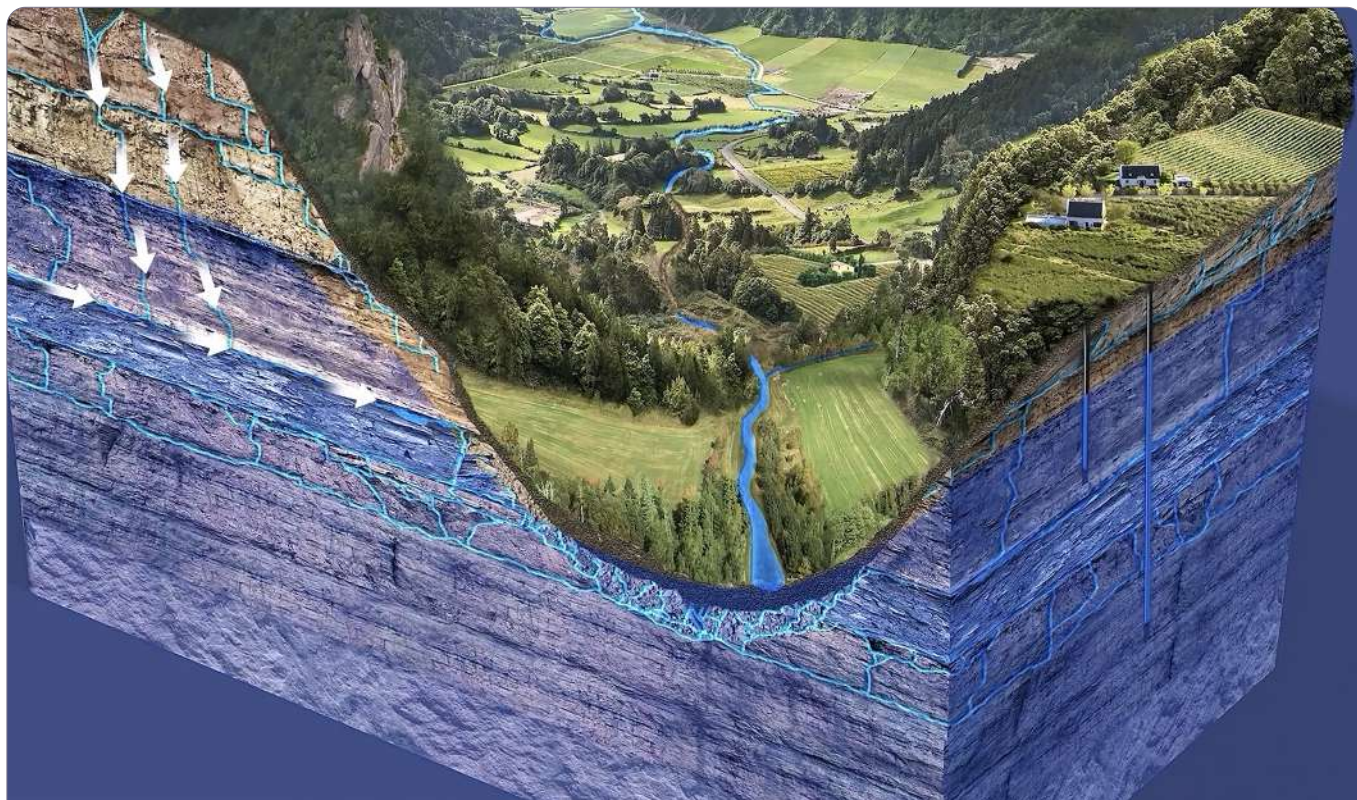


126. ábra. A műanyag hulladékok különböző abiotikus és biotikus tényezők hatására mikroszkopikus és nanoméretű részecskékre bomlanak.

Forrás: 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>

Így, a levegőből történő vízkinyerés technológiára való áttérés jelentősen javítja a fogyasztott víz minőségét, és a mikrobiális rekultivációs technológiával kombinálva hozzájárul a mikro- és nanoplasztikok környezetszennyezésének jelentős csökkenéséhez.

A talaj felső rétegeiben, csakúgy mint a víztározókban, a műanyag koncentrációja egy ideig magas marad. Azonban a víz mélyebb rétegekbe való behatolásával önmegtisztulás következik be (127. ábra). A talajban élő mikroorganizmusok elősegítik a nanoműanyag apró részecskéinek lebomlását.



127. ábra. A talajba ömlő víz geológiai kőzeteken keresztül történő biológiai utókezelésének folyamatának sematikus ábrázolása. A nyilak a szennyvíz útját mutatják, amely a talaj és a kőzet rétegein halad át, ahol a mikroorganizmusok és a szűrőanyagok eltávolítják a szennyeződések. A talajrétegek különböző színekkel vannak jelölve: barna – a talaj, szürke – a homok és a kavics.

A tisztítóberendezéseken használt és szűrt, a talajba lecsapolt víz mennyiségének növekedése elősegíti a mikroorganizmusok, köztük a baktériumok, gombák és archeák szaporodását, amelyek alapvető szerepet játszanak az egészséges talaj kialakulásában, a tápanyagok körforgásában és az ökoszisztémák fenntarthatóságában. A tisztított víz később beszívárog a mélyebb rétegekbe, és visszatér az óceánokba.

A légköri vízgenerátorok elhelyezése sivatagi régiókban, valamint a felhasznált víz talajba való visszajuttatása ígéretes megoldásnak tűnik a vízválság leküzdésére és a sivatagosodás elleni

küzdelemre, mivel aktivizálja a növényzet³²¹ és az ökoszisztémák helyreállítását elősegítő folyamatokat. A légköri vízgenerátorok használata javítja a helyi lakosság életminőségét, megoldva az ivóvízhiány problémáját.

A mikrobiális rekultivációval kombinálva az LVG alkalmazása fontos lépés lehet a vízkészletek fenntartható kezelése és a degradált területek helyreállítása felé.

A teljes átállás az LVG-kre azt jelenti, hogy a légköri vizet használják a lakosság minden igényének kielégítésére, beleértve a háztartási, ipari és mezőgazdasági igényeket is. E technológia globális bevezetése intenzívebb párolgást eredményez, ami az óceán lehűlését okozza, és felgyorsítja annak tisztulását. Ezenkívül az LVG segítségével a légkörben lévő felesleges nedvesség csökkentése csökkenti az extrém csapadékok és szelek számát, ami enyhítheti a természeti katasztrófák pusztító hatását (részletesebben a „*Víz a levegőből. Az emberiség megmentésének útja*” című filmben).

A légköri vízgenerátorok használatával kapcsolatos kihívások és kockázatok

Az LVG globális alkalmazásának azonban van egy hátránya is. A probléma abban rejlik, hogy az atmoszférikus vízgeneráló technológiák alkalmazása során nem veszik figyelembe azok közvetlen hatását az emberre. Bár ez a technológia valóban hozzájárulhat az óceánok vizének tisztításához és a hővezető képesség javításához, az LVG-ék széles körű alkalmazása azonban a mikroműanyagok koncentrációjának jelentős növekedéséhez is vezethet a légkörben.

Az LVG működési mechanizmusa magában foglalja a légkörből származó nedvesség kondenzációját, amelyet később az óceánokból származó párolgás pótol. Mivel ezek a vizek magas szintű mikroműanyagokat és nanoműanyagokat tartalmaznak, a folyamat során a légkörbe kerülő nedvesség apró műanyag részecskéket szállíthat. Ennek eredményeként, azokban a régiókban, ahol ezeket a technológiákat alkalmazzák, beleértve a nagyvárosokat is, a belélegzett levegőben a nanoműanyagok szintje elérheti a part menti területeken jelenleg megfigyelhető értékeket. Ez a nanoműanyagok koncentrációjának növekedését eredményezheti a levegőben, ami veszélyt jelent az emberi egészségre. A nanoplasztik belélegzése elősegíti annak felhalmozódását a szervezetben, többek között az agyban.

És ez a kulcsfontosságú pont. Meg kell érteni, hogy az LVG-ék használatának ötlete az óceánok tisztítására az ALLATRA tudósai által több mint 20 évvel ezelőtt merült fel, amikor a mikroműanyagok koncentrációja a légkörben még rendkívül alacsony volt. Abban az időszakban az ilyen technológiák alkalmazása valóban jelentős ökológiai hasznot hozhatott volna, anélkül, hogy komoly kockázatot jelentett volna az emberekre nézve. Ma azonban a helyzet gyökeresen megváltozott. Az LVG tömeges alkalmazása a mai körülmények között éppen ellenkezőleg, elsősorban a MNM koncentrációjának

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>

növekedéséhez vezet a levegőben, és most, hogy a MNM szintje a légkörben már így is magas, az LVG-én keresztül további mennyiségek hozzáadása végzetes lehet az emberek egészségére.

Így, a technológia, amely egykor ígéretes és innovatív volt, elvesztette aktualitását. Mi, az emberiség, elszalasztottuk azt a kritikus pillanatot, amikor az LVG megmentőnk lehetett volna. Az idő tényező döntő szerepet játszik a klíma és a környezetszennyezés kérdéseiben. Ami két évtizeddel ezelőtt megőrizhette volna milliók egészségét és valóban megtisztíthatta volna a bolygót, ma potenciálisan veszélyessé vált.

Az LVG már nem a jövő technológiája, hanem egy elszalasztott lehetőség emléke. A jelenlegi helyzetben azoknak a fejlesztéseknek kell prioritást élvezniük, amelyek lehetővé teszik a MNM eltávolítását a légkörből és az emberi szervezetből. Elsősorban időt kell nyernünk.

Innovatív tudományos megközelítés a mikro- és nanoműanyagok toxicitásának csökkentésére

A mikroműanyagok, és különösen a nanoműanyagok többszintű és kumulatív hatására vonatkozó adatok figyelembevételével nyilvánvalóvá válik, hogy a modern civilizáció olyan ökológiai-biomedikai kihívással szembesült, amely túllép a hagyományos környezetkárosítás fogalmán. Ez a probléma nemcsak egyes bioszférákat érint, hanem a Homo sapiens populáció hosszú távú fenntarthatóságát is.

Ma, gyakorlatilag az összes előállított műanyag – ami több mint 9 milliárd tonna – továbbra is felhalmozódik a környezetben, miközben mikro- és nanoméretű darabokra bomlik, amelyek magas kémiai és biológiai aktivitással rendelkeznek. Mikro- és nanoplasztik található a talajban, a vízben, a levegőben és az összes főbb élelmiszerkategóriában – a zöldségektől és gyümölcsöktől a húsig, halig, mézig, tejig és sóig. Ez a műanyag részecskék teljes behatolását jelzi az élelmiszerláncokba, ami jelentősen átalakítja a „biztonságos” vagy „egészséges” élelmiszerekről alkotott hagyományos elképzelést.

A részecskék emberi szervezetbe jutásának módja nagyban meghatározza azok biológiai viselkedését és eloszlását. Míg a gyomor-bélrendszeren keresztül bejutó műanyag részben kiválasztódhat, az inhalációs út jelentősen nagyobb kockázattal jár. A belélegzett nanoplasztik a tüdőszövetben rakódik le, áthatol a hematogén gáton, és közvetlenül eljuthat az agyba, ahol hosszabb ideig felhalmozódhat. Ugyanakkor a természetes méregtelenítő mechanizmusok (máj, vese) nem rendelkeznek hatékony eszközökkel az ilyen részecskék felismerésére és azok eltávolítására.

A mikroműanyagok legnagyobb sűrűsége víztestek, part menti területek és erdőterületek közelében figyelhető meg, különösen magas páratartalom és nagy hőmérséklet mellett.

Ilyen tájakon a műanyagok hosszabb ideig maradnak meg, részt vesznek az aeroszolos transzportban, oxidatív stresszt okoznak a növényekben és csökkentik a fotoszintézis hatékonyságát. A tengerparti pihenés, amelyet korábban egészségügyi szempontból kedvezőnek tartottak, ma már további inhalációs terheléssel jár: becslések szerint a nyílt víztestek közelében belélegzett műanyag mennyisége többszörösen meghaladhatja a városi környezetben mért értékeket.

Epidemiológiai vizsgálatok tartós összefüggést mutatnak ki az MNM-szennyezés szintje és a krónikus nem fertőző betegségek – többek között az artériás hipertónia, a cukorbetegség, a stroke, a depresszió és a kognitív zavarok – előfordulása között. Mivel az MNM képes áthatolni a biológiai gátakon és felhalmozódni különböző szövetekben, beleértve az agyat, a szívet, a tüdőt és a placentát, toxikus hatást gyakorol molekuláris, sejt- és szervszinten. A szervezetben felhalmozódó műanyag immunsuppresszív, gyulladásos és genotoxikus hatást gyakorol. A kockázatok felismerésében elért előrelépések ellenére eddig még nem fejlesztettek ki hatékony mechanizmusokat az MNM semlegesítésére és az emberi szervezetről való eltávolítására.

A nanoplasztik egyik legkritikusabb tulajdonsága, amely szisztematikus biológiai hatást gyakorol, az elektrosztatikus töltés megtartó képessége. Az inert részecskékkel ellentétben a nanoplasztik aktívan kölcsönhatásba lép a sejtfelszínnel, fehérjékkel, receptorokkal és akár a genetikai anyaggal is, stabil molekuláris szintű kötések képezve. Ez a tulajdonság nemcsak fokozza a nanoplasztik részecskék biológiai gátak, köztük a hematencefalus gát áthatolását, hanem megnehezíti azok későbbi kiválasztását is, elősegítve azok hosszú távú visszatartását a szövetekben, különösen az agyban. Az elektrosztatikus kölcsönhatás sejtkárosodások sorozatát indítja el, beleértve a membránok depolarizációját, a mitokondriális diszfunkciókat, az oxidatív stresszt és az apoptózist, ami jelentősen növeli a toxicitást még a nano-műanyag részecskék minimális koncentrációja esetén is.

A jelentés szerzői feltételezik, hogy ennek a feladatnak a megoldása – a mikro- és nanoműanyag elektrosztatikus töltésének semlegesítése vagy árnyékolása –

alapvető áttörést jelenthet, amely jelentősen csökkentheti a nanoplasztik biológiai aktivitását és lassíthatja annak felhalmozódását a kritikus fontosságú szervekben. A jelentés szerzőinek becslései szerint az elektrosztatikus töltés árnyékolása vagy semlegesítése legalább 50%-kal csökkentheti az MNM potenciális veszélyességét, ami ezt a kutatási irányt kritikus fontosságúvá teszi. Ez időt ad a tudományos közösségnek, amelyre szükség van a diagnosztika, a méregtelenítés és az MNM következményeinek megelőzése terén komplexebb megközelítések kidolgozásához. Ebben a tekintetben a biofizika, a nanoanyag-tudomány és a molekuláris toxikológia területén végzett kutatások elsőbbséget élveznek. A késlekedés ebben az esetben a lebomlási folyamatok potenciális felgyorsulását jelenti.

A biomedicinális megoldásokkal párhuzamosan tudományosan megalapozott stratégiára van szükség a műanyag hulladékok biztonságos kezelésére. A jelenlegi hulladékkezelési rendszer nem képes megakadályozni a mikroműanyagok további fragmentálódását és a bioszférába való bekerülését. A globalizáció körülményei között nemzetközi technológiai platformot kell kidolgozni a műanyagok biztonságos gyűjtési és feldolgozási módszereinek kialakításához, bevezetéséhez és kiterjesztéséhez. Az ilyen intézkedések kizárólag intézményi támogatás, határokon átnyúló szabályozás és tudományos diplomácia mellett valósíthatók meg.

Különösen fontos a tudományos közösség, az egészségügyi szakemberek és a széles közvélemény tájékoztatásának javítása. Jelenleg a legtöbb ember nincs tisztában az MNM hatásának mértékével, és tudat alatt továbbra is hozzájárul annak terjedéséhez.

Így a mikro- és nanoműanyag probléma már nem csak potenciális fenyegetés, hanem rendszerkockázati tényezővé vált. Ez a terület kiemelt figyelmet igényel a tudományos közösség és az egészségügyi hatóságok részéről, az adatok rendszerezését, kockázatértékelési szabványok kidolgozását, valamint az államközi és nemzetközi együttműködés bővítését. A rövid és hosszú távú biológiai biztonságot biztosító hatékony megoldások kidolgozásához interdiszciplináris megközelítésre, intézményi elismerésre és nemzetközi összefogásra van szükség.

X. TÉNYEZŐ: A MIKRO- ÉS NANOMŰANYAG HATÁSA A TERMÉSZETI KATASZTRÓFÁK CIKLUSÁNAK DINAMIKÁJÁRA

Mint már a „Mikro- és nanoplasztik hatása az éghajlatra” című fejezetben említettük, a mikro- és nanoplasztik részecskék csökkentik az óceánok vízének hővezető képességét, ami az óceánban felgyülemelő hőhöz és ennek következtében az óceán hőmérsékletének kritikus emelkedéséhez vezet. A mikro- és nanoplasztikák azonban önmagukban nem okozzák az óceán felmelegedését.

2023 tavaszától kezdve több mint egy éven át a világóceán átlagos felszíni hőmérséklete naponta új történelmi csúcsokat döntött, ami példátlan jelenség a megfigyelések történetében (128. ábra). A tudósok világszerte komoly aggodalmukat fejezik ki emiatt az anomális emelkedés miatt.



Dr. Brian McNulty, a Miami Egyetem Oceanográfiai Iskolájának vezető kutatója megjegyzi: **„Nem csak a rekordmagas óceánhőmérsékletekről van szó, amelyek már egy egész éve megfigyelhetők, hanem arról is, hogy ezek az új rekordok mennyivel haladják meg a korábbiakat. A jelenlegi értékek még csak meg sem közelítik a korábbi rekordértékeket”.**³²²



Ezt az aggodalmat osztja Dr. Rob Lauter, brit tengeri geofizikus: **„Ez valóban aggasztó, többek között azért is, mert nem hallottam egyetlen tudóst sem, aki meggyőző magyarázatot adott volna arra, hogy miért figyelhető meg ilyen erős eltérés. De most az a benyomásom, hogy minden sokkal erőteljesebben és gyorsabban alakul, mint vártuk”.**³²³

A klímakutatások adatai szerint a modern modellek az óceán felszíni hőmérsékletének fokozatos emelkedését jósolják, de a folyamat megfigyelt sebessége jelentősen meghaladja az összes előrejelzést. A tudósok úgy vélik, hogy az antropogén éghajlatváltozás bizonyos szerepet játszik, de nem tudja teljes mértékben megmagyarázni a megfigyelt jelenséget.

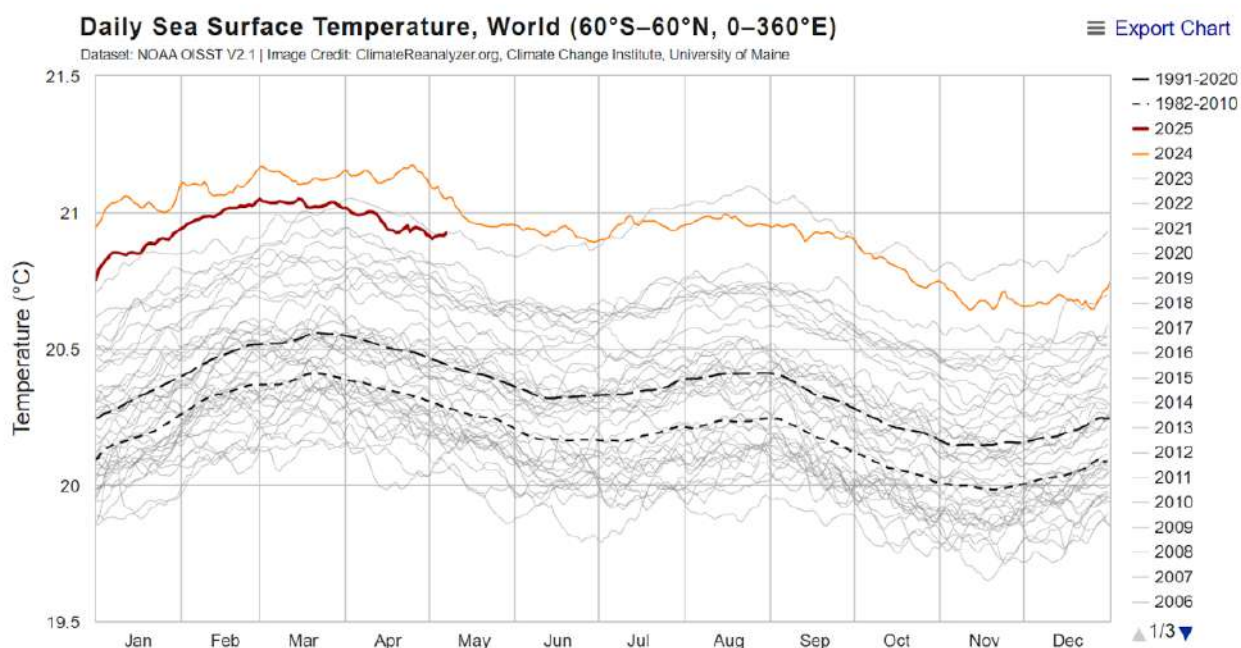
³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<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).

John Abraham professzor, a St. Thomas Egyetem óceánhőmérsékletet kutató professzora felvetette, hogy létezhetnek korábban ismeretlen tényezők, amelyek befolyásolhatják az óceán felszíni hőmérsékletének hosszú távú változásait.³²² Megjegyezte, hogy ezeket a tényezőket a korábbi előrejelzések nem vették figyelembe. A jelentés szerzői feltételezik, hogy létezik egyfajta „X-tényező”, amely felelős lehet az óceán és a légkör további felmelegedéséért.



128. ábra. Az óceán felszínének átlagos napi hőmérséklete, 1981–2025.

Adatforrás: Dataset NOAA OISST V2.1 | Kép forrása: [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>

Lehet-e a mikroműanyag és a nanoműanyag az óceánban egy még nem vizsgált X tényező?

A mikroműanyag és a nanoműanyag mint a jelenlegi óceánmelegedés fő okának lehetőségét elemző tanulmány komoly ellentmondást tár fel. A nanoműanyag valóban rontja az óceán hőelvezető képességét. Azonban nem termel hőenergiát – csak megakadályozza annak távozását az óceánból.

Az elmúlt 60 évben az óceán átlagos mélysége 15-ször gyorsabban melegedett, mint az előző 10 000 évben,^{324, 325} és ez a folyamat csak gyorsul. Ez a folyamat évről évre egyre gyorsul. Hatalmas mennyiségű energia szükséges ahhoz, hogy a hőmérsékletet olyan mélységekben emelje, ahová a nap sugarai már nem jutnak el.^{326, 327}

A mikro- és nanoplasztikok óceánba való nagymértékű bejutása viszonylag nemrég, körülbelül 30 évvel ezelőtt kezdődött, míg az óceán mélyebb rétegeinek felmelegedése már az elmúlt 60 évben megfigyelhető. Így, a műanyag nem magyarázhatja az óceán közepes mélységének hosszú távú és növekvő felmelegedési tendenciáját, amely jóval e szennyező anyagok jelentős megjelenése előtt kezdődött az óceánban.

Ezt a felmelegedést a nap sugárzása sem magyarázhatja, mivel a nap sugarai 200 m mélységig hatolnak. A víz a Nap hatására legfeljebb 700 m mélységig melegedhet fel a keveredés eredményeként.³²⁸

A mélyebb rétegek felmelegítéséhez, ahová a nap sugarai nem hatolnak be, hatalmas mennyiségű energia szükséges. Ez azt jelenti, hogy az óceánban felhalmozódott hőnek más forrásból kell származnia, és a nanoplasztik jelenléte azt eredményezi, hogy ez a hő „bezáródik” az óceán belsejébe.

Mivel a Nap által okozott felmelegedés nem magyarázza az óceán hőmérsékletének exponenciális emelkedését, felvetődött a feltételezés, hogy az óceán különböző részeiben további hőforrások is léteznek.

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)

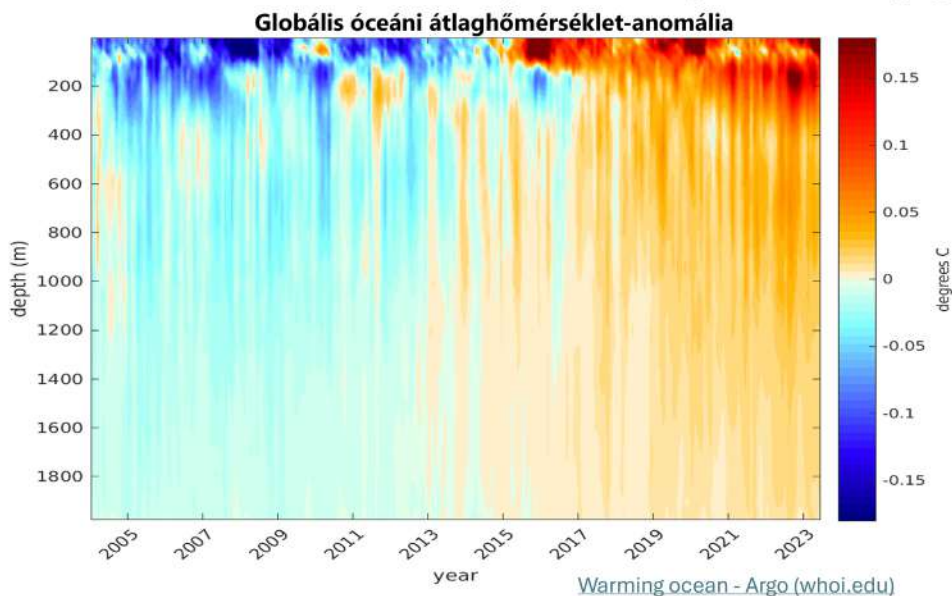
<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

A hőmérsékleti anomáliák vertikális eloszlása

Az Argo rendszer adatainak elemzése a globális hőmérsékleti ingadozásokról különböző mélységekben az elmúlt két évtizedben számos hőmérsékleti anomáliát tárt fel, amelyek nem az Argo rendszer adatainak elemzése a globális hőmérsékleti ingadozásokról különböző mélységekben az elmúlt két évtizedben számos hőmérsékleti anomáliát tárt fel, amelyek nem egyeznek a hagyományos modellel, amely szerint a hőátadás a felszínről a mélyebb óceánrétegek felé történik.^{329, 330}

Statisztikailag szignifikáns eseteket rögzítettek a hőmérsékleti gradiens inverziójára, amikor a melegebb víztömegek a viszonylag hideg felszíni rétegek alatt helyezkednek el (129. ábra). Hasonló hőmérsékleti rétegződés fizikailag lehetetlen kizárólag a felszínről lefelé irányuló hőátadás esetén, mivel a fizika törvényei szerint a hőenergia nem képes áthatolni a közbelső hideg rétegen felülről lefelé.

Az ARGO adatok az utóbbi 20 év hőmérséklet-ingadozásait mutatják különböző mélységekben.



129. ábra. Globális óceán hőmérsékleti anomáliák 0–1900 m mélységben 2004 óta.

Forrás: Argo <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

A Kínai Oceanográfiai Egyetem³³¹ tudósainak új kutatásai megerősítik azokat a következtetéseket, hogy a víztömegben hőanomáliák vannak, amelyek nem jelennek meg az óceán felszínén. A kutatások bebizonyították, hogy a tengeri hőhullámok harmada egyáltalán nem jelenik meg az óceán felszínén, míg körülbelül a fele nem minden élethciklusban jelenik meg. Az elmúlt három évtizedben az óceán felmelegedése következtében ezeknek a felszín alatti tengeri hőhullámoknak az éves száma jelentősen megnőtt. Az a tény, hogy a tengeri hőhullámok jelentős része egyáltalán nem figyelhető meg az óceán felszínén, egyértelműen arra utal, hogy ezeket nem a légkör hője okozhatja.

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>

Az óceánfenéken található hőforrások vizsgálata

Az óceánfenéken végzett kutatások és rendszeres hőmérséklet-megfigyelések jelenleg rendkívül ritkák és korlátozottak. Hosszú ideig a tudomány nem tűzte ki célul, hogy éppen ilyen mélységekben kövesse nyomon a változásokat. A modern megfigyelő rendszerek, mint például az ARGO bólyahálózat, csak az óceán területének 0,03 %-áról képesek adatokat gyűjteni, ráadásul a bólyák többsége csak a közepes mélység felére merül, nem éri el az óceán fenekét.³³²

Az emberiség valójában csak az óceánfenék felületének körülbelül 3–3,5%-át tanulmányozta.³³³ Ennek számos komoly oka van. Először is, a világóceán nagy része 3 000–6 000 m mélységben található. A 6000 m mélységig hatalmas nyomást kibíró mélytengeri járművek létrehozása hatalmas pénzügyi és technológiai erőforrásokat igényel.

Másodszor, maguk a kutatóexpedíciók rendkívül bonyolultak és költségesek: az egész történelem során mindössze nyolc speciális járművet építettek ilyen kutatásokhoz. Ezért, ma már bizonyos szempontból még a világóceán legtávolabbi zugait is jobban ismerjük, mint az úrben.

Ugyanakkor egyre nyilvánvalóbbá válik, hogy az óceánfenéken zajló geológiai folyamatok jelentős szerepet játszhatnak az éghajlatváltozásban és az óceánok hőegyensúlyában. Az óceánfenéken több millió egyedülálló geológiai objektum található – vulkánok, törésvonalak és hidrotermális források, amelyek hatalmas energiával rendelkeznek. Azonban, mivel ezek nehezen hozzáférhetők és nem elégséges a megfigyelésük, potenciális hatásaik mértéke a tudomány számára még mindig nagyban rejtély marad.

Ennek ellenére az óceánfenék kutatásai mégis folynak, és számos közülük az óceánfenéken található óceánvíz felmelegedésére utal.

Így, az **Argentín-medence két mély részén**,³³⁴ 4500 m-nél nagyobb mélységben jelentős felmelegedési tendenciák figyelhetők meg: $0,02^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$ egy évtized alatt, a 2009–2019 közötti időszakban. Ez hatalmas mennyiségű energia, amely szükséges ahhoz, hogy ilyen mennyiségű hideg vizet melegítsen fel a tengerfenéken.

Közvetlenül a Nyugat-Antarktiszi partjainál rendkívüli felmelegedés figyelhető meg a Waddell-tenger³³⁵ mély vizeiben, míg a felső 700 m-es víztömeg szinte egyáltalán nem melegszik fel. A mélyebb régiókban folyamatos hőmérséklet-emelkedés figyelhető meg. A Weddell-tenger egyik oldalán a nyugat-antarktiszi rift, a másik oldalán pedig a Déli-Sandwich-szigetekkel határos víz alatti vulkáni heggyerinc található.

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>

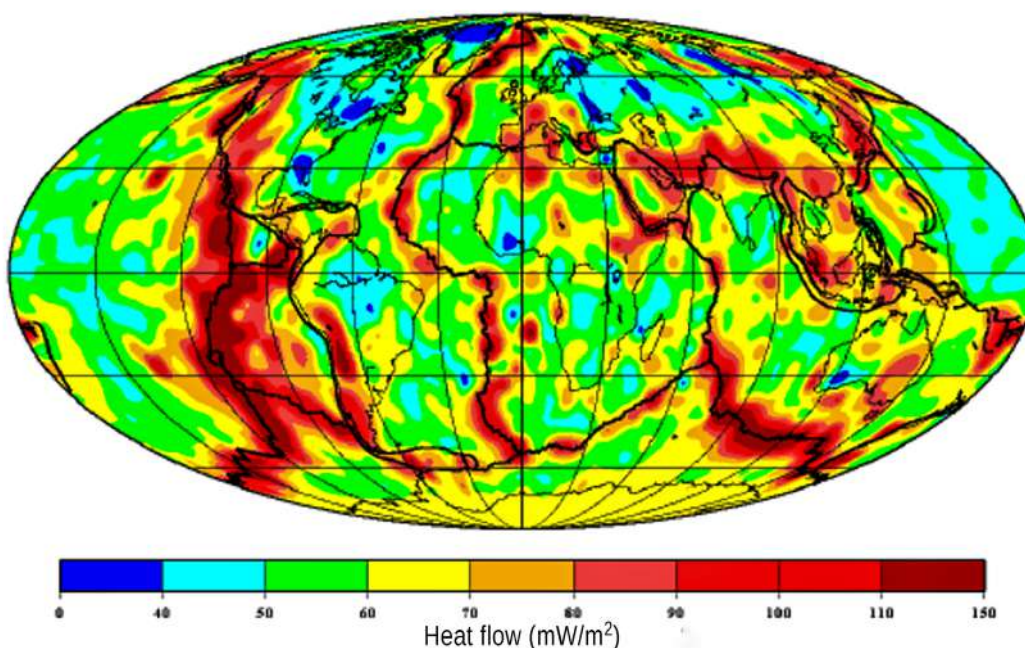
³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (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>

A geotermikus hőáramlás, a tektonikai folyamatok és a vulkáni kitörések szerepe az óceán fenekén

A mélytengeri rétegek melegedésének megfigyelt anomáliái kontextusában, ahol a légkör hatása minimális, logikusnak tűnik a Föld belsejéből származó geotermikus áramlás potenciális kiegészítő hőforrásként való figyelembevétele. A klímamodellekben hagyományosan a mélyből érkező geotermikus áramlást állandónak és körülbelül $0,09 \text{ W/m}^2$ (vagy 90 mW/m^2) értékűnek tekintik,³³⁶ ami több nagyságrenddel kisebb, mint a napenergia-áramlás.^{337, 338}

Azonban, a tudományos adatok egyre növekvő mennyisége rámutat ennek az alulértékelt hőforrásnak a jelentőségére. Nagyszabású geotermikus kutatások kimutatták, hogy az óceán fenekén keresztül kilépő hőáramlás energiája az óceáni kéreg korától függ: a legmagasabb a fiatal szpredding zónákban, a legalacsonyabb pedig a régi óceáni medencékben³³⁹ (130. ábra). Az ilyen helyi anomáliák hatással lehetnek a víz hőmérsékletének vertikális szerkezetére, gyengíthetik a termoklint és elősegíthetik a víztömegek keveredését, ami befolyásolja a cirkulációt, a bioproduktivitást és akár a sarkvidéki gleccserek stabilitását is.



130. ábra. A hőáramlás globális ábrázolása megfigyelési adatok alapján, kiegészítve digitális térképekből származó becslésekkel és az életkorral való empirikus korrelációval.

Illusztráció a cikkből: 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.

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.

A geotermikus hőáramlás a Föld belsejéből egy felületi egységre, időegység alatt beáramló hőenergia mennyisége, amelyet millivatum/négyzetméterben (mW/m²) mérnek.

Míg a kontinensek átlagos geotermikus hőáramlása 40–60 mW/m², az óceánfenéké pedig körülbelül 100 mW/m², egyes régiókban ezeket az értékeket többszörösen meghaladó értékeket regisztrálnak. A geotermikus hőáramlás legszélsőségesebb értékeit tektonikailag és vulkanikailag aktív övezetekben találták: például a közép-óceáni hegygerincek és az aktív riftzónák övezeteiben az áramlás meghaladhatja a 200–1000 mW/m²-t.³⁴⁰

Különösen magas hőáramlás figyelhető meg a hidrotermális mezők zónáiban – ezek olyan zónák, ahol forró folyadékok jutnak az óceán fenekére, ahol a víz hőmérséklete eléri a 350–400 °C-ot. Ezek a rendszerek egyedülálló ökoszisztémákat alkotnak, és helyi hőáramlás-anomáliákat okoznak, jelentősen befolyásolva a fenékvíz hőmérsékleti viszonyait.

Az óceánfenéken található, jól kutatott, megnövekedett geotermikus hőáramlás fő területei a közép-óceáni hegygerincek, amelyek a litoszférikus lemezek szétnyílásának területei, ahol aktív új óceáni kéreg képződik. Ez a globális tengeralatti hegylánc-rendszer összesen körülbelül 60000 km³⁴¹ hosszúságú, és a földgömböt körbeveszi, mint a varrások egy baseball-labdát. A közép-óceáni hegygerincek jellemzője a hidrotermális források, a víz alatti vulkánok és az aktív törésvonalak nagy koncentrációja, amelyeken keresztül jelentős mennyiségű hőenergia jut az óceánba a Föld köpenyéből.³⁴²

A hőáramlás ezeken a területeken 10-100-szorosa az óceánfenék többi részének átlagos értékének,³³² ami ezeket a területeket a Föld belső rétegei és a világóceán közötti hőcserének kulcsfontosságú pontjaivá teszi.

Arthur Viterito, a Marylandi Egyetem professzora megállapította, hogy 1995 óta nőtt a földrengések száma az óceánfenéken, a közép-óceáni hegygerinceken (131. ábra).³⁴³ 0,7-es korrelációs együtthatóval ez a növekedés megfelel a globális hőmérséklet emelkedésének. Ugyanakkor a hőmérséklet emelkedése két évvel a szeizmikus aktivitás növekedése után jelentkezik. A szeizmikus aktivitás növekedése ezeken a területeken a magma emelkedésével kapcsolatos, amely új óceáni kéreg kialakulását eredményezi.

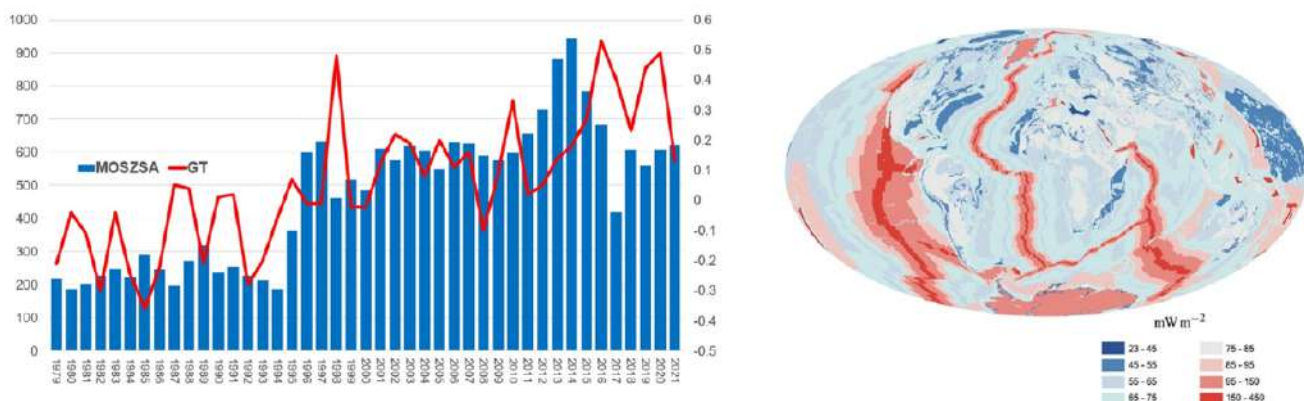
³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376.
<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).

³⁴²<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴³Baker, 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>

A tenger alatti földrengések számának növekedése a közép-óceáni hátságok mentén.

131. ábra. A 4,0–6,0 magnitúdójú földrengések számának egyidejű növekedése az óceán fenekén és a globális légköri hőmérséklet emelkedése.

Forrás: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Bár a felszínre törő magma mennyiségét közvetlenül nem lehet mérni, a globális szeizmikus megfigyelő hálózat lehetővé teszi ezeknek a folyamatoknak a mértékének közvetett becslését – a szeizmikus események számának és intenzitásának alapján, amelyek a szeizmikus adatok mennyiségétől függetlenül növekednek. Viterito hipotézise szerint, a szeizmikus és vulkáni aktivitás a közép-óceáni hegygerincek mentén a hidrotermális kibocsátások ütemének növekedéséhez és a vizek felmelegedéséhez vezet, ami viszont üvegházhatású gázok kibocsátásához és a légkör felmelegedéséhez vezet. Így, Viterito azt mutatja, hogy az óceánok nemcsak felülről, hanem alulról is felmelegednek – a geológiai folyamatok miatt.

A víz alatti vulkanizmus szintén fontos szerepet játszhat az óceánfenék hőmérsékleti viszonyainak kialakulásában. A jelenlegi adatok szerint, a Föld összes vulkánkitörésének körülbelül 75 %-a víz alatt történik.³⁴⁴ Korábban úgy gondolták, hogy a víz alatti kitörések nyugodt lávaömléssel történnek, és a robbanásos kitörések a vízoszlop nyomása miatt lehetetlenek. Ezért feltételezték, hogy a víz alatti vulkánok nem tudják felmelegíteni a víztömeget – a kifolyó láva szinte azonnal megdermed. De a legújabb kutatások megváltoztatták a víz alatti vulkánok kitörési mechanizmusának megértését.

A magma nyomása 10 000 – 30 000 bar, míg a vízoszlop nyomása az óceán legmélyebb részeiben mindössze 1 000 bar.

A magma kitörésekor a víz azonnal felforr, és a H₂O molekulák szétesnek, így több száz vagy ezer bar nyomású gáz-víz üreg keletkezik,³⁴⁵ ami hatalmas robbanásszerű kitörésekhez vezet.

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>

Az ilyen kitöréseket tefra és hidrotermek kibocsátása kíséri – óriási túlhevített vízsugarak, amelyek térfogata elérheti a 40 millió olimpiai medence térfogatának megfelelő mennyiséget. Az ilyen kibocsátások nemcsak lokálisan, hanem globális szinten is megzavarhatják az óceán hőegyensúlyát.

A Lydiai Egyetem kutatásai kilométernyi vulkáni tefra mezőket tártak fel a Csendes-óceán fenekén,³⁴⁶ ami megerősíti a hatalmas robbanásos tengeralatti kitöréseket. Egy ilyen kitörés körülbelül 1 TW hőteljesítményt bocsáthat ki, ami kétszerese az Egyesült Államok energiafogyasztásának.



A robbanásszerű kitöréseknek az óceán felmelegedésében játszott szerepét Bernd Zimanowski professzor, a bajorországi Julius Maximilianus Egyetemről is megerősíti³⁴⁷:
„A víz alatti láva-kitörések során a láva hője elég hosszú ideig átadódik a víznek. A robbanásos kitörések során azonban a magma apró részecskékre bomlik. Ez olyan erős hőimpulzusokat eredményezhet, hogy a hőegyensúlyi áramlatok az óceánokban lokálisan vagy akár globálisan is megzavarodnak.”³⁴⁸

A legújabb becslések szerint a hidrotermálisan aktív víz alatti képződmények száma 100 ezer és 10 millió között van,^{349, 350} ami arra utal, hogy valószínűleg a hidrotermális aktivitás hozzájárulása az óceán hőegyensúlyához alulbecsült. A magma robbanásszerű kitörései hatalmas hőimpulzusok kialakulásához vezetnek, amelyek helyileg megzavarhatják az óceánok hőáramlását. Az óceán méreteit figyelembe véve azonban még az ilyen erős víz alatti kitörések sem elegendőek ahhoz, hogy felmelegítsék azt. A vulkánok nem mindenhol találhatók, kitöréseik pedig epizodikusak, energiájuk pedig nem elegendő az egész óceán felmelegítéséhez. Azonban elegendő lehet ahhoz, hogy helyi hőhullámokat okozzon az óceánban.

Egyedi példája az ilyen helyi hőanomáliáknak a tengeri hőhullámok, azaz a helyileg tartósan felmelegedett víz az óceánban. Másik nevük a blobok (hőanomáliák). Ezek óriási felszíni vízterületek, amelyek hőmérséklete rendkívül magas. 1995 óta a blobok száma jelentősen megnőtt,³⁵¹ és egyre gyakrabban jelennek meg a világ óceánjának különböző részein, többek között Új-Zéland, Délnyugat-Afrika és az Indiai-óceán déli részének partjainál.

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).

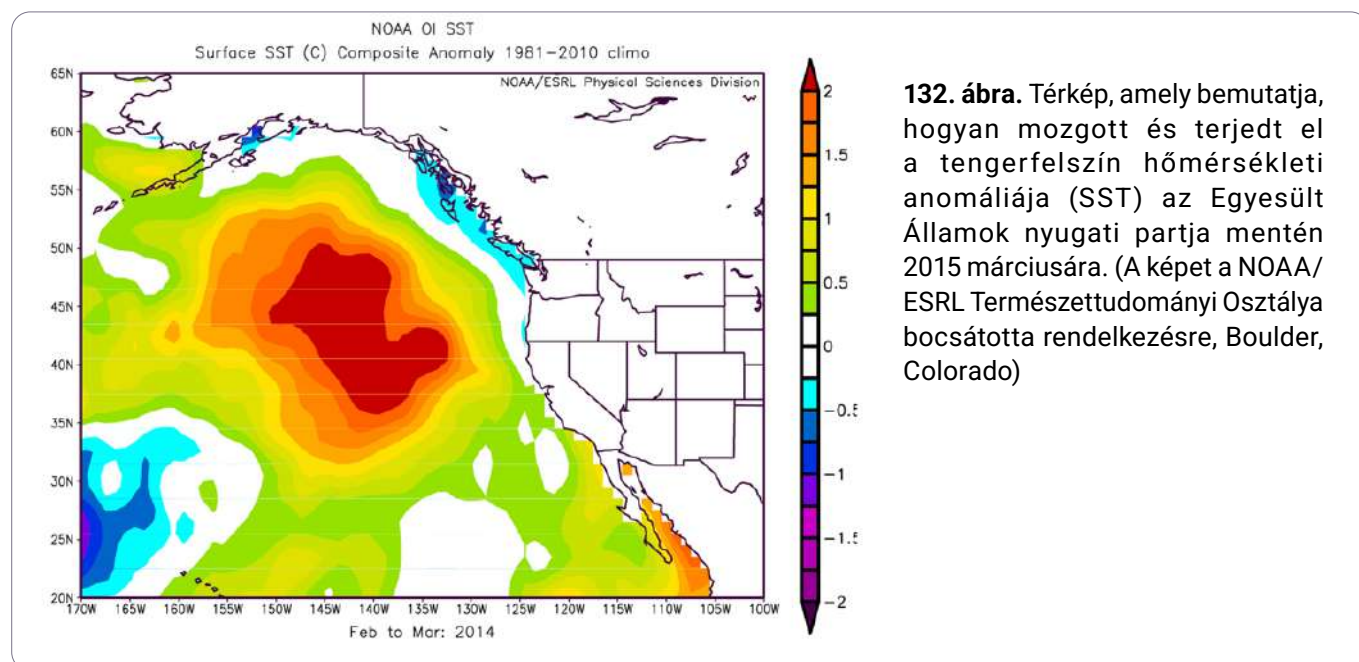
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016)
<https://www.snexplores.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>

Az egyik leghíresebb és legnagyobb kiterjedésű blob (hőanomália) 2013-ban alakult ki az Alaszkai-öbölben, és gyorsan szétterjedt a Csendes-óceánon. Területe meghaladta a 4 millió km²-t (ami nagyobb, mint India területe), és a víz hőmérséklete egyes helyeken 5-6 °C-kal is meghaladta az átlagot (132. ábra). A blob három éven keresztül, egészen 2016-ig, Alaszkától Mexikóig vándorolt az óceánban. Ez a jelenség negatívan befolyásolta a tengeri ökoszisztémát és a régió éghajlatát.

A blob keletkezésének oka nagy valószínűséggel az Alaszka partjainál zajló aktív vulkanizmus és a Cobb³⁵² magmatikus köpenycsóva volt, amelyek felmelegítették az óceán fenekén lévő vizet, és az ilyen hatalmas mennyiségben felemelkedett a felszínre.

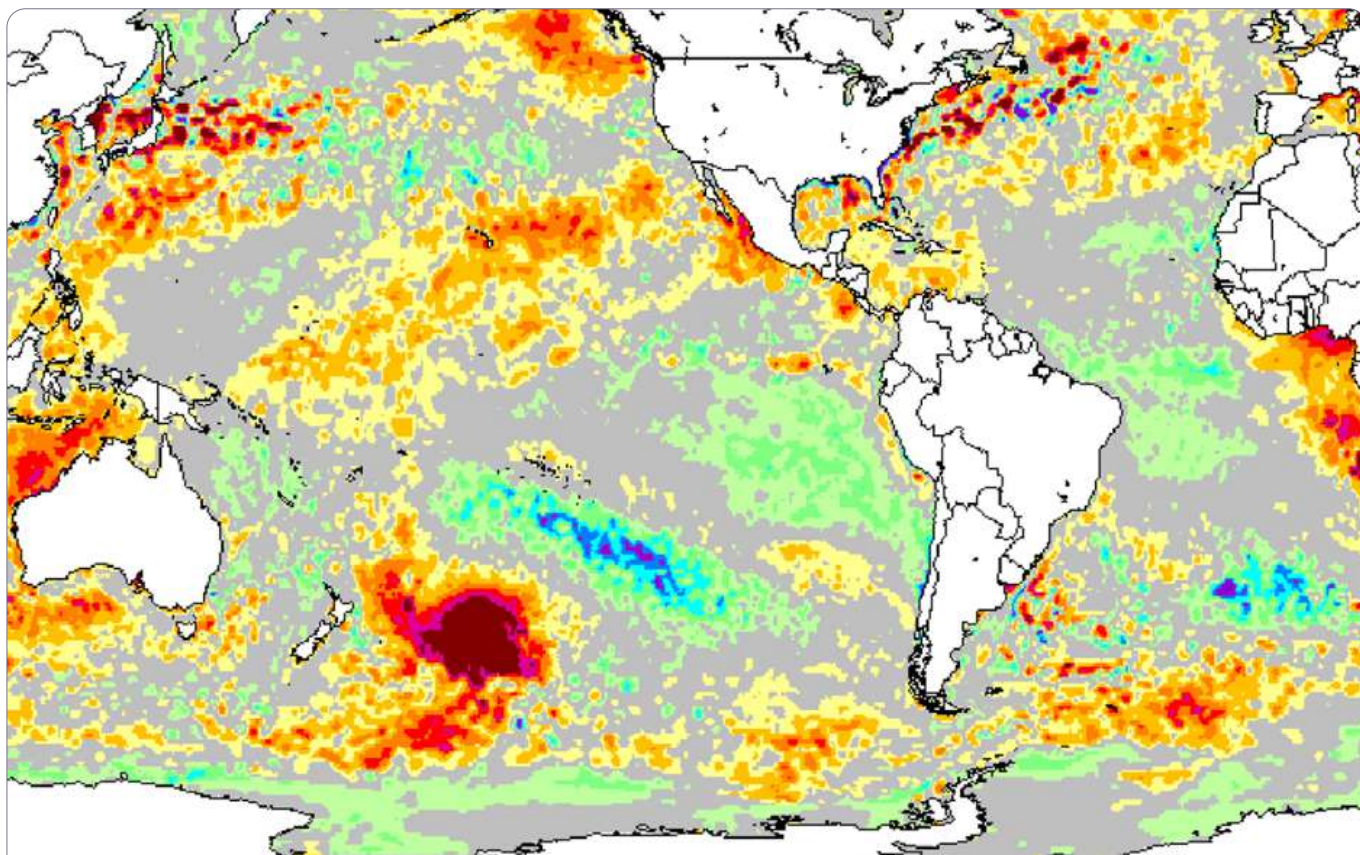


Új-Zélandtól keletre, a Csendes-óceán déli részén, 2019 decemberében megjelent egy blob (hőanomália), amelynek hőmérséklete bizonyos napokon 6 °C-kal magasabb volt az átlagos értékekhez képest. A blob területe több mint 1 000 000 km² volt, ami Texas területének 1,5-szeresének, vagy Új-Zéland területének 4-szeresének felel meg (133. ábra). A beszámolók szerint abban az időben ez volt a legnagyobb blob a Világóceánon. Sőt, ez a csepp volt a második legnagyobb megfigyelt esemény a régióban a megfigyelések kezdete óta.

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>

66

James Renwick, a Wellingtoni Victoria Egyetem Földrajzi, Ökológiai és Földtudományi Tanszékének professzora megjegyezte, hogy **„ez a bolygón a legnagyobb anomális felmelegedési zóna. Általában a víz hőmérséklete ott körülbelül 15 °C, most pedig körülbelül 20 °C.”**³⁵³



133. ábra. A tengeri felszíni hőmérséklet anomáliája a Csendes-óceán déli részén 2019. december 25-én.

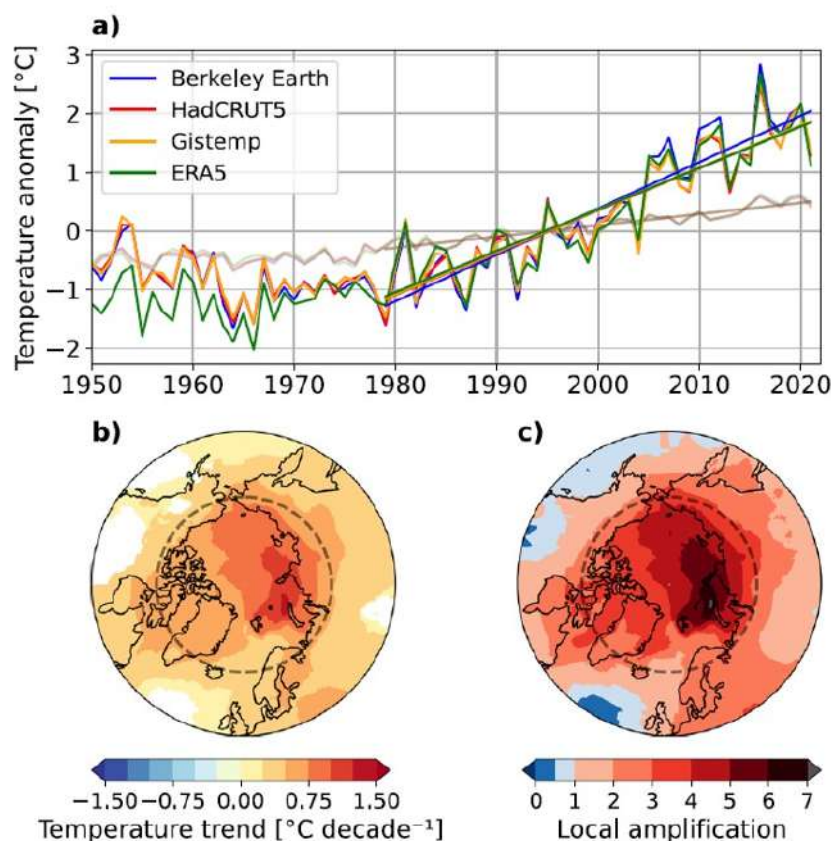
Forrás: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019)
<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Hozzáférés: 2025. május 11.)

A folt kialakulásának valószínűsíthető oka az őszi vulkáni fennsík aktivitása Új-Zéland partjainál.³⁵⁴

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>

A geotermikus hőnek az óceáni vizek hőmérsékletének magmatikus folyamatok révén történő emelkedésére gyakorolt hatásának egy másik példája a szibériai partok mentén található sarkvidéki tengerek hőmérsékleti anomáliái. A 2022-es kutatások szerint a szibériai Arktisz csaknem négyszer gyorsabban melegszik, mint a Föld, ami magasabb arány, mint amit korábban a klímamodellek figyelembe vettek, és ami rendkívül váratlan volt a tudósok számára (134. ábra).³⁵⁵



134. ábra. Az átlagos éves hőmérséklet alakulása az Északi-sarkvidéken.

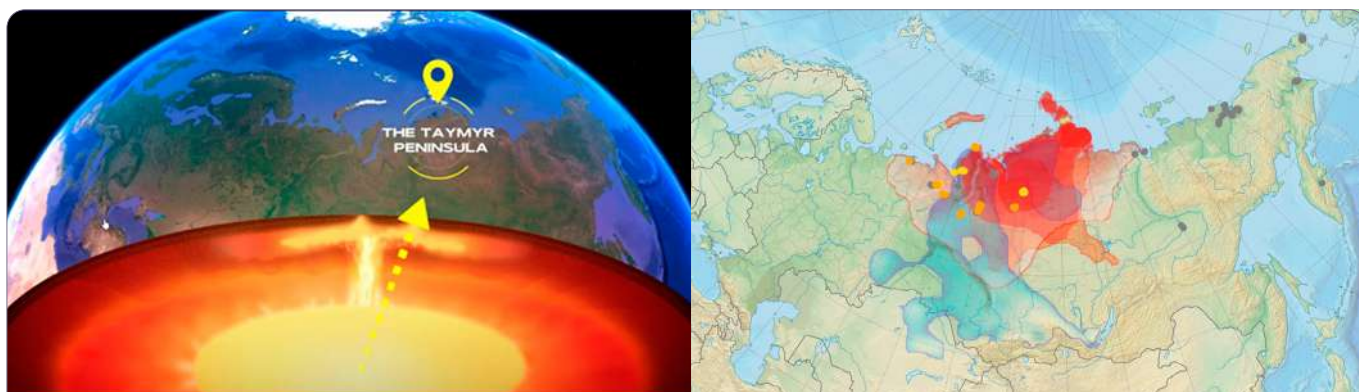
(a) Az átlagos éves hőmérsékleti anomáliák az Északi-sarkvidéken 66,5°–90° északi szélesség között (sötét színek) és globális szinten (világos színek) az 1950–2021 közötti időszakban, különböző megfigyelési adatsorok alapján. A hőmérsékleti anomáliákat a standard 30 éves időszakhoz (1981–2010) viszonyítva számították ki. A (b) és (c) grafikonokon a szaggatott vonal az Északi sarkkört jelöli (66,5° északi szélesség).

Forrás: 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>

Pontosan ebben a régióban, a Tajmir-félsziget környékén aktivizálódik a szibériai magmatikus köpenycsóva, amely jelenleg gyorsan emelkedik abban a régióban, ahol 250 millió évvel ezelőtt a szibériai trappok kiömlése történt. Minden arra utal, hogy a köpenycsóva feje jelenleg aktívan erodálja a kelet-szibériai kratont, és a magma az egész területén szétterül (135. ábra). Előzetes becslések szerint a magmaáramok elterjedésének területe Szibéria alatt elérheti a 2500–3000 km átmérőt, ami összehasonlítható Ausztrália területével.

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>



135. ábra. A köpenycsóva helyének lokalizálása különböző kutatások eredményei alapján.

Fontos megjegyezni, hogy az Északi-sarkvidék tengereinek ilyen intenzív felmelegedése éppen a Tajmir-félsziget területén történik. Ez az anomália éppen Szibéria vízi területén magyarázható azzal, hogy az óceáni kéreg vékonyabb és gyorsabban vezeti a hőt, a víz pedig nagyobb hőkapacitással rendelkezik, mint a légkör. Ezért, éppen az óceáni víz halmoz fel és tart vissza intenzíven a felemelkedő magmatikus köpenycsóva hőjét, annak ellenére, hogy annak emelkedése a kontinentális kéreg alatt, a parttól viszonylag távol történik.



A szibériai magmás köpenycsóva és annak az éghajlati rendszerre gyakorolt hatása, valamint az e geológiai szerkezet által jelentett veszélyek és a megoldási lehetőségekről a **„A SZIBÉRIAI KÖPENYCSÓVA KITÖRÉSÉNEK VESZÉLYÉRŐL ÉS A PROBLÉMA MEGOLDÁSI LEHETŐSÉGEIRŐL”** című jelentésben találhatók.

Mindezek az adatok együttesen arra utalnak, hogy az óceánfenéken zajló geológiai folyamatok jelentős tényezők a globális felmelegedésben. Az óceánfenéken megnövekedett szeizmikus és vulkáni aktivitás korrelál a globális hőmérséklet emelkedésével, ami lehetséges ok-okozati összefüggésre utal. A víz alatti kitörések, különösen a robbanásszerűek, hatalmas hőimpulzusokat képesek létrehozni, amelyek megzavarják a helyi és akár a globális hőegyensúlyt is.

A hidrotermális rendszerek és a vulkáni folyamatok nagy léptékű anomáliákat hoznak létre, mint például a blobokat, amelyek jelentős hatással vannak az óceáni ökoszisztémákra és az éghajlatra, míg a magmatikus folyamatok az Északi-sarkvidék tengereinek rendellenes felmelegedését okozzák. Így, az óceán nemcsak felülről, a légkör hatására melegszik, hanem alulról is, a föld belsejében zajló dinamikus folyamatok miatt. Ez megköveteli a meglévő éghajlati modellek felülvizsgálatát és a víz alatti geológiai aktivitás mélyebb tanulmányozását, mint a bolygó általános hőegyensúlyának fontos összetevőjét.

Van azonban egy kérdés, amely kulcsfontosságú: miért növekszik ebben az időszakban a magmatikus és tektonikus folyamatok száma a Földön?

A Föld éghajlatváltozásának geodinamikai modelljének rövid leírása a jelenlegi időszakban

Az elmúlt 30 évben a Földön példátlan és szinkronizált növekedés tapasztalható nemcsak az éghajlatváltozás, hanem az összes rétegben és a bolygó geofizikai paramétereiben is. Ezek a változások exponenciálisan növekednek. A tudományos adatok komplex elemzése azt mutatja, hogy ennek fő oka a 12 000 évente ismétlődő csillagászati ciklus.

A kozmikus tényezők hatására vonatkozó hipotézist megerősítik azok a hasonló változások, amelyek a Földdel egy időben más bolygókon és azok holdjain is megkezdődtek. Például, az Uránuszon,³⁵⁶ a Jupiteren³⁵⁷ és a Vénuszon³⁵⁸ nő a szél sebessége és bővülnek a hurrikánok területei. A Marson a sarkok jégsapkáinak olvadása figyelhető meg,³⁵⁹ a Vénuszon³⁶⁰ és a Marson pedig a vulkáni aktivitás tovább növekszik.³⁶¹ Ezenkívül, a Marson, a halott bolygón, erősödnek a földrengések,³⁶² ami rendellenes aktivitás megjelenésére utal a bolygó belsejében.

A Föld rendszerében bekövetkezett kritikus változások 1995-től kezdtek megnyilvánulni, amikor jelentős geofizikai anomáliákat rögzítettek, mint például a Föld forgásának hirtelen gyorsulása, tengelyének eltolódása és az északi mágneses pólus elmozdulásának kezdete (136. ábra).

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>

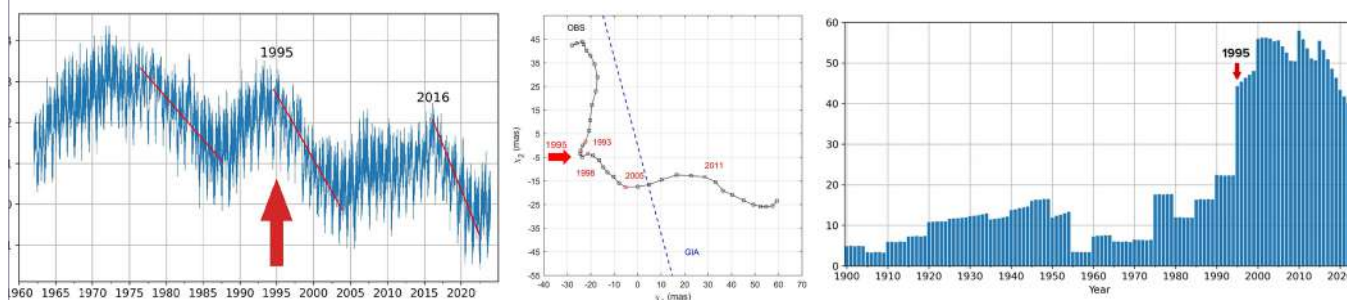
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140-158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

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). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



A bolygó forgásának hirtelen és meredek gyorsulása, amelyet a Párizsi Obszervatórium Földorientációs Központja rögzített.

Adatforrás:

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory Nap hossz – Föld orientációs paraméterek. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

A Föld forgástengelyének rendellenes változásai: hirtelen irányváltozás és 17-szeres sebességnövekedés.

Forrás: 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>

Az északi mágneses pólus mozgása, amely korábban 10 km/év sebességgel tolódott el, hirtelen 55 km/évre gyorsult, és pályáját a szibériai Tajmir-félsziget felé változtatta.

Adatforrás:

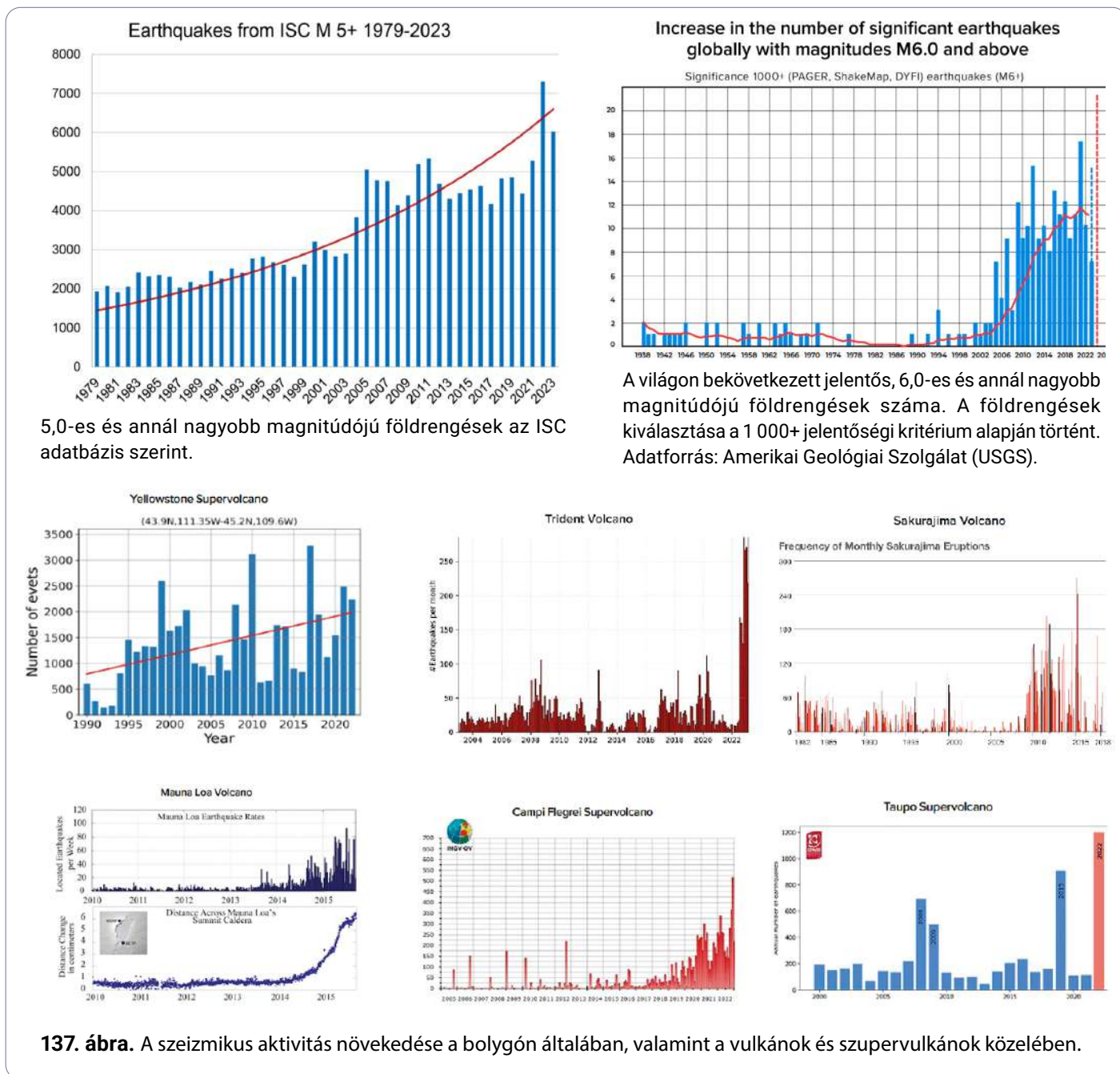
NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

136. ábra. A Föld geofizikai paramétereinek változásai 1995-ben.

Ezek az anomáliák a Föld magjában bekövetkezett mélyreható változásokra utalnak, amelyek több kvadrillióval több energiát igényelnek, mint amennyit az emberiség a civilizáció fennállása óta összesen előállított. Ennek oka egy külső kozmikus hatás, amely a Föld magjára, valamint a Naprendszer többi bolygójának magjára is hatással van. Ez a külső hatás fokozza a köpeny olvadását, ami annak felszínhez való közelebb kerüléséhez vezet. Ennek eredményeként láncreakció indul be: fokozódik a vulkáni és szeizmikus aktivitás, nő a föld belsejéből származó hő és a természeti kataklizmák száma világszerte.

1995 óta észlelhető a szeizmikus aktivitás jelentős növekedése, amely a földrengések gyakoriságának, erejének és energiájának növekedésével jellemezhető. Ez a tendencia mind a szárazföldön, mind az óceánokban észlelhető, beleértve azokat a régiókat is, ahol korábban gyakorlatilag nem regisztráltak szeizmikus aktivitást. Mindez, a változások globális mértékére utal. Fontos megjegyezni, hogy a 5,0-es és annál nagyobb magnitúdójú földrengések számának növekedése nem a hálózat vagy az érzékelők érzékenységének növekedésével függ össze, hanem valóban a Föld geodinamikai változásait tükrözi. A Nemzetközi Szeizmológiai Központ összesített adatai szerint az ilyen földrengések száma az elmúlt 25 évben jelentősen megnőtt, és továbbra is növekszik (137. ábra).

Ezenkívül növekszik a szeizmikus aktivitás a vulkánok közelében, beleértve a szupervulkánokat, mint például a Yellowstone az Egyesült Államokban, a Flegreai mezők Olaszországban³⁶³ és a Taupo Új-Zélandon,³⁶⁴ valamint más vulkánok, amelyek kitörései az elmúlt 12 ezer éves ciklusokban történtek (137. ábra).



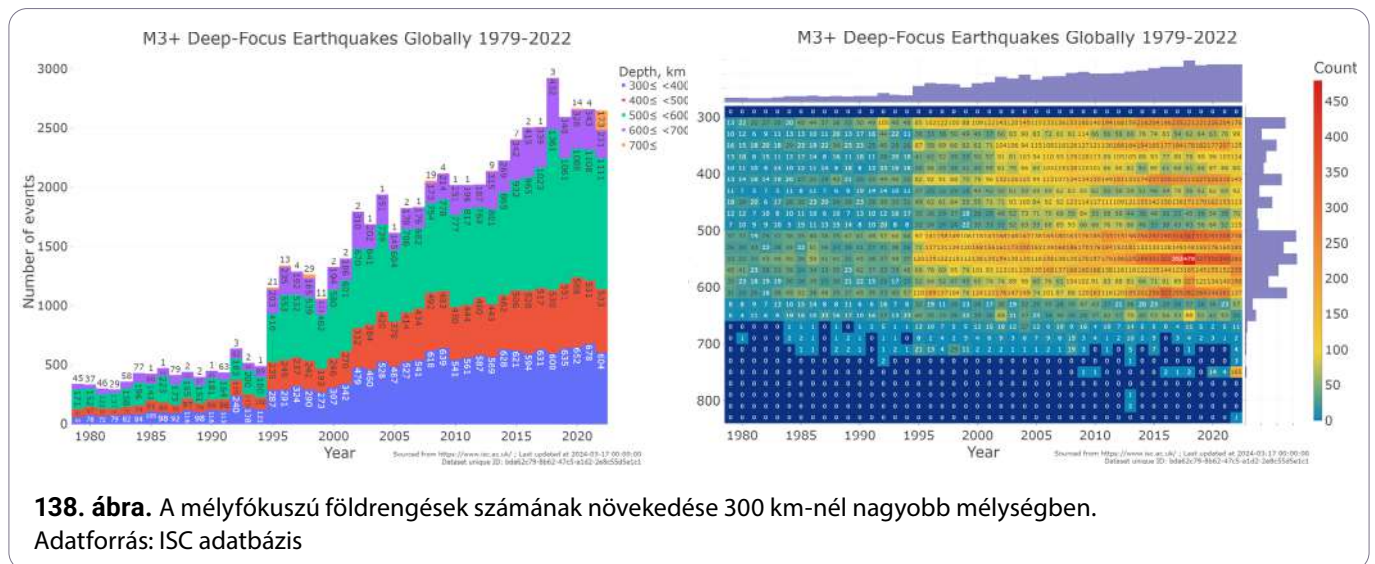
Egyre több napon fordul elő vulkánkitörés az év során, és a kilövellt láva gyakran rendellenes tulajdonságokkal rendelkezik: túlmelegedett és szokatlan kémiai összetételű, ami jellemző a mélyebb rétegekből származó magmára.

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/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Különös aggodalmat kelt a mélyfókuszú földrengések számának növekedése, amelyek 300 km-nél nagyobb mélységben, néha akár 750 km-re a Föld felszíne alatt is előfordulnak. Ezek a jelenségek nem a földkéregben, hanem a köpenyben keletkeznek, ahol a köpeny anyaga nem omladozik, hanem deformálódik, mintha gyurma lenne, ami szokatlanná teszi az ilyen földrengések természetét. Mivel ezek a földrengések extrém nyomás és magas hőmérséklet mellett következnek be, arra lehet következtetni, hogy ezek a hatalmas robbanások a köpenyben energiájukban összehasonlíthatók a Föld köpenyében egyidejűleg felrobbanó számos atombomba energiájával.

Ezenkívül, a mélyfókuszú földrengések gyakran erős szeizmikus rengéseket váltanak ki a földkéregben, fokozva azok pusztító hatását. 1995 óta ilyen mélységi földrengések számának gyors növekedése figyelhető meg (138. ábra), ami egybeesik más geodinamikai anomáliákkal, amelyek ugyanebben az időszakban kezdődtek. A köpenyen belüli robbanások számának növekedése a bolygó mélyén lévő energia növekedését és a köpeny intenzív olvadását jelzi, ami nagyszabású vulkánkitörésekhez vezethet.



A centrifugális erők hatására az 1995 óta a köpenyben olvadt magma aktívan emelkedni kezdett a Föld felszínére, belülről a szokásosnál nagyobb mértékben kimosva és felmelegítve a litoszférát. A magma emelkedése a bolygó belsejéből származó geotermikus áramlás növekedéséhez vezet, és aktiválja a nyugat-antarktiszi, közép-grönlandi és szibériai gleccserek alatti magmatikus köpenycsónákat. Ennek eredményeként a gleccserek és az örök fagyok felülről lefelé gyorsítottan olvadni kezdenek.^{365, 366, 367}

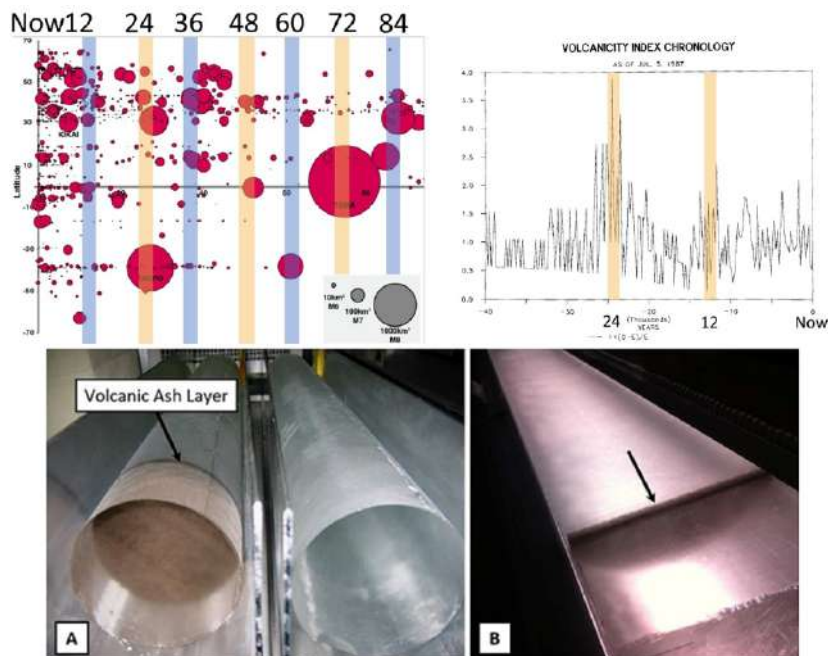
Így az óceán felmelegedésének oka a felemelkedő magma, amely különösen erősen melegíti az óceáni kéreg, amely vékonyabb és sebezhetőbb, mint a kontinentális.

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>

A geológiai és jégmagokból származó történelmi adatok azt mutatják, hogy a Föld 12 000 évente hasonló katasztrofális ciklusokkal szembesült. Minden második ciklusban, azaz 24 000 évente, a bolygókatasztrófák pusztítóbb jellegűek (139. ábra).



139. ábra. A grafikonok a 12 000 évente bekövetkező katasztrofális vulkáni aktivitást és a 24 000 évente bekövetkező még intenzívebb eseményeket szemléltetik.

Források: 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>

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>

A Föld éppen egy ilyen ciklusba lépett most. Ezúttal azonban az óceánok mikro- és nanoműanyaggal való antropogén szennyezése miatt fokozódott a hőegyensúlyhiány a köpenyben, ami a mélyfókuszú földrengések számának növekedéséhez, új magmatikus gócek kialakulásához és a bolygó általános instabilitásához vezet. Éppen ezért a kataklizmák jelenleg sokkal gyorsabban és erősebben növekszenek, mint a korábbi ciklusokban. Valójában az óceán szennyezése lett a fő oka annak, hogy a Föld nem képes megbirkózni ezzel a ciklussal. Fontos megérteni, hogy az óceán mikro- és nanoműanyaggal való szennyezésének megoldása lassíthatja a kataklizma kialakulását, de nem állíthatja meg.



A Föld belsejének geodinamikai aktivizálódásáról a jelen időszakban, a 12 000 éves kataklizmaciklusról és e probléma megoldásának módjairól szóló információkat részletesebben megismerheti „**A FÖLD ÉGHAJLATI ESEMÉNYEINEK ELŐREHALADÁSÁRÓL ÉS AZOK KATASZTROFÁLIS KÖVETKEZMÉNYEIRŐL**” című jelentésben.

Amint azt a geodinamikai változásokra vonatkozó 12 000 éves ciklusban végzett többéves interdiszciplináris kutatások kimutatták, az óceán elsődleges felmelegedésének oka a felemelkedő magma, amely különösen erősen hat az óceáni kéregre, amely vékonyabb és sebezhetőbb a kontinentális kéreghez képest. A Világóceán műanyaggal való szennyezése és a mikro- és nanoplasztik-részecskék felhalmozódása kritikus tényezővé válik, amely megváltoztatja az óceán hőfizikai tulajdonságait. Ezen szintetikus részecskék jelenléte az óceán vizében jelentősen csökkenti a hővezető képességét, ami megzavarja az óceán mélyebb rétegei és a felszín közötti hőcsere természetes folyamatait, de ami még kritikusabb – megzavarja a hőelvezetést a litoszféra lemezekről. A geodinamikai aktivitás növekedésének ciklusában, a 12 000 éves ciklus során, az óceán vizének hővezető funkciójában bekövetkező kritikus változás nemcsak az óceán és a légkör felmelegedését növeli, hanem a belső hőmérséklet emelkedését is. Ez a köpeny olvadásának növekedéséhez és ennek következtében még erősebb geodinamikai aktivitáshoz vezet.

Ez a Föld belsejében lévő felesleges energia felhalmozódását okozza, ami a mélyfókuszú földrengések számának növekedéséhez és új magmás fészkek gyorsabb kialakulásához vezet. Ezek a folyamatok viszont tovább súlyosbítják a bolygó instabilitását és felgyorsítják az óceán felmelegedését.

Egy veszélyes ördögi kör alakul ki:

a geodinamikai aktivitás felmelegíti az óceánt → a felmelegedés felgyorsítja a műanyag bomlását → a megnövekedett mikroplasztik-koncentráció csökkenti a víz hővezető képességét → akadályozottá válik a hő elvezetése a mélyből → fokozódik a geodinamikai aktivitás és a földrengések gyakorisága → az óceán még jobban felmelegszi, ami még jobban felgyorsítja a műanyag mikro- és nanorészecskékké való bomlásának folyamatát.



Ez az extrém időjárási jelenségek és természeti katasztrófák gyakoriságának és erejének növekedéséhez vezet, mint például az árvizek, hurrikánok és trópusi ciklonok, amelyek ma példátlan intenzitást érnek el.

Így az óceán mikro- és nanoplasztikkal való szennyezése nemcsak jelentős károkat okoz az emberi egészségben, az ökoszisztémákban, a bioszférában és a klímarendszerben, hanem hozzájárul az óceán felmelegedésének fokozásához is. Ezen túlmenően súlyosbítja az egyébként is pusztító katasztrófákat a 24 000 éves ciklusban, amelybe a Föld most lépett. Ez példátlan kockázatokat teremt nemcsak az emberiség túlélésére, hanem magára a Föld bolygóra nézve is.

A globális ökológiai, éghajlati és geodinamikai válság megoldása nemzetközi együttműködést igényel különböző tudományágak tudósai között, sürgős és átfogó intézkedések kidolgozása és végrehajtása érdekében. Ezeknek a megoldásoknak nemcsak az óceán mikro- és nanoműanyagtól való megtisztítását és az emberi egészségre gyakorolt negatív hatásainak csökkentését kell magukban foglalniuk, hanem a geodinamikai fenyegetések felszámolására irányuló alapvető megoldások kidolgozását is. A javasolt megoldásokkal a vonatkozó jelentésekben lehet megismerkedni:



**„A FÖLD ÉGHAJLATI ESEMÉNYEINEK
ELŐREHALADÁSÁRÓL ÉS
AZOK KATASZTROFÁLIS
KÖVETKEZMÉNYEIRŐL”**

című jelentésben.



**“A SZIBÉRIAI KÖPENYCSÓVA
KITÖRÉSÉNEK VESZÉLYÉRŐL
ÉS A PROBLÉMA MEGOLDÁSI
LEHETŐSÉGEIRŐL”**

című jelentésben.

KÖVETKEZTETÉSEK. A NANOMŰANYAG – EGY KIHÍVÁS, AMELYET NEM LEHET FIGYELMEN KÍVÜL HAGYNI

A műanyagszennyezés problémája, különösen a mikro- és nanoplasztik (MNM) formájában, túllépett a helyi ökológiai következményeken, és többdimenziós globális fenyegetés jellegét öltötte. A modern kutatások megerősítik az MNM közvetlen és közvetett hatását is a klímarendszerre, az ökoszisztémák stabilitására és az emberi egészségre. A mikroplasztik részecskék képesek behatolni az élő szervezetekbe, gyulladásos reakciókat okozni, megzavarni a hormonális egyensúlyt, az immun- és reprodukzív rendszerek működését, valamint megváltoztatni a környezet fizikai-kémiai tulajdonságait – a tengervíztől a légkörig.

Több mint 10 évvel ezelőtt a nemzetközi ALLATRA tudományos közösség képviselői felvetették a műanyagszennyezés növekvő hatását az éghajlati anomáliákra és a közegészségügyi problémák súlyosbodására. Ma ezek a hipotézisek megerősítést nyernek a vezető tudományos intézmények által végzett független kutatásokban. Az MNM ökológiai és biológiai hatásaira vonatkozó adatok gyors felhalmozódása új elemzési horizontokat nyit meg, beleértve az éghajlati minták átalakulását, a hidroszférában bekövetkező változásokat és a fenntartható fejlődés rendszerszintű kockázatainak növekedését. Különös aggodalomra ad okot, hogy még a nanoplasztik mikroszkopikus koncentrációi is kaszkádhatásokat indíthatnak el a bioszférában és az éghajlatban. A műanyag már nem pusztán szilárd hulladék – aktív ágense lesz az élőhely és az emberi szervezet átalakulásának. Terjedésének következményei már most is megmutatkoznak. Az MNM problémája nemcsak az ökológiát és az orvostudományt érinti, hanem a nemzetbiztonság, a makrogazdaság és a nemzetközi kapcsolatok kontextusában is megfontolást igényel.

E fenyegetés elleni stratégia részeként az ALLATRA Mozgalom két kulcsfontosságú irányt javasolt, amelyek alkalmazott és prognosztikai potenciállal is rendelkeznek. Az első a légköri vízgenerációs (LVG) technológiák nagyszabású bevezetése, amelyek egyszerre képesek megoldani az édesvízhiány problémáját, és hozzájárulnak a légkör és az óceánok megtisztításához a mikroplasztik részecskéktől. Azonban az LVG-technológiák megvalósítása megköveteli a lehetséges kockázatok figyelembevételét – különösen az MNM koncentrációjának növekedését a levegőben, és ennek következtében az emberre gyakorolt inhalációs hatás fokozódását. Ez megköveteli a rendkívül hatékony szűrő- és védelmi rendszerek párhuzamos fejlesztését.

A második stratégiai irány, amelyet szintén az ALLATRA javasolt, a nanoplasztik elektrosztatikus töltésének semlegesítésére vagy árnyékolására szolgáló módszerek kidolgozása – ez a toxicitásának egyik fő tényezője. A töltött nanoplasztik részecskék aktívan kölcsönhatásba lépnek a sejtmembránokkal, fehérjékkel és genetikai anyaggal, stabil molekuláris kötéseket képezve. Az ilyen részecskék áthatolnak a biológiai gátakon, beleértve a vér-agy gátat, felhalmozódnak a szövetekben, és sejtkárosodások kaszkádját indítják el – az oxidatív stressztől az apoptózisig. A mikro- és nanoműanyag elektrosztatikus aktivitásának csökkentése jelentősen mérsékelheti ártalmasságát, és lassíthatja a felhalmozódását a szervezetben.

A jelentés szerzői becslései szerint az elektrosztatikus töltés árnyékolása vagy semlegesítése legalább 50%-kal csökkentheti az MNM potenciális veszélyét, ami kritikusan fontossá teszi ezt a kutatási irányt. Ez megteremti a szükséges időbeli rést az átfogóbb diagnosztikai, megelőzési és az MNM emberi szervezetből való eltávolítására, valamint a bioszféra megtisztítására szolgáló stratégiák kidolgozásához. Ebben a kontextusban különösen nagy jelentőséget kapnak a biofizika, a nanotechnológia és a molekuláris toxikológia területén végzett kutatások.

Így, az MNM fenyegetésére való hatékony reagálás nem csupán egyedi intézkedéseket, hanem egy globális és interdiszciplináris megközelítést igényel. Szükséges a tudományos kutatások, technológiai megoldások, normatív szabályozás és nemzetközi együttműködés terén tett erőfeszítések koordinálása. A műanyagszennyezést nem szűk ökológiai problémaként kell kezelni, hanem rendszerszintű kihívásként, amely érinti az egészséget, a biztonságot, az erőforrás-ellátottságot és a társadalmi infrastruktúra stabilitását.

A jelen jelentés egyedisége az átfogó interdiszciplináris megközelítésben rejlik, amely a fizika, kémia, biológia és orvostudomány adatait egyesíti. Ez a szintézis lehetővé teszi, hogy az MNM problémáját civilizációs kihívásként kezeljük, amely több szintű megoldásokat igényel. Jelenleg a világ közössége fokozatosan tudatosítja e fenyegetés valós méretét. Annak ellenére, hogy nincs univerzális megoldás, éppen az arra való törekvés és a tudományos együttműködés fejlesztése határozhatja meg a válság leküzdéséhez vezető utat. A fő kihívás nem a megoldás hiányában rejlik, hanem abban a képességben, hogy felfedezzük azt a kritikus pont bekövetkezése előtt.

Források

- Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Accessed May 1, 2025).
- Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>
- Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>
- Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Accessed May 1, 2025)
- Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>
- AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Accessed May 1, 2025).
- Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).
- Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Accessed May 1, 2025).

- Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).
- Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>
- Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Accessed May 1, 2025).
- Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>
- Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 2025).
- Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>
- Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>
- Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>
- Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).
- Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>
- Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).
- Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>
- Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>
- Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).
- Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.
- Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>
- Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>
- Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Accessed May 1, 2025).

- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1–425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).
- Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Accessed May 1, 2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

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

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

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

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Accessed May 1, 2025)

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 2025).

[Fanpage.it](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](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 2025).

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

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

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 2025).

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

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

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

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

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

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

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

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Accessed May 1, 2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

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

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

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Accessed May 1, 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

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

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

- Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>
- Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>
- Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>
- Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>
- Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>
- Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>
- Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
- Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Accessed May 1, 2025).
- Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>
- Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Accessed May 10, 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Accessed May 1, 2025).

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

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

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

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Accessed May 1, 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Accessed May 1, 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? *Science* 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. *Water Resour* 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

- Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>
- Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>
- U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).
- United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025).
- United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Accessed May 1, 2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Accessed May 1, 2025).
- University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025)
- University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSUP.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>
- Zajác, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>