

მოსახლეობა

მიკროპლასტიკი
და ნანოპლასტიკი

ნანოპლასტიკები ბიოსფეროში

მოლეკულური ზემოქმედებიდან
კლანტარული კრიზისამდე

ფისებისა და ბოჭკოების წლიური
წარმოების მოცულობა

მილიონი
ტონა

1000

800

600

400

200

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

მოსახება

ნანოპლასტიკები ბიოსფეროში

მოლეკულური ზემოქმედებიდან
კლანტარული კრიზისამდე

ავტორები



საერთაშორისო საზოგადოებრივი მოძრაობა „ალატრა“

ინსტიტუციური მიმოხილვა
აკადემიური თანამშრომლობა



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

ბოლივიის „სან პაბლოს“ კათოლიკური უნივერსიტეტი (UCB)
გარემოსდაცვითი ინჟინერიისა და კვლევის ფაკულტეტი



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

ავტონომიური უნივერსიტეტი ზუან მისაელ სარაჩო (UAJMS)
კვლევის, მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

კვლევის მონაწილე



CREATIVE
SOCIETY

საერთაშორისო პროექტი „შემოქმედებითი საზოგადოება“

აბსტრაქტი.....	5
პლასტიკური დაბინძურების შედეგები: მიკრო და ნანოპლასტიკები (MNP), როგორც პლანეტარული კრიზისის ახალი ფაქტორი.....	7
პლასტიკური ნარჩენების გლობალური წარმოების რაოდენობრივი შეფასებები და ტენდენციები.....	7
დიდი წყნარი ოკეანის ნაგვის კონტინენტი.....	12
როგორ იქმნება მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკები.....	12
MNP-ების გავრცელება გარემოში.....	18
მიკრო- და ნანოპლასტიკური დაბინძურების გარემოსდაცვითი და კლიმატური შედეგები.....	23
როგორ არღვევენ მიკროპლასტიკი და ნანოპლასტიკი ეკოსისტემებს მოლეკულურ დონეზე.....	23
მიკრო- და ნანოპლასტმასების გავლენა კლიმატზე.....	46
მიკრო- და ნანოპლასტმასების გავლენა ადამიანის ჯანმრთელობაზე.....	71
მნპ,(მიკრო და ნანო პლასტიკები) როგორც ეპიდემიების განვითარების ახალი რისკ-ფაქტორი 21-ე საუკუნეში.....	71
მნპ ტოქსიკურობის მოლეკულური მექანიზმები. დნმ-ის, მიტოქონდრიების და უჯრედის მემბრანების დაზიანება.....	72
მნპ-ის მონაწილეობა ნაადრევი დაბერებისა და ონკოგენეზის მექანიზმებში.....	84
ჰორმონალური სისტემის დესტაბილიზაცია მნპ-ის გავლენით.....	87
ნანოპლასტიკის ელექტროსტატიკური მუხტი, როგორც ადამიანის ორგანიზმისთვის მისი ტოქსიკურობის გაზრდის ძირითადი ფაქტორი.....	93
მნპ-ის სისტემური ეფექტები ადამიანის ორგანოებსა და ფუნქციურ სისტემებზე.....	100
სასუნთქი სისტემის დაზიანების მექანიზმები მნპ-ის შესუნთქვის დროს.....	101
მნპ-ის ნეიროტოქსიკური ეფექტები. ცენტრალური და პერიფერიული ნერვული სისტემის დაზიანება.....	102
მნპ-ის მონაწილეობა გულ-სისხლძარღვთა დაავადებების პათოგენეზში.....	114
მნპ-ით გამოწვეული კუჭ-ნაწლავის ტრაქტის დარღვევა.....	116
მნპ-ის გავლენა იმუნურ სისტემაზე.....	117
მნპ-ის ონკოგენური ეფექტები. მუტაციებისა და მეტასტაზების განვითარების მექანიზმები.....	120
მნპ-ის გავლენა კალციუმის მეტაბოლიზმსა და ძვლის სტრუქტურაზე.....	121
მნპ-ის ზემოქმედებასთან დაკავშირებული რეპროდუქციული დარღვევები.	
უნაყოფობა და ერექციული დისფუნქცია.....	122
მნპ-ს შედწევა პლაცენტარულ ბარიერში და მისი გავლენა განვითარებად ორგანიზმზე.....	126
მნპ-ს ზემოქმედების შედეგები და მისი კავშირი თანდაყოლილ ანომალიებთან.....	130
დასკვნები და პერსპექტივები. შესაძლებელია თუ არა მნპ-ს ადამიანის ჯანმრთელობაზე ზემოქმედების შემცირება?.....	133
პლასტმასის დაბინძურების მინიმოზაციის თანამედროვე მიდგომების ანალიზი.....	134
წყლის ეკოსისტემებიდან მსხვილი პლასტმასის მოცილების ტექნოლოგიები.....	134
მიკრო- და ნანოპლასტმასების გაწმენდის მიმდინარე მეთოდები.....	139
ALLATRA-ს სამეცნიერო საზოგადოების მიდგომები მიკრო- და ნანოპლასტმასების ეპიდემიასთან ბრძოლის.....	142
ატმოსფერული წყლის გენერატორების (AGV) ტექნოლოგიები ოკეანის მნპ-ებისგან გასაწმენდად.....	142
მიკრო- და ნანოპლასტმასების ტოქსიკურობის შემცირების ინოვაციური სამეცნიერო მიდგომა.....	148
ფაქტორი X. მიკრო- და ნანოპლასტმასების გავლენა სტიქიური უბედურებების ციკლის დინამიკაზე....	151
დასკვნები. ნანოპლასტმასი წარმოადგენს გამოწვევას, რომლის იგნორირებაც შეუძლებელია.....	171
წყაროები.....	173

ანოტაცია

„დედამიწა დღიურს რომ აწარმოებდეს, შავი მელნით დაწერდა გასული საუკუნის შესახებ: „პლასტმასის ხანა“. მიკროსკოპული ნაწილაკებიდან, რომლებიც აღწევნ ცოცხალი ორგანიზმების უჯრედებში, ოკეანის გიგანტურ ნაგვის კუნძულებამდე, პლასტიკური გეოლოგიური ჩანაწერის განუყოფელი ნაწილი გახდა. მაგრამ რის ფასად?

ყოველწლიურად მსოფლიოში 400 მილიონ ტონაზე მეტი პლასტმასის ნარჩენი იწარმოება, საიდანაც დაახლოებით 11 მილიონი ტონა ხვდება მსოფლიო ოკეანეებში. ოკეანეებში უკვე დაგროვდა 200 მილიონ ტონაზე მეტი პლასტმასი. ზედაპირული წყლის ნიმუშების ანალიზმა აჩვენა, რომ პლასტმასის მასა 6-ჯერ აღემატება ზოოპლანქტონის მასას. ვარაუდობენ, რომ 2050 წლისთვის ოკეანეში პლასტმასის მასა თევზის მასას გადააჭარბებს.

პლასტმასი ასობით ან თუნდაც ათასობით წლის განმავლობაში იშლება, მაგრამ ტალღების, მარილიანი წყლისა და ულტრაიისფერი სხივების ზემოქმედებით ის იშლება პატარა ნაწილაკებად - მიკრო და ნანოპლასტმასებად. ისინი ათასობით კილომეტრზე გადაადგილდებიან ზღვის ჰაერითა და ნალექით, გადაკვეთენ ქვეყნებს, კონტინენტებსა და ოკეანეებს, გროვდებიან ტყეებში და გვხვდება საკვებსა და წყალში. მიკროპლასტმასმა პლანეტის შორეულ კუთხეებამდეც კი მიაღწია, როგორიცაა მარიანას ღრმული და ევერესტის მწვერვალი.

ეს მოხსენება იძლევა სიღრმისეულ ანალიტიკურ შეფასებას ზემოქმედების პლასტმასის გარემოს დაბინძურების, ადამიანის ჯანმრთელობასა და საზოგადოების სასიცოცხლო სისტემების მდგრადობაზე ანგარიში იკვლევს მიკრო და ნანოპლასტმასების, რომლებსაც აქვთ სტატიკური მუხტი და შეიცავს ტოქსიკურ ქიმიურ ნაერთებს, გავლენას ეკოსისტემებზე. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მათ როლს ოკეანის მკავიანობის გაზრდაში, კვებითი ჯაჭვების დესტაბილიზაციასა და ბიომრავალფეროვნებისთვის საფრთხეებს. წამოყენებულია ჰიპოთეზა მიკრო და ნანოპლასტმასების წყლის თვისებების ცვლილებებზე გავლენის შესახებ, რის შედეგადაც ხდება ოკეანის დაჩქარებული დათბობა და სტიქიური უბედურებების გამწვავება.

ანგარიშში განხილული ერთ-ერთი ყველაზე აქტუალური და საგანგაშო საკითხია მიკრო- და ნანოპლასტმასების (MNP) (მნპ) გავლენა ადამიანის ჯანმრთელობაზე. მათი მცირე ზომის გამო, პლასტმასის ნაწილაკებს შეუძლიათ ბიოლოგიური ბარიერების გადალახვა, რაც იწვევს ჟანგვით სტრესს, დნმ-ის დაზიანებას, ანთებით რეაქციებს და უჯრედული ფუნქციების დარღვევას. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მნპ-ების ზემოქმედებასა და ნეიროდეგენერაციული და ნეიროფსიქიატრიული დაავადებების გაზრდილ გავრცელებას შორის პოტენციურ კორელაციას. მოხსენება აჩვენებს, რომ მნპ-ების ზემოქმედება განვითარებად ორგანიზმზე პრენატალურ და პოსტნატალურ პერიოდში იწვევს კოგნიტური ფუნქციების და ფსიქიკური ჯანმრთელობის დარღვევას, რაც სერიოზულ პრობლემას წარმოადგენს კაცობრიობის მომავლისთვის.

მიკრო- და ნანოპლასტმასების ზემოქმედებით გამოწვეული დაავადებების რაოდენობის ზრდა უკვე მნიშვნელოვნად აუარესებს მოსახლეობის ცხოვრების ხარისხს, განსაკუთრებით იმ რეგიონებში, სადაც პლასტმასის დაბინძურების მაღალი დონეა.

ანგარიში აღნიშნულია რეგიონები, რომლებიც უკვე კლასიფიცირებულია, როგორც მაღალი რისკის ზონები, ასევე ის რეგიონები, რომლებიც შედარებით უსაფრთხოდ რჩება. გაუარესებულმა მდგომარეობამ, ამ ზემოქმედებისგან დაცვის ეფექტური მეთოდების არარსებობასთან ერთად, შეიძლება აიძულოს ადამიანები დატოვონ დაბინძურებული ტერიტორიები უფრო უსაფრთხო საცხოვრებელი პირობების მოსაძებნად. ეს შექმნის წინაპირობებს უკონტროლო მასობრივი მიგრაციისთვის, რამაც, თავის მხრივ, შეიძლება გაზარდოს სოციალური დაძაბულობა, გაზარდოს დატვირთვა ურბანულ ინფრასტრუქტურაზე და გამოიწვიოს ეკონომიკის დესტაბილიზაცია.

ამრიგად, პლასტმასის დაბინძურების ეკოლოგიური პრობლემა თანდათან გადაიზრდება მაკროეკონომიკურ და გეოპოლიტიკურ პრობლემად.

მოხსენება ხაზს უსვამს მიკროპლასტიკების პრობლემის გადაჭრის აუცილებლობას, გვთავაზობს ახალ შეხედულებებს მათ გავრცელებაზე, ზემოქმედებასა და შედეგებზე. ნაშრომის უნიკალურობა მდგომარეობს ინტერდისციპლინურ მიდგომაში, რომელიც აერთიანებს მონაცემებს პლასტმასის დაბინძურების ფიზიკურ, ქიმიურ და ბიოლოგიურ ასპექტებზე. ეს მოხსენებას აქტუალურს ხდის დისციპლინების ფართო სპექტრის მკვლევარებისა და მეცნიერებისთვის, რომლებიც დაინტერესებულნი არიან კაცობრიობისა და პლანეტის უსაფრთხო მომავლისთვის მდგრადი გადაწყვეტილებების შემუშავებაში.

პლასტმასის დაბინძურების შედეგები: მიკრო- და ნანოპლასტიკი (მნკ), როგორც პლანეტარული კრიზისის ახალი ფაქტორი

პლასტმასი თანამედროვე ცხოვრების განუყოფელი ნაწილი გახდა. შესაფუთი მასალები, ჭურჭელი, ტანსაცმელი, ფეხსაცმელი, ჰიგიენური საშუალებები, სამედიცინო პროდუქტები, ტრანსპორტისა და საკომუნიკაციო აღჭურვილობა - ადამიანის გარშემო არსებული საგნების უმეტესობა პლასტმასისგან არის დამზადებული. თუმცა, ის არსებობს არა მხოლოდ მსხვილი ზომის ობიექტების სახით, არამედ მიკროსკოპული ნაწილაკების სახითაც, რომლებიც ამ პროდუქტებიდან გამოიყოფა - მიკრო- და ნანოპლასტიკები. მიკროპლასტიკი არის 5 მმ-ზე ნაკლები ზომის პლასტმასის ნაწილაკები, რომელთა დანახვა შეუიარაღებელი თვალითაც შესაძლებელია. ნანოპლასტიკს, პირიქით, აქვს 1 მიკრონზე (მეტრის მემილიონედი ნაწილი) ნაკლები ზომა, რის გამოც ამ ნაწილაკების უმეტესობა სტანდარტული მიკროსკოპითაც კი არ ჩანს.

პლასტმასის მასალები წარმოდგენილია მრავალი ტიპით, მაგრამ ისინი ყველა დაფუძნებულია პოლიმერებზე - ბუნებრივ ან სინთეზურ ნაერთებზე, რომლებიც შედგება ერთმანეთთან დაკავშირებული დიდი მოლეკულებისგან. მათი უნიკალური ქიმიური თვისებების გამო, პოლიმერები ძალიან გამძლეა და მდგრადია ზემოქმედების მიმართ.

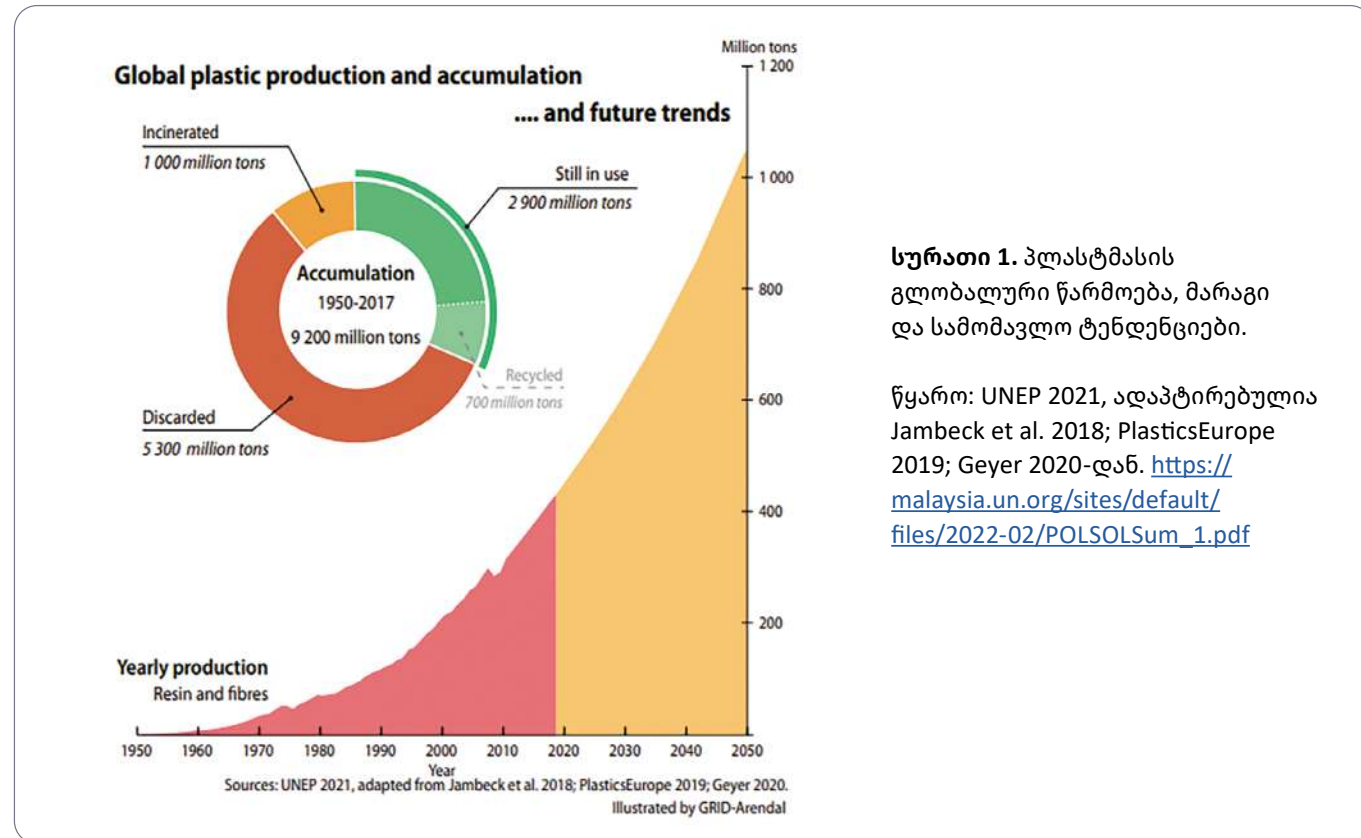
ამრიგად, პლასტმასი, მისი სიმტკიცის, მრავალმხრივობისა და დაბალი ღირებულების გამო, გახდა მასობრივი წარმოების მთავარი მასალა, მათ შორის ერთჯერადი ნივთებისთვის.¹ მაგრამ პლასტმასის ნარჩენების არასწორმა მართვამ პლასტმასი მსოფლიოში ყველაზე მნიშვნელოვან დამაბინძურებლად აქცია.

გლობალური პლასტმასის ნარჩენების წარმოების რაოდენობრივი შეფასებები და ტენდენციები

1950-იანი წლებიდან მოყოლებული, მსოფლიოში დაახლოებით 9.2 მილიარდი ტონა პლასტმასი ნაწარმოებია. აქედან 2.9 მილიარდი ტონა ამჟამად გამოიყენება, მათ შორის 2.7 მილიარდი ტონა პირველადი პლასტმასი და დაახლოებით 0.2 მილიარდი ტონა გადამუშავებული მასალა. 5.3 მილიარდი ტონა ნაგავსაყრელებზე აღმოჩნდა, ხოლო 1 მილიარდი ტონა დაიწვა. ასევე ცნობილია, რომ 1.75–2.5 მილიარდი ტონა „არასწორად მართული“ ითვლება, რაც იმას ნიშნავს, რომ ისინი შეიძლება გარემოში უკონტროლოდ მოხვდნენ. (სურათი 1).

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

დღეისათვის, პლასტმასის პროდუქტებს დაახლოებით 640 მილიონი ტონა დამატებითი ქიმიკატი დაემატა.² UNEP-ის³ მონაცემებით, ყოველწლიურად მსოფლიოში 400 მილიონ ტონაზე მეტი პლასტმასის ნარჩენები იწარმოება.



სურათი 1. პლასტმასის გლობალური წარმოება, მარაგი და სამომავლო ტენდენციები.

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

პლასტმასის ნარჩენების მხოლოდ 9% გადამუშავდება, 19% იწვება, დანარჩენი კი გარემოში რჩება, მათ შორის ნაგავსაყრელებსა და ოკეანეებში⁴ (სურათი 2).

ნარჩენების განადგურების მეთოდების წილი	(მსოფლიო მასშტაბით, 2023)
გადამუშავება	9%
დაწვა	19%
არასწორი განადგურება	22%
დამარხვა	49%

სურათი 2. პლასტმასის ნარჩენების წლიური რაოდენობა განადგურების მეთოდის მიხედვით, 2000–2023 წწ. მონაცემთა წყარო: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

ყოველწლიურად, ოკეანეებში დაახლოებით 11 მილიონი ტონა პლასტმასი ხვდება.⁵ ეს უდრის ოკეანეში ერთზე მეტი ნაგვის სატვირთო მანქანის ყოველ წუთს ჩაყრას.

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>

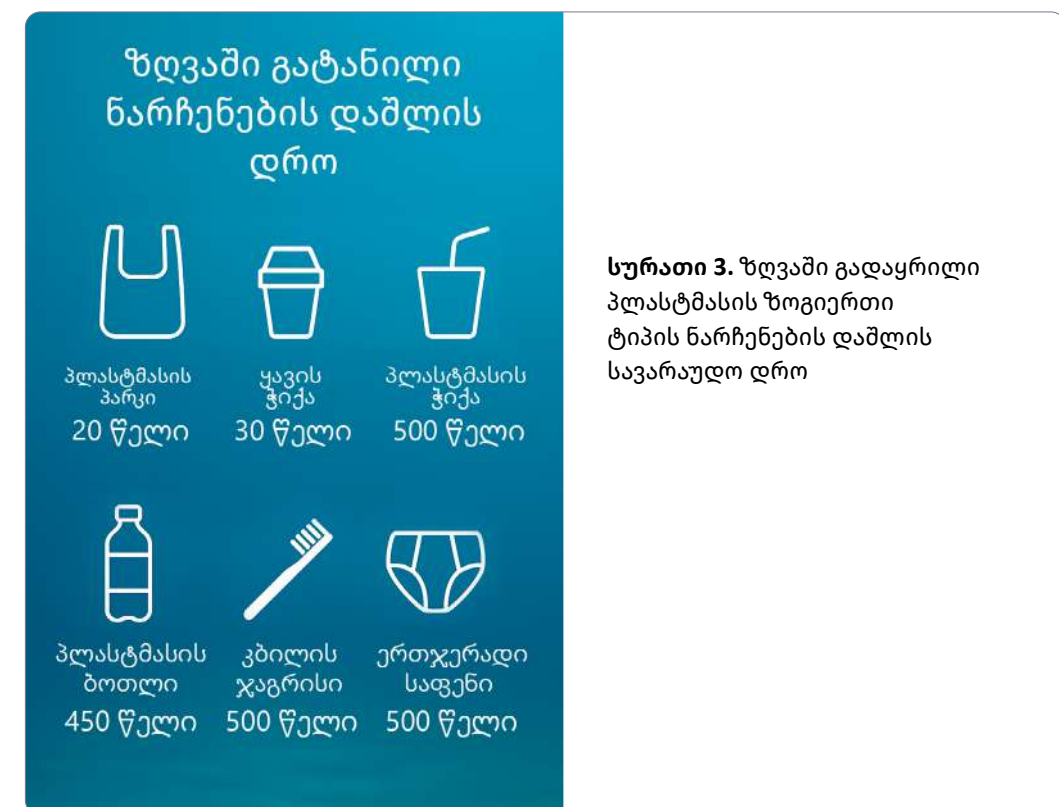
⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

ამჟამად ოკეანეებში 200 მილიონ ტონაზე მეტი დიდი პლასტმასის ნარჩენები და 35,540 ტონა მიკროპლასტიკაა.⁶ ხმელეთიდან გარემოში გამოყოფილი პლასტმასის ნარჩენების წლიური მოცულობა სხვადასხვაგვარად ფასდება, გამოყენებული ანალიზის მეთოდების მიხედვით. ჩვეული სცენარის შემთხვევაში, წყლის ეკოსისტემებში მოხვედრილი პლასტმასის ნარჩენების რაოდენობა შესაძლოა თითქმის სამჯერ გაიზარდოს, 2016 წელს წელიწადში დაახლოებით 9-14 მილიონი ტონიდან 2040 წლისთვის წელიწადში 23-37 მილიონ ტონამდე.

ანალიზის კიდევ ერთი მეთოდის თანახმად, ნარჩენების რაოდენობა შესაძლოა გაორმაგდეს, 2016 წელს წელიწადში დაახლოებით 19-23 მილიონი ტონიდან 2030 წლისთვის წელიწადში 53 მილიონ ტონამდე.⁷

კვლევის თანახმად, თუ ამჟამინდელი ტენდენციები გაგრძელდება, 2050 წლისთვის ოკეანეში დაახლოებით 12,000 მილიონი ტონა პლასტმასი იქნება⁸, რაც წონით შედარებადია ოკეანეში თევზის მთელ მასასთან (დაახლოებით 10,000 მილიონი ტონა).⁹

ტიპის მიხედვით, პლასტმასი 100-დან 1000 წლამდე იშლება (სურ. 3). ოკეანეში პლასტმასი გაცილებით ნელა იშლება და ღრმა ზღვის ბნელ და ცივ პირობებში მისი დაშლის ტემპი კიდევ უფრო მცირდება.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>

⁹Irgoien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

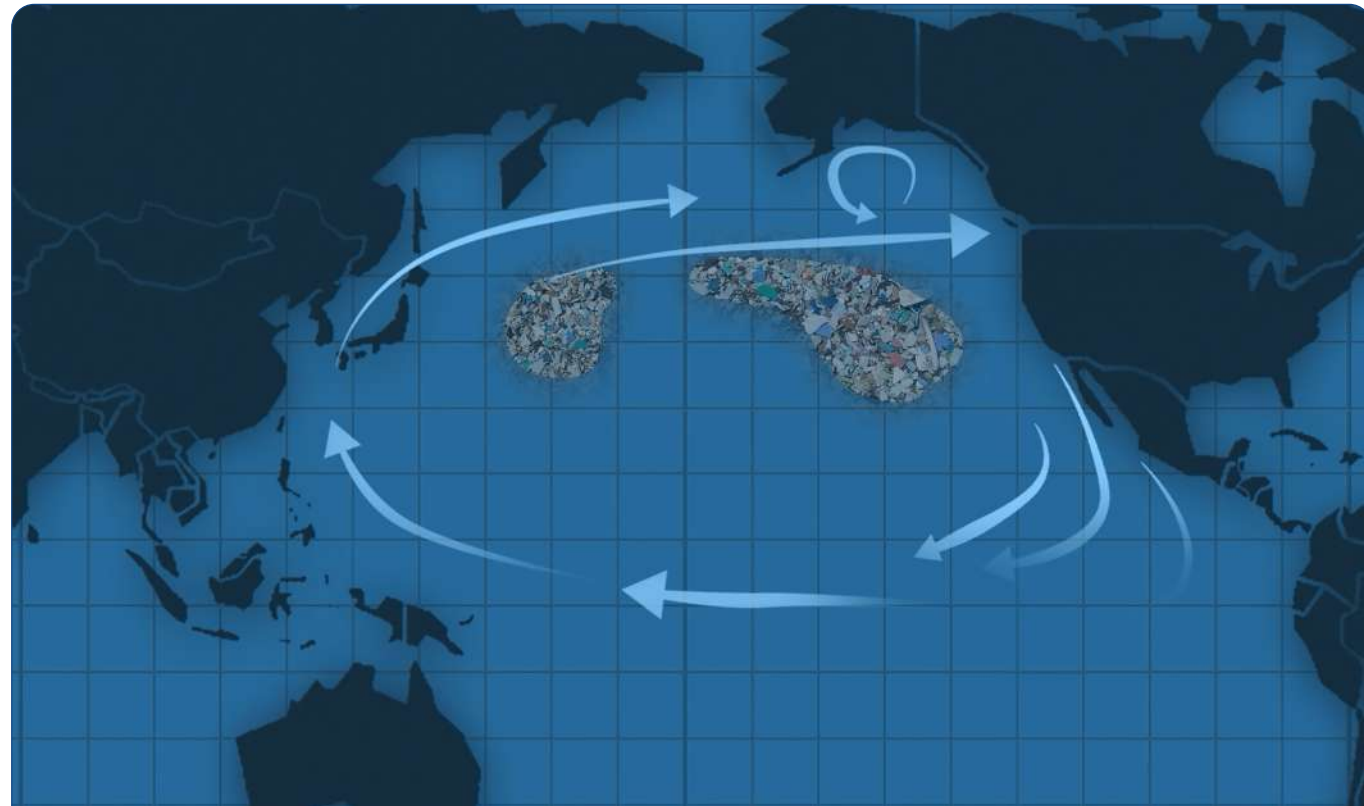
¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

გარდა იმ მასალებისა, რომლებიც დაიწვა, ყველა ჩვეულებრივი პლასტმასი, რომელიც ოდესმე გარემოში მოხვედრილა, ყველა ჩვეულებრივი პლასტმასი დაუზიანებელი რჩება, როგორც მთლიანი, ასევე ფრაგმენტების სახით.¹¹ ეს ნარჩენები პრაქტიკულად არასდროს ქრება, არამედ აგრძელებს დაგროვებას. ეს სიტუაცია შეიძლება შევადაროთ ნაგვის კონტეინერს, რომელიც მუდმივად ივსება ნარჩენებით, მაგრამ არასდროს გააქვთ. კითხვა, თუ რა მოუვა ასეთ კონტეინერს ერთ თვეში, ასახავს პლასტმასის ნარჩენების გლობალური დაგროვების პრობლემის მასშტაბებს.

დიდი წყნარი ოკეანის ნაგვის კონტინენტი

პლასტმასის ნაგავი წყლის სიღრმეში და მის ზედაპირზე იჭერს ოკეანის დინებებს, გადააქვს ოკეანის ცენტრალურ რეგიონებში და ქმნის უზარმაზარ დაგროვებას, რომელსაც „კუნძულებს“ უწოდებენ.

„წყნარი ოკეანის დიდი ნაგვის კონტინენტის“ პლანეტაზე პლასტმასის ყველაზე დიდი კონცენტრაციაა და სტაბილურ ზრდას აჩვენებს (სურათი 4). ნაგვის ზონის ფართობი ჩრდილოეთ ამერიკასა და იაპონიას შორის უზარმაზარ ტერიტორიას მოიცავს. 2018 წელს მისი ფართობი დაახლოებით 1.6 მილიონი კვადრატული კილომეტრი იყო¹², თუმცა ეს მაჩვენებელი შეიძლება იცვლებოდეს.



სურათი 4. წყნარი ოკეანის ნაგვის ზონის ფორმირების სქემატური დიაგრამა

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>

კვლევები აჩვენებს, რომ ნაგვის ზონის შიგთავსის 80%-მდე¹³ პლასტმასის ნარჩენებია.¹⁴ ნაგვის ზონის შიგთავსი მინიმუმ 80,000 ტონა ნაგავს შეიცავს.¹⁵ თუმცა, ეს პრობლემის მხოლოდ ხილული ნაწილია. ოკეანეში მოხვედრილი პლასტმასის 94%-მდე ზღვის ფსკერზე ხვდება.¹⁶ სწორედ აქ შეიძლება დამალული და დაგროვილი იქნას ნაგვის მნიშვნელოვანი რაოდენობა.

წყნარი ოკეანის დიდი ნაგვის ზონის ზუსტი ზომა უცნობია, რადგან ჩრდილოეთ წყნარი ოკეანის სუბტროპიკული ციკლონი ძალიან დიდია იმისთვის, რომ სრულად შესწავლილი იყოს მეცნიერულად არსებული ტექნოლოგიური შესაძლებლობებით.

ოკეანეში პლასტმასის დაგროვების დინამიკა

ინსტრუმენტული გაზომვები აჩვენებს დიდი ნაგვის უბნის მოცულობის ექსპონენციალურ ზრდას. 2015-დან 2022 წლამდე, ამ ტერიტორიაზე პლასტმასის ნარჩენების საშუალო მასა 5-ჯერ გაიზარდა.¹⁷ განსაკუთრებით შემამოფოთებელია ის ფაქტი, რომ იმავე პერიოდში მცირე პლასტმასის ფრაგმენტების რაოდენობა 10-ჯერ გაიზარდა, რაც მიუთითებს მსხვილი პლასტმასის ობიექტების ფრაგმენტაციის ინტენსიურ პროცესზე.

დიდი ნაგვის უბანი სინამდვილეში ჩვენი პლანეტის მეშვიდე „კონტინენტს“ წარმოადგენს. თუმცა, მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს ფენომენი უნიკალური არ არის. ამჟამად, სამეცნიერო საზოგადოებამ მსოფლიო ოკეანეში ნაგვის 5 დიდი დაგროვება გამოავლინა¹⁸: ორი ატლანტის ოკეანეში, ორი წყნარ ოკეანეში და ერთი ინდოეთის ოკეანეში¹⁹ (სურ. 5).

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. Marine Pollution Bulletin 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. Marine Pollution Bulletin 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

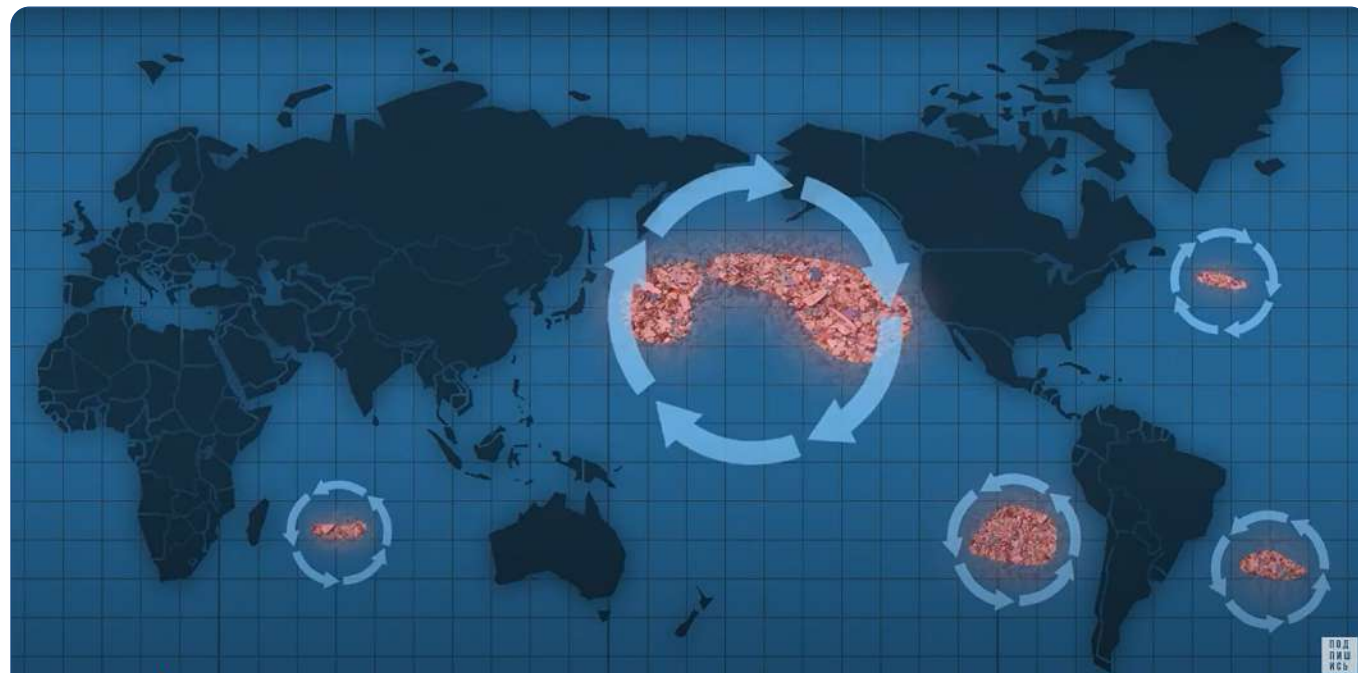
¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Sci Rep 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

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

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. Environ. Res. Lett. 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. Environ. Res. Lett. 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

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



სურათი 5. მსოფლიო ოკეანეში ხუთი ძირითადი ნაგვის დაგროვების სქემატური წარმოდგენა: ორი ატლანტის ოკეანეში, ორი წყნარ ოკეანეში და ერთი ინდოეთის ოკეანეში. ოკეანეებში მილიონობით ტონა პლასტმასი და ანთროპოგენური წარმოშობის სხვა ნარჩენები ცირკულირებს. ნაგვის გროვები კატასტროფული ტემპით იზრდება

პლასტმასის მიკრო და ნანონაწილაკების ფორმირების პროცესები

პლასტმასის ნარჩენები ძალიან მდგრადია ბიოდეგრადაციის მიმართ, მაგრამ ტალღების, მარილიანი წყლისა და მზის რადიაციის ზემოქმედებით ის იშლება მცირე ნაწილაკებად - მიკრო- და ნანოპლასტმასებად²⁰, რომლებიც შეიძლება შეუიარაღებელი თვალით უხილავი იყოს. ეს ნაწილაკები ინარჩუნებენ პოლიმერულ სტრუქტურას²¹ და დაშლის პროცესი გრძელდება ნანო დონემდე (სურ. 6-7). შედეგად, პლასტმასის ნარჩენები პლანეტის ეკოსისტემის მუდმივ კომპონენტად იქცევა.

გარდა ამისა, მიკრო- და ნანოპლასტმასები შეიცავს საშიშ ქიმიკატებს, რომლებიც პლასტმასის წარმოების პროცესში ემატება.

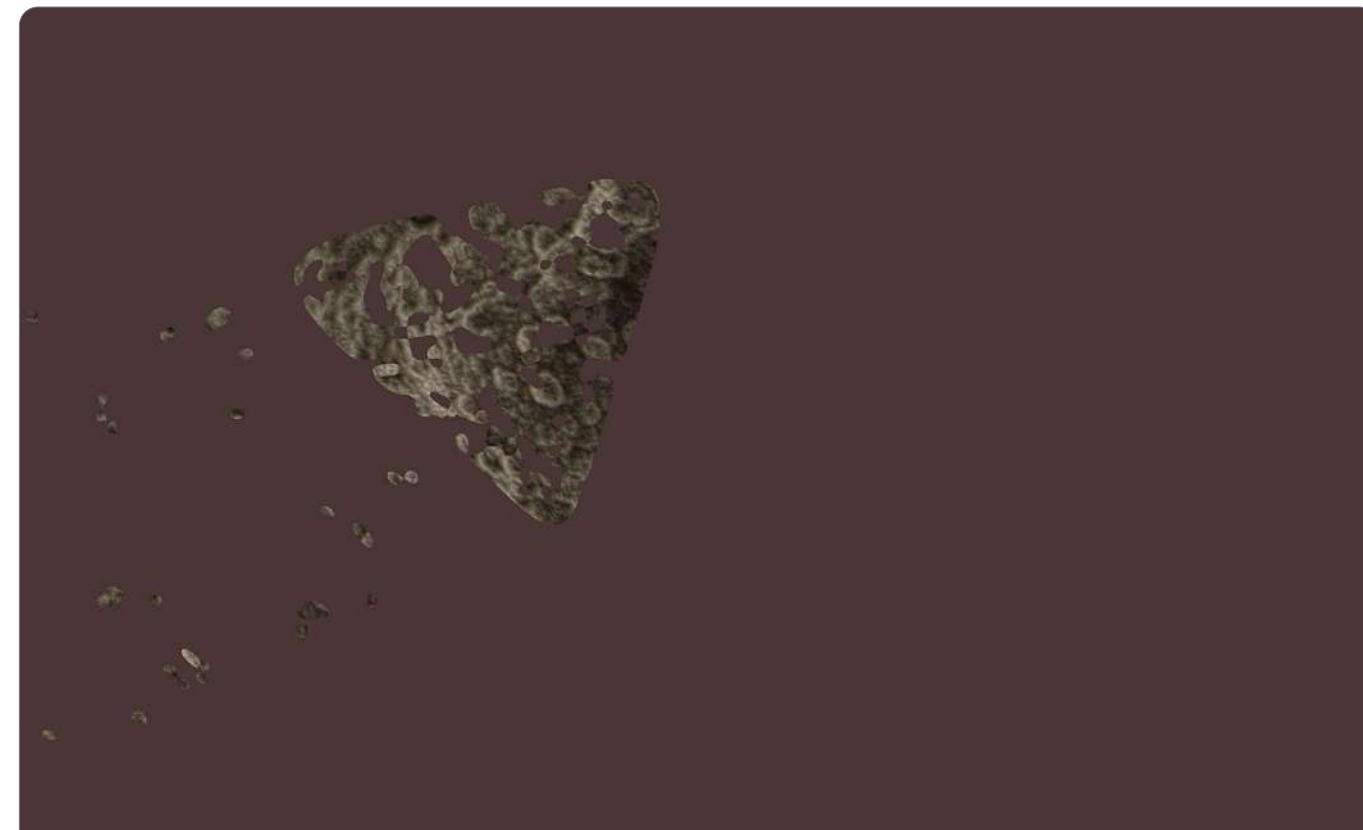
66

„პლასტმასი შეიცავს დაახლოებით 16 000 ქიმიურ ნივთიერებას. მათგან 4200-ზე მეტი ცნობილია, როგორც გარემოში მდგრადი, გროვდება ცოცხალ ორგანიზმებში, გადაადგილდება დიდ მანძილზე ან წარმოადგენს პოტენციურ საფრთხეს“, — ამბობს პროფესორი ანიკა იანკე, ჰელმჰოლცის გარემოსდაცვითი კვლევების ცენტრის გარემოსდაცვითი ქიმიკოსი.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>

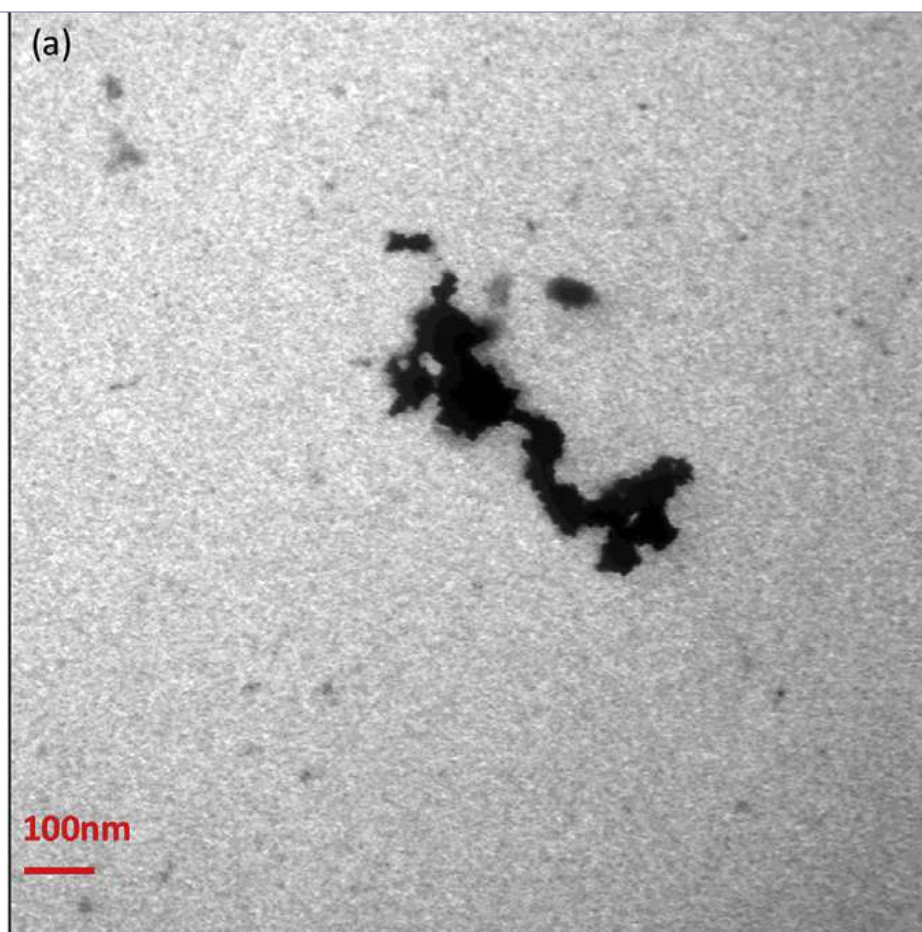
²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



სურათი 6. პლასტმასის ნაწილაკების ნანო დონემდე ფრაგმენტაციის პროცესის სქემატური წარმოდგენა პოლიმერული სტრუქტურის შენარჩუნებით

სურათი 7. გარემოსდაცვითი პოლიეთილენის ნანოპლასტიკების გამტარი ელექტრონული მიკროსკოპია, რომელიც წარმოებულია ჩრდილო ატლანტის ოკეანედან შეგროვებული მიკროპლასტიკური ნაწილაკები დეგრადირებული ულტრაიისფერი დაშლით.

წყარო: 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>



მზ-ების განაწილება ოკეანეში

პლასტმასის ყველაზე მაღალი კონცენტრაცია ნაგვის ადგილებზე გვხვდება. ეს ოკეანის ნაგავსაყრელები ქარხნების როლს ასრულებს, სადაც მიკრო და ნანოპლასტმასები განუწყვეტილად იქმნება. ისევე, როგორც ვირუსი ორგანიზმში სისხლის საშუალებით ვრცელდება, მიკროპლასტმასი ოკეანის დინებებით მსოფლიო ოკეანეებში გადადის, რაც პრობლემის გლობალურ მასშტაბს უსვამს ხაზს.

მიკროპლასტიკების აღმოჩენის ტექნიკური სირთულეების მიუხედავად, რაც ოკეანეებში მათი რაოდენობის ზუსტად განსაზღვრას ართულებს, თეორიული გამოთვლები პრობლემის მასშტაბის შეფასების საშუალებას გვაძლევს.

მიკროპლასტმასები თითქმის ყველა ოკეანის წყლის ნიმუშშია აღმოჩენილი და ზოგიერთ რეგიონში მათი კონცენტრაცია საშუალოზე ათჯერ მეტია.

ოკეანის ციკლები ხელს უწყობს მიკროპლასტმასის გლობალურ გავრცელებას, მათ შორის ისეთ შორეულ რეგიონებშიც კი, როგორიცაა არქტიკა. ყინულის ბირთვის კვლევებმა აჩვენა, რომ მიკროპლასტიკური დაბინძურების დონე არქტიკულ ოკეანეში 100-ჯერ მეტია, ვიდრე შოტლანდიის ჩრდილოეთით ატლანტიკის წყლებში ან ჩრდილოეთ წყნარი ოკეანის სუბტროპიკულ ციკლში.²³ ეს პრობლემის მასშტაბებსა და მის ტრანსსასაზღვრო ბუნებაზე მიუთითებს.

ზღვის პლასტმასის დაბინძურების გლობალური კვლევების უმეტესობა ოკეანის ზედაპირულ ფენაზეა ფოკუსირებული. 2019 წელს დადგინდა, რომ ოკეანის ზედაპირულ ფენაში 82-დან 358 ტრილიონამდე პლასტმასის ნაწილაკი იყო.²⁴

თუმცა, სულ უფრო მეტი მტკიცებულება არსებობს იმისა, რომ ღრმა წყლის ფენებში და ნალექებში მიკროპლასტიკური ნაწილაკების რაოდენობა უთვალავ ტრილიონს აღწევს.²⁵

მსუბუქი პლასტმასი ზედაპირზე ტივტივებს, ხოლო უფრო მკვრივი ან ბიოტას მიერ კოლონიზებული პლასტმასი ზღვის ფსკერზე იძირება.²⁶ შეფასებები აჩვენებს, რომ ურბანული ნარჩენებიდან პლასტმასის დაახლოებით 50%-ს ზღვის წყალზე მაღალი სიმკვრივე აქვს, რაც მის სწრაფ ჩაძირვას უწყობს ხელს. ფსკერზე ის ღრმა ზღვის დინებებით ვრცელდება და ღარებსა და ჩაღრმავებებში გროვდება. მიკროპლასტმასი ოკეანის ყველაზე ღრმა წერტილში, მარიანას ღრმულშიც კი აღმოაჩინეს²⁷ (სურ. 8–9).

²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).

<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

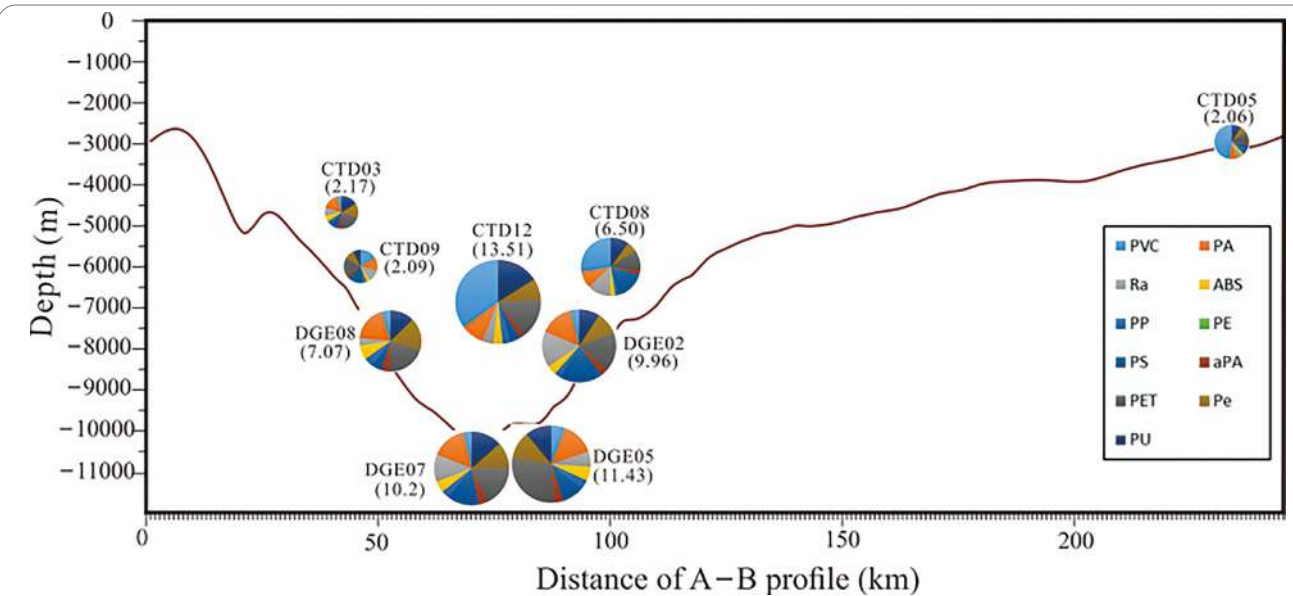
²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

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

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

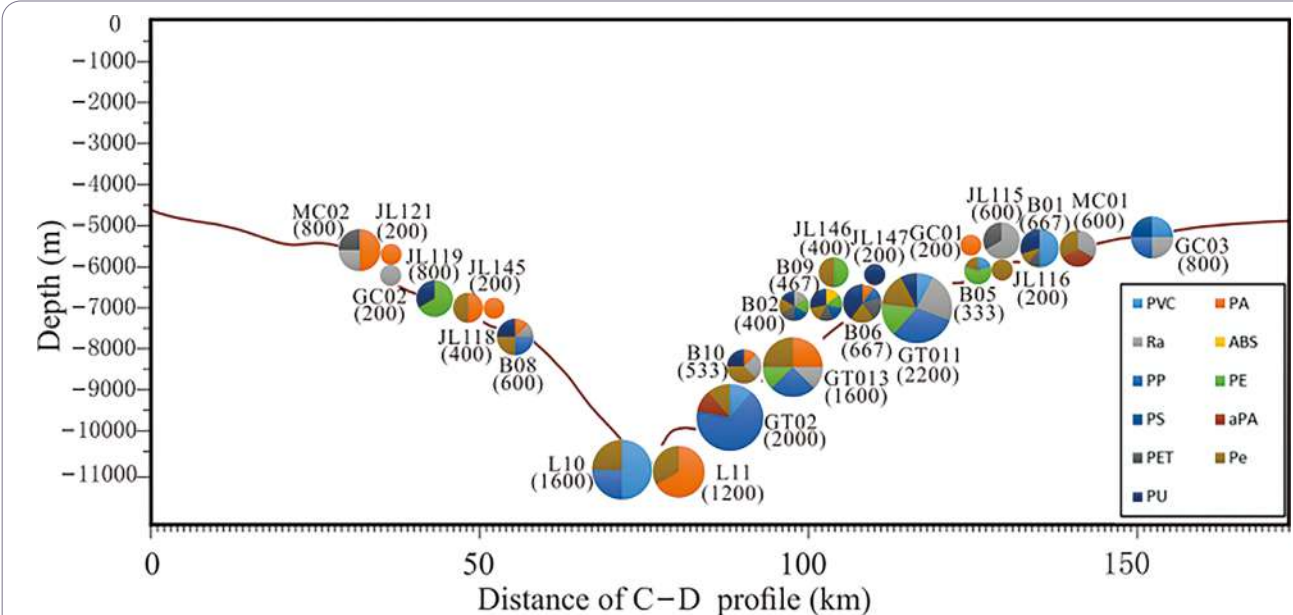
²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018).

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



სურათი 8. მიკროპლასტმასის სიმრავლისა და შემადგენლობის პროფილი მარიანას ღრმის წყლის ნიმუშებში. წრიული დიაგრამები წარმოადგენს მიკროპლასტმასის შემადგენლობებს, ხოლო ფრჩხილებში მოცემული რიცხვები წარმოადგენს მიკროპლასტიკის სიმრავლეს ლიტრზე ერთეული რაოდენობით. PVC (პოლივინილქლორიდი), PA (პოლიამიდი), Ra (ვისკოზა), ABS (აკრილონიტრილ ბუტადიენ სტიროლი), PP (პოლიპროპილენი), PE (პოლიეთილენი), PS (პოლისტიროლი), APA (არომატული პოლიამიდი), PET (პოლიეთილენ ტერეფტალატი), PE (პოლიესტერი), PU (პოლიურეთანი). X-ღერძი შეესაბამება განივი ხაზს A წერტილიდან (12 N, 142.5 E) B წერტილამდე (9.8 N, 141.43 E).

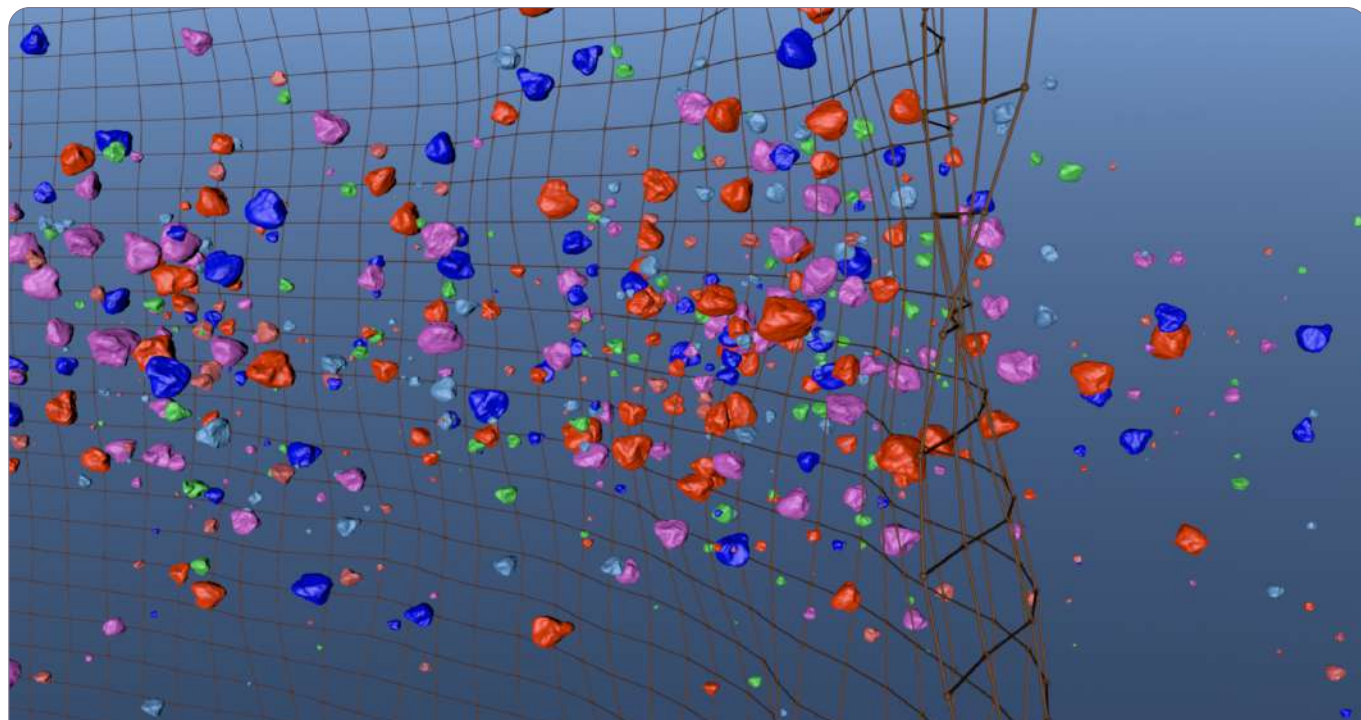
წყარო: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



სურათი 9. მიკროპლასტიკის სიმრავლისა და შემადგენლობის პროფილი მარიანას ღრმულიდან აღებულ ნალექის ნიმუშებში. წრიული დიაგრამები წარმოადგენს მიკროპლასტიკის შემადგენლობებს, ხოლო ფრჩხილებში მოცემული რიცხვები წარმოადგენს მიკროპლასტიკის ერთეულების რაოდენობას ლიტრზე. PVC (პოლივინილქლორიდი), PA (პოლიამიდი), Ra (ვისკოზა), ABS (აკრილონიტრილ ბუტადიენ სტიროლი), PP (პოლიპროპილენი), PE (პოლიეთილენი), PS (პოლისტიროლი), APA (არომატული პოლიამიდი), PET (პოლიეთილენ ტერეფტალატი), PE (პოლიესტერი), PU (პოლიურეთანი). X ღერძი შეესაბამება განივი ხაზს C წერტილიდან (12 N, 141.9 E) D წერტილამდე (10.5 N, 141.3 E).

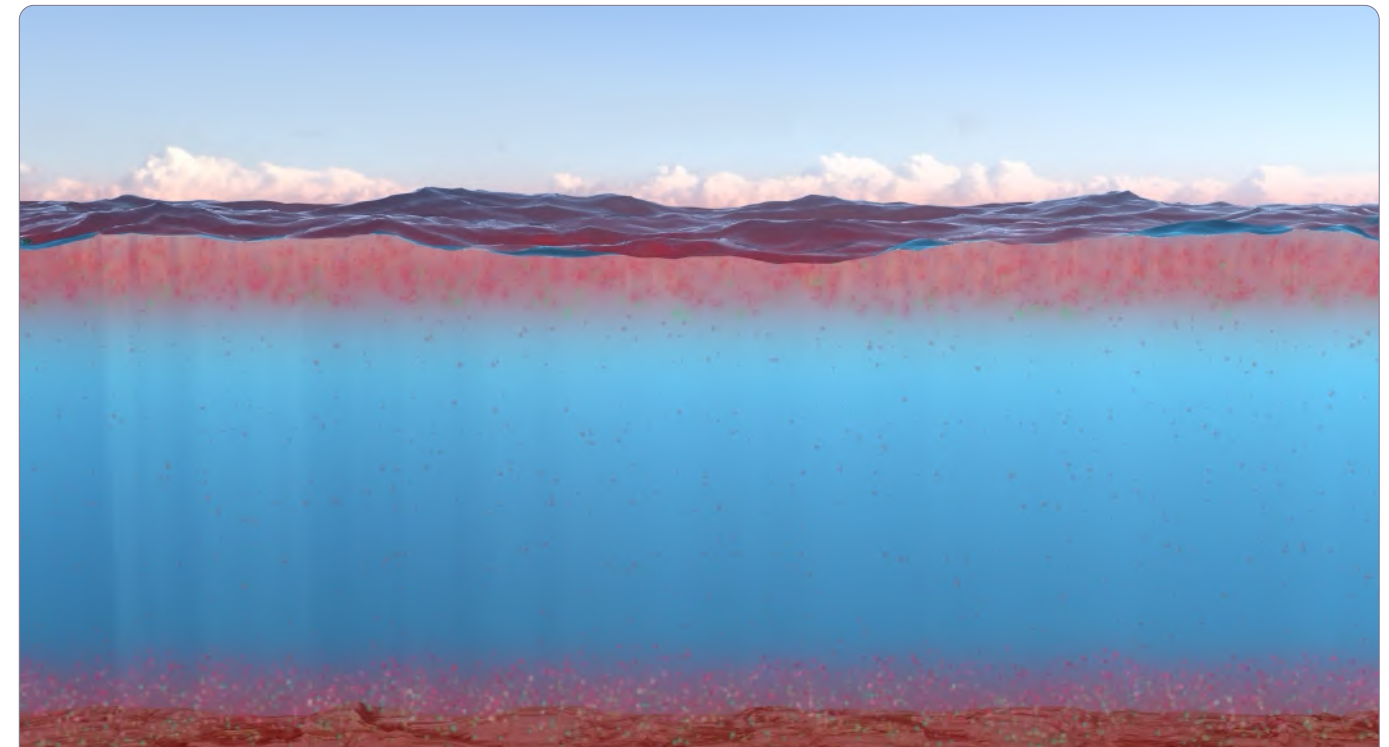
წყარო: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

სინამდვილეში, მიკროპლასტიკების ძირითადი დაგროვების ადგილი არა ოკეანის ზედაპირი, არამედ ღრმა ზღვის ფსკერია. თანდათანობით, მთელი ოკეანის ფსკერი პლასტიკის ფენით იფარება. თუმცა, ოკეანის მიკროპლასტიკური დაბინძურების შესახებ მონაცემები, სავარაუდოდ, არასაკმარისად არის შეფასებული და რეალური მდგომარეობა შესაძლოა გაცილებით უარესი იყოს. როგორც მელანი ბერგმანი, ალფრედ ვეგენერის პოლარული და საზღვაო კვლევების ინსტიტუტის (გერმანია) ბიოლოგი აღნიშნავს: „ყველას არ აქვს წვდომა დახვეწილ და ძვირადღირებულ სინჯის აღების აღჭურვილობაზე“. მისი შეფასებით, ზღვის მიკროპლასტიკური ნაწილაკების 90%-მდე შეიძლება შეუმჩნეველი დარჩეს სტანდარტული სინჯის აღების მეთოდების გამოყენებით, რადგან მათი ზომა ძალიან მცირეა აღმოსაჩენად (სურათი 10).²⁸

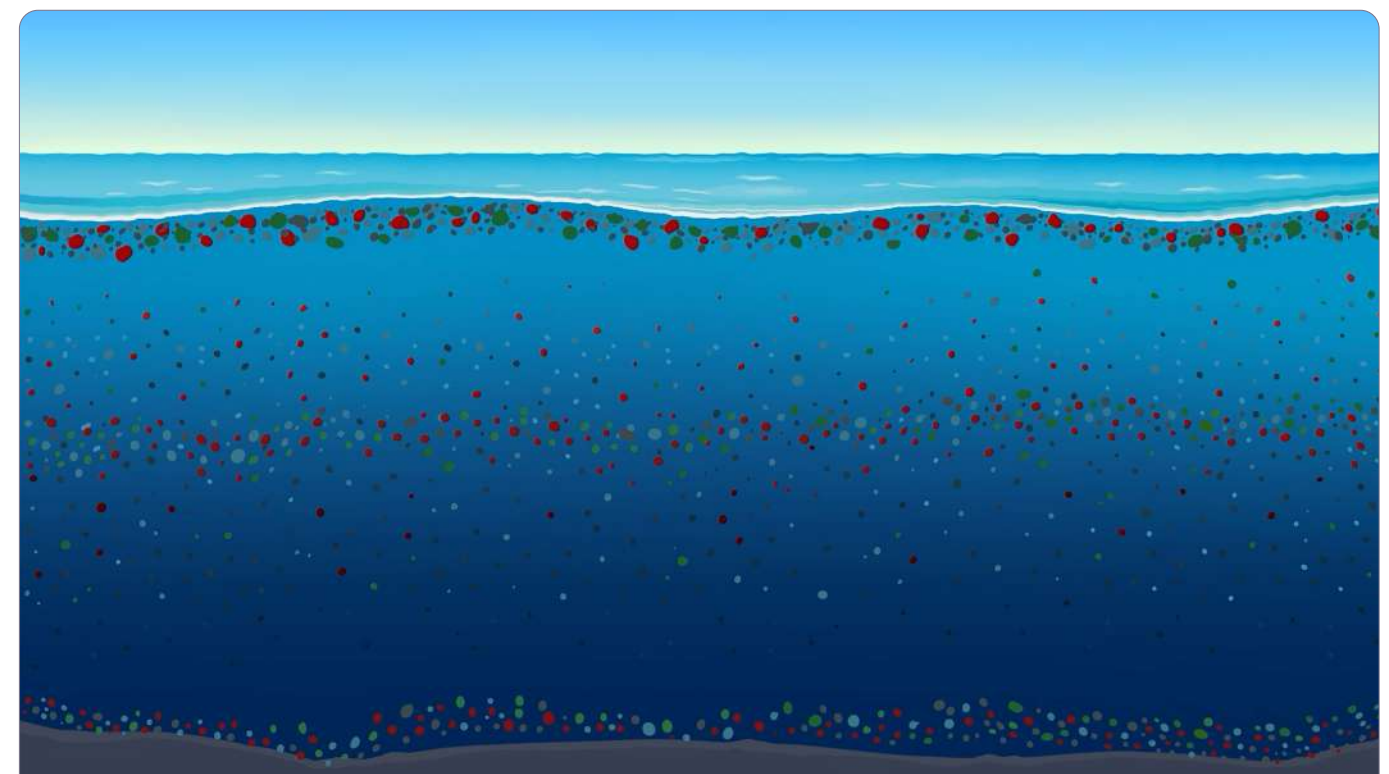


სურათი 10. მიკრო- და ნანოპლასტიკების აღების არასრულყოფილი ანალიტიკური მეთოდების სქემატური წარმოდგენა

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>



სურათი 11. მიკრო- და ნანოპლასტიკებით დაბინძურების ზედაპირული და ქვედა ფენების სქემატური წარმოდგენა

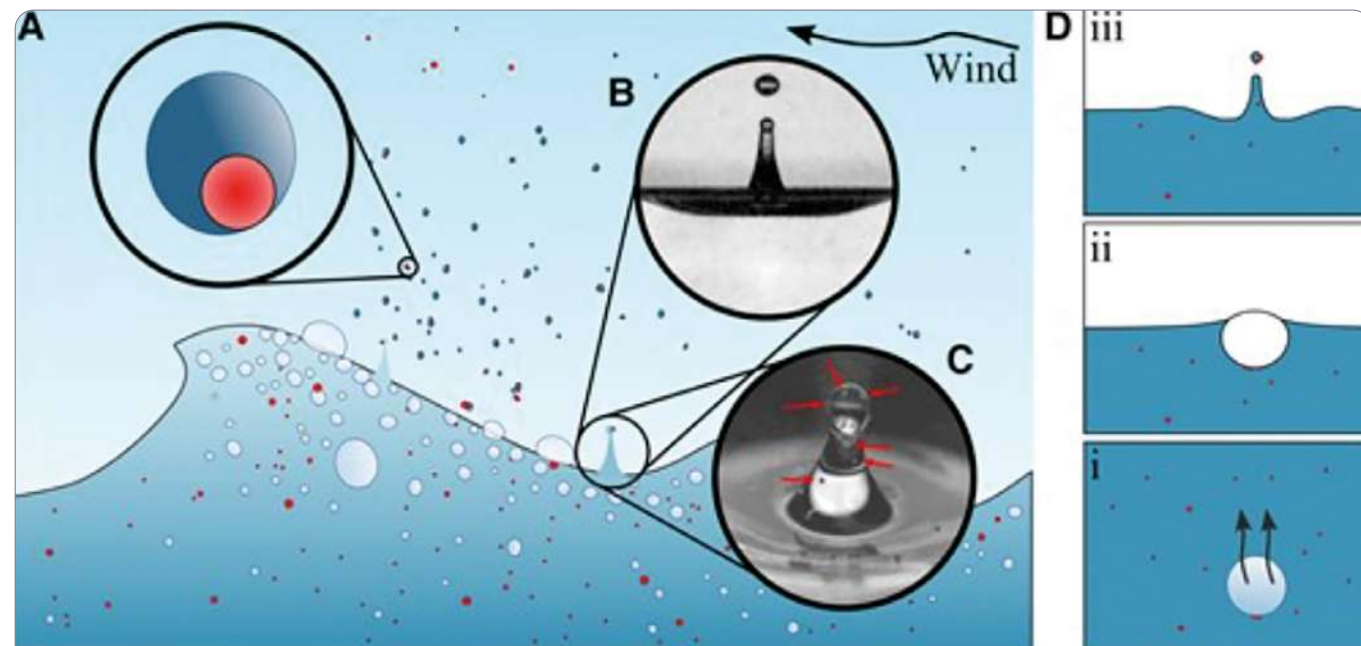


სურათი 12. მიკრო- და ნანოპლასტიკების განლაგების სქემატური წარმოდგენა ზედაპირზე, ქვედა ფენებსა და თერმოკლინის ზონაში

დაბინძურების ზედაპირული და ქვედა ფენების გარდა (სურ. 11), მიკრო- და ნანოპლასტიკების კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად იზრდება თერმოკლინიში²⁹ (სურ. 12), წყლის ფენაში, სადაც ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილებაა. ამ ფენაში მაღალი სიმკვრივის გრადიენტი ხელს უწყობს იმ ფაქტს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკების ნაწილაკები შენარჩუნებულია ამ ზონებში და დიდი ხნის განმავლობაში რჩება იქ. ოკეანე შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ფენოვანი ნამცხვარი, სადაც თითოეულ ფენას აქვს უნიკალური ტემპერატურა და სიმკვრივე და მიკროპლასტიკები გროვდება ამ ფენებს შორის საზღვრებში.

ოკეანეში ნაწილდება ცოცხალი ორგანიზმების მიერ, რომლებიც შთანთქავენ, ამუშავებენ და გამოყოფენ მას.³⁰

მწვების გავრცელება გარემოში



სურათი 13. ოკეანიდან მიკროპლასტიკების გამოყოფასთან დაკავშირებული შესაბამისი პროცესების ილუსტრაცია. A) ოკეანეში არსებული მიკროპლასტიკები (წითელი/უფრო მუქი) ატმოსფეროში ზღვის წყლის წვეთებით გადაიტანება. B) გასკდომული ბუშტები ქმნის პატარა წვეთებს ან აეროზოლებს, როგორიცაა ჭავლური წვეთები. C) სითხეში არსებული მიკროპლასტიკები შეიძლება გადაიტანოს შედეგად წარმოქმნილ ჭავლურ წვეთებად. ისრებით აღინიშნება 100 მკმ ზომის მიკროპლასტიკური ნაწილაკები. შედეგად მიღებული წვეთები შეიძლება ქარმა აიწიოს და მიკროპლასტიკური მასალა ატმოსფეროში გადაიტანოს. სითხე საბოლოოდ აორთქლდება და მიკროპლასტიკური ნაწილაკები რჩება. D) ბუშტის გასკდომით მიკროპლასტიკების გამოყოფასთან დაკავშირებული შესაბამისი ფიზიკური პროცესები იწყება ნაწილაკების დაჭერით, როდესაც ბუშტი ამოდის. Di). ზედაპირზე მიღწევის შემდეგ Di), ბუშტი საბოლოოდ იღებს წონასწორობის ფორმას, რომელიც გასკდომის შემდეგ კაპილარულ ტალღებს ფოკუსირებს თავის ძირში, რაც ჭავლური წვეთების წარმოქმნას იწვევს (Diii), მიკროპლასტიკური მასალა გადააქვს.

წყარო: 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>

როდესაც წყალი აორთქლდება³¹, მიკროპლასტიკები ოკეანის³² ზედაპირიდან ატმოსფეროში ადის. ასევე, ზღვის შხეფების, ქარისა და ტალღების კომბინაცია წყალში ჰაერის ბუშტებს ქმნის, რომლებიც მიკროპლასტიკებს შეიცავს. როდესაც ბუშტები სკდება, ნაწილაკები ატმოსფეროში გამოიყოფა (სურათი 13). ყოველწლიურად, დაახლოებით 136,000 ტონა მიკროპლასტიკები³³ მხოლოდ ზღვის ნიაკით სანაპიროებამდე გადაიტანება. და 25 მილიონ მეტრ ტონამდე მიკრო- და ნანოპლასტიკები წელიწადში ათასობით კილომეტრის მანძილზე გადაიტანება ზღვის ჰაერით, შხეფებით, თოვლითა და ნისლით, ქვეყნებს, კონტინენტებსა და ოკეანეებს გადაკვეთს.



„ჰაერი წყალზე ბევრად უფრო დინამიური გარემოა. შედეგად, მიკრო- და ნანოპლასტიკების შეუძლია გაცილებით სწრაფად შეადგინოს ჩვენი პლანეტის ყველაზე მორეულ და ძირითადად ხელუხლებელ რეგიონებში“— ამბობს დოქტორი მელანი ბერგმანი, ბიოლოგი გერმანიის, ალფრედ ვეგენერის ინსტიტუტიდან. იქ მოხვედრის შემდეგ, ნაწილაკებს შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ ზედაპირის კლიმატსა და ადგილობრივი ეკოსისტემების ჯანმრთელობაზე.³⁴

მიკროპლასტიკები აღმოჩენილია სხვადასხვა ადგილას, ზღვის ზედაპირიდან ღრმა ზღვის ნალექებამდე, სასოფლო-სამეურნეო მიწებიდან ჩვენს უმაღლეს მთებამდე, ასევე ზღვის ყინულში, ტბებსა და მდინარეებში. ისინი აღმოჩენილია 1300 წყლისა და ხმელეთის სახეობაში, კვებითი ჯაჭვის ძირში მყოფი უხერხემლოებიდან დაწყებული, მთავარი მტაცებლებით დამთავრებული, რაც ზემოქმედებას ბიოლოგიური ორგანიზაციის ყველა დონეზე, უჯრედულიდან ეკოსისტემამდე ადასტურებს. მიკროპლასტიკები ფართოდ არის გავრცელებული ჩვენს მიერ მიღებულ საკვებში, ჩვენს მიერ დაღეულ წყალში და ჩვენს მიერ ჩასუნთქულ ჰაერში (სურათი 14). ისინი ადამიანის სხეულის მრავალ ქსოვილსა და ორგანოშია აღმოჩენილი და მათი უარყოფითი ზემოქმედების მტკიცებულებები სულ უფრო მატულობს.³⁵



სურათი 14. მიკროპლასტიკების ყველაზე გავრცელება საკვებში, წყალში და ჰაერში.

წყარო: <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>

ამგვარად, შორეულ და პოლარულ რეგიონებში ტრანსპორტირება შესაძლოა ატმოსფერული და საზღვაო ტრანსპორტის კომბინაციით იყოს გამოწვეული. ამიტომ მნიშვნელოვანია ატმოსფეროსა და ოკეანეს შორის ურთიერთქმედების გაგება, რათა დადგინდეს, რა ზომის ნაწილაკები და რა რაოდენობით გადაიტანება.

მაგალითად, მკვლევართა ჯგუფმა ცოტა ხნის წინ იაპონიის მთის მწვერვალებზე არსებულ ღრუბლებში პლასტმასის გრანულები აღმოაჩინა, რომლებსაც ჰიდროფილური (წყლის მიმზიდველი) ზედაპირი აქვთ.³⁶ შემდეგ მათ გააანალიზეს ნიმუშები და დაასკვნეს, რომ დაბალი სიმაღლის და უფრო მკვრივი ღრუბლები მიკროპლასტმასის უფრო მეტ რაოდენობას შეიცავს. პოლიმერების არსებობა კონდენსაციის ბირთვებად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ღრუბლების სწრაფ ფორმირებაში, რამაც საბოლოოდ შეიძლება გავლენა მოახდინოს საერთო კლიმატზე.³⁶

ღრუბლებში პლასტმასის ნაწილაკები ხელს უწყობენ მეტი წყლის შეკავებას, რაც ნალექის მოსვლას აფერხებს. როდესაც წვიმა მოდის, ის უფრო მძიმე ხდება, რადგან ღრუბლებში მეტი წყალი დაგროვდა. გარდა ამისა, ულტრაიისფერი სინათლისა და გაფილტრული ღრუბლის წყლის ზემოქმედების ქვეშ მყოფ მიკროპლასტმასს უფრო უხეში ზედაპირი აქვს, რაც ხელს უწყობს მათ ზედაპირზე მეტი ტყვიის, ვერცხლისწყლის და ჟანგბადის შემცველი ჯგუფების დაგროვებას.³⁷

ატმოსფერო ძირითადად მცირე მიკროპლასტიკური ნაწილაკების ტრანსპორტირებას ახდენს, რაც მას გაცილებით სწრაფ სატრანსპორტო გზად აქცევს, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი დეპონირება ეკოსისტემების ფართო სპექტრში. კვლევები აჩვენებს, რომ ტყეები ქარით გადატანილი მიკროპლასტიკის ბარიერებს წარმოადგენენ. ფოთლები, ტოტები და ღეროები იჭერენ მიკროპლასტმასს, რომელიც მათ ზედაპირზე ილექება. ეს იწვევს იმას, რომ ქარით გადატანილი მიკროპლასტიკი მცენარეებზე ან მიწაზე ილექება.

მკვრივი ტყის კენწეროების ქვეშ შეზღუდული ვენტილაცია ხელს უწყობს ამ ნაწილაკების მუდმივ დაგროვებას ტყიან ადგილებში. კენწეროების ფოთლები ჰაერში გადატანილი მიკროპლასტიკის გრძელვადიანი რეზერვუარის როლს ასრულებს.³⁸ კვლევამ აჩვენა, რომ 2017 წლის შემოდგომიდან 2019 წლის ზაფხულამდე, დასავლეთ შეერთებული შტატების 11 ეროვნულ პარკსა და ნაკრძალში ნალექების სახით 1000 ტონაზე მეტი პლასტმასის ნაწილაკი ჩამოვარდა. ეს რაოდენობა საკმარისია 120 მილიონი პლასტმასის ბოთლის წარმოებისთვის.³⁹ მსგავსი სიტუაციები შეინიშნება მსოფლიოს სხვა რეგიონებშიც. მაგალითად, იაპონიაში დაკბილული მუხის (*Quercus serrata*) ტყეები, რომლებიც დაახლოებით 32,500 კმ² ფართობს მოიცავს, ყოველწლიურად დაახლოებით 420 ტრილიონ ჰაერში მოხვედრილ მიკროპლასტიკურ ნაწილაკს იჭერს.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., Ariyase, 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>

ტყეებისგან განსხვავებით, ქალაქებში, კარგი ვენტილაციისა და ავტომობილების გამოწვევებიდან და სამრეწველო სმოგიდან გამოყოფილი უფრო მძიმე ნაწილაკების არსებობის გამო, ზოგიერთი მიკრო- და ნანოპლასტმასი ილექება. დღეს ტყეებში ჰაერი უფრო მეტად არის გაჯერებული ნანოპლასტიკით, ვიდრე მეგაპოლისებში.

სამყარო შეიცვალა! ახლა კი, როდესაც ადამიანები ოკეანეში ბანაობენ, სანაპიროზე მზის აბაზანებს იღებენ ან სანაპიროს გასწვრივ ან პარკში დარბიან, ტყეში სეირნობენ ჯანმრთელობის გასაუმჯობესებლად, პირიქით, ისინი თავიანთ სხეულს დამატებით მიკროპლასტმასმასით ზემოქმედებენ. აფრიკიდან და ჩრდილოეთ ამერიკიდან მიკროპლასტმასი აღმოჩენილია შორეულ და ერთი შეხედვით ხელუხლებელ ადგილებში, როგორიცაა ფრანგული პირენეები. ეს აჩვენებს მიკროპლასტმასის გლობალურ გავრცელებას, რომელიც ჰაერის დინებებითა და ნალექებით გადაიტანება და უზარმაზარ მანძილებს ფარავს.

მიკრო- და ნანოპლასტმასები ქალაქის წყალსატევებში ხვდება წვიმის წყლის მიღების, სამრეწველო გამონაბოლქვისა და ატმოსფეროდან ნაწილაკების შთანთქმის გზით. მაგალითად, სინთეტიკური ქსოვილების ერთჯერადი გარეცხვა ჩამდინარე წყლებში 1,5 მილიონამდე მიკროპლასტმასის ნაწილაკს გამოყოფს.⁴¹ ჩამდინარე წყლებში მოხვედრის შემდეგ ეს ნაწილაკები მდინარეებსა და ოკეანეებში ხვდება, სადაც თევზები და სხვა წყლის ორგანიზმები მათ ყლაპავენ. მდინარეებსა და მიმდებარე ლანდშაფტში ნაპოვნი ნარჩენების ანალიზით, მკვლევარებმა შეძლეს გამოთვალონ, რომ მხოლოდ 10 მდინარის სისტემას გადააქვს მდინარეებიდან ოკეანეში მოხვედრილი პლასტმასის 88-დან 95 პროცენტამდე.⁴²

კიდევ ერთ კვლევაში, მეცნიერებმა გადახედეს ტრადიციულ ვარაუდებს იმის შესახებ, თუ როგორ გადაიტანება პლასტმასი მდინარეებში და დაასკვნეს, რომ მდინარეებში პლასტმასის ნარჩენების რეალური რაოდენობა შესაძლოა 90 პროცენტით მეტი იყოს, ვიდრე ადრე ეგონათ.⁴³

პლასტმასი ასევე გვხვდება მსოფლიოს დიდი ტბების უმეტესობაში. ტბებში პლასტმასის ნარჩენების სიმკვრივე შეიძლება კიდევ უფრო მაღალი იყოს, ვიდრე ოკეანის უდიდეს ნაგავსაყრელებში და ხელუხლებელ ადგილებში მდებარე ტბებიც კი შეიცავს ნაგვის მნიშვნელოვან რაოდენობას. ეს დადასტურდა მილანო-ბიკოკას უნივერსიტეტის ბარბარა ლეონისა და ვერონიკა ნავას ხელმძღვანელობით ჩატარებულ მასშტაბურ საერთაშორისო კვლევაში.⁴⁴ გაეროს გარემოსდაცვითი პროგრამის (UNEP) 2021 წლის ანგარიშის თანახმად, მიკროპლასტმასი ყველა შესწავლილ მტკნარი წყლის ობიექტში აღმოაჩინეს, მათ შორის მდინარეებში, ტბებსა და წყალსაცავებში.⁴⁵ მაგალითად, მკვლევარებმა აღმოაჩინეს, რომ ყოველწლიურად დიდ ტბებში შეერთებული შტატებიდან და კანადიდან თითქმის 10 000 მეტრული ტონა, ანუ 22 მილიონი ფუნტი პლასტმასის ნარჩენები ხვდება.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>

საბოლოო ჯამში, მიკროპლასტიკის ადამიანებს თევზის ან ზღვის პროდუქტების სახით უბრუნდება.

იტალიელმა მეცნიერებმა აღმოაჩინეს, რომ ხილი და ბოსტნეული ასევე შეიცავს მილიონობით მიკროპლასტიკის ნაწილაკს. ამ ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაცია აღმოჩნდა ვაშლში, მსხალში, სტაფილოში, კარტოფილში, სალათის ფურცლებსა და ბროკოლში. ამავდროულად, ნაწილაკების კონცენტრაცია ხილში 2-3-ჯერ მეტი იყო, ვიდრე ბოსტნეულში: სალათის ფურცლებში 52 ათასი ნაწილაკიდან გრამზე და ვაშლში 223 ათასამდე.⁴⁷

კვლევამ აჩვენა, რომ მთელ მსოფლიოში აღებული ონკანის წყლის 159 ნიმუშიდან 81% შეიცავდა მიკროპლასტიკს.⁴⁸ სხვა კვლევები ადასტურებენ ამ დასკვნებს, აღნიშნავენ მიკროპლასტიკის ნაწილაკების არსებობას მინერალურ წყალში. საინტერესოა, რომ ნაწილაკების რაოდენობა დაახლოებით იგივე იყო როგორც მინის, ასევე პოლიეთილენტერეფტალატის (PET) ბოთლებში, რომელთა რიცხვი ლიტრზე 6,292 ნაწილაკს აღწევდა.^{49, 50, 51}

ნიუკასლის უნივერსიტეტის (ავსტრალია) მეცნიერებმა ჩაატარეს კვლევა იმის შესაფასებლად,⁵² თუ რამდენ პლასტიკს მოიხმარს საშუალო თანამედროვე ადამიანი. შედეგებმა აჩვენა, რომ ადამიანი წელიწადში დაახლოებით 250 გრამ პლასტიკს მიირთმევს, რაც 50 პლასტიკის პარკის ეკვივალენტურია.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/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

მიკრო და ნანოპლასტიკური დაბინძურების ეკოლოგიური და კლიმატური შედეგები

როგორ ანადგურებს მზე ეკოსისტემებს მოლეკულურ დონეზე

პლასტიკის ნარჩენები ყველგანაა: ოკეანეებიდან და მდინარეებიდან დაწყებული ნიადაგით, ჰაერითა და მცენარეებით დამთავრებული.⁵⁴ ხანგრძლივი დაკვირვებები ადასტურებს, რომ პლასტიკი, მცენარეული და ცხოველური მასალისგან განსხვავებით, არ განიცდის აქტიურ ბუნებრივ დაშლას.⁵⁵ ის გარემოში რჩება ბუნებრივი ბიოდეგრადაციის ციკლებში მონაწილეობის გარეშე. დაშლის პროცესების წინააღმდეგობის გასაწევად შექმნილი პლასტიკი გლობალური ეკოსისტემის მუდმივ ელემენტად იქცა. ეს წინააღმდეგობა, რომელიც თავდაპირველად ტექნოლოგიურ წარმატებად ითვლებოდა, ახლა მნიშვნელოვან ეკოლოგიურ დისბალანსს იწვევს.

პლასტიკის წარმოებაში 13 000-ზე მეტი ქიმიური ნივთიერება გამოიყენება. აქედან 3200-ზე მეტი, მათ შორის მონომერები, დანამატები და გადამამუშავებელი დამხმარე საშუალებები, პოტენციურად საშიშია მათი ტოქსიკური თვისებების გამო.⁵⁶

ნიადაგის თვისებებსა და ეკოსისტემის დეგრადაციაზე მზ-ის გავლენა

კვლევები აჩვენებს, რომ ხმელეთის ეკოსისტემების, განსაკუთრებით სასოფლო-სამეურნეო ნიადაგების მიკროპლასტიკური დაბინძურება შეიძლება 4-დან 23-ჯერ მეტი იყოს წყლის გარემოში არსებულ დაბინძურებასთან შედარებით⁵⁷, რაც მიუთითებს ნიადაგში პლასტიკის მნიშვნელოვან დაგროვებაზე. პლასტიკი ნიადაგებში გროვდება სხვადასხვა გზით, მათ შორის ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ნაგებობებით, მულჩით, ატმოსფერული დეპონირებით და ყოველდღიური პროდუქტებით. ერთჯერადი პლასტიკის პროდუქტების ფართოდ გამოყენება განუყოფლად არის დაკავშირებული მიკრო და ნანოპლასტიკებით ნიადაგის მძიმე დაბინძურებასთან. ბუნებრივი და ანთროპოგენური ფაქტორები⁵⁸ ხელს უწყობენ მცირე მიკროპლასტიკური ნაწილაკების ნიადაგში შეღწევას, რაც ცვლის მნიშვნელოვან ეკოლოგიურ პროცესებს.⁵⁹

დაკვირვებები ადასტურებს მიკროპლასტიკის მავნე ზემოქმედებას ეკოსისტემებზე, რაც გავლენას ახდენს მიკროორგანიზმების, მცენარეების და ნიადაგების სტრუქტურასა და ფუნქციაზე (სურათი 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. Journal of Geophysical Research: Oceans 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

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

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

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

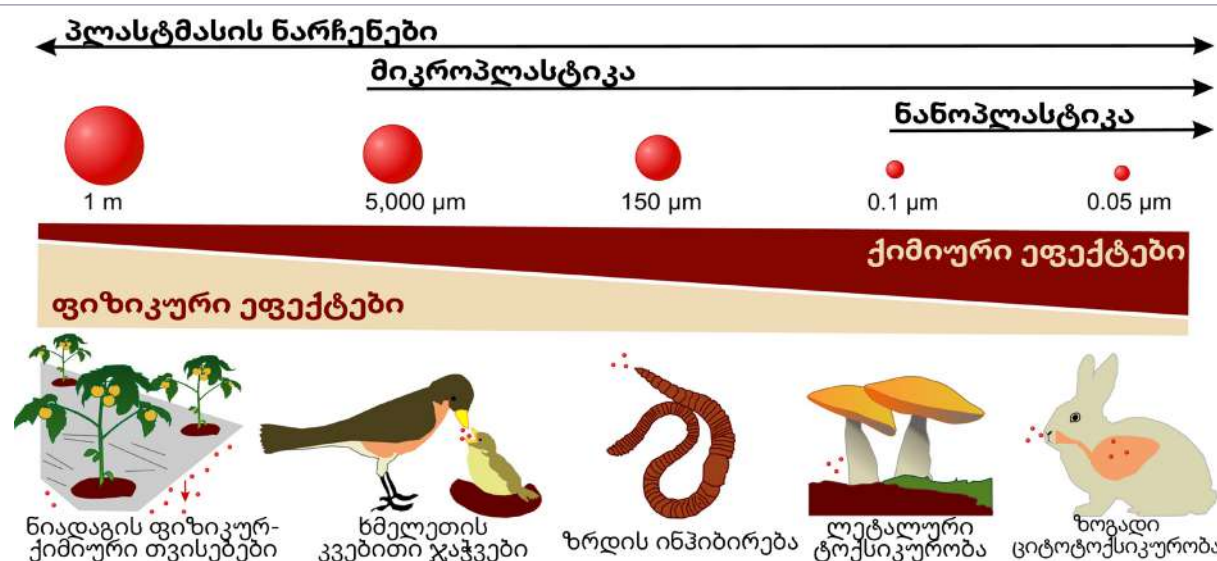
⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingrassia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. Front. Plant Sci. 8, 1805 (2017).

<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 186, 5–22 (2023).

<https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

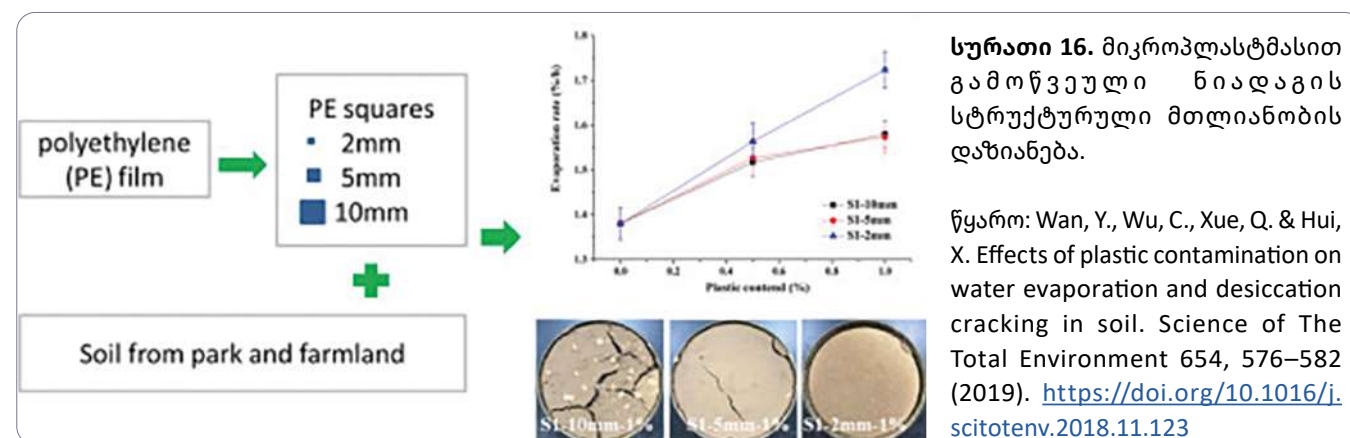


სურათი 15. მიკროპლასტიკები, როგორც კომბინირებული ფიზიკური ან ქიმიური ეფექტების გამომწვევი ფაქტორი.

ნიდაგის ბიოგეოქიმია, რომელიც დაკავშირებულია სასოფლო-სამეურნეო მულჩირებასთან, ხმელეთის და შიდა ფრინველების მიერ მოხმარებასთან, ჭიანჭყის ზრდის შემცირებასთან, სოკოებისთვის ლეტალურ ტოქსიკურობასთან, ძუძუმწოვრების ფილტვების ანთებასთან და ნანოპლასტიკების ფართო ციტოტოქსიკურობასთან.

წყარო: 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>

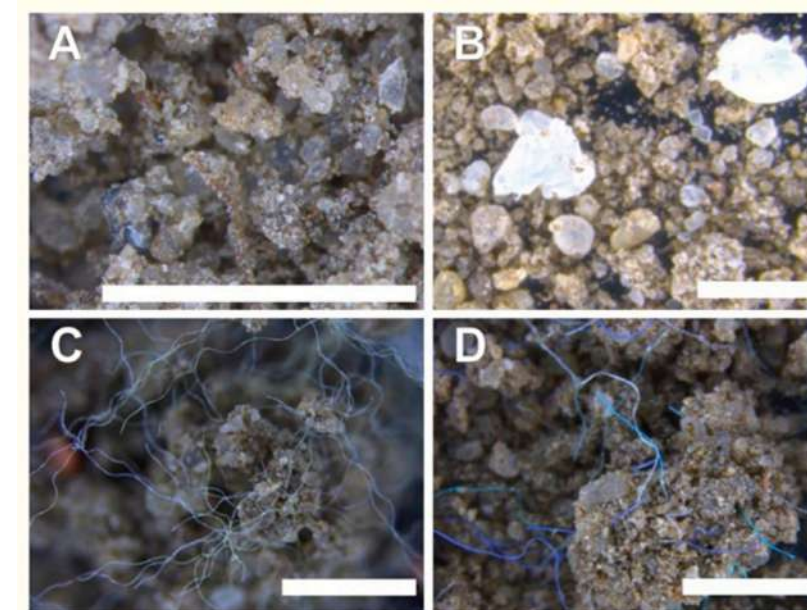
ჩინეთის მეცნიერებათა აკადემიის მიერ ჩატარებული კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ ნიდაგში სხვადასხვა ზომის პლასტიკური ფენების არსებობამ მნიშვნელოვნად გაზარდა წყლის აორთქლების სიჩქარე. ეფექტი განსაკუთრებით ძლიერი იყო 2 მმ-იანი ნაწილაკების დამატებისას. პლასტიკის უფრო დიდი ფრაგმენტები (5-10 მმ) იწვევდა ნიდაგის ბზარებს, არღვევდა მის სტრუქტურულ მთლიანობას. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ პლასტიკის დაბინძურება არღვევს ნიდაგში წყლის ციკლს, რამაც შეიძლება გააუარესოს ნიდაგის წყლის დეფიციტი და გავლენა მოახდინოს დამაბინძურებლების ვერტიკალურ ტრანსპორტირებაზე⁶⁰ (სურ. 16–17).



სურათი 16. მიკროპლასტიკით გამოწვეული ნიდაგის სტრუქტურული მთლიანობის დაზიანება.

წყარო: 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>

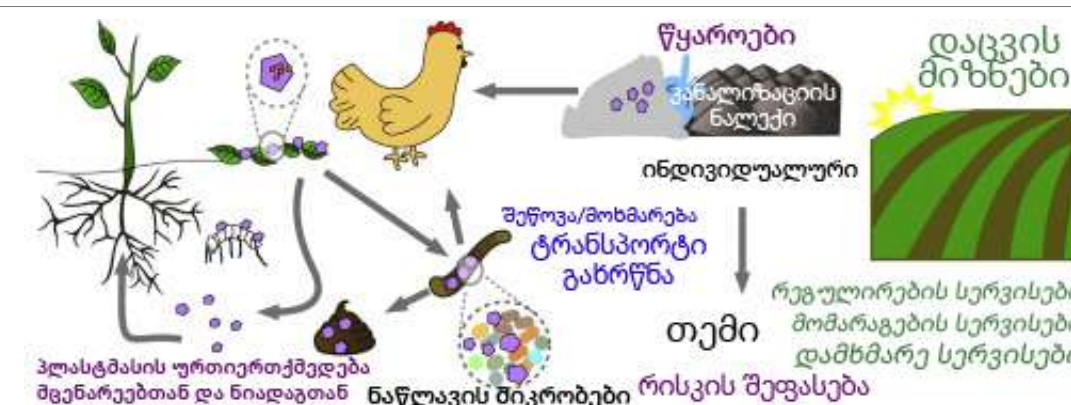


სურათი 17. მიკროპლასტიკური ნაწილაკების ინტეგრაცია ნიდაგის ბიოფიზიკურ გარემოში.

სტერემიკროსკოპის ქვეშ საკონტროლო ნიდაგის (A) სტრუქტურა ვიზუალურად არ განსხვავდებოდა პოლიამიდის მძივებით (SI S1D) დაბინძურებული ნიდაგისგან. პოლიეთილენის ფრაგმენტებმა (B) და პოლიესტერმა (C) ან პოლიაკრილის ბოჭკოებმა (D) ნიდაგის ვიზუალურად გამორჩეული მახასიათებლები გამოავლინეს. თითოეულ პანელში თეთრი ზოლი 1 მმ ზომას წარმოადგენს.

წყარო: 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>

კვლევები ასევე ადასტურებს პლასტიკის უარყოფით გავლენას ნიდაგის ბიოტაზე, მრავალფეროვან საზოგადოებაზე, რომელიც მოიცავს მიკროორგანიზმებს (მაგ. ბაქტერიებს, სოკოებს) და ფაუნას (მიკროსკოპული და მაკროსკოპული ცხოველები). ეს ორგანიზმები ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან, მცენარის ფესვებთან და გარემოსთან ნიდაგის კვებითი ქსელების შესაქმნელად (სურათი 18), რომლებიც აუცილებელია საკვები ნივთიერებების ციკლისა და მცენარეთა ჯანმრთელობისთვის.

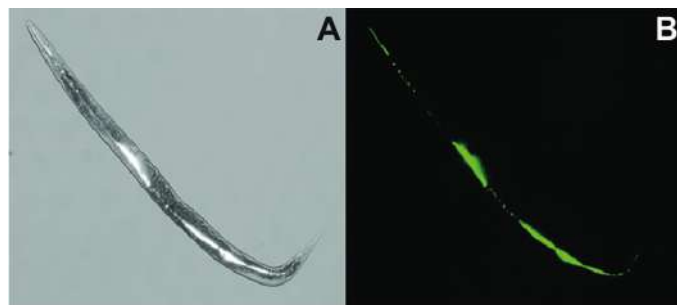


სურათი 18. ნიდაგის კვებითი ჯაჭვების ფორმირების პროცესის სქემატური წარმოდგენა.

წყარო: 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>

მიკროპლასტიკური დაბინძურების ბიოინდიკატორებად ხმელეთის ბიოტის სხვადასხვა ტიპი გვევლინება. ყველა ნიმუშის ანალიზმა აჩვენა მიკროპლასტიკური ნაწილაკების და პოტენციურად ტოქსიკური ელემენტების (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) არსებობა სხვადასხვა კონცენტრაციით, რაც⁶¹ მიკროპლასტიკის შესაძლო ტოქსიკურობაზე მიუთითებს.⁶²

კვლევებმა აჩვენა, რომ პოლისტიროლის მძივები შეიძლება შეიწოვოს ნიადაგის ნემატოდმა *Caenorhabditis elegans*-მა (სურ. 19); ეს ასევე ნიშნავს, რომ პოლისტიროლის ნაწილაკებს შეუძლიათ დაგროვება ნიადაგის კვებით ჯაჭვში.⁶³



სურათი 19. *Caenorhabditis elegans*-ის ზრდასრული ჭიის ბრაითფილდის (A) და ფლუორესცენციის (B) გამოსახულებები, რომელმაც 20°C ტემპერატურაზე 15 წუთის განმავლობაში დააგროვა 0.5 μ m ყვითელ-მწვანე ფლუორესცენტული მიკროსფეროები. ფოტოები გადაღებულია $\times 100$ გადიდებით.
წყარო: 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>

ნიადაგის ბიოტა არ არის მხოლოდ „დედამიწის ბიოლოგიური ძრავა“, არამედ მრავალფუნქციური სისტემა, რომელზეც ყველა ხმელეთის ეკოსისტემაა დამოკიდებული. მისი როლი პლანეტაზე სიცოცხლის შენარჩუნებაში შედარებადი ოკეანეებისა და ატმოსფეროს ფუნქციებთან, რაც დასტურდება ნიადაგის მეცნიერების, ეკოლოგიისა და კლიმატოლოგიის კვლევებით. ამიტომ, ტოქსიკურობით გამოწვეულ ნებისმიერ ცვლილებას შეუძლია გავლენა მოახდინოს ნიადაგისა და კვებით ჯაჭვში არსებულ მრავალ კრიტიკულ პროცესზე, რაც იწვევს ეკოლოგიურ დისბალანსს.⁶⁴

მონაცემები მიუთითებს მიკროპლასტიკების უნარზე, სწრაფად ადსორბციულ იქნას ნიადაგის ზედაპირზე მათი მცირე ზომის, დიდი სპეციფიკური ფართობის, მაღალი ჰიდროფობიურობისა და ბიოდეგრადაციისადმი მდგრადობის გამო.⁶⁵ ეს ხელს უწყობს მის ადვილად შეწოვას ორგანიზმების მიერ და მათში დაგროვებას, რაც პოტენციურ საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას. ეს პროცესი არ შემოიფარგლება მხოლოდ ნიადაგის ფენით, არამედ ვრცელდება მცენარეებზე, სადაც ის აგრძელებს თავის მავნე ზემოქმედებას.

საკვებში არსებული მიკროპლასტიკები

ანთროპოგენურ დამაბინძურებლებს შეიძლება მნიშვნელოვანი გავლენა ჰქონდეთ ეკოსისტემებზე, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ისინი მცენარეებში შედიან. დადასტურებულია, რომ მიკროპლასტიკები შეიძლება შეიწოვოს და გადაიტანოს მცენარის სხვადასხვა ორგანოში.

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. & Mohammedin, 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. & Mohammedin, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

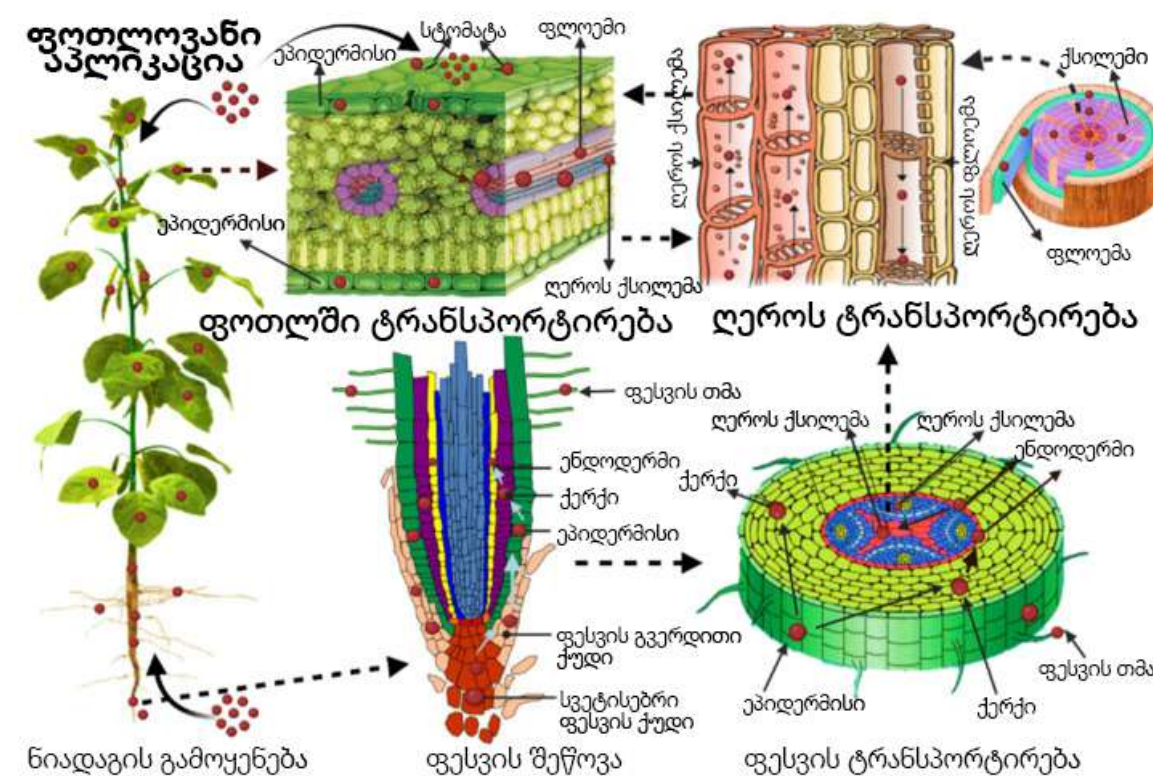
⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. Environmental Technology & Innovation 27, 102408 (2022).

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

კვლევის მონაცემები მიუთითებს, რომ მიკროპლასტიკები მცენარეთა სისტემებში სხვადასხვა გზით გროვდება, რაც უარყოფითად მოქმედებს მცენარეებზე, კულტურებსა და საკვებ პროდუქტებზე.

ნანოპლასტიკებს, მცირე ზომის გამო, შეუძლიათ პირდაპირ შეაღწიონ მცენარის ქსოვილში.⁶⁶ მცენარეები ნანოპლასტიკებს საკვები გარემოდან შთანთქავენ, რის შემდეგაც ისინი მიწისზედა ნაწილებში გადაიტანება ქსილემის მეშვეობით, გამტარი ჭურჭლის სისტემის მეშვეობით, რომელიც წყალსა და საკვებ ნივთიერებებს ფესვებიდან ღეროებსა და ფოთლებში გადააქვს.

ფოთლებზე დალექილი მიკროპლასტიკები აღწევს ბაგეებში და შეიძლება გადაიტანონ ფესვებში სისხლძარღვთა კონების მეშვეობით. როგორც მიკრო, ასევე ნანოპლასტიკები ავლენენ ტოქსიკურ ეფექტს სასოფლო-სამეურნეო მცენარეების ფიზიოლოგიურ პროცესებსა და ფერმენტულ აქტივობაზე⁶⁷ (სურ. 20).



სურათი 20. მცენარეებში მიკრო- და ნანოპლასტიკური შთანთქმის მექანიზმები.

მცენარეების მიერ პლასტიკის შთანთქმის მექანიზმი ნიადაგში ფესვის შთანთქმის გზით მოხვედრისას; ტრანსპორტირების გზები ფესვიდან ღერომდე და ტრანსპორტირება ღეროდან ფოთლებსა და ნაყოფებამდე. ფოთლებში აჩვენებს პლასტიკის შეღწევას ფოთლების ბაგეებში და შემდგომ ტრანსპორტირებას მცენარის სხვა ნაწილებში. მყარი ისარი მიუთითებს მცენარისთვის პლასტიკის ხელმისაწვდომობაზე, ხოლო წერტილოვანი ისარი მიუთითებს მცენარეში ტრანსპორტირებაზე.

წყარო: 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>

მცენარეების წყლის ტრანსპორტირების სისტემას შეუძლია ნანოპლასტიკების სწრაფად გადატანა ღეროებში, ფოთლებსა და შესაძლოა ნაყოფში. თამბაქოს მცენარეების (*Nicotiana tabacum*) შესწავლის შედეგად მიღებული მონაცემების თანახმად, 100 ნმ ზომის ნანოპლასტიკები არ აღწევს მცენარის უჯრედებში, ხოლო 20-დან 40 ნმ-მდე ზომის ნაწილაკები წარმატებით შეიწოვება.⁶⁸

გარდა ამისა, ზოგიერთ პლასტიკის ნაწილას აქვს შინაგანი მუხტი, რომელსაც შეუძლია გააძლიეროს მათი აღსორცია მცენარის ფესვებში ელექტროსტატიკური მიზიდულობის გამო, რაც გავლენას ახდენს საკვები ნივთიერებების იმობილიზაციაზე ან ფოტოსინთეზის პროცესებზე.⁶⁹ უარყოფითად დამუხტული მიკროპლასტიკები უფრო მეტად აღწევენ ფესვის ქერქს.⁷⁰

პლასტიკური ნაწილაკებით მაღალი დაბინძურების მქონე აგროეკოსისტემებში შეინიშნება მცენარის ზრდისა და განვითარების შენელება⁷¹, ასევე ხანმოკლე და გარდამავალი ეფექტები აღმოცენების სიჩქარესა და ფესვების განვითარებაზე.⁷²

კვლევები ადასტურებს მიკროპლასტიკის არსებობას კომერციულად ხელმისაწვდომ თაფლში, როგორც სამრეწველო, ასევე ადგილობრივად წარმოებულში. შემდგომმა ანალიზმა გამოავლინა მიკროპლასტიკის ფართო გავრცელება სხვადასხვა მცენარის სახეობის ყვავილელებში.^{73, 74}

ბოლო წლებში, მთელ მსოფლიოში ფუტკრების პოპულაციების ჯანმრთელობა მკვეთრად გაუარესდა. კვლევები ვარაუდობენ, რომ ამის ერთ-ერთი არასაკმარისად შეფასებული მიზეზი შეიძლება იყოს მიკროპლასტიკით (მპ) და ნანოპლასტიკით (ნპ) გარემოს დაბინძურება. კვლევებმა აჩვენა, რომ ფუტკრები „აგროვებენ“ მიკროპლასტიკის ჰაერიდან, წყლიდან, მცენარეებიდან და ნიადაგიდან და შემდეგ მიაქვთ სკაში. ფუტკრები აგროვებენ ნექტარსა და მტვერს მცენარეებიდან, ასევე წყალს ბუნებრივი წყაროებიდან - ყველა მათგანი უკვე შეიცავს მიკროპლასტიკას. ფუტკრის სხეულზე არსებული თმები ნაწილაკების „ხაფანგების“ როლს ასრულებს. პლასტიკის ნაწილაკები ასევე გროვდება ფეხებზე, განსაკუთრებით ნაკეცებსა და სეგმენტებს შორის - ისინი კონტაქტში შედიან მცენარეების, ნიადაგის, წყლის და თვით სკასთანაც კი.

66

„თაფლის ფუტკარი გარემოს დაბინძურების ძალიან კარგი ბიოლოგიური ინდიკატორია, რადგან ის ყველგან არის, დაფარულია თმებით, რომლებიც იჭერენ ჰაერში არსებულ მინარევებსა და ნაწილაკებს, მგრძნობიარეა დამაბინძურებლების მიმართ, ძალიან მობილურია და აქვს ფართო ფრენის რადიუსი და სხვა.“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>

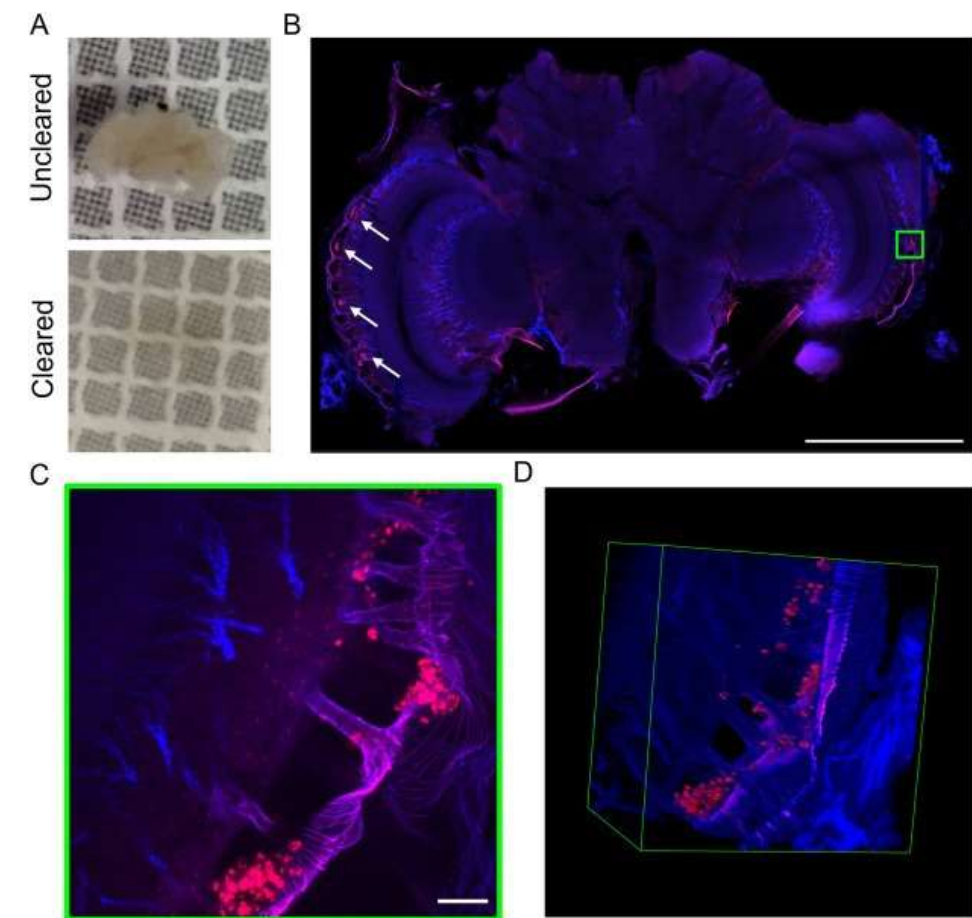
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

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>

მიკრო და ნანოპლასტიკები ასევე შედიან ფუტკრის სხეულში კუტიკულის (სხეულის გარეთა გარსი) მეშვეობით. ფუტკრის სხეულში მოხვედრის შემდეგ, პლასტიკის ნაწილაკები ტვინში 3 დღის განმავლობაში აღწევს, რაც იწვევს მეხსიერების, ორიენტაციისა და კოგნიტური დარღვევების განვითარებას, რაც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საკვების მოძიებისა და ნავიგაციისთვის.⁷⁶ მიკროპლასტიკის ტვინზე ზემოქმედება ასევე იწვევს მეხსიერების აღდგენის უნარის შემცირებას. ეს კრიტიკულად მნიშვნელოვანია, რადგან ფუტკრები გარემოში ნაცნობი ორიენტირების გამოყენებით ნავიგაციას ახდენენ. ფუტკრის ტვინში არსებული ნანოპლასტიკები ასევე იწვევს იმას, რომ ფუტკრები კარგავენ ნექტრის წყაროების დამახსოვრების უნარს, უარესად რეაგირებენ ყვავილების სურნელზე და კარგავენ სკაში დაბრუნების გზას. ასეთი კოგნიტური დარღვევები პირდაპირ ამცირებს დამტვერვის ეფექტურობას და შეიძლება მთელი კოლონიის დესტაბილიზაცია გამოიწვიოს.⁷⁶



სურათი 21. მიკროპლასტიკის მნიშვნელოვანი რაოდენობის აღმოჩენა თაფლის ფუტკრის ტვინში.

A) დისექცირებული ტვინის ფოტოები iDISCO-ს გაწმენდამდე და მის შემდეგ.

B) მთელი ტვინის 3D რეკონსტრუქციის ერთი ოპტიკური მონაკვეთი (~200 მკმ სიღრმე), მიღებული ორფოტონიანი ფლუორესცენტული მიკროსკოპიით 10× ობიექტივით; გარჩევადობა: 0.51 × 0.51 × 2 მკმ³. ლურჯი ფერი აღნიშნავს ქსოვილის ავტოფლუორესცენციას, წითელი კი წითელფლუორესცენტურ მიკროპლასტიკას (მითითებულია თეთრი ისრებით). მასშტაბის ზოლი: 1000 მკმ.

C) სურათზე მწვანედ მონიშნული რეგიონის მაღალი გარჩევადობის ჩანართი, მიღებული 63× ობიექტივით. გამოსახულება წარმოადგენს 150 მკმ სიღრმის დასტის სერიის მაქსიმალური ინტენსივობის პროექციას 0.17 × 0.17 × 1 მკმ³ გარჩევადობით. მასშტაბის ზოლი: 20 მკმ.

D) C-ში წარმოდგენილი დასტის სერიის 3D ვიზუალიზაცია. ზომები: 170 × 170 × 150 μm³.

წყარო: 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>

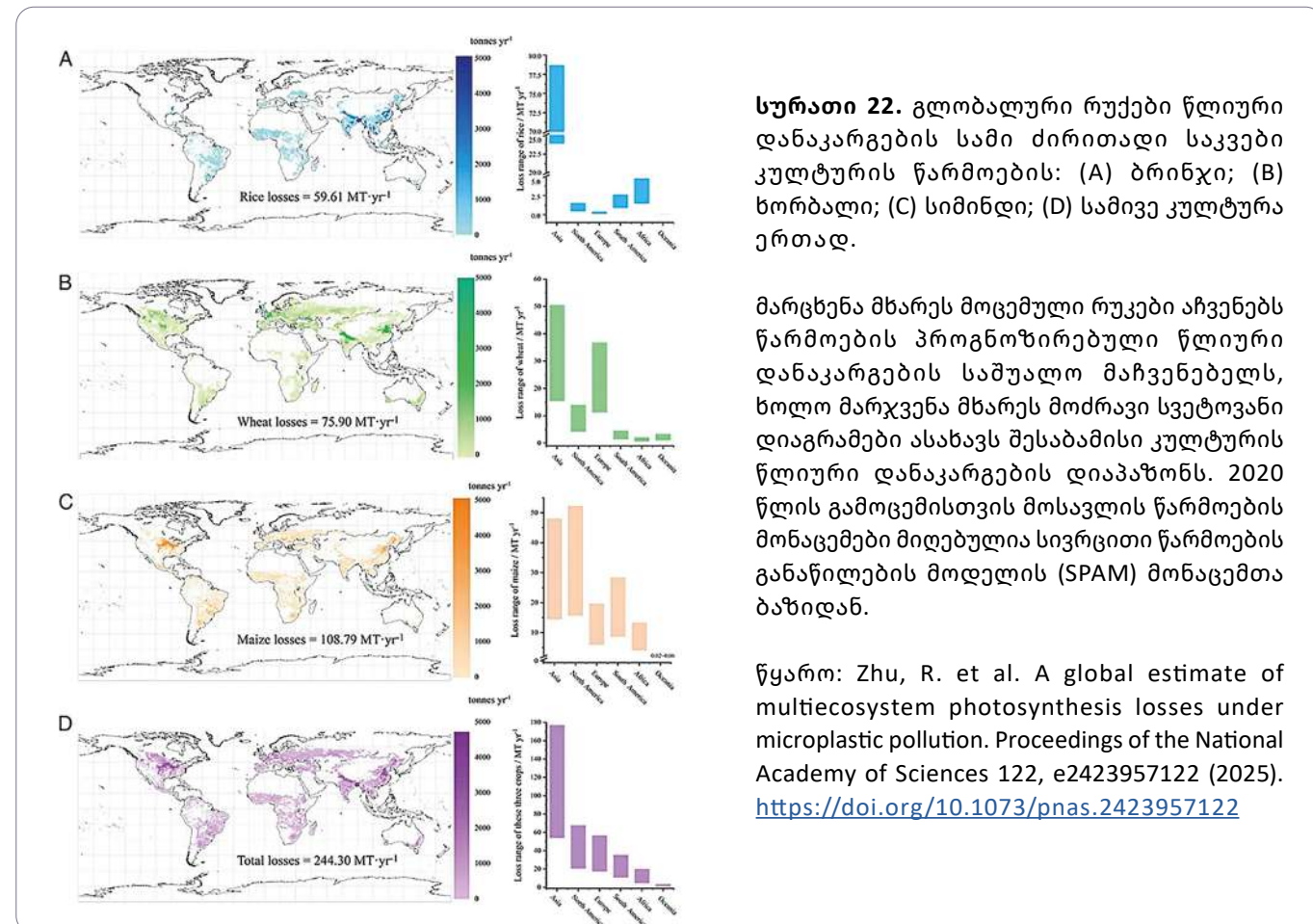
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

ფუტკრების მიერ მოხვედრისას ნანოპლასტიკები ასევე იწვევს ნაწლავების დაზიანებას, ასუსტებს იმუნურ სისტემას და ზრდის ვირუსების მიმართ მგრძნობელობას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ფუტკრების სიკვდილი მწვავე პლასტმასის ტოქსიკურობის არარსებობის შემთხვევაშიც კი.^{75, 77} გარდა ამისა, პლასტმასის ფრაგმენტები გროვდება არა მხოლოდ ფუტკრებში, არამედ თაფლში, ცვილსა და ლარვებშიც, რაც ქმნის პლასტმასის დაბინძურების ჩაკეტილ ციკლს სკაში.⁷⁵

ამას პოტენციურად შეიძლება სერიოზული შედეგები მოჰყვეს არა მხოლოდ ფუტკრებისთვის, არამედ სურსათის უვნებლობისთვისაც. ფუტკრები ძირითადი დამამტვერებლები არიან და მათი დასუსტება პირდაპირ გავლენას ახდენს მოსავლიანობაზე.

ტვინის დაზიანება, წონის დაკლება და იმუნიტეტის შესუსტება იწვევს დამტვერვის აქტივობის შემცირებას, რამაც, როგორც მეცნიერები აფრთხილებენ, შეიძლება გააუარესოს გლობალური სურსათის წარმოების კრიზისი.⁷⁷ ფუტკრები დაბინძურების აქტიური ბიოინდიკატორების როლს ასრულებენ და მიკროპლასტმასი უკვე მნიშვნელოვანი რაოდენობით იქნა ნაპოვნი თაფლში, წარმოშობის ქვეყნის მიუხედავად.⁷⁸

ასევე, MF-ის ზემოქმედება ქლოროფილის საერთო შემცველობას 5.63–17.42%-ით ამცირებს, რაც ბრინჯის, ხორბლისა და სიმინდის გლობალური წარმოების შემცირებას იწვევს. ეს დანაკარგი ამ კულტურების მსოფლიო წლიური წარმოების 4.11–13.52%-ს შეადგენს, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სურსათის უვნებლობაზე (სურ. 22).⁷⁹



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

ტყეები, როგორც მნკ-ს შენახვის ადგილები

ანალიზმა გამოავლინა ნანოპლასტმასების არსებობა ფესვებში, ტეროებში, ფოთლებსა და ნემსებში ყველა შესწავლილი კონცენტრაციისა და დროის ინტერვალის მიხედვით. ფესვებში ნანოპლასტმასის კონცენტრაცია მინიმუმ 10-ჯერ აღემატებოდა მიწისზედა ნაწილებში არსებულ კონცენტრაციას.

პლასტმასით დაბინძურება უარყოფითად მოქმედებს როგორც მარადმწვანე წიწვოვანი, ასევე ფოთლოვანი ხეების ფუნქციონირებაზე, იწვევს ჟანგვით სტრესს და ამცირებს ფოტოსინთეზის ეფექტურობას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს მცენარის ზრდის შენელება და სიკვდილიც კი. კვლევები აჩვენებს, რომ ფოტოსინთეზის ეტაპების დარღვევები იწვევს ჭარბი სინათლის ენერგიის დაგროვებას, რომელიც, ქიმიურ ენერგიად გარდაქმნის გარეშე, იწვევს ფოტოოქსიდაციურ სტრესს და მცენარის ქსოვილების დაზიანებას. თავის დასაცავად, მცენარეები ააქტიურებენ ფოტოდაცავ მექანიზმებს, რომლის დროსაც კაროტინოიდები სითბოს სახით ანაწილებენ ზედმეტ ენერგიას.⁸⁰

ფოტოსინთეზის დარღვევით, ჟანგვითი სტრესის გამოწვევით და მცენარეების ფიზიოლოგიური აქტივობის შემცირებით, პლასტმასის დაბინძურება ზრდის ეკოსისტემების დაუცველობას კლიმატის ცვლილების მიმართ. ეს დასკვნები ხაზს უსვამს პლასტმასის დაბინძურების ზემოქმედების მასშტაბებს მცენარეთა თემებზე, რაც თავის მხრივ კითხვებს ბადებს მის გავლენას ამ ეკოსისტემებზე დამოკიდებულ ხმელეთის ცხოველებზე.

როგორ ანადგურებს ნანოპლასტმასი ფაუნას

მრავალრიცხოვანმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მიკრო- და ნანოპლასტმასების დაგროვება გარემოში, მათ შორის მცენარეებში, გავლენას ახდენს მეცხოველეობის განვითარებაზე⁸¹ რაც გავლენას ახდენს კვების ჯაჭვებსა და ცხოველთა ჯანმრთელობაზე. იტალიის რძის ფერმაში ჩატარებულმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ჭვავის ბალახის თივის ყველა ნიმუში შეიცავდა მიკროპლასტმასს.⁸² ინდოეთში ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა პოლიეთილენტერეფტალატის მიკროპლასტიკური დაბინძურება რძის ძროხის რაციონის ნიმუშების 100%-ში, კონცენტრაციით 89-დან 326 გ/კგ-მდე.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>

ანალიზმა დაადასტურა მიკროპლასტიკის არსებობა მსხვილფეხა რქოსანი პირუტყვის ფოლიკულურ სითხეში⁸⁴, რძეში⁸⁵ ცხვრის განავალში⁸⁶, საქონლის ხორცსა და სისხლში⁸⁷ რაც მიუთითებს მცოხნავი ცხოველების მნიშვნელოვან ზემოქმედებაზე. მონაცემების თანახმად, დაკლული მსხვილფეხა რქოსანი პირუტყვის⁸⁸, მათ შორის მცირე ზომის მცოხნავი ცხოველების, როგორიცაა თხა და ცხვარი, აღმოჩენილი უცხო სხეულების 50-60% პლასტიკის მასალებია. მიკროპლასტიკები ასევე აღმოაჩინეს ქალაქის ძაღლებისა და კატების შინაგან ქსოვილებში⁸⁹ შინაური იხვების ნაწლავებსა⁹⁰ და ღორების ფილტვის ქსოვილში.⁹¹

კვლევის მონაცემები ადასტურებს, რომ მიკროპლასტიკი ცხოველებს არა მხოლოდ თავისთავად აზიანებს, არამედ მათ წარმოებაში გამოყენებული დანამატებისა და გარემოდან შთანთქმული დამაბინძურებლების მეშვეობითაც, რაც სხვადასხვა ხარისხის დაზიანებას იწვევს⁹² დადასტურებულია, რომ მიკროპლასტიკი ცხოველებში ტოქსიკურ ეფექტებს იწვევს, მათ შორის ჟანგვით სტრესს, ნაწლავების დაზიანებას, იმუნოტოქსიკურობას, რეპროდუქციულ ტოქსიკურობას და ნეიროტოქსიკურობას (სურათი 23).⁹³ გარდა ამისა, მიკროპლასტიკი ისეთი დამაბინძურებლების მატარებელია, როგორიცაა მძიმე მეტალები, ანტიბიოტიკები, მდგრადი ორგანული ნაერთები და პესტიციდები, რაც ზრდის ეკოსისტემების, ცხოველთა და ადამიანების ჯანმრთელობისა პოტენციურ რისკებს.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-PLASTICS0UP.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>

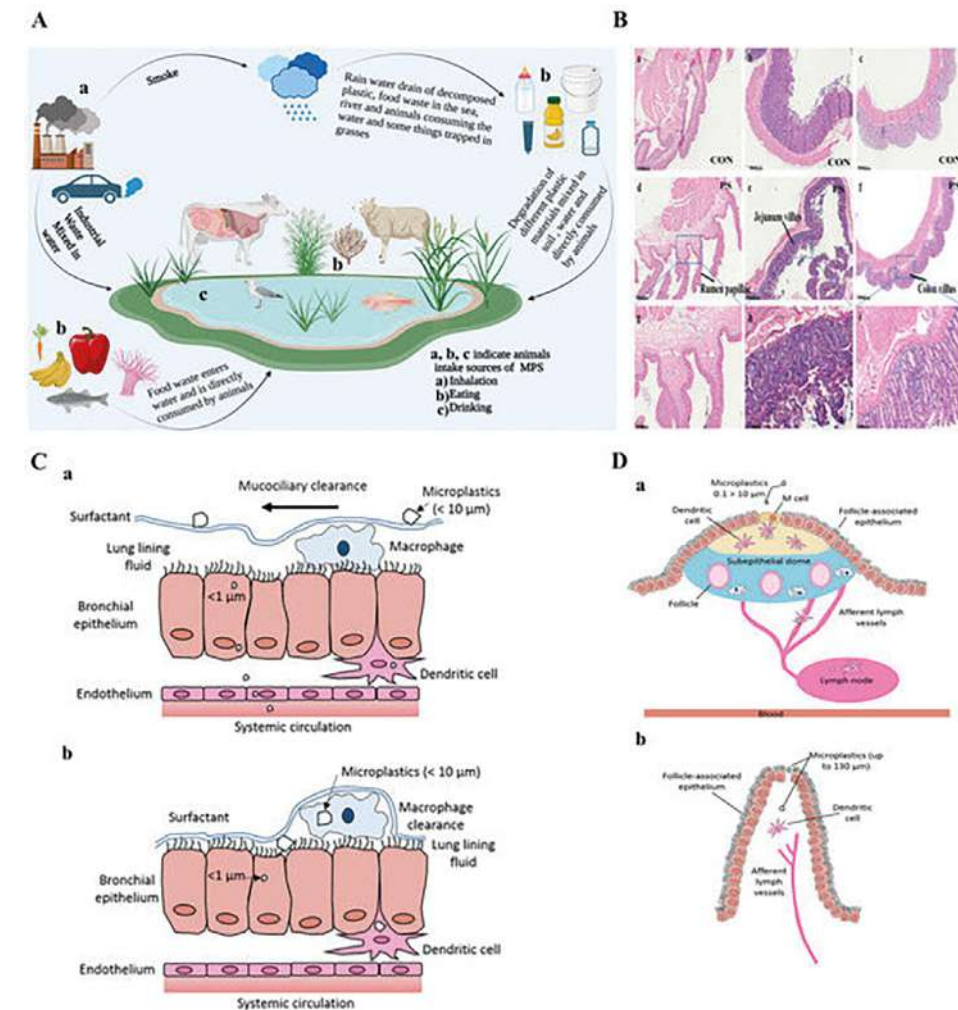
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibrina, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. Water Air Soil Pollut 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

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>



სურათი 23. ცხოველებში მიკროპლასტიკის მიღების გზებისა და კუჭ-ნაწლავის ტრაქტზე ზემოქმედების სქემატური წარმოდგენა.

(A) ცხოველებში მიკროპლასტიკის (MP) მიღების გზები.

(B) კუჭ-ნაწლავის ტრაქტის მდგომარეობა პოლისტიროლის ნაწილაკების (PS) ზემოქმედების შემდეგ ზემოქმედებამდე და მის შემდეგ:

საკონტროლო ჯგუფში (CG) მუნის (a), ჯეჯუნუმის (b) და მსხვილი ნაწლავის (c) პემატოქსილინით და ეოზინით (H&E) შეღებილი სურათები.

(d) მცირე პოლისტიროლის ნაწილაკების (მცირე PS) ჯგუფის მუნის H&E სურათი.

(e) დიდი პოლისტიროლის ნაწილაკების (დიდი PS) ჯგუფის ჯეჯუნუმის H&E სურათი.

(f) დიდი პოლისტიროლის ნაწილაკების (დიდი PS) ჯგუფის მსხვილი ნაწლავის H&E სურათი.

(g–i) ადგილობრივად გაღიებული სურათები, რომლებიც შეესაბამება (d–f)-ს.

(C) ფილტვებში მიკროპლასტიკების (0.1-დან 10 მკმ-მდე ზომის) შეწოვისა და კლირენსის პოტენციური მექანიზმები:

(a) ზედა სასუნთქ გზებში (ფილტვების ცენტრალური ნაწილი), სადაც ფილტვის მემბრანა უფრო სქელია, ფილტვის სითხეები (ზედაპირულად აქტიური ნივთიერება და ლორწო) ამცირებენ მიკროპლასტიკის გადაადგილების ალბათობას. 1 მკმ-ზე დიდი ნაწილაკები ამოღებულია წამწამოვანი ლორწოვანი გარსით. 1 მკმ-ზე პატარა ნაწილაკები შეიძლება შეიწოვოს ეპითელიუმმა. (b) თუ მიკროპლასტიკების აეროდინამიკური დიამეტრი საშუალებას აძლევს მათ დალეკონ ღრმა ფილტვში, მათ შეუძლიათ შეაღწიონ ფილტვის სითხის უფრო თხელ ფენაში და დაუკავშირდნენ ეპითელიუმს, გავრცელდნენ დიფუზიით ან აქტიური უჯრედული შეწოვით.

(D) მიკროპლასტიკის შეწოვის შემოთავაზებული გზები კუჭ-ნაწლავის ტრაქტიდან (GI):

(a) მიკროპლასტიკების (0.1-დან 10 მკმ-მდე ზომის) შეწოვა კუჭ-ნაწლავის სანათურიდან M უჯრედების მიერ პეიერის შემგროვებელ ლიმფურ კვანძებში ენდოციტოზის გზით. M უჯრედები ირჩევენ და გადააქვთ ნაწილაკები ნაწლავის სანათურიდან ლორწოვანი გარსის ლიმფოიდურ ქსოვილში.

(b) მიკროპლასტიკები კუჭ-ნაწლავის სანათურიდან პარაცელულარული შთანთქმის გზით შეიწოვება. არადეგრადირებადი ნაწილაკები, როგორიცაა მიკროპლასტიკი, შეიძლება მექანიკურად შევიდეს ქვედა ქსოვილებში ერთმანეთი ეპითელიუმის სუსტი შეერთებების მეშვეობით. დენდრიტულ უჯრედებს შეუძლიათ ამ ნაწილაკების დაჭერა და მათი ქვემოთ მდებარე ლიმფურ სისხლძარღვებსა და ვენებში გადატანა. ნაწილაკების გავრცელება შესაძლებელია მეორად ქსოვილებში, მათ შორის ღვიძლში, კუნთსა და ტვინში.

წყარო: 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>

მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ გარეული ცხოველები პლასტმასის ნარჩენებს საკვებში ერევა, რაც მათ ნაწლავებში დაგროვებას იწვევს. ზიმბაბვესა⁹⁵ და შრი-ლანკაში⁹⁶, ღია ნაგავსაყრელებზე მკვებავი სპილოები ძნელად მოსაწვავი პლასტმასისგან იხოვებიან. იაპონიის ნარას პარკში, გარეული ირმები ტურისტების მიერ დატოვებული პლასტმასის ნარჩენების გადაყლაპვით გამოწვეული გართულებების შედეგად იღუპებიან⁹⁷ არაბთა გაერთიანებულ საემიროებში, დუბაის მახლობლად, 30 000-ზე მეტი აქლემის კვლევამ აჩვენა, რომ ცხოველების 1%, სავარაუდოდ, მათ საჭმლის მომწოდებელ ტრაქტში დაგროვილი პლასტმასისგან დაიღუპნენ.⁹⁸ მეცნიერებმა ტერმინი „პოლიბეზოარი“ შექმნეს ძნელად მოსაწვავი მასალის მკვრივი მასის აღსაწერად, როგორიცაა პლასტმასი, თოკი, ნაგავი და მარილის დეპოზიტები, რომლებიც კუჭში ან ნაწლავებში, განსაკუთრებით მცოხნავ ცხოველებში, ქვის მსგავს კონკრემენტს წარმოქმნიან. ტერმინი აერთიანებს ტერმინებს „პოლი“ (სინთეზური ნივთიერება) და „ბეზოარი“ (ქვის მსგავსი წარმონაქმნი). დაკვირვებები ადასტურებს, რომ პოლიბეზოარები იწვევენ კუჭ-ნაწლავის ობსტრუქციას, ბაქტერიების ზრდის შედეგად სეფსისს, დეჰიდრატაციას და არასრულფასოვან კვებას (სურ. 24).



სურათი 24. დუბაის მახლობლად, უდაბნოში, მკვდარი აქლემების შიგნით ნაპოვნი პოლიბეზოარები. ახალი კვლევისთვის გაანალიზებული ყველაზე დიდი აქლემი თითქმის 6.4 კგ-ს (141 ფუნტი) იწონდა. წყარო: 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>

მნპ-ების გადაცემა პლანქტონიდან ადამიანებზე კვებითი ჯაჭვების მეშვეობით

ოკეანეში პლასტმასის დაგროვებას მნიშვნელოვანი უარყოფითი გავლენა აქვს საზღვაო ეკოსისტემებზე. ბოლო ოთხი ათწლეულის განმავლობაში ჩატარებულმა სამეცნიერო დაკვირვებებმა მიკროპლასტმასი მსოფლიოს თითქმის ყველა საზღვაო ჰაბიტატში აღმოაჩინა.⁹⁹ კვლევები ადასტურებს, რომ პლასტმასის ნარჩენები საფრთხეს უქმნის ზღვის ბიომრავალფეროვნებას, რაც გავლენას ახდენს მინიმუმ 690 სახეობაზე, მათ შორის ვეშაპისნაირებზე, ფუმფულა ფრინველებზე, ზღვის ფრინველებზე, კუებზე, თევზებსა და კიბოსნაირებზე.¹⁰⁰ პლასტმასის გადაყლაპვა ცხოველებზე დამატებით ტოქსინებით აზიანებს. პლასტმასის ქიმიკატები მოხმარების შემდეგ ორგანიზმში ხვდება და კვებით ჯაჭვში მსხვერპლიდან მტაცებელზე გადადის. ჩახლართულობის ან გადაყლაპვის შედეგები ლეტალურიდან სუბლეტალურამდე მერყეობს, რაც იწვევს კვების დარღვევებს, საჭმლის მომწოდებელ პრობლემებს, არასრულფასოვან კვებას, დაავადებებს, რეპროდუქციული უნარის შემცირებას, ზრდის შეფერხებას და სიცოცხლის ხანგრძლივობის შემცირებას.¹⁰¹ მცირე ზომის გამო, მიკროპლასტმასს პლანქტონი ყლაპავს, რომელიც ზღვის კვებითი ჯაჭვის მთავარი რგოლია. პლანქტონს ბევრი საზღვაო სახეობა მოიხმარს, ხოლო ისინი, ვინც მისით არ იკვებებიან, პირდაპირ მიირთმევენ ორგანიზმებს, რომლებმაც უკვე გადაყლაპეს პლანქტონი. ამ გზით, მიკროპლასტმასი ინტეგრირდება კვებით ჯაჭვებში (სურათი 25-26).

1999 წელს, ჩრდილოეთ წყნარი ოკეანის ცენტრალური ტალღის ზედაპირული წყლის ნიმუშების ანალიზმა აჩვენა, რომ პლასტმასის მასა ექვსჯერ¹⁰² აღემატებოდა ზოოპლანქტონის მასას, რომელიც ეკოსისტემის მთავარი საკვები წყაროა, რაც ხაზს უსვამს პლასტმასის უპირატესობას ოკეანეში ცოცხალ ორგანიზმებთან შედარებით.

დაკვირვების მონაცემებზე დაფუძნებული გამოთვლები აჩვენებს, რომ მიკროპლასტმასის კონცენტრაცია იზრდება თევზის ზომის ზრდასთან ერთად. მონაცემები აჩვენებს, რომ ყველაზე დიდი ცხოველი, ვეშაპი, ყოველდღიურად 43.6 კგ-მდე პლასტმასს იღებს, ამ მოცულობის 98.5% კილოგრამამდე საკვებიდან მოდის და არა პირდაპირ წყლიდან, რადგან მიკროპლასტმასს უკვე შეიცავს მსხვერპლი.¹⁰³

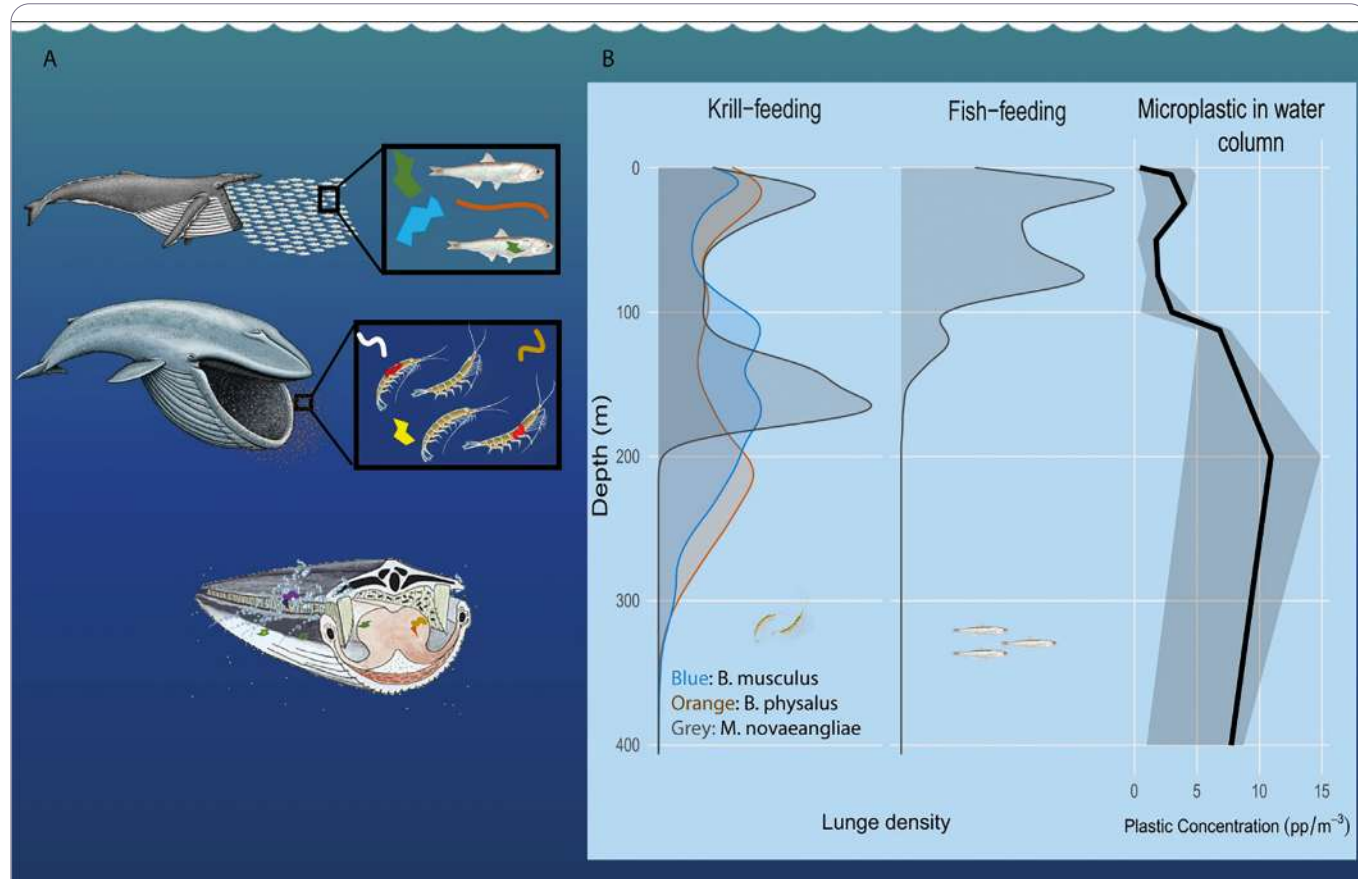
⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

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>



სურათი 25. მინკეს ვეშაპის საკვების მოპოვების სიღრმე წყლის სვეტის მიკროპლასტიკის კონცენტრაციის ფუნქციის მიხედვით.

a — ვეშაპების მიერ დღეში გადაყლაპული პლასტმასი, მოდელირებული, როგორც (i) წყლიდან დღეში გაფილტრული პლასტმასის და (ii) მსხვერპლის მიერ დღეში მოხმარებული პლასტმასის ჯამი. პლასტმასის გადაყლაპვის შესაძლო რისკის დიაპაზონი დაბალი, საშუალო და მაღალია, რადგან ზოგიერთ ცვლადს არასრული მონაცემები აქვს;

b - მონტერეის ყურის დანალექებიდან ამოვარდნილი მასალის სიღრმე, რომელიც შეესაბამება მონტერეის ყურეში პლასტმასის კონცენტრაციების სიღრმის პროფილს. ვეშაპები და მსხვერპლი ილუსტრირებულია ალექს ბურსმას მიერ, ხოლო ფილტრაციის განივი კვეთის დიაგრამა ილუსტრირებულია სანაპირო კვლევების ცენტრის სკოტ ლენდრის მიერ.

წყარო: 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>

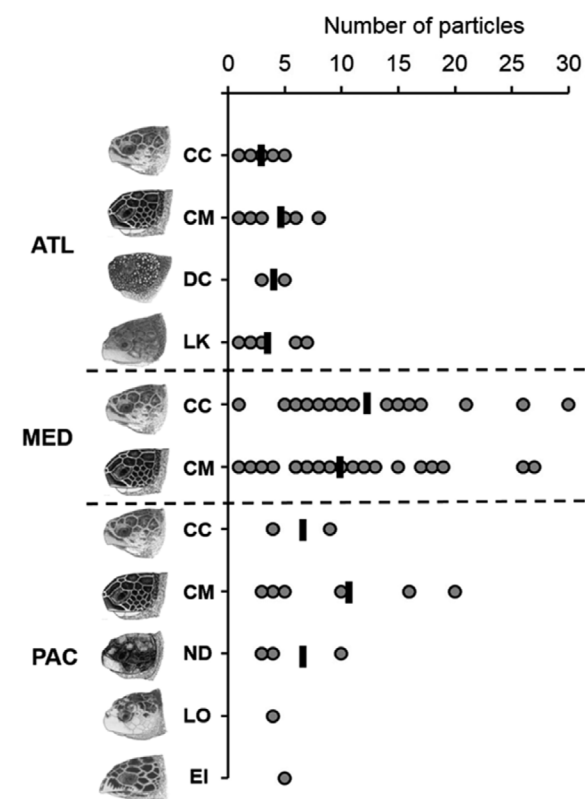


სურათი 26. პლასტმასის შეღწევადობის სქემატური წარმოდგენა კვებით ჯაჭვში

პლასტმასი ზღვის ორგანიზმებს კლავს

ყოველწლიურად, დაბინძურება დაახლოებით 1 მილიონ ზღვის ფრინველს და 100 000 ზღვის ძუძუმწოვარს კლავს¹⁰⁴ დაკვირვებები ადასტურებს კავშირს გადაყლაპულ ნარჩენებსა და ზღვის ფრინველების სიკვდილიანობას შორის. 51 სახეობის 1733 ფრინველზე ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ 557 ფრინველს (32.1%) შიგნით ზღვის ნაგავი ჰქონდა - 1-დან 40 ნივთამდე, მაქსიმალური წონით 3340 მგ და მოცულობით 3621 მმ³.¹⁰⁵

ცალკეული მონაცემები აჩვენებს, რომ ზოგიერთი პლასტმასი გამოყოფს დიმეტილსულფიდს, ქიმიურ ნივთიერებას, რომელიც იმიტირებს ზღვის ფრინველების მიერ საკვების იდენტიფიცირებისთვის გამოყენებული ყნოსვითი სიგნალს.¹⁰⁶ ახალმა კვლევამ ასევე აჩვენა, რომ პლასტმასის გადაყლაპვა იწვევს თირკმლის, ღვიძლისა და კუჭის დაზიანებას წიწილებში, ასევე ტვინის დაზიანებას, რომელიც ალცჰაიმერის დაავადების მსგავსია. ეს ხაზს უსვამს პლასტმასის დაბინძურების დამანგრეველ გავლენას ზღვის ფაუნაზე.¹⁰⁷ სინთეტიკური ნაწილაკები აღმოაჩინეს სამი ოკეანის აუზის შვიდივე სახეობის კუს თითოეულ ინდივიდში (სურ. 27).¹⁰⁸



სურათი 27. სინთეზური მიკრონაწილაკების მიღება სამი ოკეანის აუზის ყველა ზღვის კუს სახეობის მიერ. თითოეული ოკეანის აუზის თითოეული სახეობისთვის თითოეულ 100 მლ ქვენიმუშში იდენტიფიცირებული ნაწილაკების საერთო რაოდენობა. შავი ხაზი წარმოადგენს ნაწილაკების საშუალო რაოდენობას. ზღვის კუს თავის ქალები გამოყენებულია WIDECAST-ის ნებართვით; ორიგინალური ნახატები ტომ მაკფარლენდის მიერ.

წყარო: 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>

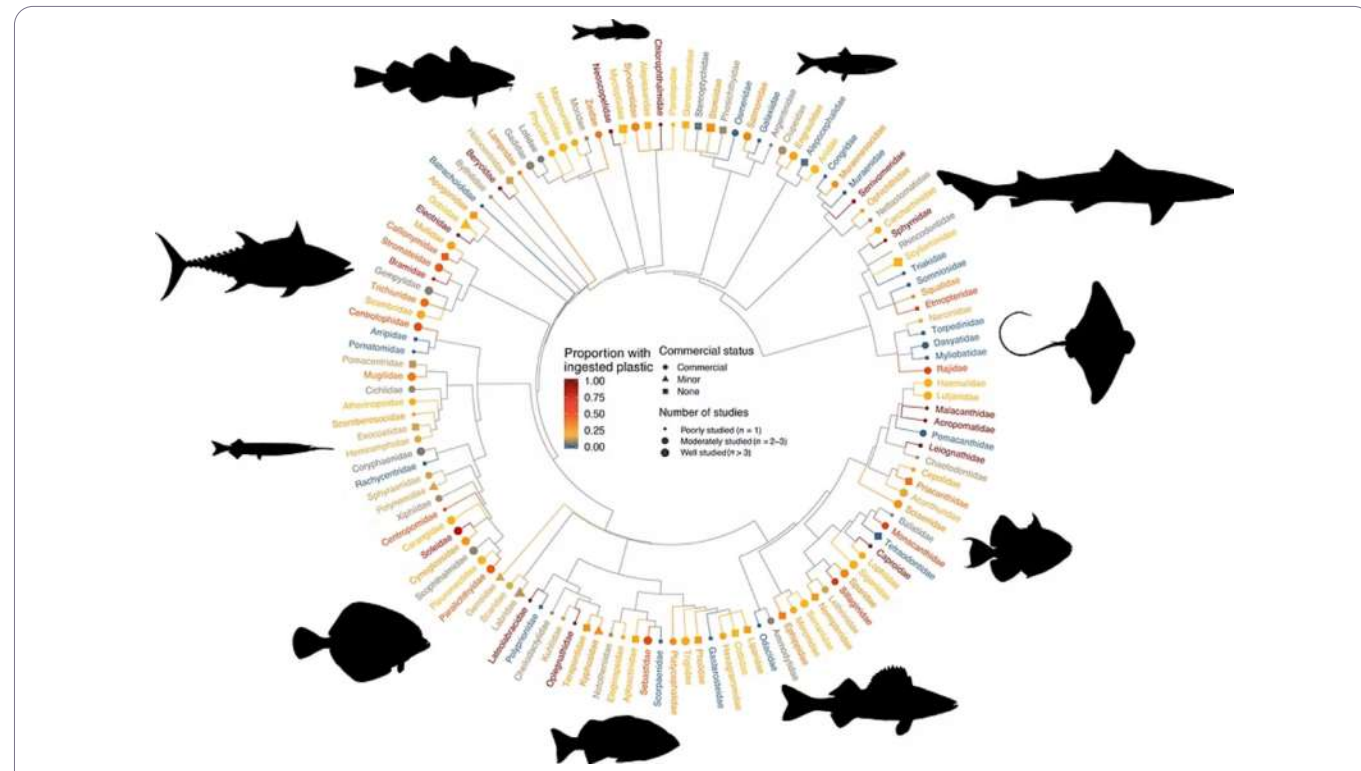
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. Sci. Adv. 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

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 სახეობის ზღვის თევზის 171,774 ინდივიდის კვლევამ აჩვენა, რომ ზღვის თევზის 386 სახეობა, მათ შორის 210 კომერციულად მნიშვნელოვანი, მოიხმარდა პლასტმასის ნარჩენებს.¹⁰⁹ თევზების მიერ მიკროპლასტმასის მიღების სიხშირე 26%-ს შეადგენდა, რაც ბოლო ათწლეულის განმავლობაში გაორმაგდა (სურათი 28). ანალოგმა აჩვენა დადებითი კორელაცია ზედაპირულ წყლებში პლასტმასის სიჭარბესთან (სურათი 29) და ზღვის ორგანიზმების მიერ მის მოხმარებას შორის (სურათი 30).

ლაბორატორიული კვლევები აჩვენებს, რომ პლასტმასის ნაერთები, თევზის ქსოვილში შეწოვისას, ამცირებს აქტივობას, არღვევს ღვიძლის ფუნქციას, აზიანებს ტვინს, ანელებს ზრდას და აუარესებს რეპროდუქციულ ფუნქციას.^{109, 110, 111}



სურათი 28. თევზების ოჯახები და პლასტმასის მიღება.

ზღვის თევზების ოჯახების ფილოგენეტიკური ურთიერთობები ($n = 131$), შეფერილი პლასტმასის მიღების სიხშირის მიხედვით. თითოეული წერის ფორმები მიუთითებს მონაცემთა ნაკრებში ოჯახში იმ სახეობების პროპორციას, რომლებიც კომერციულად იჭერენ თევზს (0 = კომერციულად არ იჭერენ თევზს; მცირე = კომერციულად დაჭერილი სახეობების 25%; კომერციულად = > კომერციულად დაჭერილი სახეობების 25%). წერის ზომა მიუთითებს ამ ოჯახში არსებულ სახეობებზე ჩატარებული კვლევების რაოდენობაზე. ეს ხაზს უსვამს 15 ოჯახს, რომლებიც კარგად არის შესწავლილი ($n > 10$ ინდივიდი, > 2 სახეობა) პლასტმასის მიღების მაღალი სიხშირით (FO პლასტმასი > 0.25); ამ ოჯახებიდან 67, სადაც პლასტმასის მიღების ჩანაწერებია, ასევე კომერციულად იჭერენ თევზს.

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

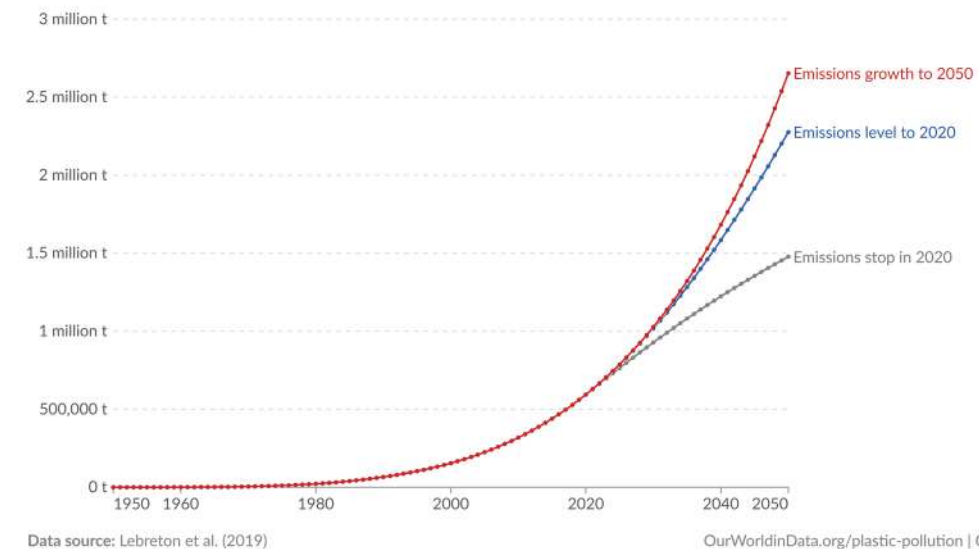
¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

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

¹¹¹Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

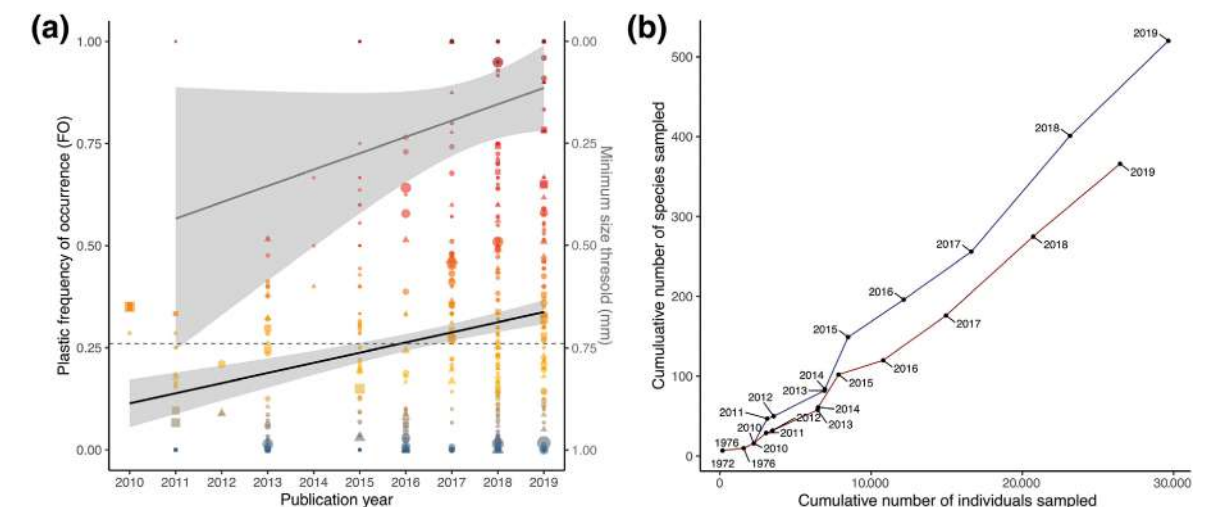
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with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



სურათი 29. ოკეანის ზედაპირზე მიკროპლასტმასის ზრდის გრაფიკი 2050 წლამდე პროგნოზით.

წყარო: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (წდომის თარიღი: 1 მაისი 2025)

მონაცემთა წყარო: 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>



სურათი 30. თევზების მიერ პლასტმასის მიღების დროითი ტენდენციები. (a) ზედა ნაცრისფერი ხაზი მიუთითებს, რომ 2011 წლიდან მოყოლებული უფრო და უფრო მცირე ნაწილაკების აღმოჩენის ტენდენცია შეინიშნება. ქვედა შავი ხაზი აჩვენებს პლასტმასის გამოყენების სიხშირის (FO) ზრდას თევზის ყველა სახეობაში 2010 წლიდან 2019 წლამდე. ამ პერიოდში პლასტმასის მოხმარების სიხშირე მნიშვნელოვნად გაიზარდა, წელიწადში 2.4%-ით. ჰორიზონტალური წერტილოვანი ხაზი წარმოადგენს FO-ს 0.26-ს, რაც თევზების მიერ პლასტმასის მოხმარების საშუალო სიხშირეა მთელ მსოფლიოში. (b) სახეობების დაგროვების მრუდი, სადაც ლურჯი ხაზი მიუთითებს დროთა განმავლობაში შესწავლილი სახეობების კუმულატიურ რაოდენობას, მათ შორის პლასტმასის გადაყლაპვით და მის გარეშე აღმოჩენილ სახეობებს, ხოლო წითელი ხაზი ასახავს მხოლოდ პლასტმასის გადაყლაპვის მქონე სახეობებს. წითელ ხაზში ასიმპტოტის არარსებობა მიუთითებს მაღალ ალბათობაზე, რომ მომდევნო წლებში დამატებითი სახეობები გააგრძელებენ პლასტმასის მოხმარებას.

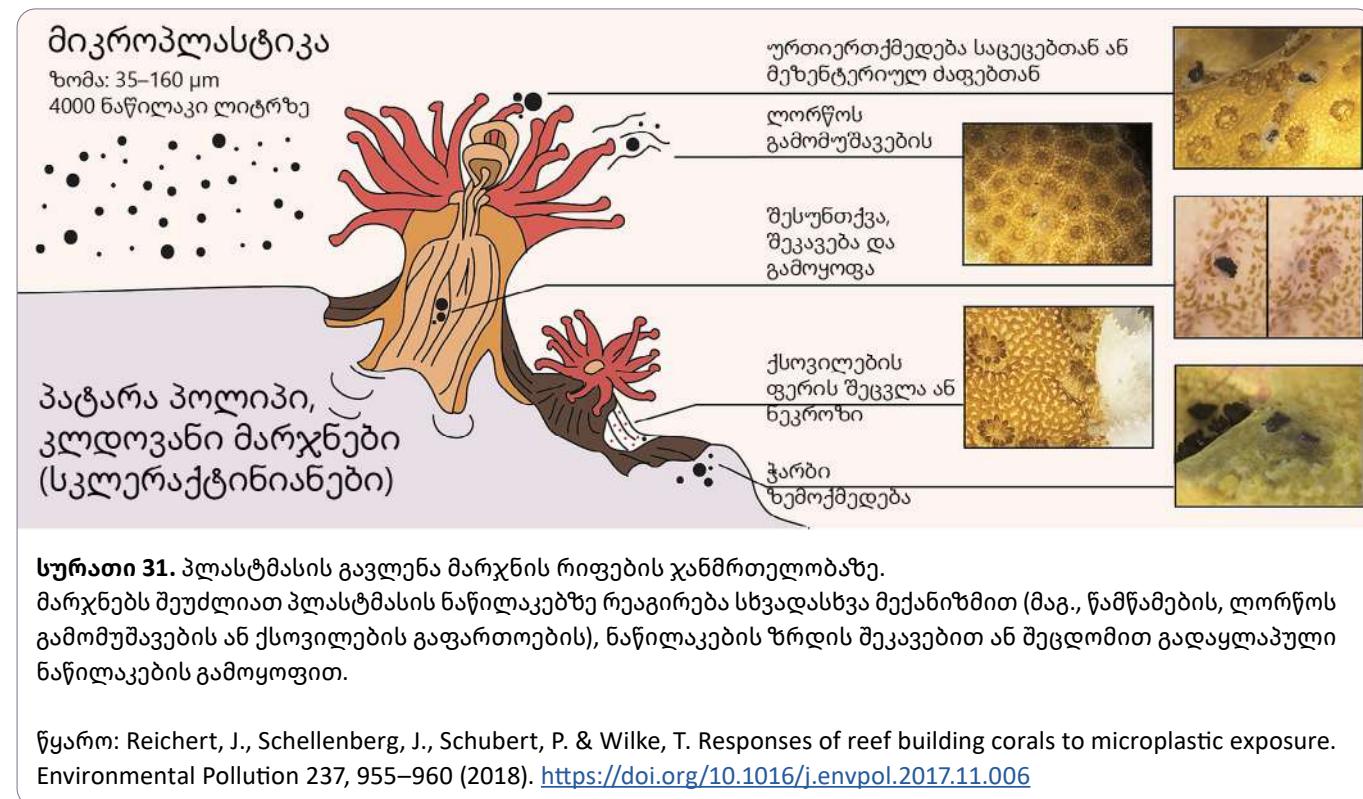
წყარო: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

მარჯნები დარტყმის ქვეშ:

მიკრო საფრთხე გლობალური მასშტაბით

პლასტმასით დაბინძურება მარჯნის რიფებისთვის მზარდ საფრთხეს წარმოადგენს, რადგან ის მათ კვებით ჯაჭვებში შედის და დაავადებების გავრცელებას და რიფების საზოგადოების სტრუქტურის განადგურებას ზრდის. ანალიზმა ანთროპოგენური ნარჩენები გამოავლინა შესწავლილი 84 რიფიდან 77-ზე, მათ შორის ცენტრალურ წყნარ ოკეანეში¹¹² მდებარე იზოლირებულ ატოლებზე. შესწავლილი ექვსი სახეობიდან ხუთში დაფიქსირდა ჯანმრთელობისთვის უარყოფითი ზეგავლენა¹¹³, როგორიცაა გაუფერულება და ქსოვილების ნეკროზი¹¹⁴ (სურათი 31).

პლასტმასის უფრო დიდი ფრაგმენტები ხელს უწყობს დაავადებების გადაცემას და ფიზიკურ დაზიანებას, რაც ზრდის მარჯნების პათოგენების მიმართ დაუცველობას.¹¹⁵ ეს ზეგავლენა გავლენას ახდენს ჩონჩხის მიკრობიომზე, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მარჯნის კოლონიების ჯანმრთელობის შენარჩუნებაში¹¹⁶ (სურათი 32). კვლევა ასევე აჩვენებს, რომ მიკროპლასტმასზე ბიოფილმები, რომლებიც ცნობილია როგორც პლასტიფეროები,¹¹⁴ შეიძლება გამოიწვიოს დისბიოზი მარჯნის მიკრობიომაში.¹¹⁷ პლასტმასის ზემოქმედება მარჯნის დაავადებების რისკს 4%-დან 89%-მდე ზრდის (სურათი 33). მარჯნის რიფების დაკარგვა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ბიომრავალფეროვნების დაკარგვაზე, რადგან ისინი ზღვის სახეობების მეოთხედის ჰაბიტატს წარმოადგენენ.¹¹⁵



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>

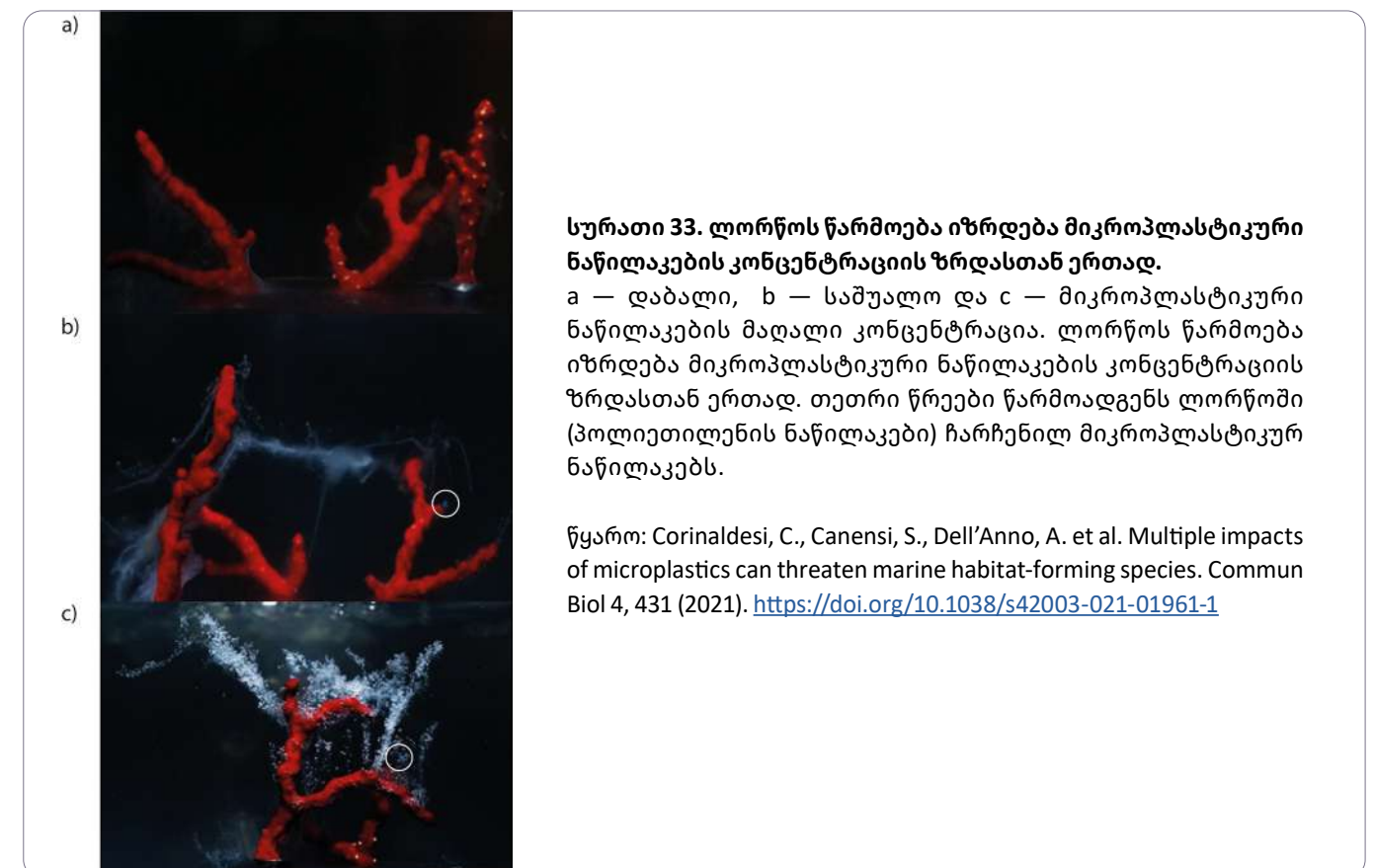
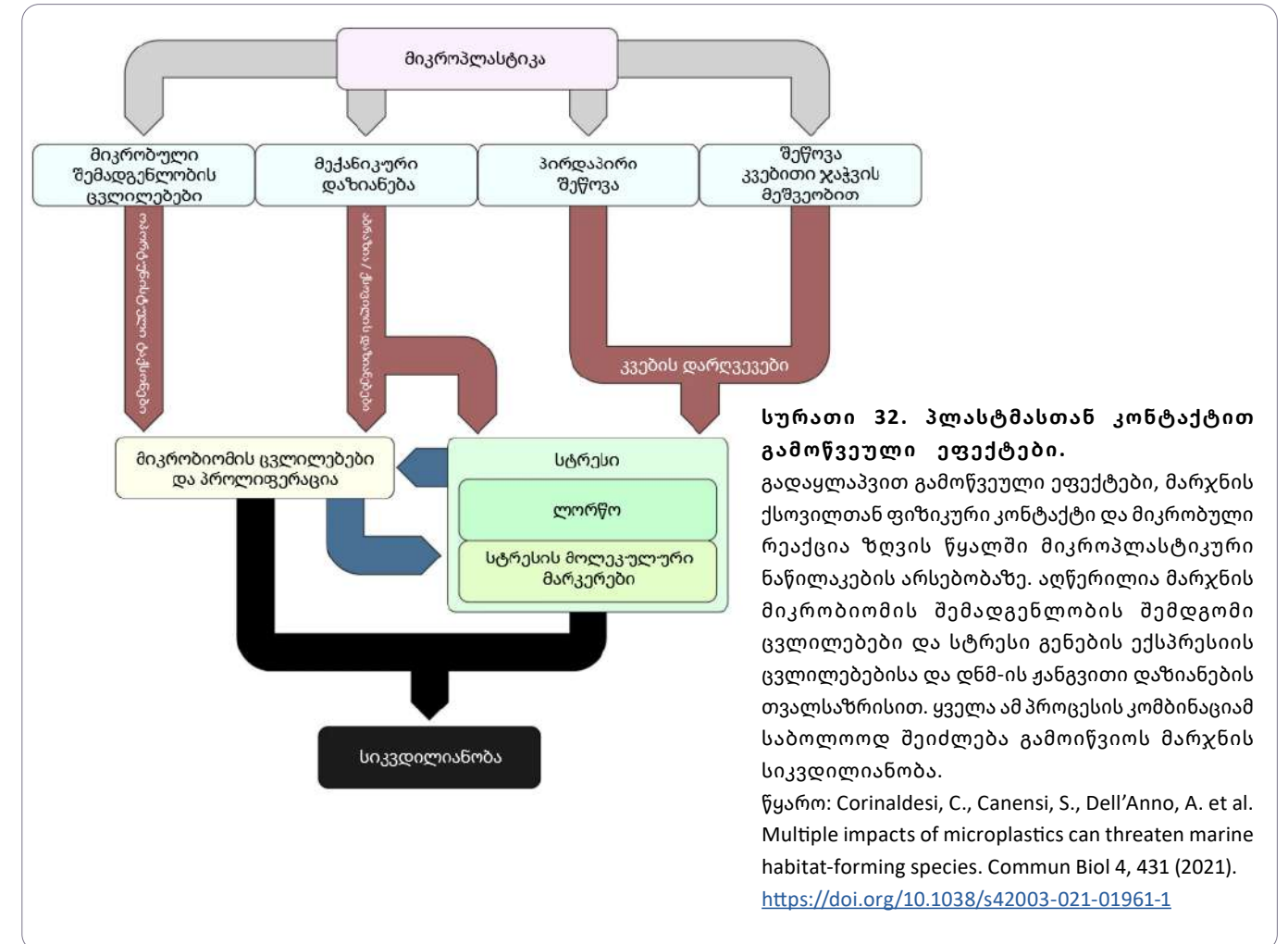
¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. Environmental Pollution 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

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>

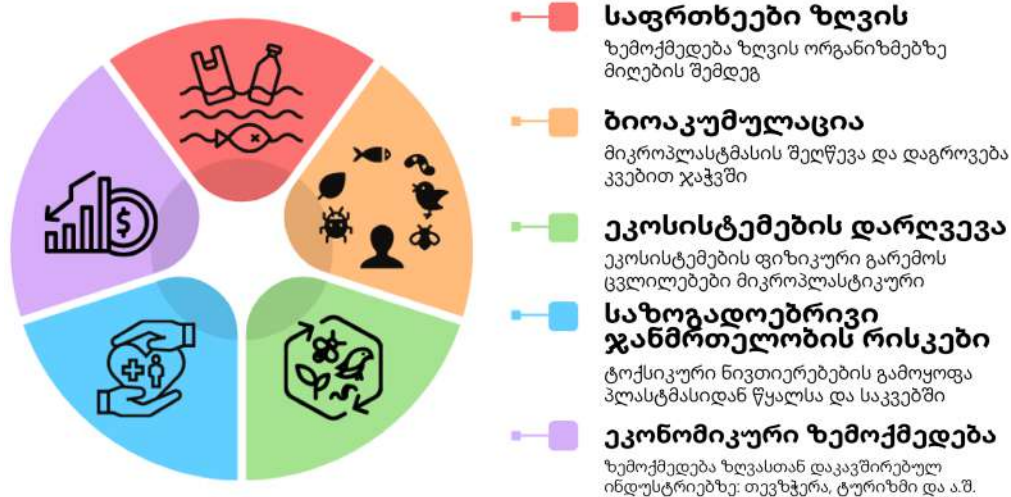
¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. Environmental Microbiome 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>



მნპ-ის გავლენა ეკოსისტემების ჟანგბადის ბალანსზე

დაკვირვებები აჩვენებს, რომ გარემოში პლასტმასი ძირითადად მზის რადიაციის ზემოქმედებით იშლება. ეს პროცესი ცვლის მის ქიმიურ შემადგენლობას და სტრუქტურას. კვლევები ადასტურებს, რომ მზის სხივებით გამოწვეული რეაქციები აძლიერებს გახსნილი ორგანული ნაერთების გამორეცხვას, რაც გავლენას ახდენს ზღვის წყლის ბიოგეოქიმიაზე და ასტიმულირებს ჰეტეროტროფული ბაქტერიების ზრდას¹¹⁸ (სურათი 34).

მიკროპლასტმასისგან გამოწვეული საფრთხეები ზღვის გარემოში



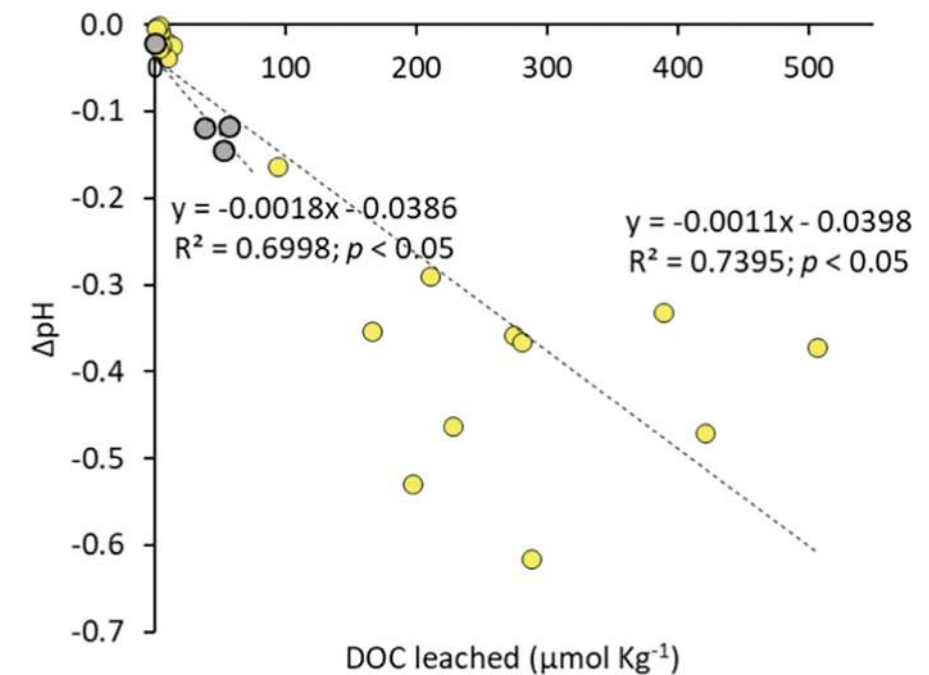
სურათი 34. ზღვის მიკროპლასტმასის მიერ წარმოქმნილი საფრთხეები.

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

გრძელვადიანი კვლევები აჩვენებს, რომ პლასტმასის მიერ ზღვის წყალში გამოყოფილი ქიმიკატები მისი დაშლისას მოდის ან თავად მასალისგან, ან პოლიმერისთვის ფერის ან სტაბილურობის მისაცემად გამოყენებული დანამატებისგან. ამ ნაერთებიდან ზოგიერთი ორგანული მჟავებია, რაც ხსნის მათ როლს pH-ის შემცირებაში. ამრიგად, პლასტმასი ზრდის ოკეანის მჟავიანობას (სურათი 35), რამაც, თავის მხრივ, შეიძლება მნიშვნელოვნად შეაფერხოს დედამიწის ბუნებრივი სისტემების ფუნქციონირება.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>

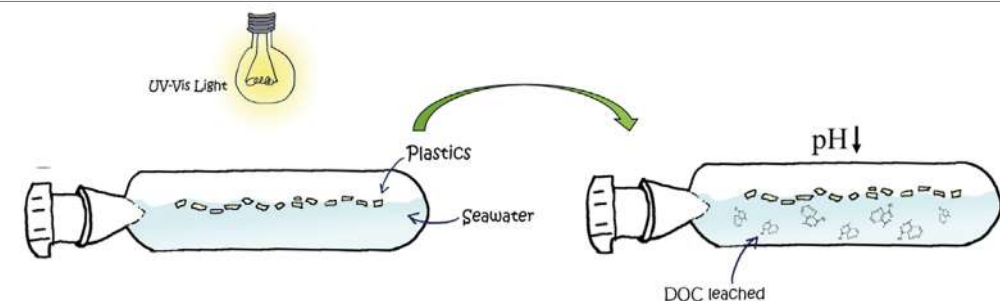
¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



სურათი 35. pH-ის ცვლილებასა და პლასტმასიდან გამორეცხილ DOC-ს შორის ურთიერთკავშირი, რომელიც ნაჩვენებია თითოეული ინდივიდუალური განმეორებითი ნიმუშისთვის ყველა ექსპერიმენტის განმავლობაში. ასევე მოცემულია თითოეული ექსპერიმენტისთვის პლასტმასისგან თავისუფალი კონტროლი. ყვითელი წერტილები წარმოადგენს დასხივებულ დამუშავებას, ხოლო ნაცრისფერი წერტილები - მუქ დამუშავებას. წყარო: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

66

„ამ კვლევის წყალობით, ჩვენ შევძელით გვეჩვენებინა, რომ ოკეანის ზედაპირის პლასტმასით ძლიერ დაბინძურებულ ადგილებში, პლასტმასის დეგრადაცია გამოიწვევს pH დონის 0.5 ერთეულამდე შემცირებას, რაც შედარებადია pH-ის ვარდნასთან, რომელიც მოსალოდნელია ანთროპოგენური ემისიების ყველაზე უარესი სცენარის შემთხვევაში XXI საუკუნის ბოლოსთვის“, — ამბობს კრისტინა რომერა-კასტილო, საზღვაო მეცნიერებათა ინსტიტუტის (ICM-CSIC) მკვლევარი (სურათი 36).¹²⁰



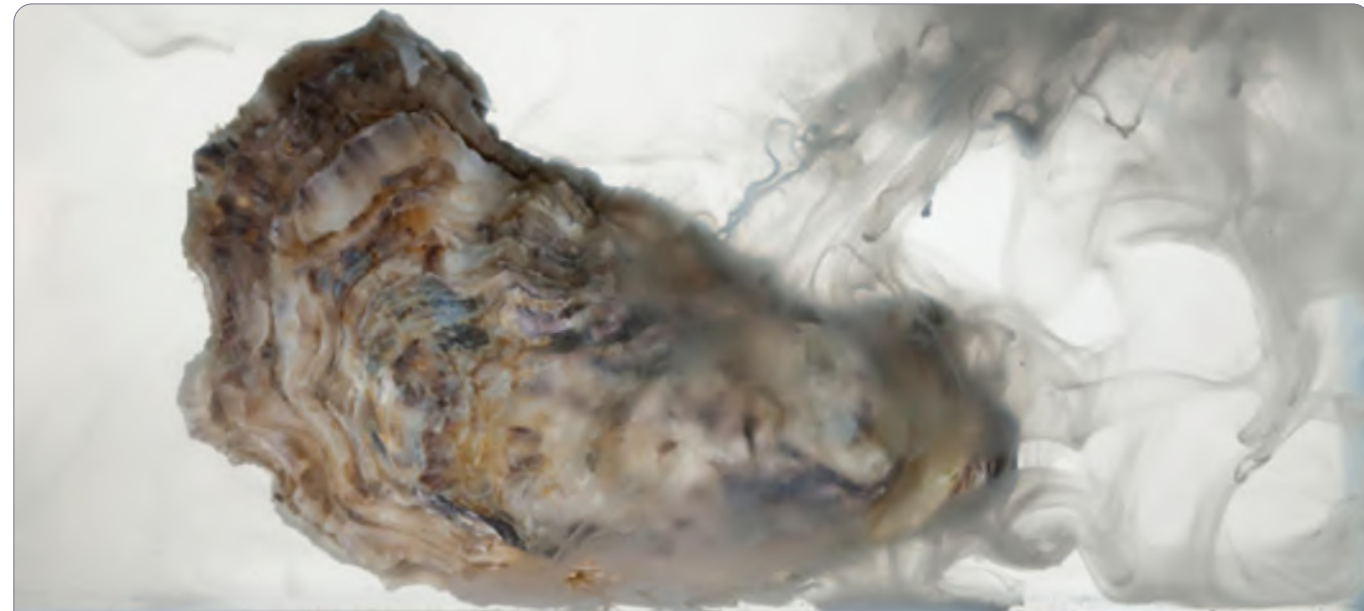
სურათი 36. პლასტმასის გამორეცხვას შეუძლია ზღვის წყლის pH-ის 0.5 ერთეულამდე შემცირება. წყარო: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

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)

ოკეანის მჟავიანობა საზღვაო გარემოს დარღვევაა, მდგრადი და მზარდი გარემო ზეწოლა.¹²¹ ეკოსისტემებზე ზემოქმედება ათწლეულების, საუკუნეების და უფრო მეტხანს გრძელდება. დაკვირვებები ადასტურებს სანაპირო სისტემებში ბიომრავალფეროვნების შემცირებას pH-ის შემცირების გამო.^{122, 123} ეს ამცირებს ეკოსისტემების მდგრადობას, საფრთხეს უქმნის მათ ფუნქციებს, მათ შორის ჰაბიტატს, საკვები ნივთიერებების ციკლს და ნახშირბადის შენახვას.¹²³

კვლევები აჩვენებს, რომ მიდიები (*Mytilus edulis*) უფრო ნელა იზრდებიან და ნაკლებად გადარჩებიან ოკეანის მჟავიანობის დროს (სურათი 37). ეს ამცირებს მათ რაოდენობას, რაც ამცირებს წყლის ფილტრაციისა და სანაპირო გარემოს ხარისხის შენარჩუნების მათ უნარს.¹²⁴

ოკეანის ზედაპირული pH-ის ამჟამინდელი მაჩვენებლები უპრეცედენტოა ბოლო 26 000 წლის განმავლობაში¹²⁵ ეს პროცესი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მარჯნის რიფებზე, ღრმა ზღვისა და მაღალი განედის ეკოსისტემებზე, რომლებიც დამოკიდებულნი არიან უნიკალურ სახეობებზე. ეს სახეობები შეუცვლელ როლს ასრულებენ და მათი დაკარგვა არღვევს ეკოსისტემის ძირითად ფუნქციებს, რადგან მათი შემცვლელები არ არსებობს.¹²⁶



სურათი 37. წყნარი ოკეანის ხამანწკა ორეგონის შტატში, Whiskey Creek-ის ხამანწკების ინკუბატორში მღვრიე სპერმას გამოყოფს. ზოგიერთ სანაპირო წყლებში მჟავიანობამ უკვე სერიოზულ დონეს მიაღწია; აქ კი წარმოება ორჯერ შემცირდა, რამაც ხამანწკების ლარვების ზრდა შეანელა.

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

ხამანწკები და მიდიები კარბონატული გაჯერების შემცირების გრადიენტების გასწვრივ მნიშვნელოვან კლებას ავლენენ. ოკეანის მჟავიანობამ შეიძლება შეამციროს ხამანწკების სიმრავლე

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>

და ეკოსისტემური სერვისები, რომლებსაც ისინი ველურ ბუნებაში უზრუნველყოფენ; ასევე შეიძლება შეამციროს მათი ხარისხი, როგორც ზღვის პროდუქტების.

კვლევა ადასტურებს მიკროპლასტიკების მნიშვნელოვან ნეგატიურ გავლენას მიკროწყალმცენარეების ბიოლოგიურ პარამეტრებზე¹²⁷, მათ შორის ზრდაზე, ქლოროფილის შემცველობაზე, ფოტოსინთეზურ აქტივობასა და რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების დონეზე.^{128, 129}

კვლევის თანახმად, მიკროპლასტიკების ზემოქმედება იწვევს ფოტოსინთეზის გლობალურ შემცირებას 7.05–12.12%-ით ზღვის და მტკნარი წყლის წყალმცენარეებში.¹³⁰ ცნობილია, რომ ფოტოსინთეზი დედამიწაზე მთავარი პროცესია, რომელიც წარმოქმნის მოლეკულურ ჟანგბადს (O_2), რომელიც გამოიყოფა ატმოსფეროში.

გარდა ამისა, საზღვაო ნალექებში არსებული მიკროპლასტიკა ცვლის მიკრობულ საზოგადოებებს და არღვევს აზოტის ციკლს, რაც პოტენციურად ამწვავებს ადამიანის მიერ გამოწვეულ პრობლემებს, როგორიცაა ტოქსიკური წყალმცენარეების ყვავილობა. ოკეანის ზედაპირზე პლანქტონის საზოგადოებებში ცვლილებებმა შეიძლება გააუარესოს დეოქსიგენაცია (წყალში ჟანგბადის რაოდენობის შემცირება), რაც ზღვის ორგანიზმებს ჟანგბადს ართმევს.¹³¹

მონაცემები აჩვენებს, რომ 1960-დან 2010 წლამდე ოკეანემ დაკარგა გახსნილი ჟანგბადის 2% წყლის ტემპერატურის მატებისა და დამაბინძურებლების დაგროვების გამო, მათ შორის სამრეწველო, საყოფაცხოვრებო და სასოფლო-სამეურნეო ჩამონადენის.¹³² ჟანგბადის დაკარგვა იწვევს მკვდარი ზონების წარმოქმნას - ოკეანის იმ უბნების, სადაც ზღვის სიცოცხლე პრაქტიკულად გაქრა. დაკვირვებები აჩვენებს, რომ 1960-იან წლებში მსოფლიო ოკეანეებში 45 მკვდარი ზონა იყო, ხოლო 2011 წლისთვის მათი რიცხვი დაახლოებით 700-მდე გაიზარდა.¹³³ UNDP-ის ვებსაიტზე გამოქვეყნებული მონაცემების თანახმად, მკვდარი ზონების რაოდენობა 1960-იანი წლებიდან მოყოლებული ყოველ ათწლეულში ორმაგდება. ამ ტენდენციის გათვალისწინებით, დიდი ალბათობით, მათი რიცხვი 2025 წლისთვის 1500-ს მიაღწევს.¹³⁴

პლასტიკური დაბინძურება გავლენას ახდენს დედამიწის სისტემაში არსებულ მრავალ პროცესზე. კვლევის თანახმად, მას შეუძლია გაამწვავოს ისეთი აქტუალური გარემოსდაცვითი პრობლემები, როგორიცაა ბიომრავალფეროვნების დაკარგვა და კლიმატის ცვლილება.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. & Rath Bhuwaneswari, 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 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.csee.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.

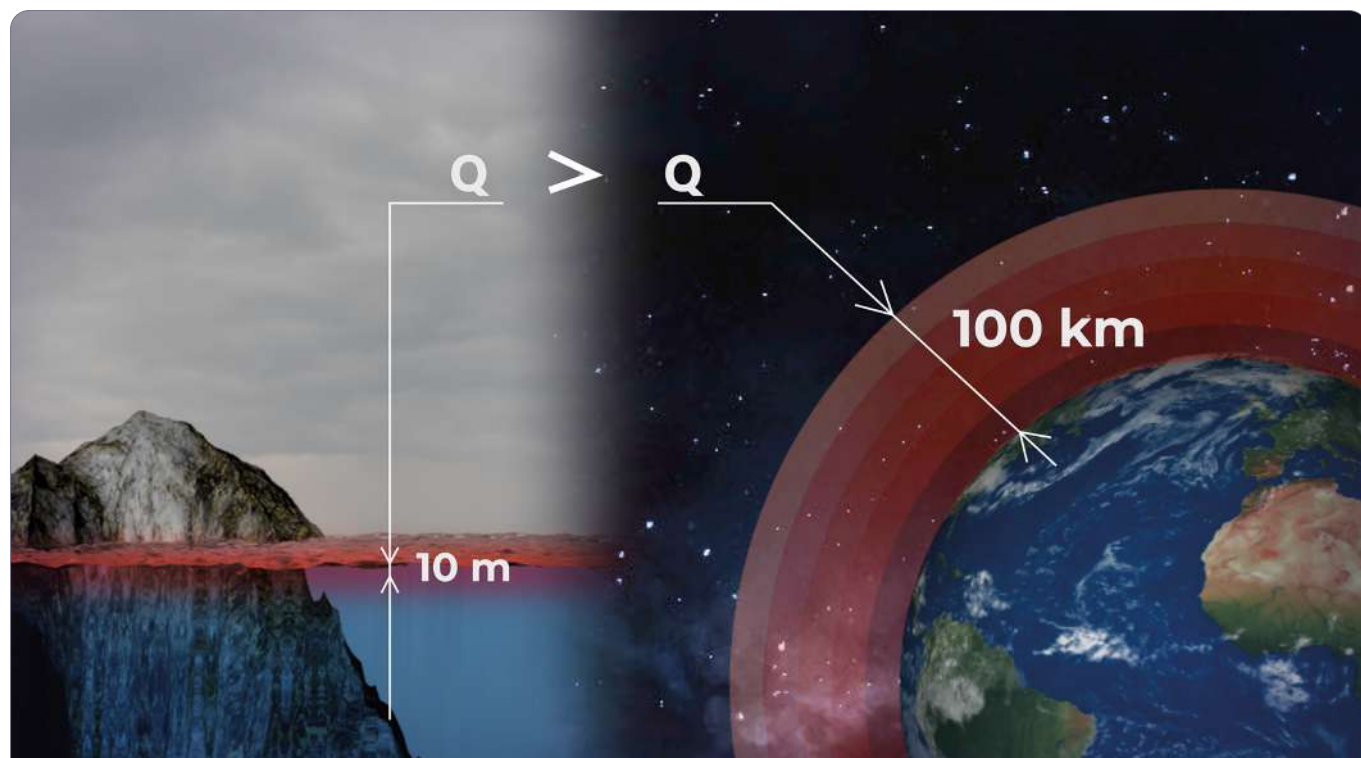
<https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

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>

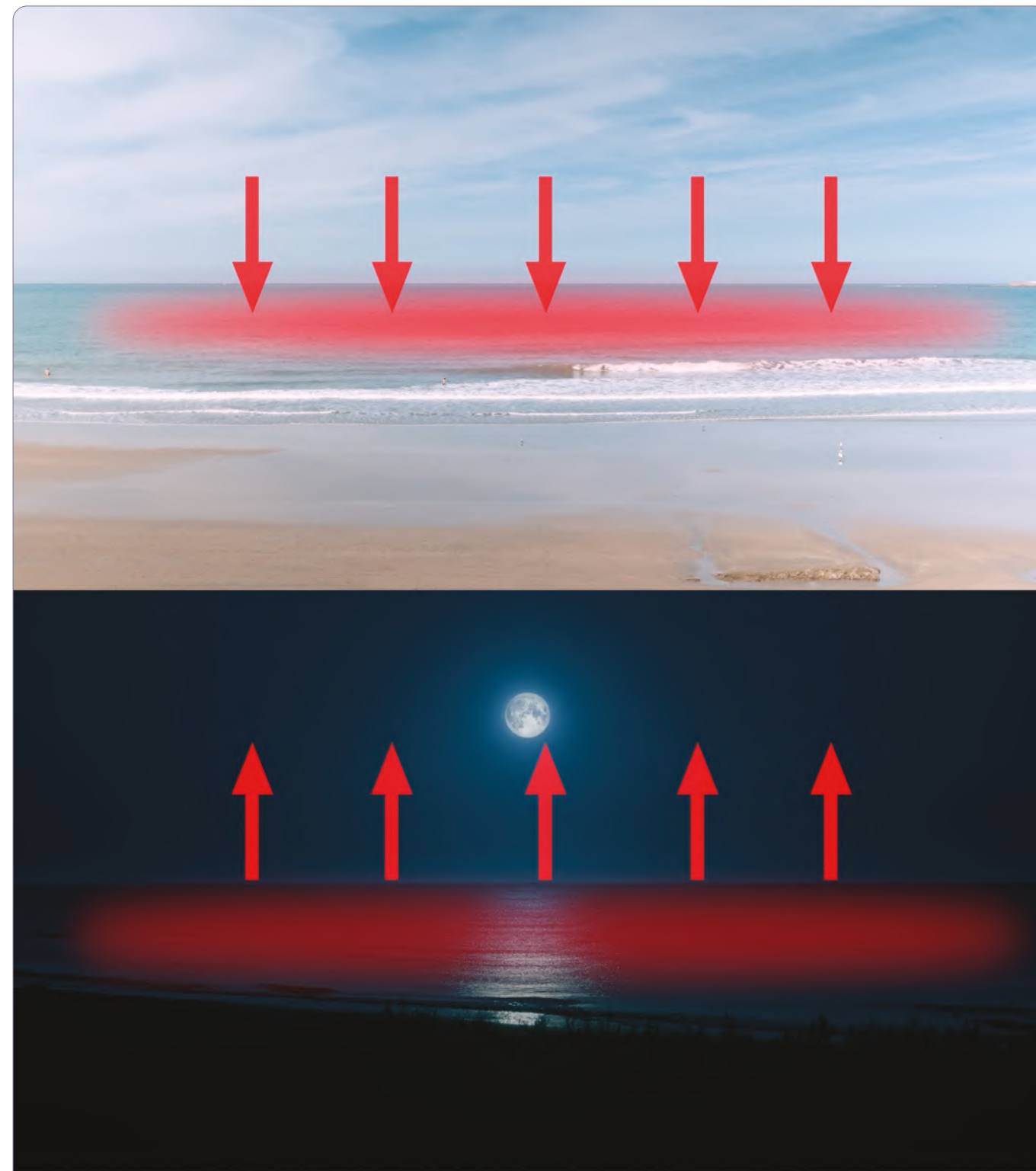
მრავალეროვნული სასარმოების გავლენა კლიმატზე

ოკეანის ფუნქციები

ოკეანე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს პლანეტის კლიმატური წონასწორობის შენარჩუნებაში, მოქმედებს როგორც ბუნებრივი „კონდიციონერი“. მისი უნიკალური უნარი, დაგროვდეს და თანდათანობით გამოთავისუფლდეს სითბო, ხელს უწყობს პლანეტაზე ტემპერატურის რყევების ზომიერებას. ოკეანის წყლის მხოლოდ ათმეტრიან ფენას შეუძლია მეტი სითბოს შთანთქმა, ვიდრე დედამიწის მთელ ატმოსფეროს (სურ. 38). ეს ამცირებს ტემპერატურულ სხვაობას როგორც დღისით, ასევე ღამით (სურ. 39), ასევე სეზონურად - ზაფხულსა და ზამთარში.



სურათი 38. ოკეანისა და ატმოსფეროს შედარებითი თბოტევადობის სქემატური წარმოდგენა: ჰაერის მცირე მასის მიუხედავად, ოკეანეს შეუძლია ათჯერ მეტი სითბოს დაგროვება და შენარჩუნება, რაც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დედამიწის კლიმატის რეგულირებაში



სურათი 39. ყოველდღიური სითბოს გაცვლის სქემატური წარმოდგენა: ოკეანე დღის განმავლობაში შთანთქმავს სითბოს და ღამით გამოყოფს, რაც ასწორებს ჰაერის ტემპერატურის რყევებს

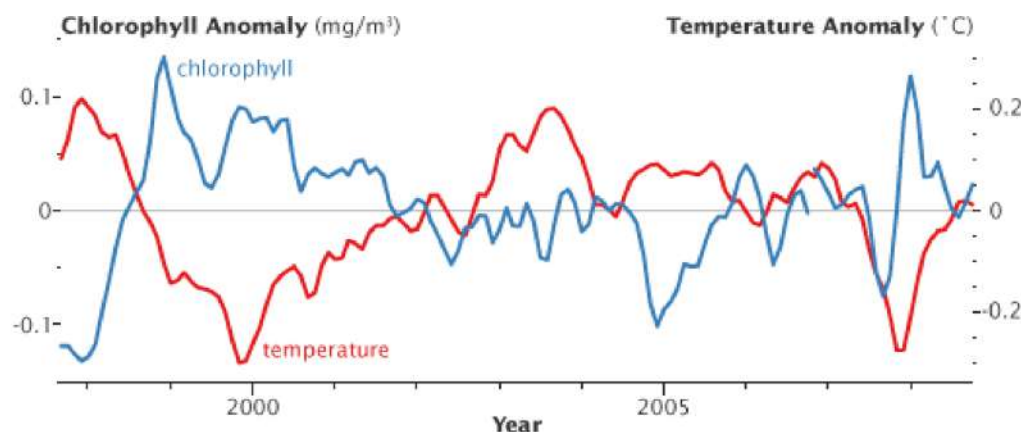
ოკეანის დინებები თბილ წყალს ტროპიკებიდან უფრო ცივ რეგიონებში, მაგალითად ჩრდილოეთ განედებში, გადააქვთ. ეს ხელს უწყობს სანაპირო რაიონებში კლიმატის შერბილებას. ცივი დინებები, პირიქით, გაციებულ წყალს ეკვატორში აბრუნებენ. ამ გზით, ოკეანე არეგულირებს პლანეტის კლიმატს.

ოკეანეს მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს ატმოსფერულ პროცესებზე, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ღრუბლებისა და ნალექების წარმოქმნაში. ყოველდღიურად, მისი ზედაპირიდან უზარმაზარი რაოდენობით წყალი ორთქლდება, რომელიც შემდეგ ღრუბლებად კონდენსირდება და დედამიწაზე წვიმის ან თოვლის სახით ბრუნდება. ეს პროცესი მნიშვნელოვანია მდინარეების, ტბებისა და ნიადაგის წყლის რესურსების მტკნარი წყლით შესავსებად.

ოკეანეში არსებული მიკროსკოპული წყალმცენარეები, როგორიცაა ფიტოპლანქტონი (სურ. 40), ჟანგბადის 50%-ზე მეტს გამოიმუშავებენ.¹³⁶ ოკეანის ქიმიისა და ბიოლოგიის მრავალი მოდელი პროგნოზირებს, რომ ატმოსფერული სათბურის გაზების ზრდის საპასუხოდ ოკეანის ზედაპირის დათბობასთან ერთად, ფიტოპლანქტონის პროდუქტიულობა შემცირდება (სურათი 41).^{137, 138}



სურათი 40. ფიტოპლანქტონი უკიდურესად მრავალფეროვანია, ფოტოსინთეზური ბაქტერიებიდან (ციანობაქტერიები) დაწყებული, მცენარის მსგავსი დიატომებითა და ნიჟარიანი კოკოლიტოფორებით (მასშტაბის გარეშე) დამთავრებული. (კოლაჟი ადაპტირებულია სალი ბენსუსენის ნახატებისა და ფოტომიკროგრაფიების მიხედვით, NASA EOS პროექტის სამეცნიერო ოფისიდან.)
წყარო: NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>



სურათი 41. ოკეანის დაახლოებით 70% მუდმივად იყოფა ფენებად, რომლებიც ცუდად ერწყმის ერთმანეთს. 1997 წლის ბოლოდან 2008 წლის შუა პერიოდამდე, თანამგზავრებმა დააფიქსირეს, რომ საშუალოზე თბილი ტემპერატურა (წითელი ხაზი) ამ რეგიონებში ქლოროფილის საშუალოზე დაბალი კონცენტრაციის (ლურჯი ხაზი) მიზეზი გახდა. (გრაფიკი ადაპტირებულია ბერენფელდის და სხვების 2009 წლის სტატიიდან, რობერტ სიმონსი). წყარო: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

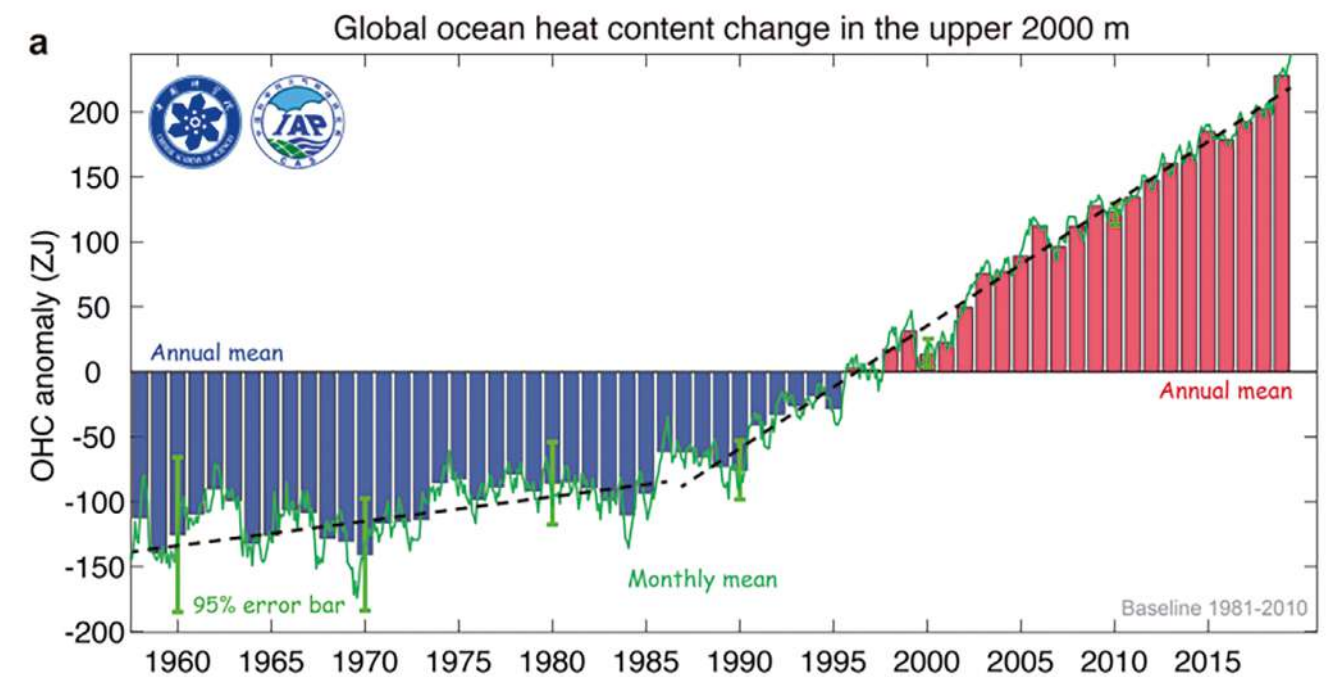
¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

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>

ოკეანის ტემპერატურის რეჟიმის ცვლილება

ანგარიში „მსოფლიო ოკეანის მდგომარეობა 2024“ ოკეანის უპრეცედენტო დათბობის შემაშფოთებელ სურათს ასახავს. კვლევები აჩვენებს, რომ ოკეანის ტემპერატურა 1960-დან 1986 წლამდე სტაბილურად იზრდებოდა. თუმცა, ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში ეს პროცესი გაორმაგდა (სურათი 42).¹³⁹



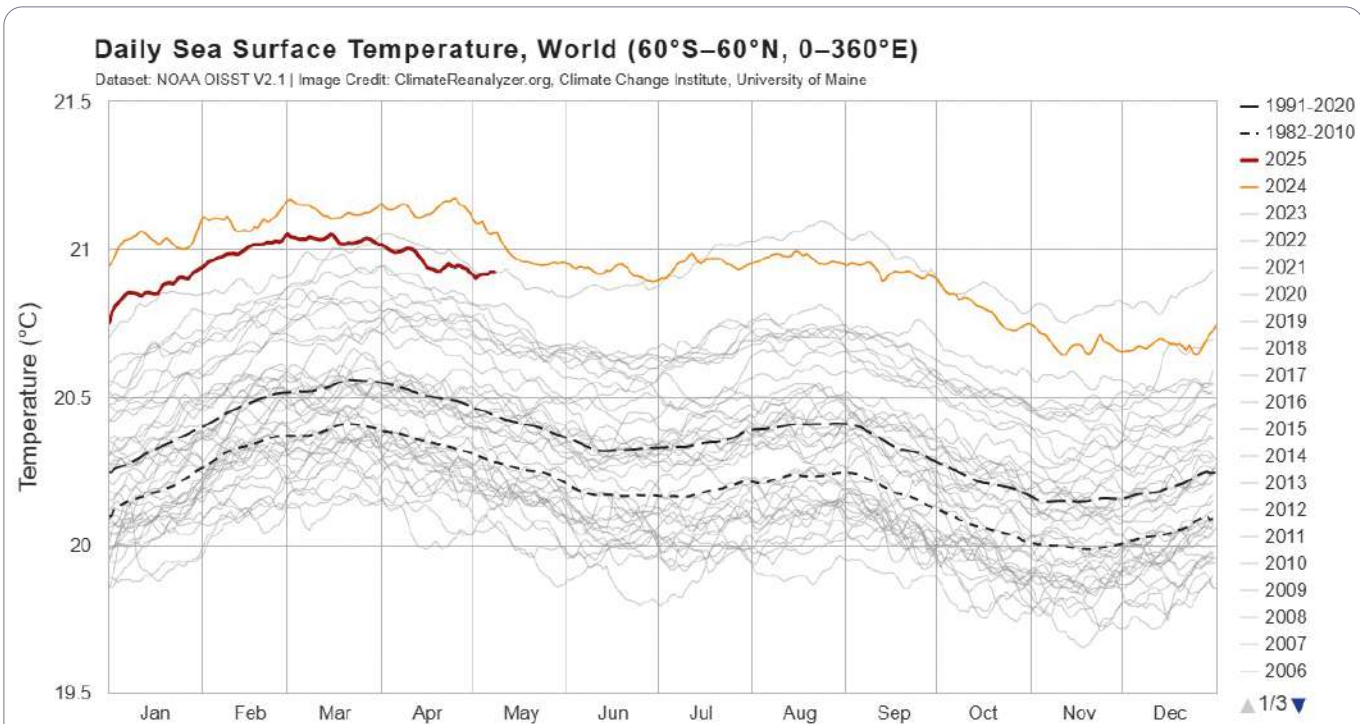
სურათი 42. სითბოს შემცველობის ცვლილება მსოფლიო ოკეანის ზედა 2000 მეტრში.
წყარო: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

2023 წელი რეკორდულად თბილი წელი იყო, რომელმაც 2016 წელს დამყარებული წინა რეკორდს გადააჭარბა. ასევე დამყარდა ზღვის ზედაპირის ტემპერატურის ყველა დროის რეკორდი.¹⁴⁰ ეს ტენდენცია გაგრძელდა და 2024 წელს 2023 წლის რეკორდი მოხსნა (სურათი 43) და გახდა ყველაზე თბილი მთელი დაკვირვების პერიოდში.¹⁴¹ ამ პერიოდში ზღვის ზედაპირის ტემპერატურა რეკორდულად მაღალ ნიშნულზე ზედიზედ 15 თვის განმავლობაში შენარჩუნდა, რაც დაკვირვებული დათბობის მდგრადობაზე მიუთითებს.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

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

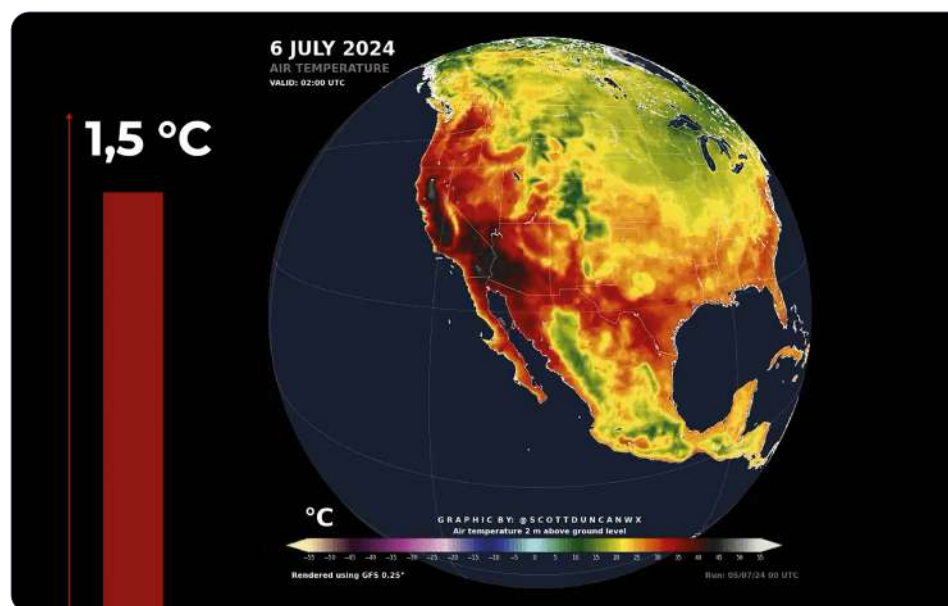
¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.



სურათი 43. ზღვის ზედაპირის დღიური ტემპერატურა: ოკეანის ზედა ფენების ტემპერატურის ცვლილებების გრაფიკული წარმოდგენა, რომელიც ასახავს სეზონურ ვარიაციას წლების განმავლობაში.

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

ისტორიაში პირველად, საშუალო წლიურმა ტემპერატურამ ინდუსტრიამდელ პერიოდს 1.5°C-ით გადააჭარბა¹⁴² (სურ. 44). ექსპერტების აზრით, ეს მაჩვენებელი კრიტიკული ზღვარია, რომლის შემდეგაც კაცობრიობა მასშტაბური კლიმატური მოკების წინაშე აღმოჩნდება.¹⁴³

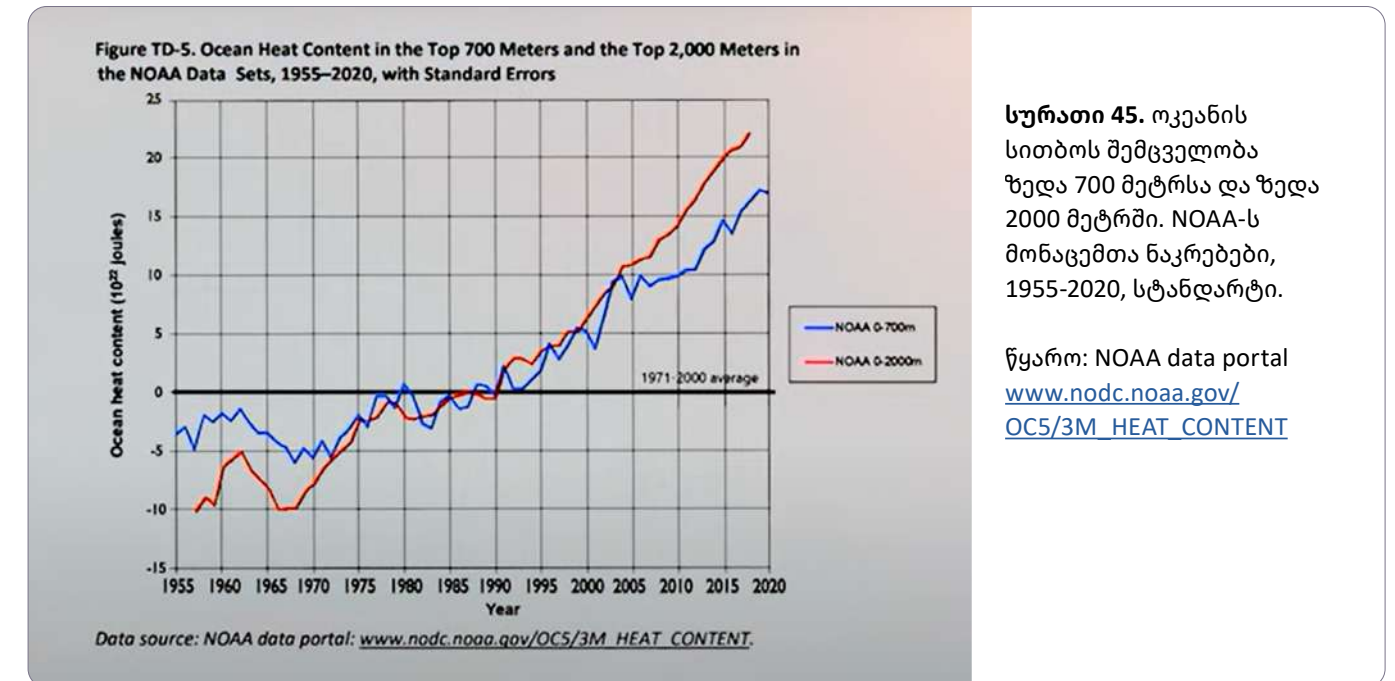


სურათი 44. კლიმატის ზღვრბლის სქემატური წარმოდგენა: 2024 წელს, საშუალო წლიური გლობალური ტემპერატურა პირველად გადააჭარბებს ინდუსტრიამდელ დონესთან შედარებით 1.5°C ზღვრბლს

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)

ტემპერატურის ეს მატება XXI საუკუნის შუა პერიოდისთვის იყო მოსალოდნელი¹⁴⁴, თუმცა ეს ზღვარი უკვე გადაილახა. გაეროს შეფასებით, თუ მიმდინარე ტენდენციები გაგრძელდება, გლობალური ტემპერატურა ამ საუკუნის განმავლობაში შესაძლოა თითქმის 3°C-ით გაიზარდოს.¹⁴⁴



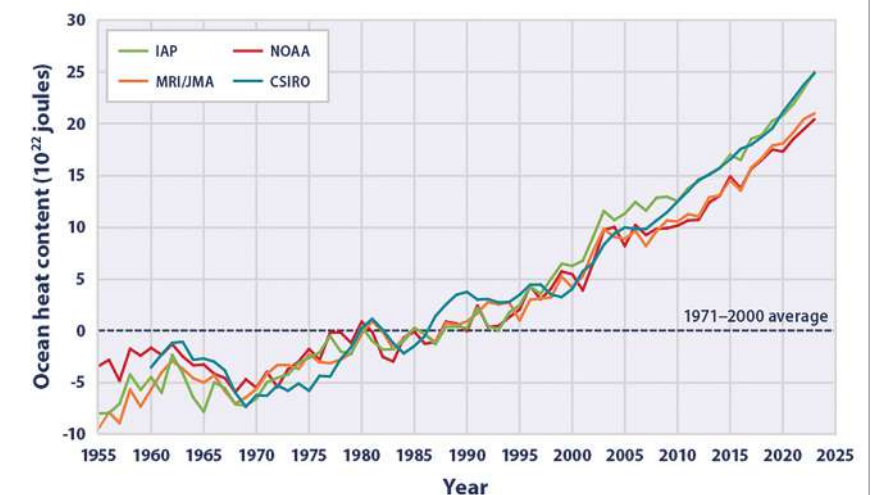
სურათი 45. ოკეანის სითბოს შემცველობა ზედა 700 მეტრსა და ზედა 2000 მეტრში. NOAA-ს მონაცემთა ნაკრებები, 1955-2020, სტანდარტი.

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

სურათი 46.

ეს დიაგრამა ასახავს გლობალური ოკეანის ზედა 700 მეტრის სითბოს შემცველობის ცვლილებებს 1955 წლიდან 2023 წლამდე. ოკეანის სითბოს შემცველობა იზომება ჯოულებში, ენერგიის ერთეულში, და შედარებულია 1971-2000 წლების პერიოდის საშუალო მაჩვენებელთან, რომელიც ნულზეა დაყენებული საცნობაროდ. სხვადასხვა საბაზისო პერიოდის არჩევა დროთა განმავლობაში არ შეცვლის მონაცემების ფორმას. ხაზები დამოუკიდებლად გამოითვალა სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით ოთხი ქვეყნის სამთავრობო უწყებების მიერ: აშშ-ის ეროვნული ოკეანისა და ატმოსფეროს ადმინისტრაცია (NOAA), ავსტრალიის საერთო სამეცნიერო და სამრეწველო კვლევების ორგანიზაცია (CSIRO), ჩინეთის ატმოსფერული ფიზიკის ინსტიტუტი (IAP) და იაპონიის მეტეოროლოგიური სააგენტოს მეტეოროლოგიური კვლევების ინსტიტუტი (MRI/JMA).

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

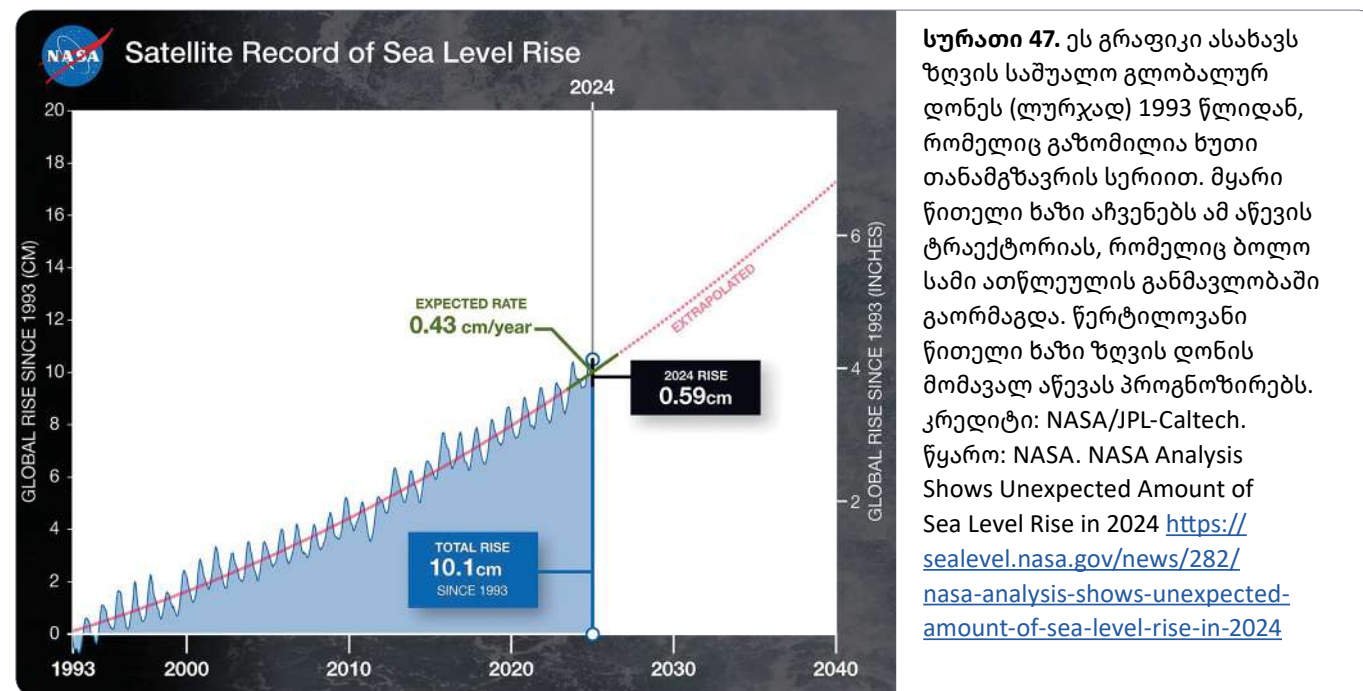


¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

ბოლო 60 წლის განმავლობაში, შუა სიღრმეში მყოფი ოკეანეები 15-ჯერ უფრო სწრაფად გათბა, ვიდრე წინა 10,000 წლის განმავლობაში¹⁴⁵ (სურ. 45–46). ეს აჩვენებს, რომ გლობალური დათბობის პროცესები გავლენას ახდენს არა მხოლოდ წყლის ზედა ფენებზე, არამედ ოკეანის უფრო ღრმა ნაწილებზეც, სადაც მზის სინათლე არ აღწევს. ასეთ სიღრმეში წყლის გაცხელებას უზარმაზარი ენერგია სჭირდება, რაც პრობლემის მასშტაბურობას უსვამს ხაზს. მეცნიერების აზრით, ოკეანის ამჟამინდელი ტემპით გასათბობად, უნდა გამოთავისუფლდეს ენერგიის ეკვივალენტი, რაც წელიწადში ყოველ წამში 7 ატომური ბომბის აფეთქებას შეესაბამება¹⁴⁶ - კოლოსალური ციფრი, რომელიც კითხვას ბადებს: საიდან მოდის ეს ენერგია?

წყლის ტემპერატურის მატება გარდაუვლად იწვევს ზღვის დონის აწევას, რაც მთელი სანაპირო ზოლის შთანთქმის საფრთხეს წარმოადგენს. ბოლო ორი საუკუნის განმავლობაში ზღვის დონე 21 სმ-ით, ხოლო ბოლო 30 წლის განმავლობაში - 10.1 სმ-ით აიწია.¹⁴⁷ ამჟამინდელი ზრდის ტემპი 2.5-ჯერ მეტია, ვიდრე ადრე და ეს ტენდენცია გაგრძელდება. თუ სიტუაცია ასე გაგრძელდა, მილიონობით ადამიანი ლტოლვილად იქცევა, იძულებული გახდება საკუთარი სახლებიდან გაიქცეს და სანაპიროდან შორს თავშესაფარი ეძებოს.

„2024 წელს ზღვის დონის აწევა უფრო მაღალი იყო, ვიდრე ველოდით“, - თქვა ჯომ უილისმა, ზღვის დონის მკვლევარმა NASA-ს რეაქტიული ძრავის ლაბორატორიიდან სამხრეთ კალიფორნიაში. **„ყოველი წელი ცოტა განსხვავებულია, მაგრამ ცხადია, რომ ოკეანე აგრძელებს აწევას და აწევის ტემპი სულ უფრო და უფრო სწრაფი ხდება“**¹⁴⁸ (სურათი 47).



ოკეანის დათბობა ასევე ხელს უწყობს ექსტრემალური ამინდის მოვლენების, როგორიცაა წყალდიდობები, ტაიფუნები და ძლიერი ნალექები, უფრო ხშირი და ინტენსიური წარმოშობას. ეს ცვლილებები საფრთხეს უქმნის პლანეტის ეკოსისტემებს და მილიარდობით ადამიანის სიცოცხლეს და ყოველწლიურად უფრო და უფრო მწვავე ხდება.

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)

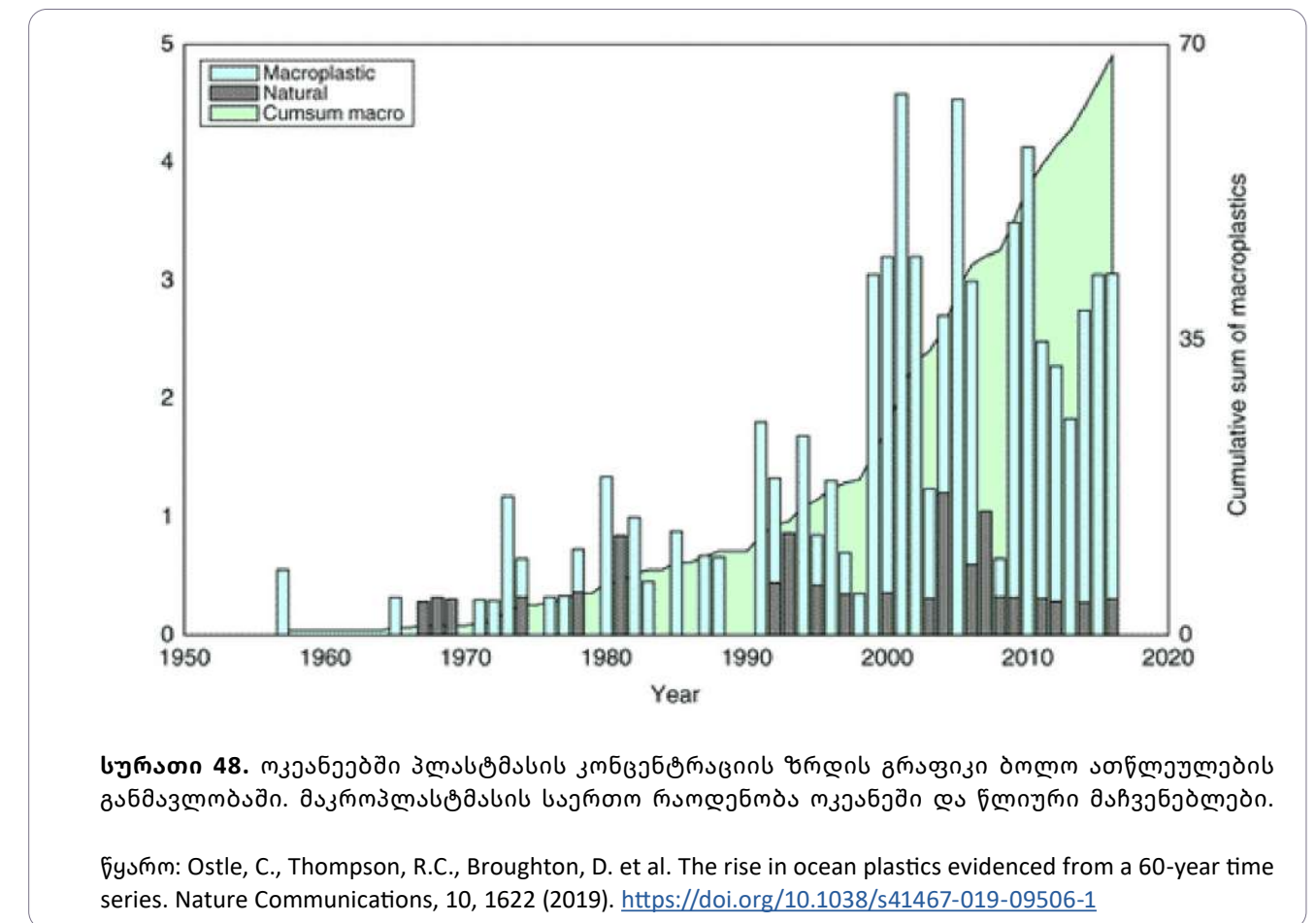
¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

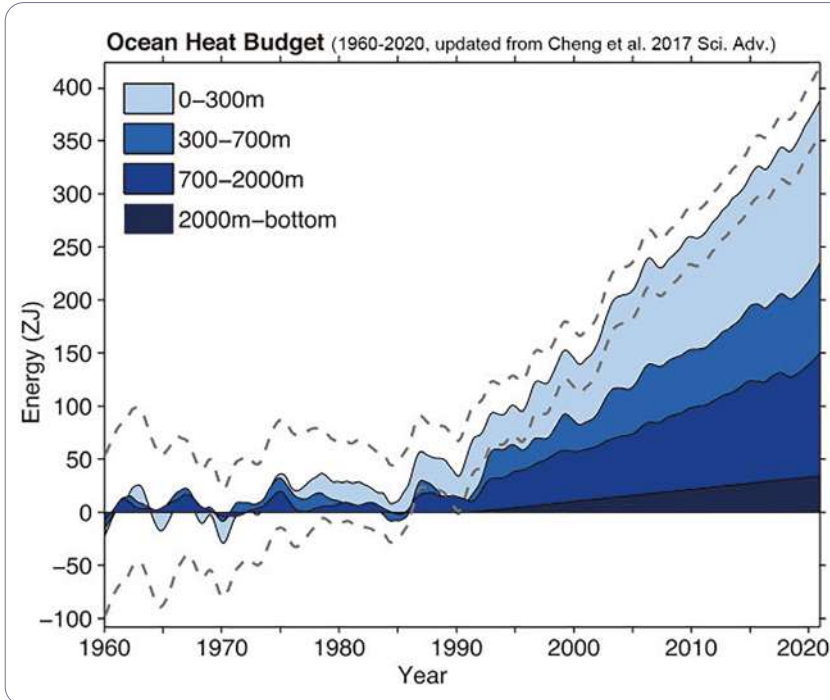
რატომ თბება ოკეანე? ჰიპოთეზა

ოკეანის გათბობაზე გავლენის მქონე ძირითადი ზოგადად აღიარებული ფაქტორებია სათბურის აირები, როგორიცაა CO₂, რომლებიც ატმოსფეროში იჭერენ სითბოს და ზრდიან ოკეანის წყლების ზედა ფენების ტემპერატურას. თუმცა, არსებობს სხვა ფაქტორებიც, რომლებსაც ასევე შეუძლიათ მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინონ ამ პროცესზე. ოკეანის გათბობის დამატებითი ფაქტორი ასევე განხილული იქნება თავში „ფაქტორი X. მიკრო- და ნანოპლასტიკების გავლენა სტიქიური უბედურებების ციკლის დინამიკაზე“.

მე-20 საუკუნის მეორე ნახევრიდან ოკეანეებში პლასტიკის რაოდენობის მკვეთრი ზრდა შეინიშნება, რაც ემთხვევა დაჩქარებული სამრეწველო განვითარებისა და პლასტიკის პროდუქტების მასობრივი წარმოების პერიოდს (სურ. 48). 1960 წლიდან 2019 წლამდე ასევე შეინიშნება ოკეანის ტემპერატურის ცვლილება. გრაფიკი (სურ. 49) აჩვენებს ოკეანეების საშუალო ზედაპირის ტემპერატურის პარალელურ ზრდას, რაც ასევე შეინიშნება მე-20 საუკუნის შუა პერიოდიდან.

ორი გრაფიკის (სურ. 48–49) შედარებისას, ოკეანეებში პლასტიკის კონცენტრაციის ზრდასა და წყლის ტემპერატურის მატებას შორის კორელაცია ჩანს. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ოკეანეების პლასტიკის დაბინძურება შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი, მაგრამ ნაკლებად შესწავლილი ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს ოკეანის წყლების დათბობაზე.





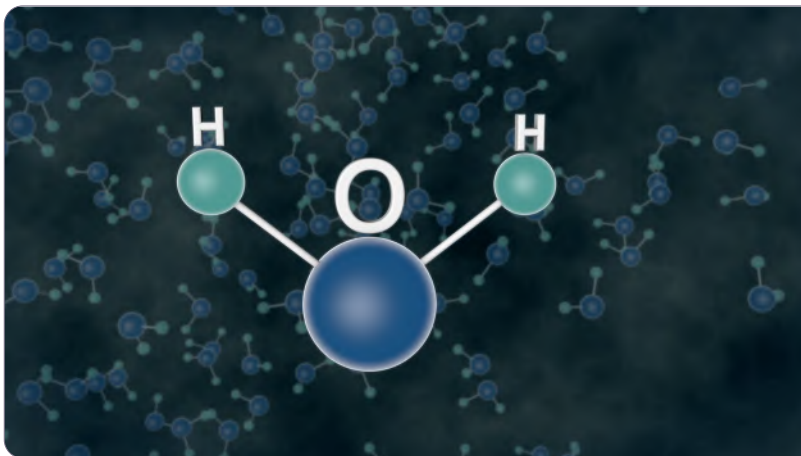
სურათი 49. მსოფლიო ოკეანის ტემპერატურის ცვლილებების გრაფიკი იმავე პერიოდში (1960–2019).

წყარო: (Purkey and Johnson, 2010; with data update Cheng and others, 2017) 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>

ამ საკითხის შემდგომი შესწავლისთვის მნიშვნელოვანია გავიგოთ, შეუძლია თუ არა პლასტმასს გავლენა მოახდინოს ოკეანის წყლის ფიზიკურ თვისებებზე, როგორიცაა თბოგამტარობა და თბოტევადობა. და შეიძლება თუ არა ამ ცვლილებებმა ხელი შეუწყოს ოკეანის ტემპერატურის მატებას? ამ პროცესების უკეთ გასაგებად, ჩვენ ჩავუდრმავდებით წყლის ძირითად მახასიათებლებს და მის ურთიერთქმედებას დამაბინძურებლებთან.

წყლის ძირითადი მახასიათებლები

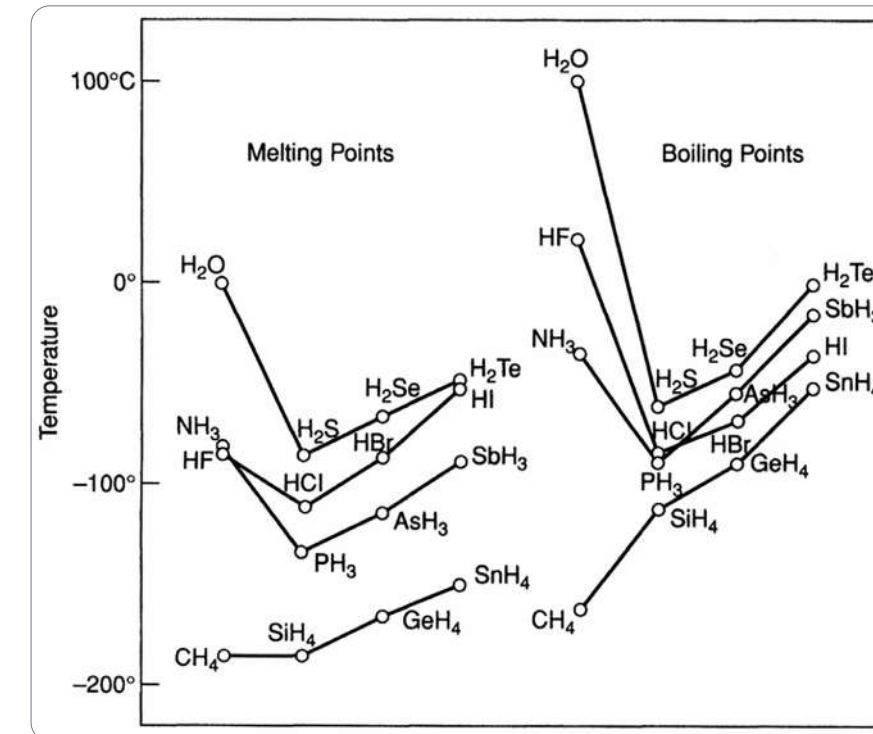
წყლის მოლეკულას აქვს სიმეტრიული V-ფორმა, სადაც ორი წყალბადის ატომი განლაგებულია ერთ მხარეს უფრო დიდი ჟანგბადის ატომთან შედარებით (სურ. 50).



სურათი 50.

წყლის მოლეკულის სტრუქტურის გამოსახულება: ორი წყალბადის ატომი (H) დაკავშირებულია ერთ ჟანგბადის ატომთან (O) $\sim 104.5^\circ$ კუთხით, რაც ქმნის დიპოლს დადებითი და უარყოფითი მუხტებით

ეს სტრუქტურა განსხვავდება წრფივი მოლეკულებისგან, როგორიცაა CO_2 , სადაც ყველა ატომი ჯაჭვშია განლაგებული. წყლის მოლეკულის ეს ფორმა მას განსაკუთრებულს და მნიშვნელოვანს ხდის დედამიწაზე არსებული მრავალი პროცესისთვის. წყლის მოლეკულების თვისებები წყალს საშუალებას აძლევს, დარჩეს თხევად მდგომარეობაში ისეთ ტემპერატურაზე, რომელიც ჩვეულებრივ სხვა ტრიატომური მოლეკულების გაზიფიცირებას გამოიწვევს (სურათი 51).



სურათი 51. ტჰიდრიდის მოლეკულების იზოთერმული თანმიმდევრობების დნობის (მარცხნივ) და დუღილის (მარჯვნივ) ტემპერატურები. წყლის ტემპერატურა მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე მსგავსი ნაერთების ტემპერატურების ექსტრაპოლაციით მიღებული.

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

ეს განპირობებულია წყალბადური ბმებით¹⁴⁹, რომლებიც წყლის მოლეკულებს ერთმანეთთან აკავშირებენ ძლიერი და მოწესრიგებული სტრუქტურის შესაქმნელად.

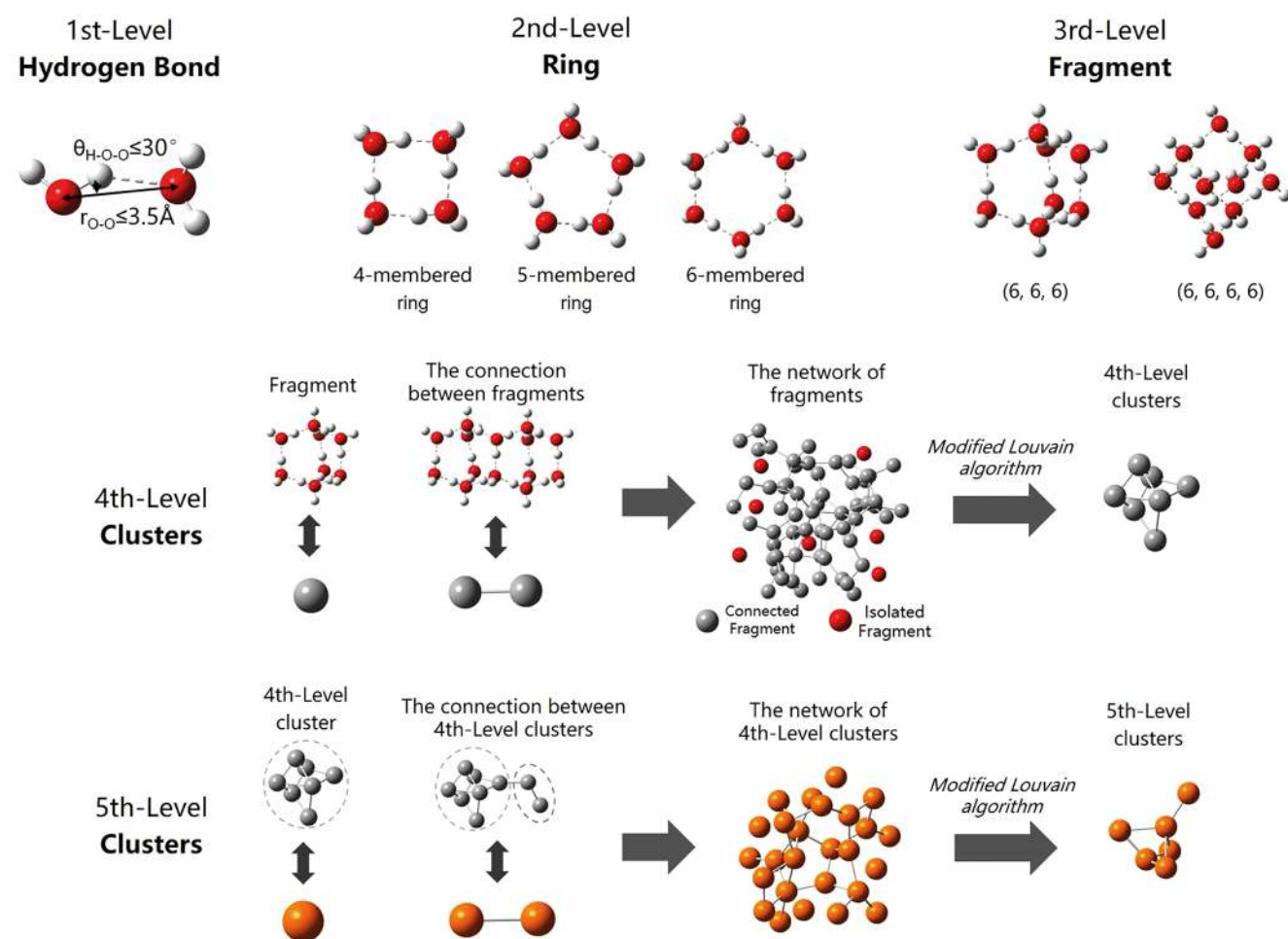
წყალბადის ბმების უმეტესობა სუსტი მიზიდულობაა, რომელთა ბმის სიძლიერე ნორმალური კოვალენტური ბმის სიძლიერის დაახლოებით მეათედია. მიუხედავად ამისა, ისინი ძალიან მნიშვნელოვანია. მათ გარეშე, ყველა ხის კონსტრუქცია ჩამოიშლებოდა, ცემენტი დაიმსხვრეოდა, ოკეანეები აორთქლდებოდა და ყველა ცოცხალი ორგანიზმი არაცოცხალ მატერიად დაიშლებოდა.¹⁵⁰

ამიტომ, წყალს აქვს კლასტერების წარმოქმნის უნარი, რაც ხსნის მის ანომალურ თვისებებს (სურ. 52–53). წყლის კლასტერებს შეუძლიათ წყალბადის ბმის ქსელის 95%-ზე მეტი დაფარონ, ზოგიერთი კლასტერი ათასობით მოლეკულას მოიცავს და 3.0 ნმ-ზე მეტს ვრცელდება.¹⁵¹

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

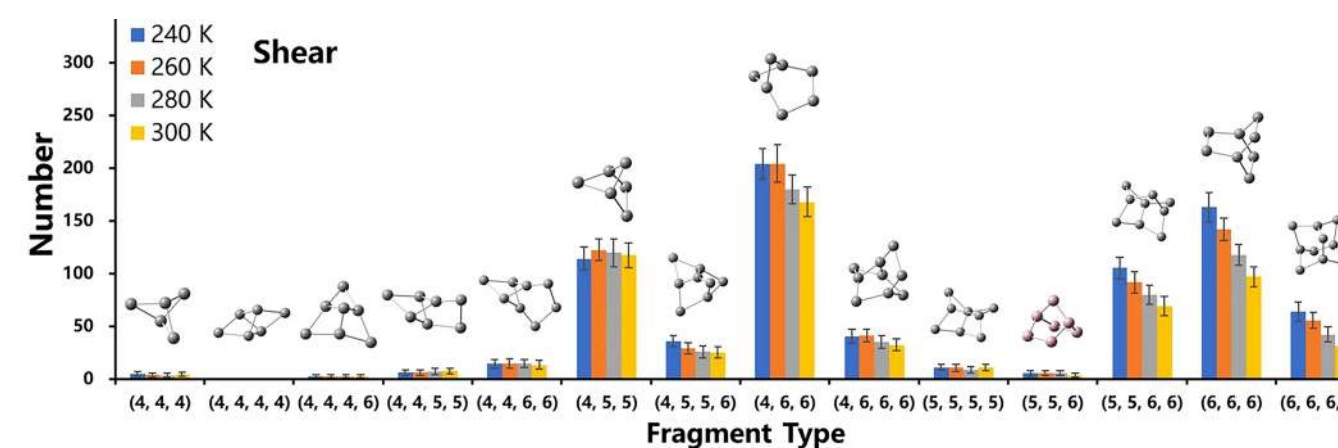
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

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>



სურათი 52. იერარქიული კლასტერიზაციის მეთოდის სქემები. წყალბადის ბმები, რგოლები და ფრაგმენტები განიხილება, როგორც 1-ლი, მე-2 და მე-3 დონის სტრუქტურები, რომლებიც ქიმიური თვალსაზრისით ბურთისა და ჩხირის მოდელია, ხოლო წითელი და თეთრი ბურთულები შესაბამისად ჟანგბადის და წყალბადის ატომებს წარმოადგენს. მყარი და წერტილოვანი ჩხირები შესაბამისად კოვალენტურ O-H ბმებსა და წყალბადის ბმებს წარმოადგენს. მე-4 და მე-5 დონის კლასტერები ტოპოლოგიური თვალსაზრისით არის ილუსტრირებული. ბურთულები ბოლო დონის სტრუქტურას წარმოადგენს. ფიგურაში მოცემული სტრუქტურები მხოლოდ არჩევანია კლასტერიზაციის ალგორითმით განხილულ სტრუქტურებს შორის.

წყარო: 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>



სურათი 53. ქსელში იერარქიული სტრუქტურების განაწილება 1, 2 და 3 დონეებზე სხვადასხვა შემთხვევაში. (a) წყალბადის ბმების განაწილება (1 დონის სტრუქტურები) სხვადასხვა ტემპერატურაზე. (b) რგოლების განაწილება (2 დონის სტრუქტურები) სხვადასხვა ტემპერატურაზე. (c) ფრაგმენტების განაწილება (3 დონის სტრუქტურები) სხვადასხვა ტემპერატურაზე. გაითვალისწინეთ, რომ (4, 4, 4) აღნიშნავს ფრაგმენტის სიმბოლოს, რომელიც შედგება სამი 4-წევრიანი რგოლისგან.

წყარო: 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>

წყლის სითბოტევადობა, თბოგამტარობა და სიმკვრივე და მათი ფუნქციური მნიშვნელობა

1. წყლის მაღალი სითბოტევადობა

სტანდარტულ პირობებში წყალს ნებისმიერი სითხისა და მყარი ნივთიერების ყველაზე მაღალი სპეციფიკური სითბოტევადობა აქვს, რომელიც მხოლოდ ზოგიერთ აირს, მაგალითად წყალბადს, ჩამორჩება.¹⁵² ეს ნიშნავს, რომ მას შეუძლია დიდი რაოდენობით თერმული ენერგიის შთანთქმა, შენარჩუნება და გადაცემა საკუთარი ტემპერატურის შედარებით მცირე ცვლილებით.

წყლის სითბოტევადობა განისაზღვრება, როგორც სითბოს რაოდენობა, რომელიც საჭიროა 1 გ წყლის ტემპერატურის 1°C-ით ასაწევად და სტანდარტულ პირობებში დაახლოებით 4.18 ჯ/(გ · °C)-ს შეადგენს. ეს თვისება კლიმატის რეგულირების ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორია: ოკეანეებში წყალი დღის განმავლობაში სითბოს აგროვებს და ღამით ნელ-ნელა გამოყოფს. ზაფხულში ოკეანე ზედმეტ სითბოს შთანთქავს, ზამთარში კი თანდათანობით გამოიყოფა, რაც გიგანტური თერმოსტატის როლს ასრულებს და პლანეტაზე ტემპერატურულ სხვაობას ამცირებს.

2. წყლის თბოგამტარობა

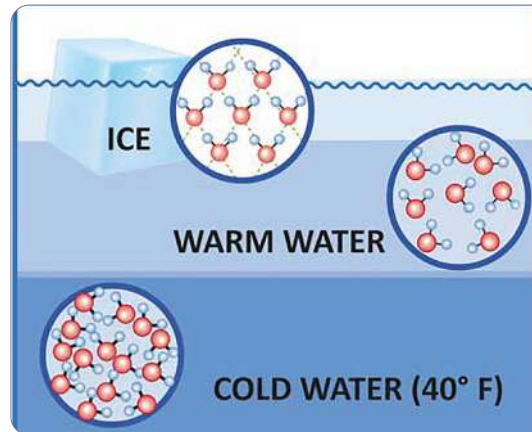
წყალს ლითონებთან შედარებით დაბალი თბოგამტარობა აქვს, მაგრამ ის ბევრ სხვა სითხეზე მაღალია. თბოგამტარობა არის ნივთიერების უნარის საზომი, გადასცეს სითბო ერთი ნაწილიდან მეორეზე თავად ნივთიერების გადაადგილების გარეშე. წყლის თბოგამტარობა სტანდარტულ პირობებში (25 °C) დაახლოებით 0.6 W/(m·K)-ია, რაც მას სითბოს ეფექტურ გამტარად აქცევს ბუნებრივ პროცესებში, როგორიცაა სითბოს განაწილება ოკეანეებსა და წყლის სხვა ობიექტებში.

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

დაკვირვებები აჩვენებს, რომ წყლის თბოგამტარობა იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად გარკვეულ ზღვრამდე.¹⁵² გარდა ამისა, ეს მნიშვნელობა შეიძლება შეიცვალოს მინარევების ან გახსნილი ნივთიერებების არსებობით.^{153, 154} ეს მახასიათებლები გავლენას ახდენს წყალში სითბოს განაწილებაზე, რაც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია ოკეანესა და ატმოსფეროს შორის ურთიერთქმედების გასაგებად.

3. წყლის სიმკვრივის ანომალიური ქცევა

ნივთიერებების უმეტესობისგან განსხვავებით, წყლის სიმკვრივე ტემპერატურის ცვლილებისას უჩვეულოდ იქცევა. 4°C-მდე გაგრილებისას მისი სიმკვრივე იზრდება, მაგრამ შემდგომი გაგრილებისას (4°C-დან 0°C-მდე) სიმკვრივე იწყებს შემცირებას (სურ. 54). როდესაც წყალი იყინება, მისი სიმკვრივე მცირდება 8–9%-ით. ეს ხსნის, თუ რატომ არ იძირება ყინული, არამედ ზედაპირზე რჩება. ეს ფენომენი კრიტიკულად მნიშვნელოვანია წყლის ობიექტებში სიცოცხლისთვის, რადგან ყინული იცავს წყალს და ცოცხალ ორგანიზმებს სრული გაყინვისგან, ხელს უშლის წყლის ფსკერამდე გაყინვას.



სურათი 54. წყლის სიმკვრივის ცვლილების სქემატური გამოსახულება გაგრილებისას: გაციებისას წყლის მოლეკულები ერთმანეთთან უფრო ახლოს მოძრაობენ, სიმკვრივე იზრდება და მაქსიმუმს 4°C-ზე აღწევს. გაციებისას წყალბადური ბმები დომინანტური ხდება და წყლის მოლეკულები ყინულის კრისტალურ სტრუქტურად იწყობა, რაც იწვევს წყლის გაფართოებას და ყინულის სიმკვრივის შემცირებას, რის შედეგადაც წყლის სიმკვრივე დაახლოებით 10%-ით ნაკლებად მკვრივი ხდება, ვიდრე თხევადი წყლის.
წყარო: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

წყლის თვისებების გავლენა კლიმატსა და ეკოსისტემებზე

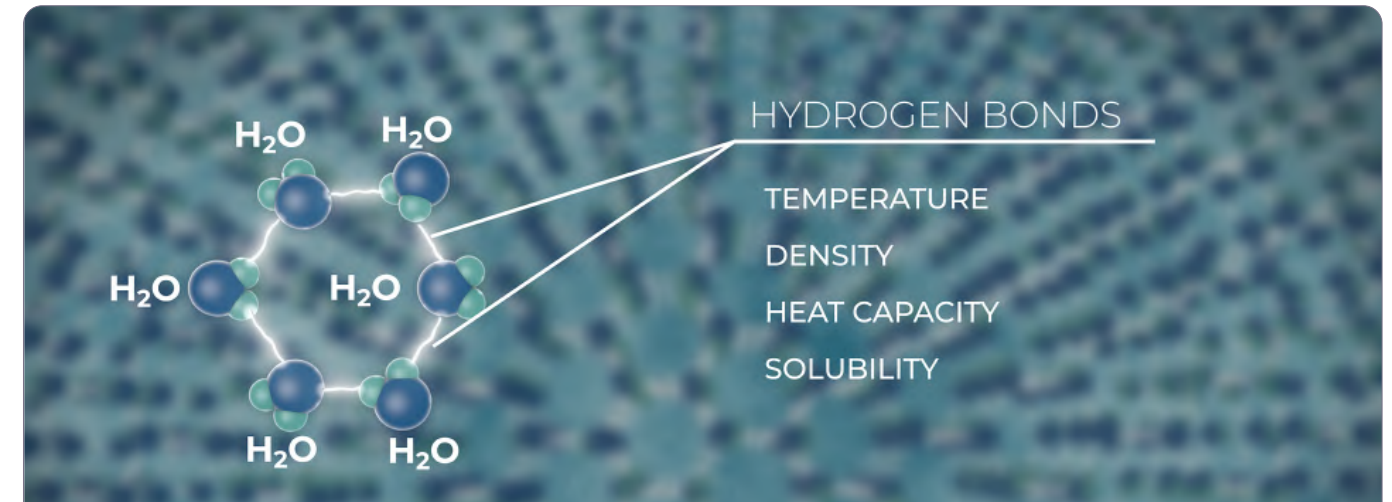
წყლის ტემპერატურის ცვლილებებმა შეიძლება მნიშვნელოვნად იმოქმედოს ოკეანეების სითბურ ბალანსზე და მათ სითბოს შენახვისა და გადაცემის უნარზე. ეს, თავის მხრივ, გავლენას მოახდენს დედამიწის კლიმატურ სისტემაზე.

ამგვარად, წყლის ფიზიკური და ქიმიური თვისებები, განსაკუთრებით მისი თბოტევადობა და თბოგამტარობა, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს პლანეტაზე ეკოლოგიური ბალანსის შენარჩუნებასა და კლიმატური პროცესების რეგულირებაში (სურ. 55).

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

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

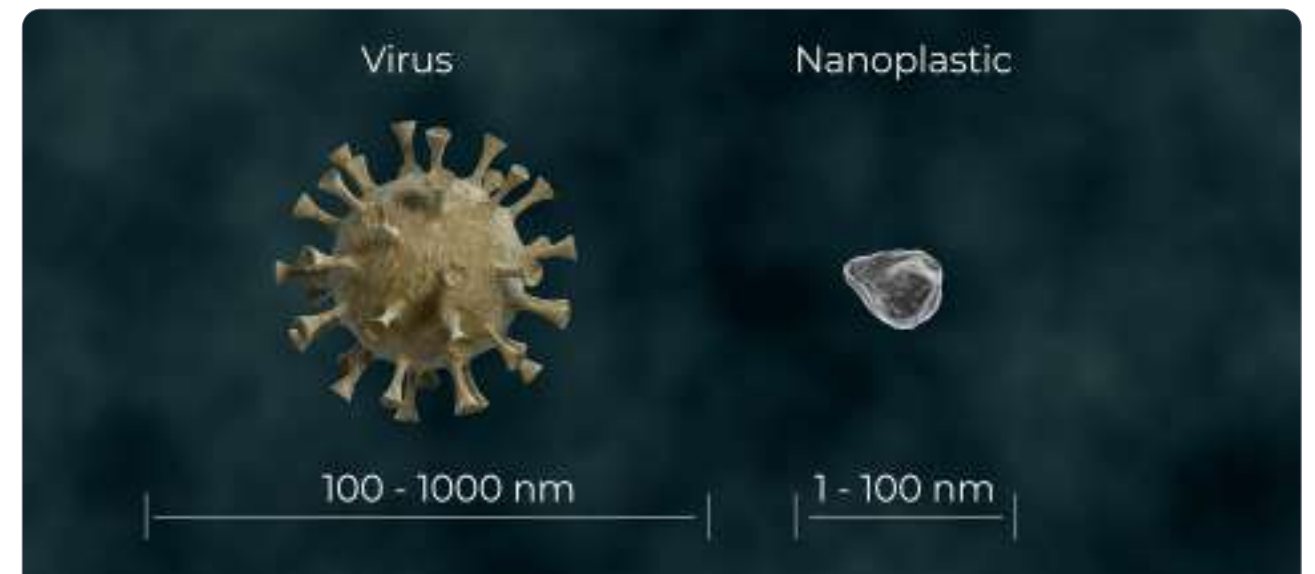
¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)



სურათი 55. წყლის მოლეკულებში წყალბადის ბმების სქემატური წარმოდგენა და მათი გავლენა წყლის ძირითად თვისებებზე: წყალბადის ბმები ხელს უწყობს წყლის მაღალ სითბოტევადობას, რაც საშუალებას აძლევს მას ეფექტურად შეიწოვოს და შეინარჩუნოს სითბო. ეს ბმები ასევე განსაზღვრავს წყლის სიმკვრივეს, რომელიც ყველაზე მაღალია 4°C-ზე, და მის პოლარული და იონური ნივთიერებების გახსნის უნარს, რაც წყალს უნივერსალურ გამხსნელად აქცევს

მწკ-ის როლი ზღვის წყლის ფიზიკური თვისებების შეცვლაში

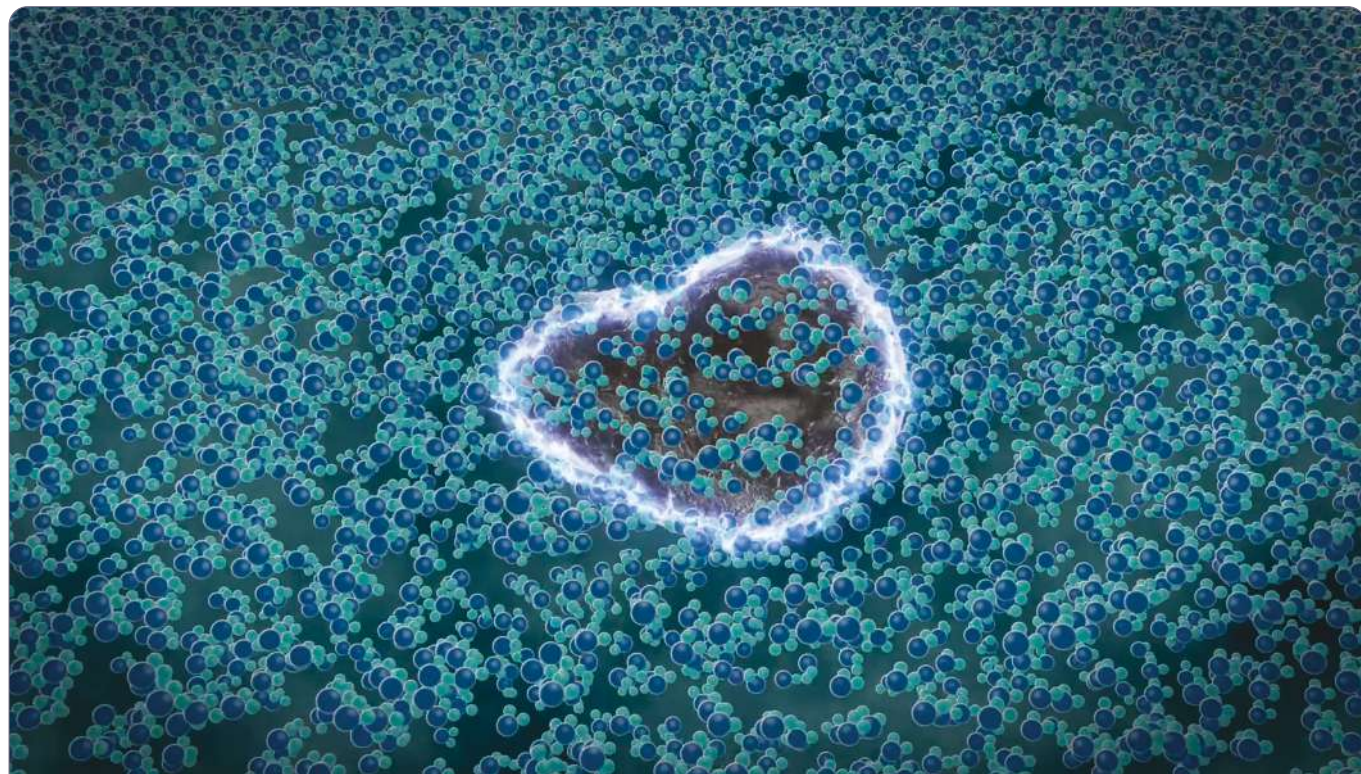
პლასტიკის, რომელიც ნავთობქიმიური მრეწველობის პროდუქტია, ბუნებაში არ იშლება, არამედ იშლება უფრო მცირე ნაწილაკებად, როგორიცაა მიკრო და ნანოპლასტიკები.¹⁵⁵ ამ ნაწილაკებს, განსაკუთრებით ნანოპლასტიკებს, შეუძლიათ მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინონ წყლის ფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებზე, რამაც, თავის მხრივ, შეიძლება გავლენა მოახდინოს ეკოსისტემებსა და კლიმატურ პროცესებზე. ნანოპლასტიკის ნანომეტრის ზომის ნაწილაკებია, რაც ვირუსზე პატარაა (სურ. 56).



სურათი 56. ვირუსისა და ნანოპლასტიკური ნაწილაკის ზომების სქემატური შედარება

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

მაგალითად, აზოტისა და ჟანგბადის შემცველი ნეილონის (პოლიამიდის) ნანოპლასტიკას შეუძლია წყალთან წყალბადის ბმების წარმოქმნა.¹⁵⁶ როდესაც ნანოპლასტიკური ნაწილაკები წყალში შედიან, ისინი არღვევენ წყლის მოწესრიგებულ სტრუქტურას წყლის მოლეკულებს შორის წყალბადის ბმების საფუძველზე, რამაც შეიძლება შეცვალოს მისი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები (სურ. 57). კერძოდ, წყლის მოლეკულები კარგავენ მობილობას, რაც ამცირებს მათ სითბოს გაცვლის პროცესებში ეფექტურად მონაწილეობის უნარს. გარდა ამისა, სხვადასხვა ნივთიერებების შემცველ წყალხსნარებში, ნანოპლასტიკური ნაწილაკებს შეუძლიათ ელექტრული მუხტის მიღება.¹⁵⁷



სურათი 57. წყალში დამუხტული პლასტმასის ნანონაწილაკების სქემატური წარმოდგენა: არასტაბილური წყლის პირობების ზემოქმედებისას - როგორცაა ორგანული ან სინთეზური მინარევების არსებობა, pH-ის, ტემპერატურის ან მარილიანობის ცვლილებები - ნანოპლასტიკის ზედაპირი პოტენციურად აქტიური ხდება და შეუძლია ელექტრული მუხტების გენერირება წყლის გარემოში.

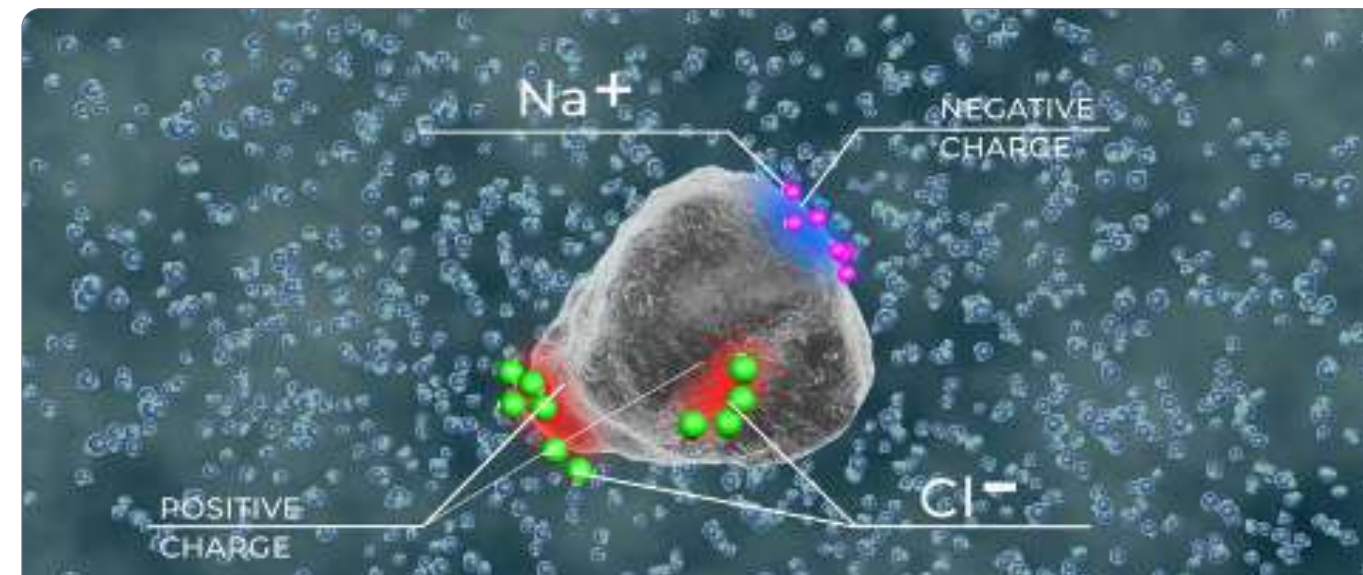
წყარო: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

ეს ხდება მის ზედაპირზე ქიმიური ცვლილებების, მაგალითად, დაჟანგვის, და ასევე ზღვის წყალში იონების, როგორცაა ნატრიუმის (Na^+) და ქლორის (Cl^-) ადსორბციის გამო. დამუხტული პლასტმასის ნანონაწილაკები, რომლებიც გარშემორტყმულია იონებით, იზიდავს წყლის მოლეკულებს და ქმნის ჰიდრატაციის გარსს საკუთარ თავზე¹⁵⁸ (სურ. 58).

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>

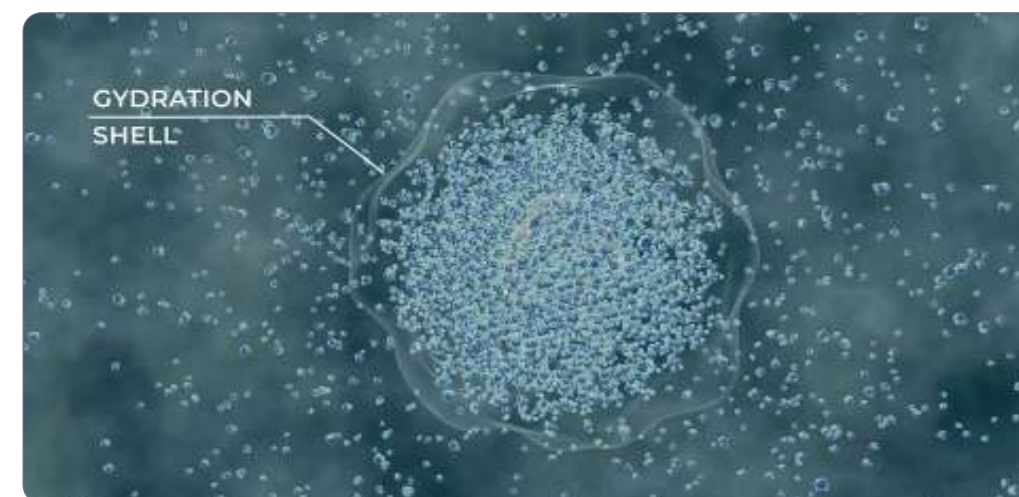
¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. Sci. Adv. 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>



სურათი 58. დამუხტული პლასტმასის ნანონაწილაკების გარშემო ჰიდრატაციული გარსის ფორმირების პროცესის სქემატური წარმოდგენა: ამ პროცესში, დამუხტული ნანონაწილაკები იზიდავენ იონებს, რაც ხელს უწყობს მათ გარშემო წყლის მოლეკულების წარმოქმნას და ქმნის დამცავ ჰიდრატაციული გარსს.

წყარო: 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>

ლოზანის პოლიტექნიკური სკოლის მკვლევრებმა გადაწყვიტეს გარკვა, თუ რამდენად დიდია ამ ჰიდრატაციული გარსის ზომა იონებისთვის, ანუ რამდენი წყლის მოლეკულა რეაგირებს იონზე. აღმოჩნდა, რომ ერთ იონს შეუძლია გავლენა მოახდინოს დაახლოებით მილიონ მიმდებარე წყლის მოლეკულაზე. ეს ეფექტი ძლიერდება, თუ ნაწილაკს აქვს დიდი ზედაპირული მუხტი და ადსორბირებული იონების მაღალი კონცენტრაცია. შედეგად, ერთ ნანოპლასტიკურ ნაწილაკს შეუძლია შეცვალოს მილიონობით წყლის მოლეკულის თვისებები¹⁵⁸ (სურ.59). ჰიდრატაციული გარსით შეკრული მოლეკულები ნაკლებად მობილურია.¹⁵⁹ შედეგად, წყლის საერთო სითბოტევადობა მცირდება.^{160, 161}



სურათი 59. ნანოპლასტიკური ნაწილაკის გარშემო ჰიდრატაციის გარსის სქემატური წარმოდგენა

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>

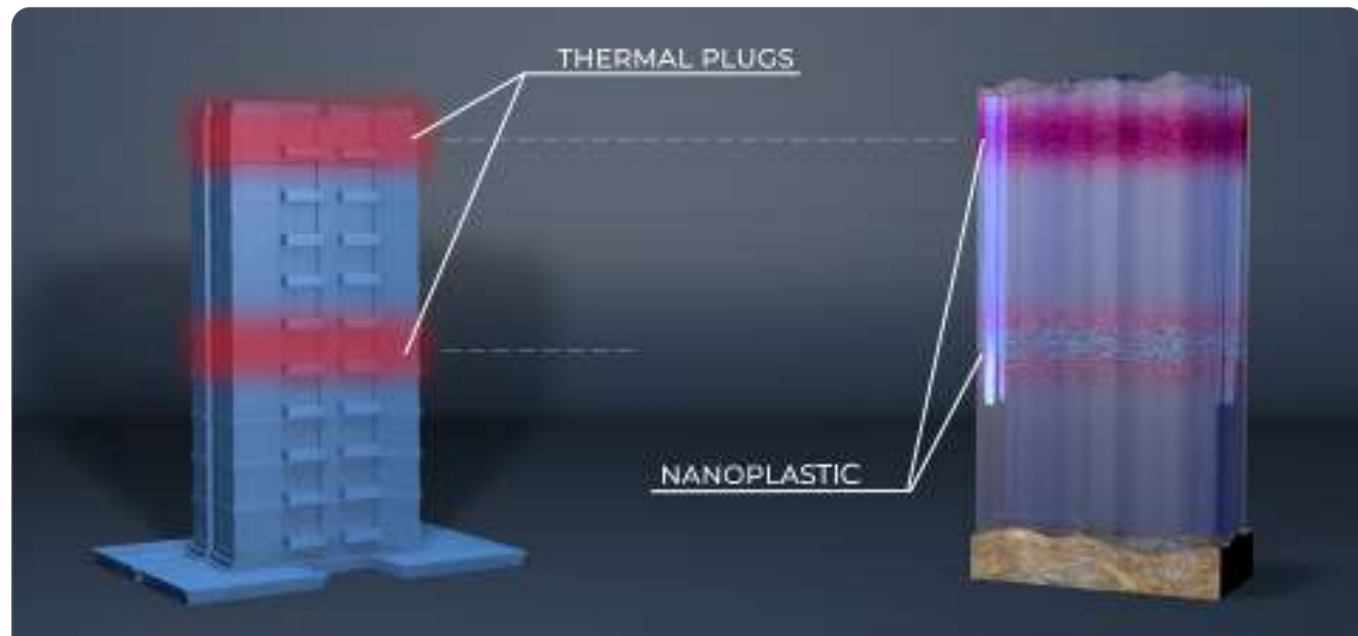
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. Polymers 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

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>

წყალბადის ბმის სტრუქტურის დარღვევა ასევე იწვევს თბოგამტარობის შემცირებას.¹⁶² შედეგად, ნანოპლასტიკთან ახლოს მყოფი წყალი შეიძლება ცხელი დარჩეს, რადგან ის კარგავს სითბოს ეფექტურად გადაცემის უნარს.

მიკრო- და ნანოპლასტიკების კონცენტრაციის ზონები ოკეანეში

მიკრო- და ნანოპლასტიკები შეიძლება გავრცელდეს ოკეანეში დინების მეშვეობით, ხოლო უფრო მკვირივი ნაწილაკები ან დაბინძურებული პლასტიკები შეიძლება დაიღუპოს ზღვის ფსკერზე. ნანოპლასტიკები ასევე გროვდება თერმოკლინის ზონებში, გარდამავალ ფენაში, რომელიც მდებარეობს თბილ ზედაპირულ წყლებსა და უფრო ცივ ღრმა ფენებს შორის¹⁶³ (სურათი 60).

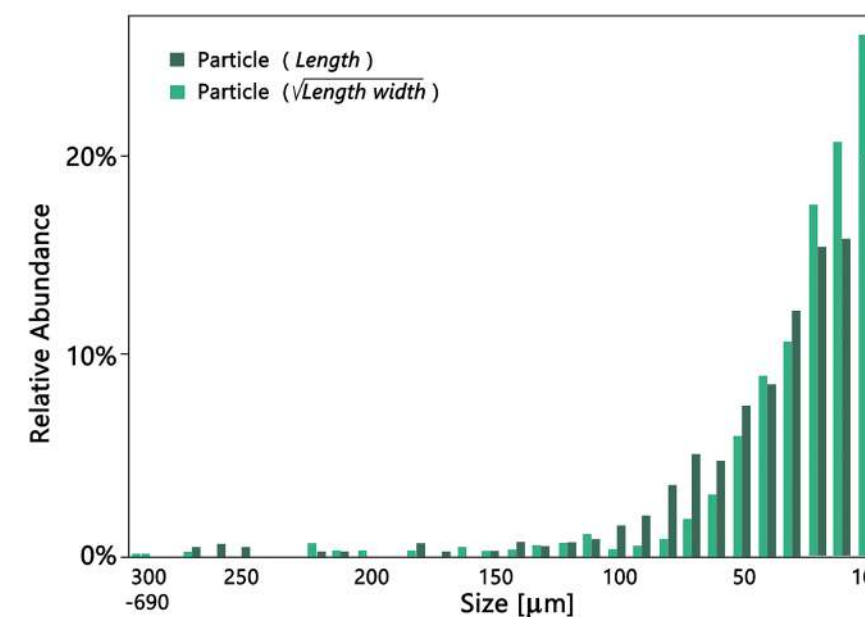


სურათი 60. გამოსახულებაზე გამოსახულია ოკეანეში მიკრო- და ნანოპლასტიკების კონცენტრაციის ზონების ფიგურული შედარება და მრავალსართულიან შენობაში, სადაც მე-5 და მე-10 სართულებზე თბოგამტარებელია განთავსებული. ეს საცობები ხელს უშლის ნორმალურ სითბოს გაცვლას და სითბოს თანაბრად განაწილების ნაცვლად, ის ამ სართულებზე გროვდება. თერმული ვიზუალიზაცია აჩვენებს, რომ შენობის შიგნით ტემპერატურა მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე იმავე შენობაში, მაგრამ საცობების გარეშე. ანალოგიურად, წყალში არსებული ნანოპლასტიკი არღვევს სითბოს ბუნებრივი გაცვლის მექანიზმებს, რაც ოკეანეში „თერმულ საცობებს“ ქმნის.

ოკეანეებში ნანოპლასტიკების კონცენტრაციის ზრდამ შესაძლოა გლობალური თბობა-გლობალიზაციის ცვლილებები გამოიწვიოს. ამან შეიძლება გავლენა მოახდინოს ოკეანის ტემპერატურის ზრდაზე და ამით კლიმატის ცვლილება გამოიწვიოს. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ნანოპლასტიკების მცირე რაოდენობასაც კი შეუძლია მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინოს ეკოსისტემებზე. ოკეანის ზედაპირის ტემპერატურის მატება აჩქარებს პლასტიკების ნარჩენების მიკრო- და ნანოპლასტიკებად დაშლას (სურ. 61). შედეგად, იზრდება ამ ნაწილაკების რაოდენობა, რომლებიც ატმოსფეროში წყლის ორთქლთან ერთად ხვდებიან. მიკრო- და ნანოპლასტიკების არსებობა ატმოსფეროში ხელს უწყობს მის დამატებით გაცხელებას, რაც, თავის მხრივ, ზრდის ოკეანის გაცხელებას. ამრიგად, წარმოიქმნება მანკიერი წრე, სადაც პროცესები ურთიერთგამაძლიერებელია.

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>



სურათი 61. მიკროპლასტიკების ნაწილაკების ფარდობითი ზომის განაწილება ყველა გაანალიზებული სადგურისთვის (n = 543). სურათებზე ნაჩვენებია რამანის მიკროსპექტრომეტრიით აღმოჩენილი და დადასტურებული ყველაზე პატარა (მარჯვნივ) და უდიდესი (მარცხნივ) მიკროპლასტიკური ნაწილაკები.

წყარო: 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>

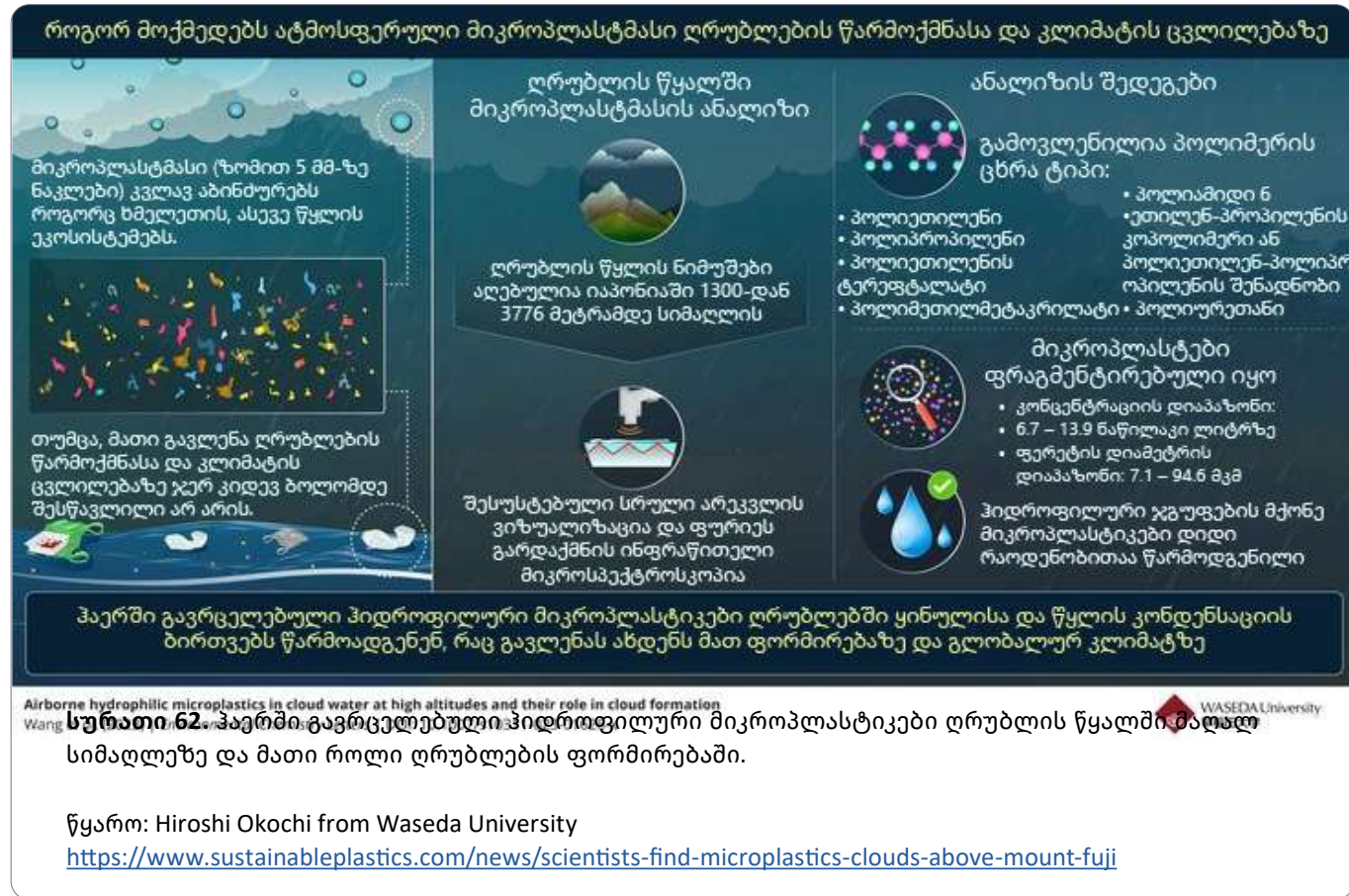
მიკროპლასტიკების ელექტროსტატიკურ მუხტსა და ატმოსფერულ მოვლენებს შორის კავშირი

მიკრო- და ნანოპლასტიკები ატმოსფეროში სხვადასხვა გზით ხვდება. ოკეანეებისა და წყლის სხვა ობიექტების ზედაპირიდან აორთქლებული წყლის ორთქლი მიკრონაწილაკებს ჰაერში გადააქვს.¹⁶⁴ კონტინენტებზე ატმოსფერული პლასტიკების ძირითადი წყაროებია ქარხნები, ნაგვის გადამამუშავებელი ქარხნები და ნაგავსაყრელები. გარდა ამისა, მიკროპლასტიკები ჰაერში ამოდის, როდესაც სასოფლო-სამეურნეო სასუქები და პლასტიკის მულჩა შრება და ქარით გაიტაცება. მიკროპლასტიკური ნაწილაკები გამოიყოფა ავტომობილის საბურავების ხახუნის შედეგად.

ამ და მრავალ სხვა წყაროს მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს ატმოსფეროს დაბინძურებაში. ეს პროცესები ხელს უწყობს მიკროპლასტიკის დაგროვებას და გავრცელებას ატმოსფეროში, რაც სერიოზულ გარემოსდაცვით და კლიმატურ საფრთხეებს ქმნის. ატმოსფეროში მოხვედრის შემდეგ, მიკრო- და ნანოპლასტიკური ნაწილაკები შეიძლება წყლის ორთქლის კონდენსაციის ბირთვების ფუნქციას ასრულებდეს. რაც უფრო მეტი ასეთი ბირთვია, მით უფრო სწრაფად ხდება წყლის ორთქლის კონდენსაცია წვეთებად. ჰაერში გავრცელებული მიკროპლასტიკები აღმოაჩინეს იაპონიის მთის მწვერვალებიდან შეგროვებულ ღრუბლის წყლის ნიმუშებში¹⁶⁵ (სურათი 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



66

„დაბინძურებულ გარემოში, სადაც უამრავი აეროზოლური ნაწილაკია, მაგალითად, მიკროპლასტიკები, მთელი წყალი ნაწილდება აეროზოლის ნაწილაკების დიდ რაოდენობაში და თითოეულის გარშემო უფრო პატარა წვეთებს ქმნის. როდესაც მეტი წვეთია, ნაკლები ნალექი მოდის. მაგრამ იმის გამო, რომ წვეთები მხოლოდ მაშინ ვარდება, როდესაც საკმარისად დიდი ხდება, ღრუბელში მეტი წყალი იქედება. შედეგად, მეტი ნალექი მოდის“, — თქვა მირიამ ფრიდმანმა, ქიმიის პროფესორმა პენსილვანიის 166 შტატის უნივერსიტეტის მეტეოროლოგიისა და ატმოსფერული მეცნიერებების დეპარტამენტში. ეს ხსნის, თუ რატომ იყო ბოლო წლებში რეგიონებში უჩვეულო ნალექი.

ეს ხსნის, თუ რატომ იყო ბოლო წლებში რეგიონებში უჩვეულო ნალექი.

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>

ელექტრული მუხტები ღრუბლებში

დედამიწის ატმოსფერო რთული ელექტრული სისტემაა, რომელშიც წყლის მოლეკულები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ. 1752 წლიდან, როდესაც ბენჯამინ ფრანკლინმა პირველად აჩვენა, რომ ატმოსფერო ელექტრიფიცირებულია და ჭექა-ქუხილი ელექტრული ხასიათისაა, ითვლებოდა, რომ წყლის ურთიერთქმედება (ორთქლში, სითხესა და ყინულში) მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ამ პროცესებში. წყალი სუფთა სახით ნეიტრალურია, მაგრამ ფაზური გადასვლების დროს, როგორიცაა დნობა და გაყინვა, ასევე მოლეკულური შეჯახების დროს, მას შეუძლია იონების სხვა ნაწილაკებზე გადატანა, რაც იწვევს ელექტრულ ეფექტებს.

ატმოსფეროში, ყინულის კრისტალებს, ზეგაცივებულ წყლის წვეთებსა და სხვა ნაწილაკებს შორის შეჯახება ბუნებრივი ელექტრული ველების არსებობისას იწვევს მუხტის გამოყოფას. ეს პროცესი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ატმოსფერული ელექტროენერგიის ფორმირებაში, მათ შორის ჭექა-ქუხილის ღრუბლებში. ეს ფენომენი მნიშვნელოვანია ღრუბლების წარმოქმნისა და ნალექებისთვის. დამუხტული წვეთები იწყებენ ერთმანეთის მიზიდვას, აჩქარებენ მათი უფრო დიდ წვეთებად აგრეგაციის პროცესს, რაც საბოლოოდ იწვევს ღრუბლების წარმოქმნას, რომლებსაც შეუძლიათ ნალექების, როგორიცაა წვიმა, თოვლი ან სეტყვა, წარმოქმნა.

66

„მუხტები წარმოუდგენლად მნიშვნელოვანია და ღრუბლების ფორმირების პროცესში მუხტები თითქმის ყველაფერია. ჩვენ აღმოვაჩინეთ, რომ მუხტები მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ“, — თქვა ჯერალდ ჰ. პოლაკმა, ფილოსოფიის დოქტორმა, ვაშინგტონის უნივერსიტეტის ბიოინჟინერიის პროფესორმა და ინტერდისციპლინარული კვლევითი ჟურნალის WATER-ის მთავარმა რედაქტორმა და დამფუძნებელმა.¹⁶⁷

ასევე 1843 წელს, მაიკლ ფარადეიმ აღმოაჩინა, რომ ელექტროენერგია წარმოიქმნება წყლის წვეთების ლითონთან ხახუნით, რაც წყალს მუხტავს. ამ აღმოჩენამ გამოიწვია ხახუნით, ფაზური გადასვლებით და კონტაქტური ელექტროფიკაციით გამოწვეული წყლის დამუხტვის შემდგომი კვლევები, ასევე ამ ეფექტის გამოყენების მცდელობები ახალი ენერგიის წყაროების შესაქმნელად.

ცნობილია, რომ ნოტიო ჰაერს შეუძლია ზედაპირული მუხტის ნეიტრალიზება წყლის აპკის წარმოქმნით, რომელიც საშუალებას აძლევს იონებს გადაადგილდნენ და გაფანტონ დაგროვილი მუხტი. თუმცა, ზოგიერთ შემთხვევაში, წყლის შთამნთქმელ ზედაპირებს შეუძლიათ ნოტიო ატმოსფეროდან მუხტის დაგროვება, რაც ასევე გავლენას ახდენს გარემოს ელექტრულ მდგომარეობაზე.¹⁶⁸ კვლევამ აჩვენა, რომ მძიმე მეტალები ადვილად ემაგრებიან მიკროპლასტიკებს და რომ ამ კომბინაციამ პოტენციურად შეიძლება ზიანი მიაყენოს პლანეტის ეკოსისტემებს.

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>

გარდა ამისა, მიკროპლასტიკების და მათ ზედაპირზე არსებულ ნივთიერებათა ნარევის არა მხოლოდ სხვა დამაბინძურებლებთან შეწებება, არამედ ერთმანეთთან ურთიერთქმედებაც შეუძლია, რაც მათ ქიმიურ თვისებებს ცვლის.¹⁶⁹ როდესაც მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკები ატმოსფეროში ერევა, მათ შეუძლიათ ატმოსფერულ პროცესებში დელიკატური ბალანსის დარღვევა. პლასტიკების ნაწილაკებს შეუძლიათ მუხტის ტარება, რაც ზრდის პოლარული წყლის მოლეკულების მიზიდულობას და ხელს უწყობს წვეთების წარმოქმნას. პლასტიკების ნაწილაკები არ ხდებიან ჩვეულებრივი კონდენსაციის ბირთვები, როგორცაა მტვერი, ზღვის მარილი ან ქვარტლი, არამედ შეუძლიათ წვეთებად უფრო ეფექტურად შეგროვდნენ, ვიდრე ნეიტრალურ ნაწილაკებს.¹⁷⁰

ეს ნიშნავს, რომ წყლის წვეთები დამუხტული ნაწილაკების გარშემო უფრო სწრაფად იწყებენ ფორმირებას, რაც გავლენას ახდენს ღრუბლების სტრუქტურაზე და შეიძლება გამოიწვიოს დიდი წვეთების და ანომალიურად დიდი ყინულის კრისტალების წარმოქმნა.¹⁷¹ მაგალითად, მკვლევართა ჯგუფმა ცოტა ხნის წინ იაპონიის მთების მწვერვალებზე ღრუბლებში აღმოაჩინეს პლასტიკის გრანულები, რომლებსაც აქვთ წყლის მიმზიდველი ზედაპირი.¹⁷²

ღრუბლების წარმოქმნასა და ნალექებზე გავლენა

მიკროპლასტიკების შეუძლია გავლენა მოახდინოს ნალექების ნიმუშებზე, ამინდის პროგნოზირებაზე, კლიმატის მოდელირებაზე და ავიაციის უსაფრთხოებაზეც კი, რადგან გავლენას ახდენს ატმოსფერული ყინულის კრისტალების მიერ ღრუბლების ფორმირებაზე.

კვლევამ აჩვენა¹⁷³, რომ მიკროპლასტიკების შემცველი წყლის წვეთები იყინება 4-10°C-ით მაღალ ტემპერატურაზე, ვიდრე მიკროპლასტიკების გარეშე წყლის წვეთები, რაც ნიშნავს დაბალ სიმაღლეებზე. მინარევების გარეშე წყლის წვეთი, როგორც წესი, იყინება დაახლოებით -38°C ტემპერატურაზე. თუმცა, მიკროპლასტიკების შემთხვევაში, წვეთების 50% იყინება -18°C-დან -24°C-მდე ტემპერატურაზე, პლასტიკის ტიპის მიხედვით.

მიკროპლასტიკების შემცველი წყლის წვეთები უფრო სწრაფად იყინება და ქმნის უფრო დიდ ყინულის ნაწილაკებს. ეს ნაწილაკები ზევით მიმართული დინებით აიწევა, განმეორებით იფარება ყინულის ფენებით და შემდეგ მიწაზე ცვივა. ამ ფენომენმა შეიძლება გამოიწვიოს უფრო დიდი სეტყვა (სურ. 63-64), მათი დამანგრეველი ზემოქმედების გაძლიერება და ყინულის ღრუბლების წარმოქმნის ზრდა. შედეგად, იცვლება ნალექების სიხშირე და ინტენსივობა, მათ შორის წვიმისა და თოვლის. ამან შეიძლება გამოიწვიოს კასკადური ეფექტები კლიმატზე, ჰიდროლოგიურ ციკლსა და ეკოსისტემებზე.

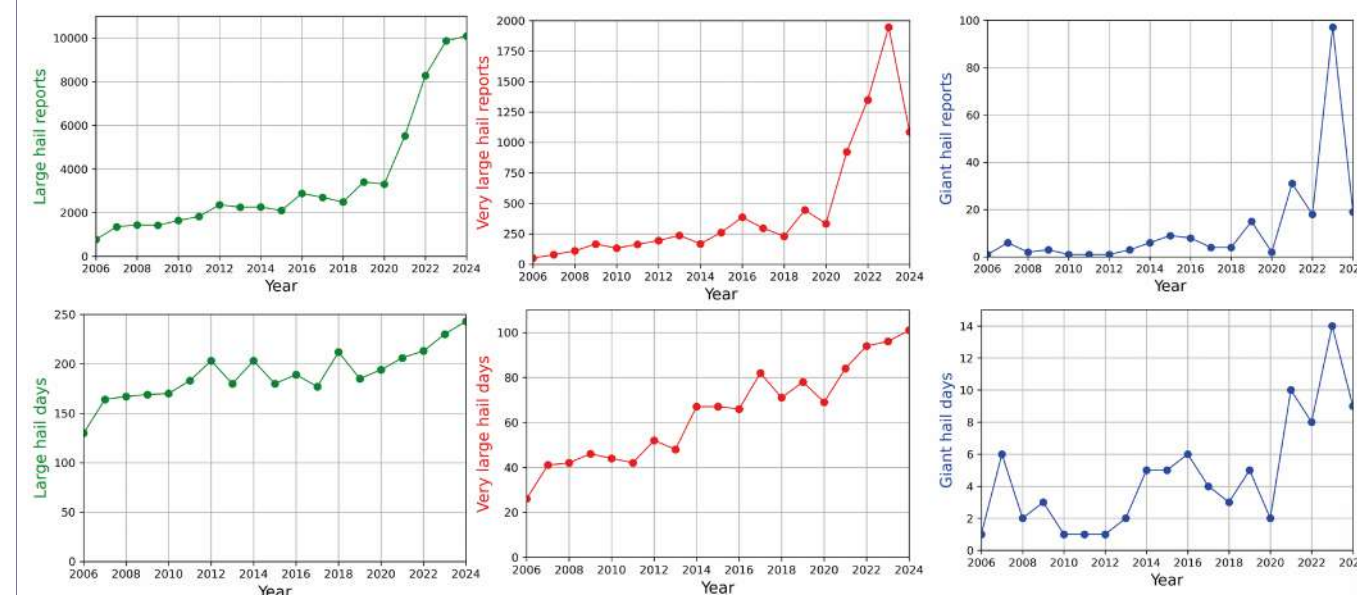
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

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>

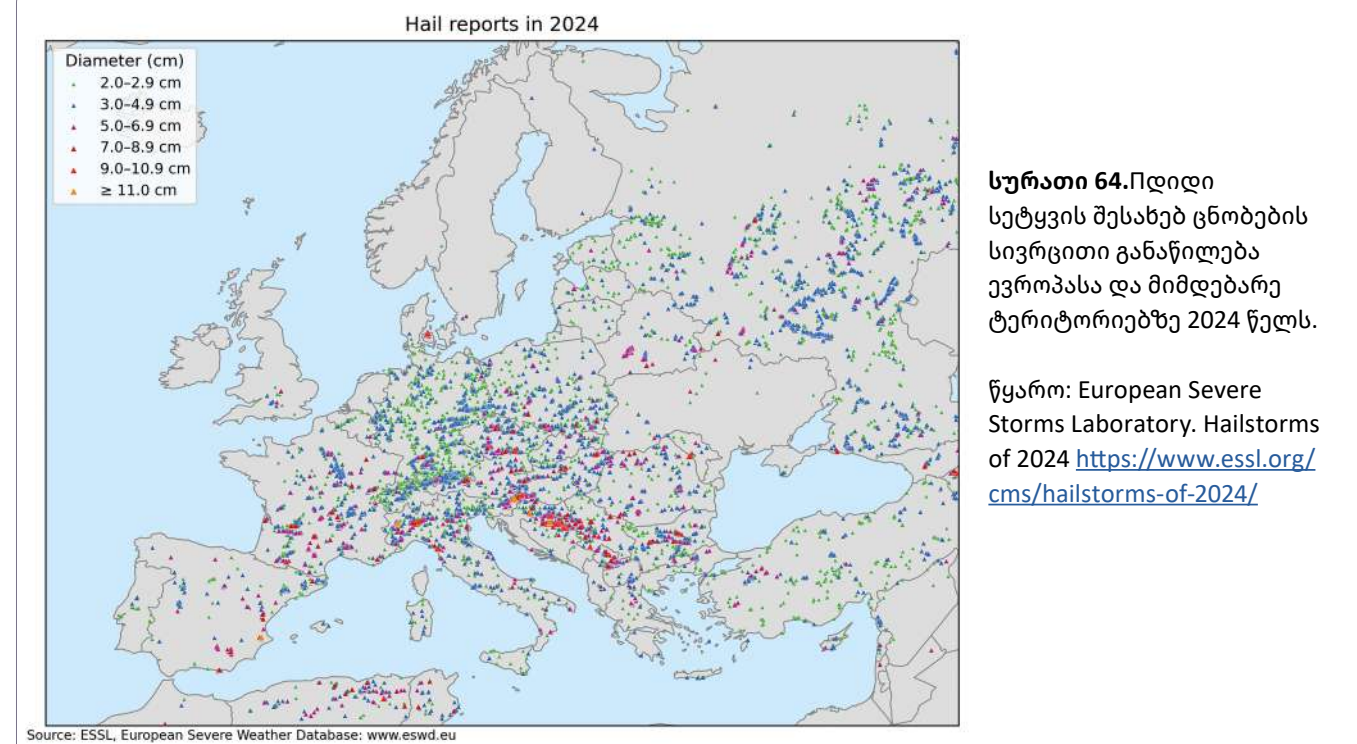
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

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>



სურათი 63. 2006 წლიდან 2024 წლამდე დიდი (2+ სმ), ძალიან დიდი (5+ სმ) და გიგანტური (10+ სმ) სეტყვის შემთხვევების და დღეების რაოდენობა.

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



სურათი 64. დიდი სეტყვის შესახებ ცნობების სივრცითი განაწილება ევროპასა და მიმდებარე ტერიტორიებზე 2024 წელს.

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

როდესაც ატმოსფეროში ნანოპლასტიკური ნაწილაკებია, ღრუბლები იწყებენ ფორმირებას დაბალ სიმაღლეებზე, როგორც წესი, 2 კმ-ზე ქვემოთ. ეს იწვევს ნაკლებად მოძრავ ღრუბლებს, რაც ხელს უშლის ნალექების ნორმალურ განაწილებას. შედეგად, ზოგიერთ რაიონში შეიძლება გვალვა იყოს, ზოგიერთში კი - ჭარბი ნალექი.

მნპ-ის როლი პლანეტის კლიმატური ბალანსის დარღვევაში

სქელი ღრუბლები ატმოსფეროს ქვედა ფენებში სითბოს შეკავებას იწყებენ, შთანთქავენ და თერმული გამოსხივების ნაწილს დედამიწის ზედაპირზე საბნის მსგავსად აბრუნებენ. ეს ამცირებს სითბოს კოსმოსში დაკარგვას და ხელს უწყობს ატმოსფეროს დათბობას. ტემპერატურის მატება იწვევს წყლის დამატებით აორთქლებას ოკეანეებიდან, ხოლო ატმოსფეროში მეტი ტენიანობა კიდევ უფრო მეტ დათბობას იწვევს. ეს მანკიერი წრეა. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ დათბობის ყოველი ხარისხისთვის ჰაერში ტენიანობის რაოდენობა დაახლოებით 7%-ით¹⁷⁴ იზრდება, ხოლო ელვისებური განმუხტვის სიხშირე 12%-ით.¹⁷⁵

66

როგორც კევინ ტრენბერტი, აშშ-ის ატმოსფერული კვლევების ეროვნული ცენტრის (NCAR) გამორჩეული კლიმატოლოგი, IPCC-ის ანგარიშების წამყვანი ავტორი აღნიშნავს: „**მაღალი ტემპერატურისა და ატმოსფეროში წყლის ორთქლის რაოდენობის კომბინაცია მას უფრო არასტაბილურს ხდის. ეს იწვევს კონვექციის გაძლიერებას და შტორმების ზრდას. ზოგიერთი მათგანი, ყველაზე ძლიერი, ჭექა-ქუხილად გადაიქცევა. ასეთ პირობებში, ძლიერი ჭექა-ქუხილის რისკი იზრდება.**

როდესაც ჭექა-ქუხილები იწყებენ გაერთიანებას და ურთიერთქმედებას, როგორც ეს ხდება ტროპიკული შტორმების დროს, მათ შეუძლიათ უფრო ძლიერ ქარიშხლებად გადაიქცნენ. ყველა ეს ფაქტორი ერთად იზრდება, რაც ზრდის შტორმების, ძლიერი ჭექა-ქუხილის, განსაკუთრებით სუპერუჯრედული შტორმების რისკს, რომლებიც სეტყვას წარმოქმნიან და ზოგიერთ ადგილას, შესაბამის პირობებში, შეიძლება ტორნადოებიც კი გამოიწვიონ“.

ამრიგად, ოკეანის უკიდურესი გათბობა, ატმოსფეროში ელექტროენერგიისა და სითბოს ჭარბი რაოდენობა კლიმატურ სიტუაციას აუარესებს, რაც იწვევს უფრო დამანგრეველ კლიმატურ მოვლენებს, როგორიცაა ძლიერი ჭექა-ქუხილი, ქარიშხლები, ელვა და სპრაიტები.

ატმოსფეროში პლასტმასი არა მხოლოდ გარემოს აბინძურებს, არამედ ცვლის კლიმატურ პროცესებსაც, რაც გავლენას ახდენს ღრუბლებისა და ნალექების წარმოქმნაზე. ის ზრდის ატმოსფეროში ელექტროსტატიკურ მუხტს, აჩქარებს წყლის ორთქლის კონდენსაციას და გავლენას ახდენს ღრუბლების სიმკვრივეზე, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს შტორმების, ჭექა-ქუხილის და სხვა დამანგრეველი ბუნებრივი მოვლენების ინტენსივობის ზრდა. ჩვენ კლიმატზე ამ ზემოქმედების მასშტაბური შედეგების გააზრების ზღვარზე ვართ, რაც მოითხოვს სასწრაფო და ყოვლისმომცველ ზომებს ოკეანეებსა და ატმოსფეროში პლასტმასის ნაწილაკებით დაბინძურების შესამცირებლად.

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

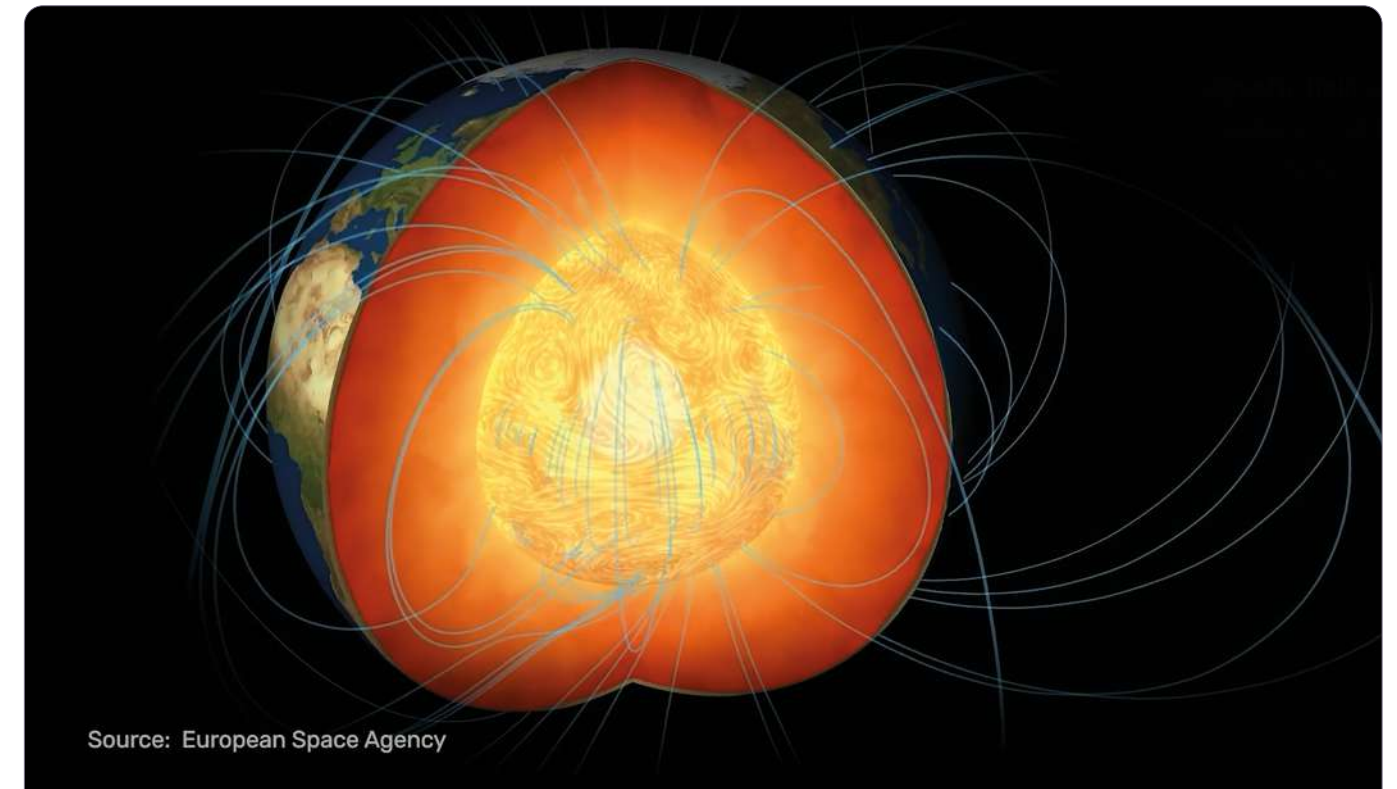
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

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>

ოკეანის ურთიერთქმედება დედამიწის მაგნიტურ ველთან

ოკეანეები დედამიწის ზედაპირის დაახლოებით 70%-ს იკავებენ და წარმოადგენენ არა მხოლოდ წყლის გიგანტურ რეზერვუარებს, არამედ მნიშვნელოვან ელემენტებს პლანეტის რთულ ელექტრულ პროცესებში. ისინი ურთიერთქმედებენ დედამიწის მაგნიტურ ველთან, მონაწილეობენ მის ელექტრომაგნიტურ პროცესებში.

დედამიწის მაგნიტური ველი იცავს პლანეტის ზედაპირს მზის ქარისა და კოსმოსური გამოსხივებისგან და მოქმედებს როგორც ბუნებრივი ფარი. ამ ველის გარეშე ატმოსფერო განადგურდებოდა. გეომაგნიტური ველი იქმნება პლანეტის სიღრმეში, სადაც თხევადი გარეთა ბირთვი მოძრაობს მყარი შიდა ბირთვის გარშემო, რაც ქმნის ბუნებრივ გენერატორს - პროცესს, რომელსაც გეოდინამო ეწოდება (სურ. 65).



Source: European Space Agency

სურათი 65. გეომაგნიტური ველის ფორმირების პროცესის სქემატური წარმოდგენა:

დედამიწის თხევადი გარეთა ბირთვი ბრუნავს მყარი შიდა ბირთვის გარშემო, ქმნის ბუნებრივ გენერატორს - გეოდინამოს, რომლის წყალობითაც იქმნება პლანეტის მაგნიტური ველი.

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

დედამიწის მაგნიტური ველი ურთიერთქმედებს ოკეანეებსა და ატმოსფეროში არსებულ ელექტრულ მოვლენებთან. ზღვის წყალს, მარილისა და გახსნილი იონების შემცველობის გამო, აქვს მნიშვნელოვანი ელექტროგამტარობა, რაც საშუალებას აძლევს მას გაატაროს ელექტრული დენები. ეს დენები, თავის მხრივ, ურთიერთქმედებს მაგნიტურ ველთან, ქმნის რთულ ელექტრომაგნიტურ პროცესებს, რომლებიც როლს თამაშობენ პლანეტარული მაგნიტური ველის დინამიკაში.

როგორც ადრე განვიხილეთ, ოკეანის დაბინძურებას, განსაკუთრებით მიკრო და ნანოპლასტიკებს, შეუძლია შეცვალოს წყლის ქიმიური და ელექტრული თვისებები. რაც უფრო მაღალია დამაბინძურებლების კონცენტრაცია, მით უფრო ირღვევა ბუნებრივი ელექტრომაგნიტური პროცესები.

როდესაც დაბინძურებული წყალი აორთქლდება, მიკროსკოპული წვეთები და აეროზოლები შეიძლება ატმოსფეროში გადაიტანონ მიკრო და ნანოპლასტიკები, მძიმე მეტალები¹⁷⁶, და სხვა ნივთიერებები, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს ადგილობრივ ელექტრომაგნიტურ პროცესებზე. ეს მსგავსია იმისა, თუ როგორ ცვლის მაგნიტთან ახლოს მოთავსებული ლითონის ობიექტი მაგნიტური ველის განაწილებას, ასუსტებს მის სიძლიერეს გარკვეულ ტერიტორიაზე.

ოკეანის დაბინძურების გავლენა დედამიწის მაგნიტურ ველზე დამატებით შესწავლას საჭიროებს, განსაკუთრებით გლობალური კლიმატის ცვლილების კონტექსტში. ამ პროცესების გაგება ხელს შეუწყობს მათი პოტენციური ზემოქმედების შეფასებას პლანეტის კლიმატურ სისტემასა და ეკოსისტემებზე.

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>

მიკრო- და ნანოპლასტიკების გავლენა ადამიანის ჯანმრთელობაზე

66

„პლასტიკი არა მხოლოდ აბინძურებს ჩვენს ოკეანეებსა და წყლის გზებს და კლავს ზღვის ორგანიზმებს, არამედ ის ყველა ჩვენგანშია და პლასტიკის მოხმარებას ვერ გავუბრუნებთ. ამ კრიზისის დასაძლევად გლობალური მოქმედება სასწრაფო და აუცილებელია“.

მარკო ლამბერტინი
WWF International-ის გენერალური დირექტორი

მიკრო- და ნანოპლასტიკები, როგორც XXI საუკუნის ეპიდემიების ახალი რისკ-ფაქტორები

ბოლო 30 წლის განმავლობაში, გულის შეტევების, ინსულტების, კიბოს, დიაბეტის, ალერგიებისა და ნაწლავების ანთებითი დაავადებების შემთხვევების სტაბილური ზრდა შეინიშნება. იმუნური ფუნქციის დაქვეითება შეინიშნება როგორც ბავშვებში, ასევე მოზრდილებში მთელ მსოფლიოში. უნაყოფობა სულ უფრო ფართოდ ვრცელდება. მიუხედავად იმისა, რომ უნაყოფო პირებისა და წყვილების რაოდენობის შესახებ მონაცემები შეზღუდულია, ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის შეფასებით, ზრდასრული მოსახლეობის დაახლოებით 17.5% - დაახლოებით 6-დან 1 მსოფლიოში - უნაყოფოა.¹⁷⁷

2010 წლიდან ინტელექტუალური შესაძლებლობების დაქვეითება შეინიშნება. განვითარებულ ქვეყნებშიც კი, ზრდასრულთა 25%-ს უჭირს ელემენტარული მათემატიკური ამოცანების ამოხსნა; შეერთებულ შტატებში ეს მაჩვენებელი 35%-ს აღწევს. ყურადღების კონცენტრაციის, ლოგიკური აზროვნების და მარტივი ამოცანების გადაჭრის უნარი უარესდება. დემენციისა და კოგნიტური დარღვევის სხვადასხვა ფორმის გავრცელება იზრდება.¹⁷⁸

ფსიქიკური ჯანმრთელობის დარღვევების ზრდამ გადაასწრო ფიზიკური დაავადებების ზრდას.¹⁷⁹ მფოთვითი აშლილობები, აუტიზმი, დეპრესია, ბიპოლარული აშლილობა და ყურადღების დეფიციტისა და ჰიპერაქტიურობის სინდრომი (ADHD) პანდემიის დონეს აღწევს.

სულ უფრო მეტი მტკიცებულება არსებობს, რომ მიკრო და ნანოპლასტიკები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ამ ჯანმრთელობის პრობლემების განვითარებაში.

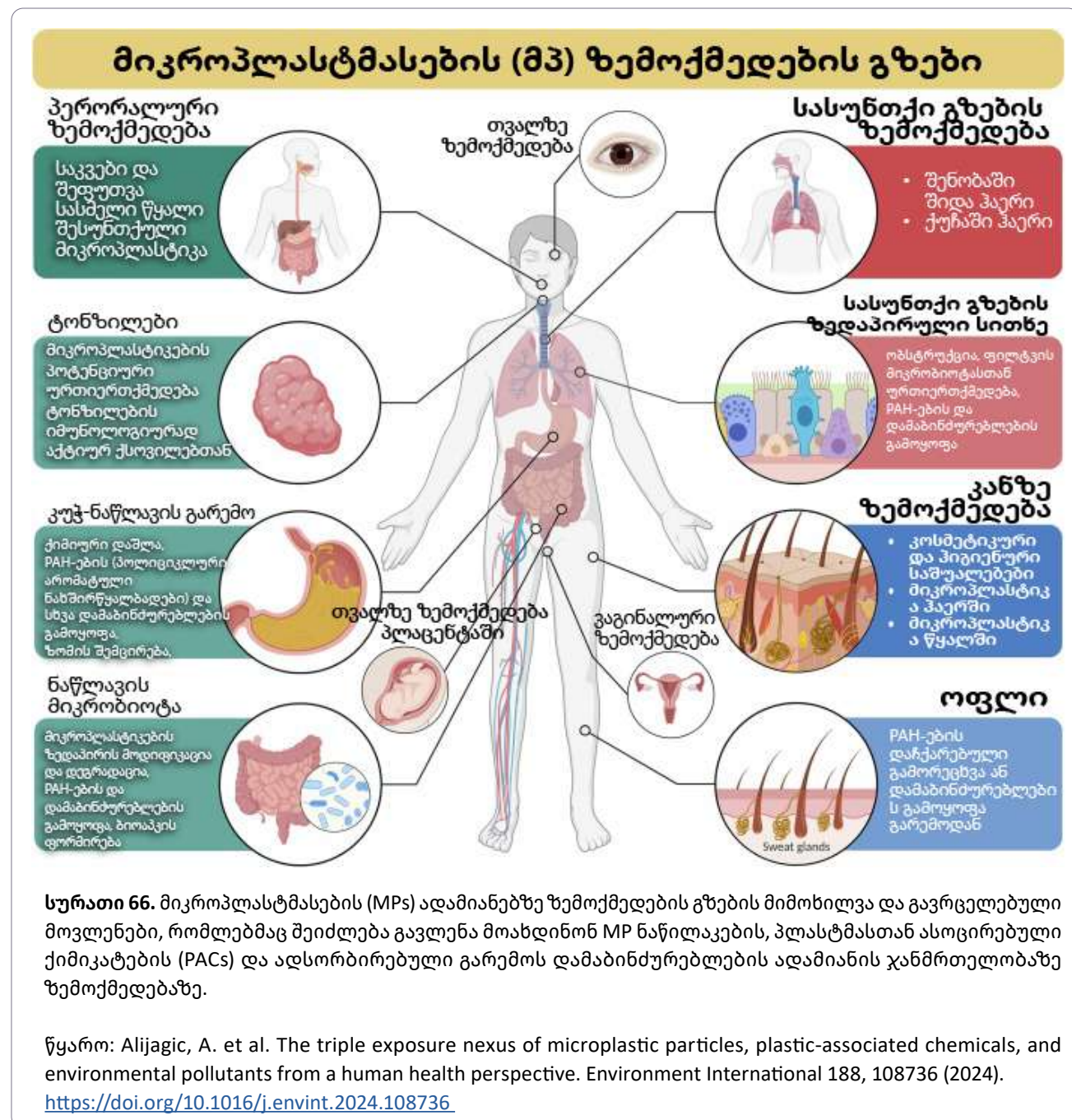
¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

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).

მნკ ტოქსიკურობის მოლეკულური მექანიზმები: დნმ-ის, მიტოქონდრიის და უჯრედის მემბრანების განადგურება

მიკრო- და ნანოპლასტიკები (მნკ) გარემოში ანთროპოგენური დაბინძურების ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ ფორმას წარმოადგენს. მათი ფიზიკური და ქიმიური თვისებების გამო, პლასტიკის ნაწილაკებს შეუძლიათ დიდ მანძილზე გადაადგილება, როგორც გეოგრაფიული, ასევე ეკოლოგიური ბარიერების გადალახვით. მიკრო- და ნანოპლასტიკების ადამიანის ორგანიზმში მოხვედრის ძირითადი გზებია გადაყლაპვა (წყლისა და საკვების მეშვეობით), ჰაერიდან შესუნთქვა და კანიდან შეწოვა¹⁸⁰ (სურ. 66).



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

როგორც აღნიშნულია პირველ ნაწილში: „**პლასტიკის დაბინძურების გავლენა: მიკრო- და ნანოპლასტიკები (მნკ), როგორც პლანეტარული კრიზისის ახალი ფაქტორი**“, საზღვაო გარემო მეორადი მიკროპლასტიკის მნიშვნელოვანი წყაროა. დადგენილია, რომ ზღვის ნიაჟი ყოველწლიურად სანაპირო რაიონებში დაახლოებით 136 000 ტონა მიკროპლასტიკას გადააქვს. გარდა ამისა, ურბანულ რაიონებში ღია წყლის ობიექტები, მათ შორის ჩამდინარე წყლებისა და წვიმის წყლის სისტემები, პლასტიკის ნაწილაკების დაგროვებისა და შემდგომი გავრცელების მნიშვნელოვანი ცენტრები ხდებიან, რომელთა რაოდენობამ შესაძლოა წინა შეფასებებს 90%-ით გადააჭარბოს.

საკვები პროდუქტები წარმოადგენს მიკროპლასტიკების ადამიანის ორგანიზმში მოხვედრის მთავარ გზას. მცენარეებს შეუძლიათ ნანოპლასტიკის დაგროვება ფესვთა სისტემის მეშვეობით: მორწყვის ან წვიმის დროს ნაწილაკები შედიან ნიადაგში და შეიწოვება წყალთან ერთად, გადაადგილდებიან ქსილემში და გროვდებიან ფოთლებისა და ნაყოფის ქსოვილებში.¹⁸¹ პლასტიკის ნაწილაკების ყველაზე მაღალი კონცენტრაცია აღმოჩენილია ისეთ კულტურებში, როგორიცაა ვაშლი, მსხალი, სტაფილო და ბროკოლი.

ზღვის პროდუქტები მიკროპლასტიკების გადაცემის კიდევ ერთი გზაა. მიკროპლასტიკის მიღება ზღვის ორგანიზმების მიერ ყველა ტროფიკულ დონეზეა დაფიქსირებული. ნიუკასლის უნივერსიტეტის კვლევის თანახმად, საშუალო ადამიანმა შეიძლება წელიწადში 250 გრამამდე მიკროპლასტიკას მოიხმაროს - დაახლოებით 5 გრამი კვირაში, ანუ ერთი პლასტიკის საკრედიტო ბარათის წონის. გარდა ამისა, როდესაც პლასტიკის კონტეინერები - მათ შორის ბავშვთა საკვების შეფუთვა - მიკროტალღურ ღუმელებში თბება, ზედაპირის ყოველ კვადრატულ სანტიმეტრზე საკვებში შეიძლება გამოიყოს 2 მილიარდზე მეტი ნანონაწილაკი და პლასტიკის 4 მილიონ მიკრონაწილაკი.

მიკროპლასტიკასი ფართოდ არის გავრცელებული სასმელ წყალში. კვლევები აჩვენებს, რომ შეერთებულ შტატებში ონკანის წყლის ნიმუშების 90%-მდე შეიცავს მიკროპლასტიკის ნაწილაკებს. დაბინძურების ძირითადი წყაროებია ჩამდინარე წყლების ჩამონადენი, სამრეწველო გამონაბოლქვი და ჰაერში პლასტიკის ატმოსფერული დაღეჟვა. როდესაც დაბინძურებული წყალი აორთქლდება, პლასტიკის ნაწილაკებს შეუძლიათ ატმოსფეროში ასვლა და მოგვიანებით წვიმასთან ან თოვლთან ერთად ჩამოვარდნა. აშშ-ს 11 ეროვნულ პარკში ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ 14 თვის განმავლობაში ნალექებთან ერთად 1000 ტონაზე მეტი პლასტიკის ნაწილაკი ჩამოვარდება, რომელიც საკმარისია 120 მილიონი პლასტიკის ბოთლის წარმოებისთვის.

მიკროპლასტიკის ნაწილაკების აეროზოლური გადაცემა ადამიანისთვის ერთ-ერთ ყველაზე საშიშ ექსპოზიციის გზად ითვლება. პლასტიკის ნაწილაკები ოკეანეებისა და წყლის ობიექტების ზედაპირიდან აიწევა, ჰაერის დინებებით გადაიტანება და ატმოსფერული აეროზოლების ნაწილი ხდება. შეფასებები მიუთითებს, რომ დიდ ქალაქში ზრდასრულ ადამიანს ორსაათიანი სეირნობის დროს შეუძლია 106 000-მდე მიკროპლასტიკის ნაწილაკის შესუნთქვა. წყლის ობიექტებთან ახლოს მდებარე ადგილებში ეს მაჩვენებელი შეიძლება ათჯერ მეტი იყოს.

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

ამერიკის კარდიოლოგიის კოლეჯის კონფერენციაზე (ACC.25) წარდგენილმა ახალმა კვლევამ აჩვენა, რომ მიკროპლასტიკის მაღალი ზემოქმედება — რომლის შემთხვევით მიღება ან შესუნთქვაც შესაძლებელია — დაკავშირებულია ქრონიკული არაგადამდები დაავადებების გაზრდილ გავრცელებასთან. კვლევამ აჩვენა, რომ აშშ-ში აღმოსავლეთ და დასავლეთ სანაპიროებზე, მექსიკის ყურის სანაპიროზე და ტბების გარკვეულ სანაპიროებზე განლაგებულ თემებში გარემოში მიკროპლასტიკის მაღალი კონცენტრაცია დაფიქსირდა, რაც კორელაციაში იყო ისეთი ქრონიკული დაავადებების, როგორიცაა ჰიპერტენზია, დიაბეტი და ინსულტი, მაღალ მაჩვენებლებთან.

66

„ეს კვლევა იძლევა საწყის მტკიცებულებას, რომ მიკროპლასტიკის ზემოქმედება გავლენას ახდენს გულ-სისხლძარღვთა ჯანმრთელობაზე, განსაკუთრებით ქრონიკულ, არაგადამდები დაავადებებზე, როგორიცაა მაღალი არტერიული წნევა, დიაბეტი და ინსულტი“, — თქვა საი რაჰულ პონანამ, მაგისტრმა, ოჰაიოს შტატის კეის ვესტერნ რეზერვის სამედიცინო სკოლის კვლევის მონაცემთა მეცნიერმა და კვლევის წამყვანმა ავტორმა. **„როდესაც ჩვენს ანალიზში¹⁸² სხვადასხვა სოციალურ-ეკონომიკური და გარემო მახასიათებელი ჩავრთეთ, არ ველოდით, რომ მიკროპლასტიკის ქრონიკული არაგადამდები დაავადებების გავრცელების პროგნოზირების ტოპ 10-ში მოხვდებოდა.“¹⁸²**

მიკრო- და ნანოპლასტიკებს, როგორც აღმოჩნდა, შეუძლიათ ბიოლოგიური ბარიერებში შეღწევა და გადალახვა, მათ შორის ნაწლავის, ფილტვების, ტვინისა და პლაცენტის ბარიერებში.¹⁸³ მტკნარი ან ზღვის წყლის ზემოქმედების ქვეშ მყოფი მიკროპლასტიკები უფრო ადვილად აღწევენ უჯრედებში (სურ. 67) მათ ზედაპირზე ბიომოლეკულების დაგროვების გამო. ეს ბიომოლეკულები წარმოქმნიან საფარს (ეკოკორონა), რომელიც ეხმარება მიკროპლასტიკას საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის გავლასა და ქსოვილებში ინტეგრაციაში. ეს საფარი მოქმედებს როგორც ხელშემწყობი, აძლიერებს ნაწილაკების უჯრედებში ინტერნალიზაციას „ტროას ცხენის“ მსგავსად.¹⁸⁴

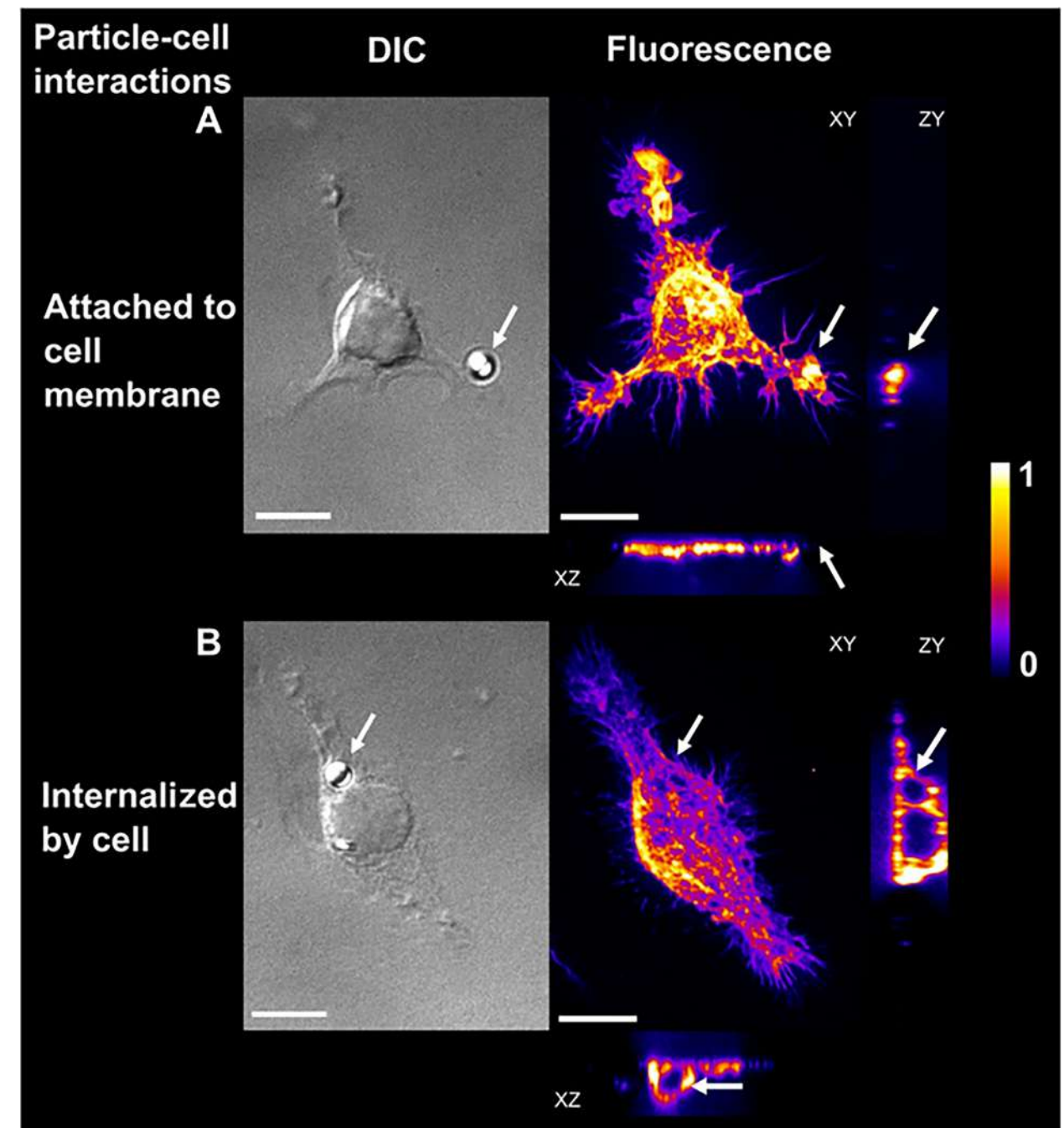
¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

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

¹⁸³ Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saqib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴ Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>



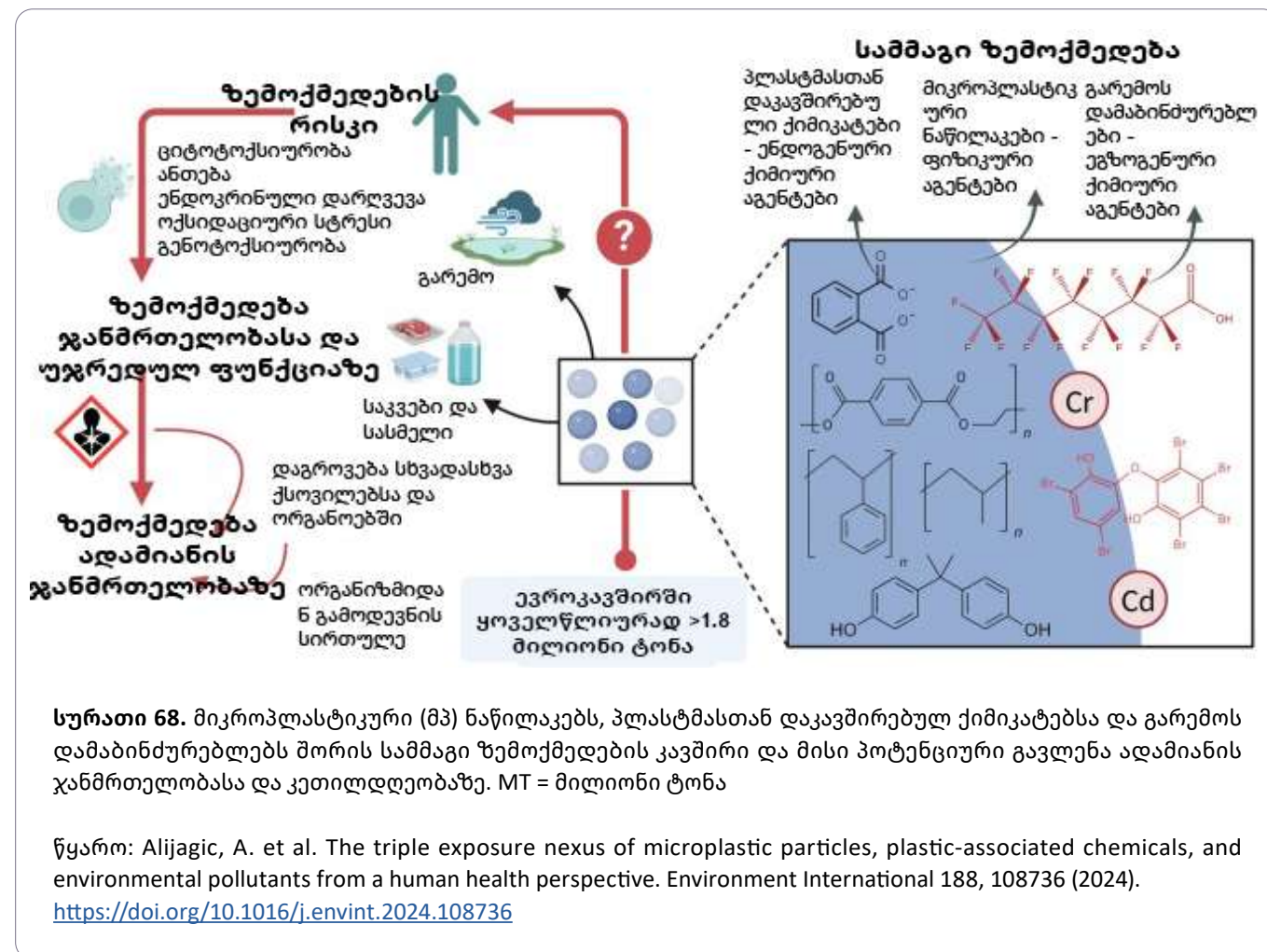
სურათი 67. მიკროპლასტიკური ნაწილაკების ნაწილაკ-უჯრედის ურთიერთქმედების სურათები, რომლებიც 2 კვირის განმავლობაში მტკნარ წყალზე იყვნენ ექსპოზირებული.

DIC: ნაწილაკ-უჯრედის ურთიერთქმედების დიფერენციალური ინტერფერენციული კონტრასტული მიკროსკოპიის სურათები. ფლუორესცენცია: უჯრედების მბრუნავი დისკის კონფოკალური სურათები ფლუორესცენციულად მონიშნული ძაფისებრი აქტინით (ცრუ ფერის სურათი, მაქსიმალური ინტენსივობის პროექცია აჩვენებს თვითნებურ ერთეულებს). სამგანზომილებიანი კონფოკალური სურათების XY, YZ და XZ პროექციები საშუალებას იძლევა უჯრედის მემბრანებზე მიმაგრებული მიკროპლასტიკური ნაწილაკების (A) ან (B) ინტერნალიზებული მიკროპლასტიკური ნაწილაკების დიფერენციალის. ისრები მიუთითებს მიკროპლასტიკური ნაწილაკის პოზიციას. მასშტაბის ზოლები, 10 μ m.

წყარო: 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>

მიკროპლასტიკის ტოქსიკურობაზე შესაძლოა გავლენა იქონიოს მრავალმა ფაქტორმა, მათ შორის ზომამ, ფორმამ, ზედაპირულმა მუხტმა, ამინდის/დაბერების პროცესმა, ადსორბციამ და ა.შ.¹⁸⁵ უფრო მცირე ნაწილაკები უჯრედებში უფრო ადვილად აღწევენ და უფრო გამოსატულ ჟანგვით სტრესს იწვევენ. მიკროპლასტიკის ზედაპირული მუხტი უჯრედების მიერ მათი შთანთქმის ეფექტურობის განმსაზღვრელი მთავარი ფაქტორია, რადგან ის გავლენას ახდენს ადჰეზიაზე. გარდა ამისა, მიკროპლასტიკის შეღებვა პოლიმერებისა და სხვადასხვა ქიმიური დანამატებისგან, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს მათ მავნე ეფექტებს.¹⁸³

მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკები, პლასტიკში გამოყენებული ქიმიური ნაერთები და მიმდებარე გარემოდან წარმოქმნილი დამაბინძურებლები, რომლებსაც პლასტიკები შთანთქავენ - ყველა ერთად მოქმედებენ რთულ¹⁸⁶ და მავნე გზით, რაც მნიშვნელოვან საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას (სურ. 68).



¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Aljagic, 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).

მიკროპლასტიკის მხოლოდ ერთი გრამი შეიძლება შეიცავდეს 24,000 ნანოგრამამდე მდგრად ორგანულ დამაბინძურებლებს.¹⁸⁷ ეს ნივთიერებები ძლიერ ტოქსიკურია, გროვდება ორგანიზმებში და შეიძლება ზიანი მიაყენოს მცირე კონცენტრაციებშიც კი.

მიკროპლასტიკს ასევე შეუძლია სხვა დამაბინძურებლების უფრო საშიში გახადოს,¹⁸⁸ რადგან როგორც თავად პლასტიკის, ასევე მის ზედაპირზე არსებული ქიმიური ნარევი არა მხოლოდ სხვა დამაბინძურებლებს ეკვრება, არამედ ურთიერთქმედებს მათთან, ცვლის მათ ქიმიურ თვისებებს.

კვლევები აჩვენებს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკების ზემოქმედება იწვევს მძიმე ტოქსიკურობას სხვადასხვა ბიოლოგიური ორგანიზმებისთვის, მათ შორის:

- **მაკრომოლეკულები:** დნმ-ის და გენების დაზიანება, გენების ექსპრესიის დარღვევა და ცილების ტრანსკრიფციის ცვლილება.
- **ორგანულების უჯრედები:** უჯრედების დაყოფის ცვლილება, უჯრედების ტოქსიკურობა, აპოპტოზი, ჟანგვითი სტრესის რეაქცია, მეტაბოლიზმი, კალციუმის იონების მომატება.
- **ქსოვილები:** ანთება, ფიბროზი და ძვლოვანი ქსოვილის ოსტეოლიზი.
- **ორგანოები:** იმუნური რეაქციები, ორგანოების დისფუნქცია, ნეიროტოქსიკურობა, კანცეროგენეზი, კვების ცვლილება, მეტაბოლური მოთხოვნილების ცვლილება და ენერგეტიკული რეზერვების გადანაწილება.
- **Популяции животных и человека:** ნაყოფიერების შემცირება, ზრდის შენელება და პოპულაციის შემცირება.

ეს ეფექტები ხაზს უსვამს მიკრო- და ნანოპლასტიკების მრავალდონიან გავლენას ბიოლოგიურ სისტემებზე.¹⁸⁹

1. უჯრედული ფუნქციის დარღვევა

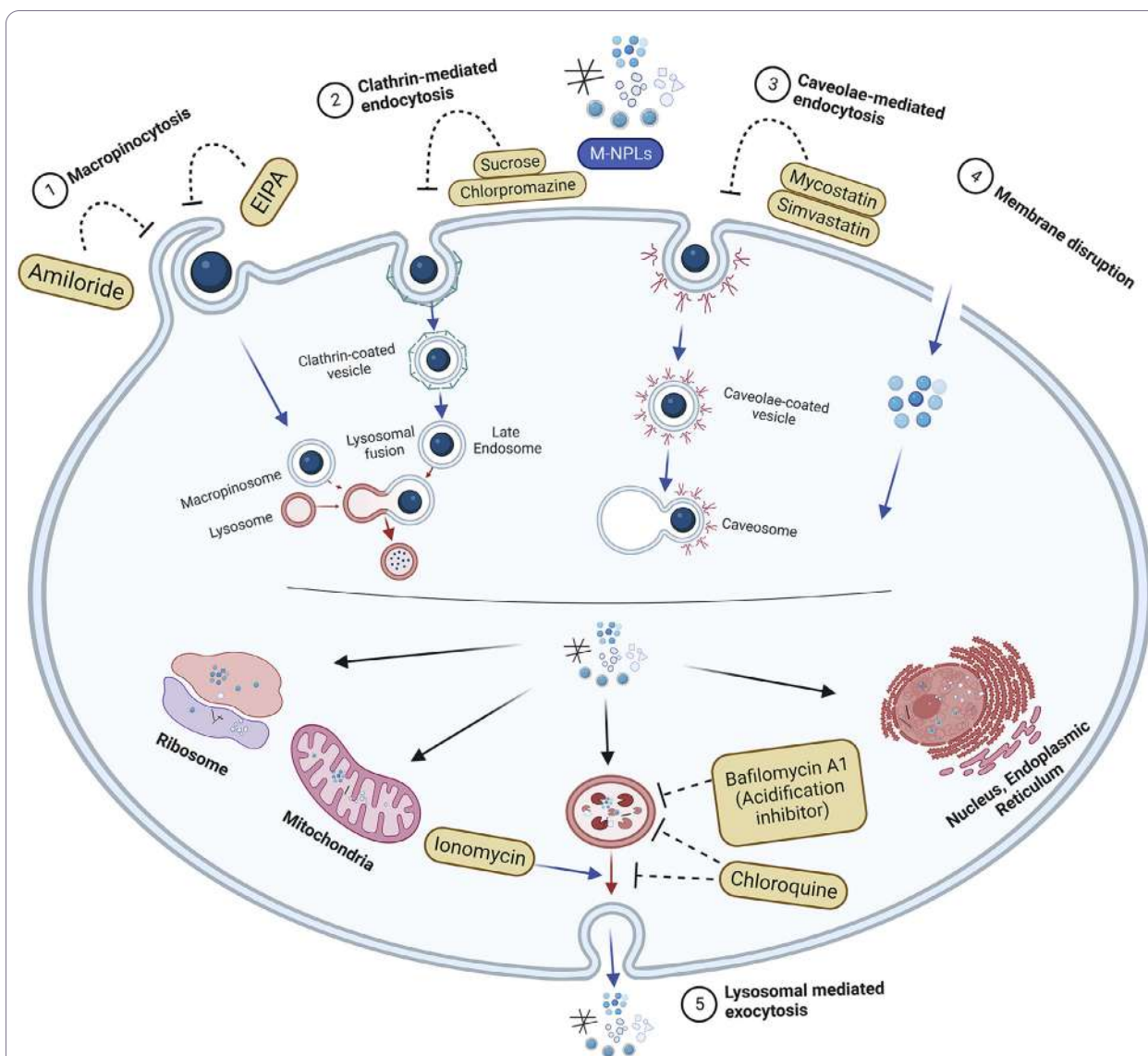
ადამიანის ორგანიზმის განადგურება მიკრო- და ნანოპლასტიკების ზემოქმედებით უჯრედულ დონეზე იწყება.¹⁹⁰ მნპ-ები ურთიერთქმედებენ უჯრედულ მემბრანებთან სხვადასხვა ბმების (მაგ., წყალბადის, ჰალოგენის) ან ჰიდროფობიური, ვან დერ ვაალის და ელექტროსტატიკური ძალების მეშვეობით. დესტაბილიზაციის ფაქტორის როლში მოქმედებით, მნპ-ები არღვევენ უჯრედული მემბრანების მთლიანობასა და ფუნქციას (სურ. 69).

¹⁸⁷Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

¹⁸⁸Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>



სურათი 69. მ-ნპლ-ების უჯრედული შთანთქმა და გამოთავისუფლება. M-NPL-ები იყენებენ ენდოციტოზის სხვადასხვა ტიპს.

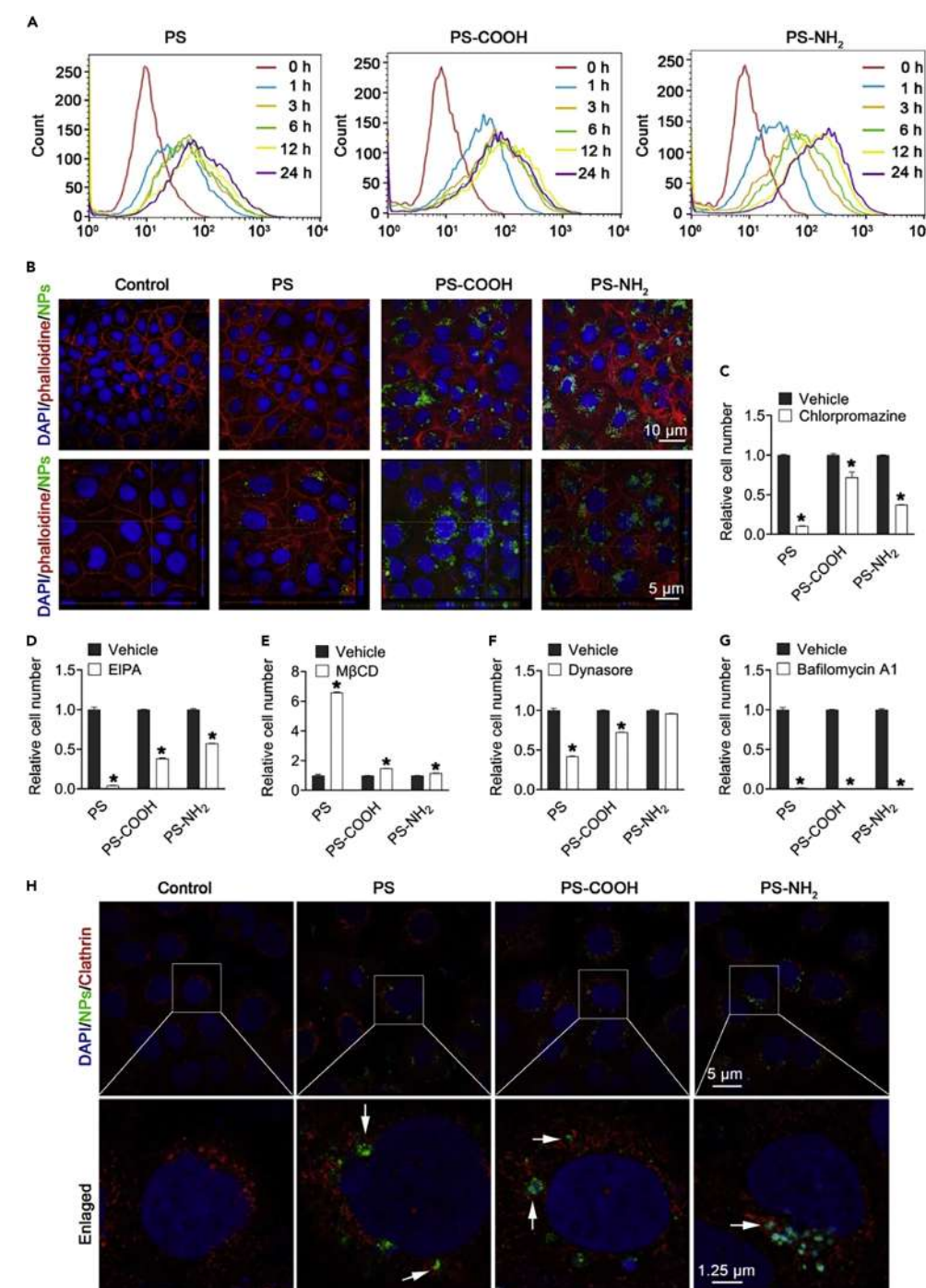
მაკროპინოციტოზი, (2) კლატრინით განპირობებული ენდოციტოზი, (3) კავეოლებით განპირობებული ენდოციტოზი და უჯრედის მემბრანის დარღვევა ინტერნალიზაციის მიზნით. M-NPL-ები უჯრედებიდან გამოთავისუფლება 4) ლიზოსომური ენდოციტოზით.

წყარო: 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>

მცირე ზომის გამო, MNP-ებს შეუძლიათ ადვილად შეაღწიონ ადამიანის უჯრედებში (სურ. 70). MNP-ებზე დაგროვილი მცირე ზომა და ელექტროსტატიკური მუხტი განსაზღვრავს მათ სისტემურ ეფექტს ორგანიზმზე.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>



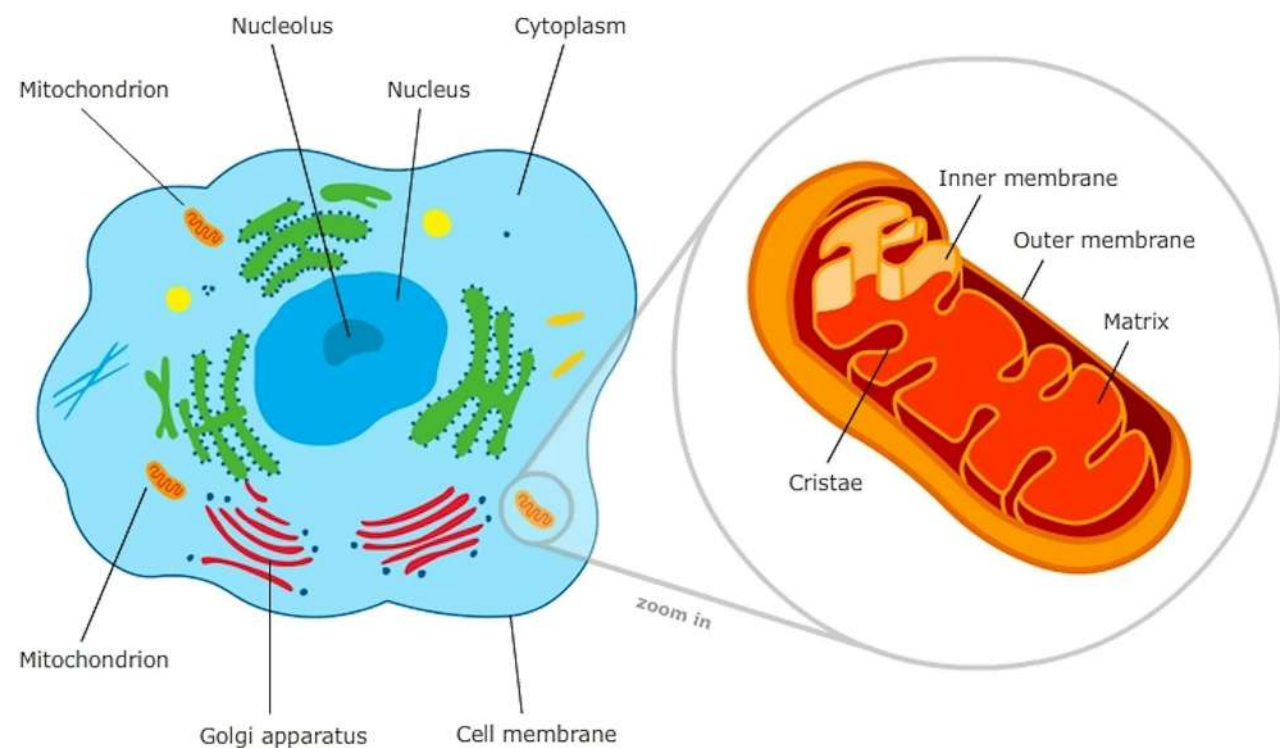
სურათი 70. Caco-2 უჯრედები, რომლებიც ახდენენ NPL-ების ინტერნალიზაციას.

(A–G) Caco-2 უჯრედების მიერ NPL-ების ინტერნალიზაციის ანალიზი ნაკადური ციტომეტრიის (A) და კონფოკალური მიკროსკოპიის (B) გამოყენებით. Caco-2 უჯრედების ნაკადური ციტომეტრიული ანალიზი, რომლებიც წინასწარ დამუშავებული იყო ქლორპრომაზინით (C), EIPA-თი (D), MβCD-ით (E), დინასორით (F) და ბაფილომიცინით A1-ით (G) 1 საათის განმავლობაში, რასაც მოჰყვა NPL-ებით შემდგომი დამუშავება 24 საათის განმავლობაში. NPL-ების ლოკალიზაცია კლატრინით განპირობებულ ვეზიკულაში, შესწავლილი კონფოკალური მიკროსკოპიით (H). მიღებულია Elsevier-ის ნებართვით.

წყარო: 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>

უჯრედულ დონეზე მათი დესტრუქციული მოქმედების ძირითადი ასპექტია უჯრედის მემბრანების, მიტოქონდრიების დაზიანება და დნმ-ის განადგურება. ელექტროსტატიკურად დამუხტულ მიკრო და ნანოპლასტიკურ ნაწილაკებს შეუძლიათ უჯრედების, განსაკუთრებით ნეირონების, მემბრანული პოტენციალის დესტაბილიზაცია, რაც იწვევს სპონტანურ ელექტრულ სიგნალებს, უჯრედშორისი კომუნიკაციის ჩავარდნებს ან უჯრედების სიკვდილს.

უჯრედის შიგნით, ნანოპლასტიკების დესტრუქციული ეფექტის მთავარი სამიზნეა მიტოქონდრიები - უჯრედის გადარჩენისა და აღდგენისთვის პასუხისმგებელი აუცილებელი ორგანოები(სურ.71). უჯრედის, „ელექტროსადგურების“ ფუნქციის გარდა, მიტოქონდრიები ასრულებენ მრავალფუნქციურ როლს, რაც გავლენას ახდენს ზოგად ჯანმრთელობაზე, სტრესისადმი მდგრადობაზე, ქრონიკული დაავადებების განვითარებაზე და დაბერების პროცესზე.



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

სურათი 71. უჯრედისა და მისი მიტოქონდრიის სქემატური ილუსტრაცია

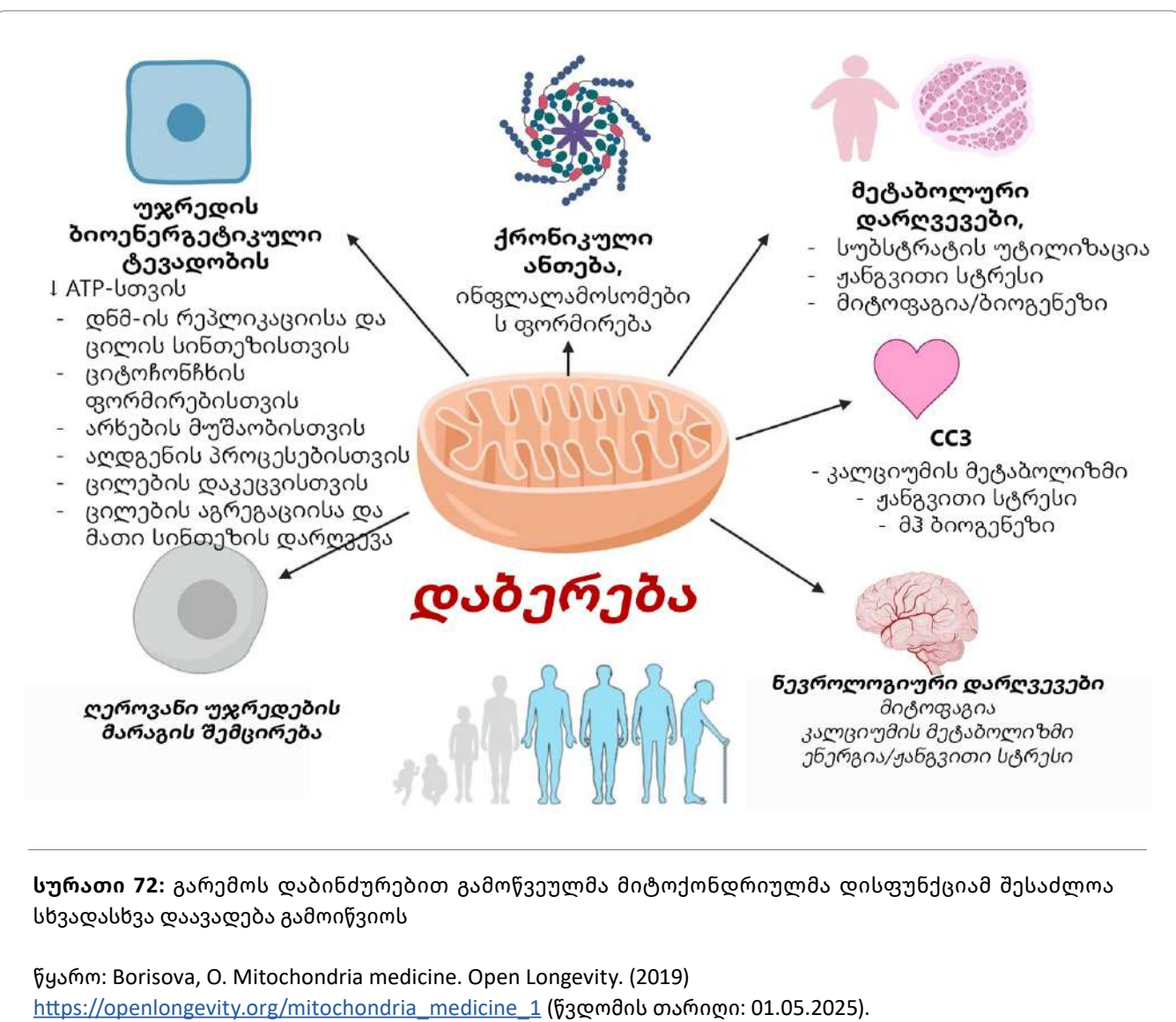
მიტოქონდრიის სათანადო ფუნქცია სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია უჯრედების გადარჩენის, ჰომეოსტაზისა და ენერგიის წარმოებისთვის. მიტოქონდრიების სტრუქტურასა და ფუნქციონირებას უზრუნველყოფს მიტოქონდრიის ხარისხის კონტროლის სისტემა, რომელიც მოიცავს მიტოქონდრიის ბიოგენეზს, დინამიკას (შერწყმა და დაშლა), მიტოფაგიის და მიტოქონდრიის გაშლილ ცილოვან პასუხს (UPR^m). მიტოქონდრიული დისფუნქცია ან დაზიანება დაკავშირებულია ადამიანის მრავალი დაავადების დაწყებასა და პროგრესირებასთან, მათ შორის ნეიროდეგენერაციულ დარღვევებთან, გულ-სისხლძარღვთა დაავადებებთან, ასაკთან დაკავშირებულ დაავადებებთან, დიაბეტთან და კიბოსთან. გარემო სტრესმა და დამაბინძურებლებმა შეიძლება გაზარდოს მიტოქონდრიის დაუცველობა, რაც დისფუნქციას იწვევს. მრავალი მტკიცებულება მიუთითებს მიკრო- და ნანოპლასტიკების გავლენას მიტოქონდრიის ჯანმრთელობაზე. ნაჩვენებია, რომ მნპ-ები იწვევენ ჟანგვით სტრესს და ზრდიან რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების წარმოებას, რაც საბოლოოდ არღვევს მიტოქონდრიის მემბრანულ პოტენციალს. ამ ნაწილაკებს შეუძლიათ გადალახონ ბიოლოგიური ბარიერები ადამიანის სხეულში და შეიწოვონ უჯრედებში, პოტენციურად შეცვალონ მიტოქონდრიის დინამიკა, ბიოენერგეტიკა და სასიგნალო გზები, რითაც გავლენას ახდენენ უჯრედულ მეტაბოლიზმსა და ფუნქციაზე.

მიტოქონდრიების კრიტიკული როლის გათვალისწინებით, როგორც უჯრედულ, ასევე საერთო ჯანმრთელობაში, მნპ-ები სერიოზულ საფრთხეს წარმოადგენენ მიტოქონდრიის მთლიანობისთვის. ამჟამინდელი დასკვნები ხაზს უსვამს მნპ-ის დაბინძურების ფართოდ გავრცელებული პრობლემის გადაჭრის გადაუდებელ აუცილებლობას — არა მხოლოდ გარემოს დასაცავად, არამედ ადამიანის ჯანმრთელობის დასაცავადც.¹⁹²

მიტოქონდრიები სინთეზირებენ ატფ-ს — უნივერსალურ ენერგიის მოლეკულას, რომელიც კვებავს ყველა ბიოლოგიურ პროცესს, კუნთების შეკუმშვიდან და ნერვული იმპულსების გადაცემიდან დაწყებული, ჰორმონების გამომუშავებითა და უჯრედების დაყოფით დამთავრებული. ისინი მონაწილეობენ ნახშირწყლების, ცხიმებისა და ამინომჟავების მეტაბოლიზმში, რაც ხელს უწყობს ორგანიზმის მეტაბოლური ბალანსის შენარჩუნებას.

მიტოქონდრიები ასევე არეგულირებენ უჯრედების სიკვდილს, ანუ აპოპტოზს — კრიტიკულად მნიშვნელოვან პროცესს, რომელიც ხელს უშლის დაზიანებული ან პოტენციურად საშიში უჯრედების დაგროვებას. ამ სისტემის დარღვევები დაკავშირებულია კიბოს, აუტოიმუნური დარღვევების და ნეიროდეგენერაციული დაავადებების განვითარებასთან. გარდა ამისა, მიტოქონდრიები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ანტიოქსიდანტურ დაცვაში რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების (ROS) დონის რეგულირებით. როდესაც ეს სისტემა ვერ ფუნქციონირებს, დაზიანება გროვდება, დაბერება ჩქარდება და ქრონიკული ანთების და დაავადების რისკი იზრდება (სურ. 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>



მიტოქონდრიები შეიცავს საკუთარ დნმ-ს, რომელიც დედის ხაზით მემკვიდრეობით გადაეცემა, რაც მათ გენეტიკური დაავადებების უნიკალურ ხელშემწყობ ფაქტორებად აქცევს. ისინი არეგულირებენ ბირთვული გენების აქტივობას და ეხმარებიან უჯრედებს გარე გარემოში ცვლილებებთან ადაპტაციაში. მიტოქონდრიები ასევე მონაწილეობენ სტეროიდული ჰორმონების, მათ შორის კორტიზოლის, ესტროგენების და ტესტოსტერონის სინთეზში. ნანოპლასტიკების ზემოქმედებით გამოწვეული მიტოქონდრიული ფუნქციის დარღვევა პათოლოგიური პროცესების კასკადის ბირთვს წარმოადგენს. ამან შეიძლება გამოიწვიოს სერიოზული და პოტენციურად შეუქცევადი შედეგები — არა მხოლოდ ცალკეულ ორგანოებსა და სისტემებში, არამედ მთლიანად ორგანიზმში (იხილეთ ცხრილი 1).

ნევროლოგიური დაავადებები	პარკინსონის დაავადება, ალცჰაიმერის დაავადება, ამიოტროფიული გვერდითი სკლეროზი (ALS), ეპილეფსია, შაკიკი, მიტოქონდრიული ენცეფალომომოპათიები (მაგალითად, MELAS სინდრომი)
გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები	კარდიომომოპათიები, გულის უკმარისობა, ათეროსკლეროზი (ოქსიდაციური გზით)
იმუნური და ანთებითი დაავადებები	აუტოიმუნური დაავადებები (მაგ., სისტემური წითელი მგლურა), ქრონიკული ანთებითი მდგომარეობები (როგორიცაა ROS და ციტოკინური სიგნალიზაციის დისფუნქცია)
მეტაბოლური დარღვევები	მე-2 ტიპის დიაბეტი, სიმსუქნე, მეტაბოლური სინდრომი, ცხიმოვანი მჟავების და ლაქტატის ცვლის დარღვევები
ონკოლოგიური დაავადებები	მიტოქონდრიული დისფუნქცია იწვევს მუტაციების და ავთვისებიანი უჯრედების ტრანსფორმაციის გაზრდილ რისკს
კუნთების დაავადებები	მიტოქონდრიული მოპათიები, ქრონიკული კუნთების სისუსტე და დაღლილობა
გრძნობის ორგანოების დაავადებები	პიგმენტური რეტინიტი, ლებერის მემკვიდრეობითი მხედველობის ნერვის ნეიროპათია (მემკვიდრეობითი დაავადება, რომელიც მხედველობის დაკარგვას იწვევს)
გენეტიკური მიტოქონდრიული დარღვევები	ლი სინდრომი, კერნს-სეირის სინდრომი, ბარტის სინდრომი

ცხრილი 1. მიტოქონდრიულ დისფუნქციასთან დაკავშირებული შერჩეული დაავადებების მიმოხილვა

მნკ-ის მონაწილეობა ნაადრევი დაბერებისა და ონკოგენუზის მექანიზმებში

ნანოკლასტმასების ზემოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს ნაადრევი დაბერება მიტოქონდრიების ფუნქციონირების ჩარევით და ორგანიზმის გენეტიკური პროგრამების დარღვევით. მიტოქონდრიების დაზიანება იწვევს რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების ჭარბ წარმოებას, რაც იწვევს ჟანგვით სტრესს. ეს აზიანებს დნმ-ს, არღვევს გენეტიკურ სტაბილურობას, ააქტიურებს ანთებას და აჩქარებს ქსოვილების დაბერებას. გარდა ამისა, ნანოკლასტმასები ხელს უწყობენ ტელომერების დამოკლებას, რაც ზღუდავს უჯრედების დაყოფის უნარს.

66

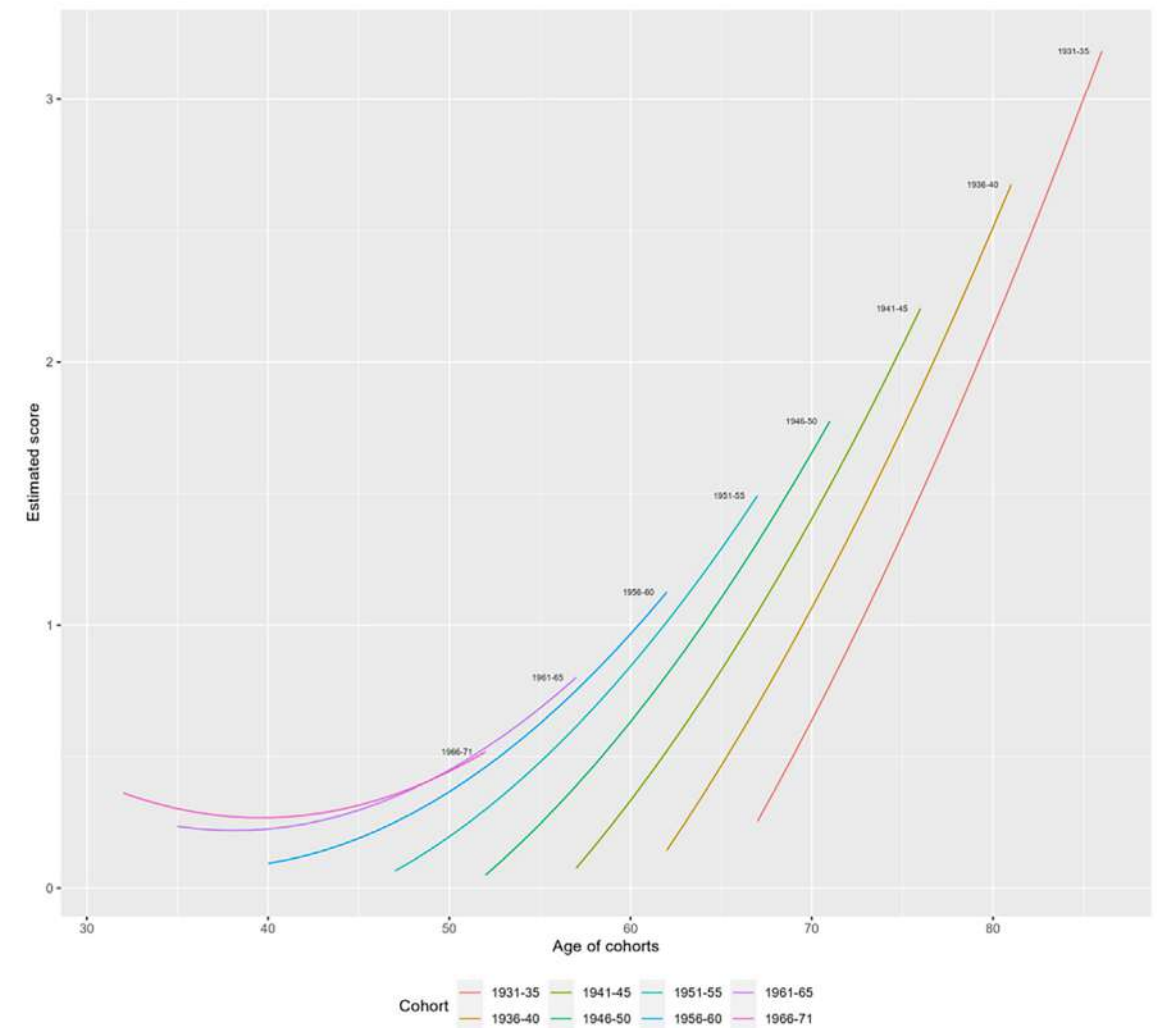
„ჩვენ ასევე შევძელით გვეჩვენებინა, რომ ადამიანებში, მიტოქონდრიული დნმ-ის ნუკლეოტიდის ერთ ცვლილებასაც კი, რომელიც დაკავშირებულია მიტოქონდრიულ დაზიანებასთან და ბავშვთა მიტოქონდრიულ დაავადებებთან, შეუძლია დააჩქაროს დაბერების პროცესი“, — თქვა ტაოშენგ ჰუანგმა, მედიცინის დოქტორმა, ფილოსოფიის დოქტორმა, პროფესორმა და გენეტიკის განყოფილების ხელმძღვანელმა UB-ის ჯეიკობსის მედიცინისა და ბიოსამედიცინო მეცნიერებების სკოლის პედიატრიის დეპარტამენტში. **„ჩვენ აღმოვაჩინეთ, რომ მიტოქონდრიების ცუდი ფუნქციონირების გამო რეაქტიული ჟანგბადის სახეობები დროთა განმავლობაში იწვევს დნმ-ის დაზიანების ზრდას.“**¹⁹³

ეპიგენეტიკური დაბერება გულისხმობს გენების რეგულირების ცვლილებებს, რომლებიც ხდება დნმ-ის დონეზე მოდიფიკაციების გზით (გენების ჩართვა ან გამორთვა), თავად დნმ-ის შეცვლის გარეშე. ეს არის დახვეწილი „მოლეკულური საათი“, რომლის გაზომვაც შესაძლებელია და ის შეიძლება უფრო სწრაფად ან ნელა მუშაობდეს, ვიდრე ქრონოლოგიური დაბერება. მიტოქონდრიული დნმ-ის მაღალი აქტივობა დაკავშირებულია დაჩქარებულ ეპიგენეტიკურ დაბერებასთან. ზოგიერთ ინდივიდში, თუნდაც 20-30 წლის ასაკში, უჯრედების ბიოლოგიურმა ასაკმა შეიძლება მნიშვნელოვნად გადააჭარბოს მათ ქრონოლოგიურ ასაკს, რაც ნიშნავს, რომ მათი სხეული მოსალოდნელზე სწრაფად ბერდება.

მიტოქონდრიული დისფუნქციის მქონე ადამიანებს ხშირად ადრეულ ასაკში უვითარდებათ ასაკთან დაკავშირებული დაავადებები, მათ შორის დემენცია, გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები, არითმიები და გულის უკმარისობა. შოტლანდიელმა მკვლევარებმა აღმოაჩინეს, რომ რაც უფრო გვიან დაიბადა ადამიანი, მით უფრო მაღალია მისი დაავადების რისკი 50 წლის ასაკში. მაგალითად, 1956-დან 60 წლამდე დაბადებულებს აქვთ უფრო მაღალი დაავადების ქულები, ვიდრე იმავე ასაკში 1951–55 ან 1946–50 წლების კოჰორტებს (სურ. 73).¹⁹⁴

¹⁹³Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>



სურათი 73. პროგნოზირებული მულტიმორბილობის ქულები კოჰორტისა და ასაკის მიხედვით.

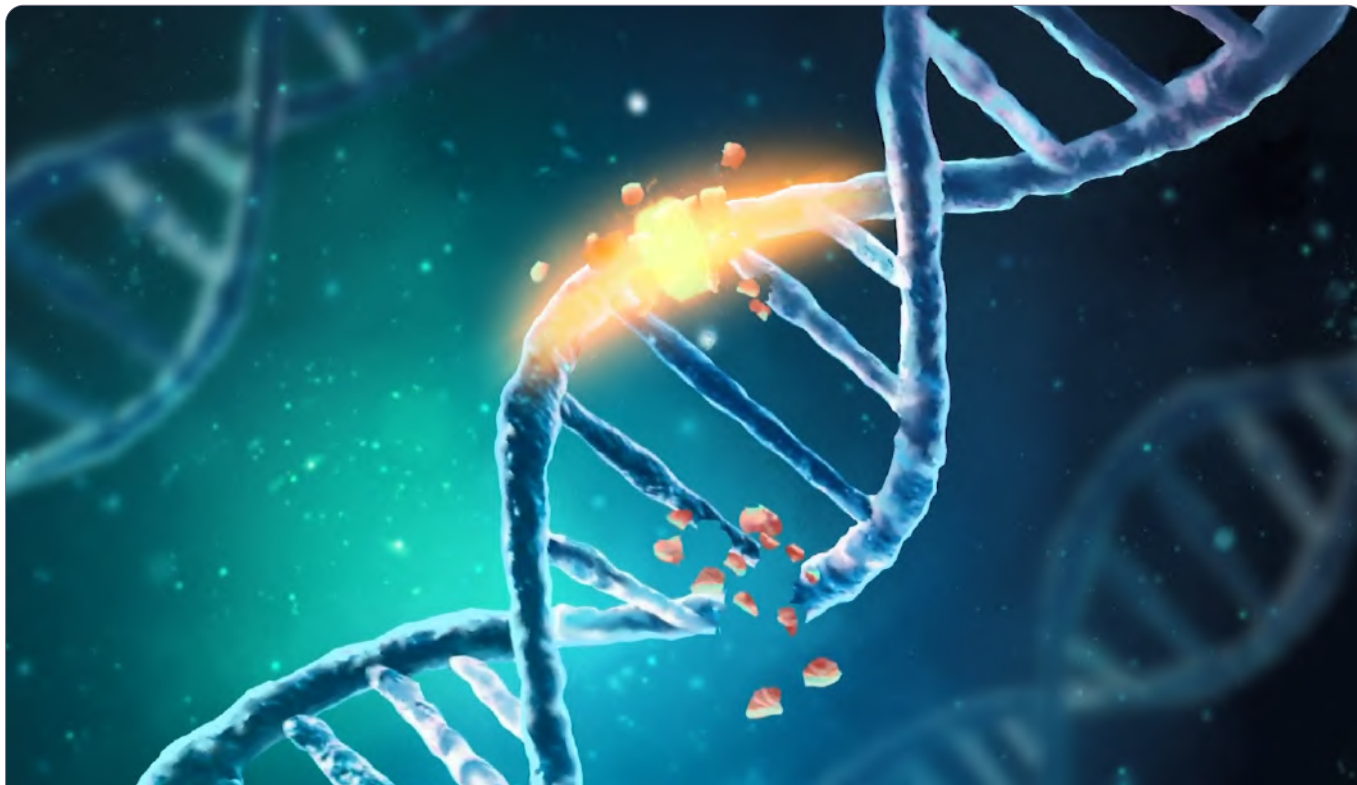
წყარო: Scottish Longitudinal Study. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703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

მიტოქონდრიული დნმ-ის მუტაციები დაბერებისა და კიბოს დროს

დაბერებისა და კიბოს განვითარების ძირითად მექანიზმებს ბევრი საერთო მახასიათებელი აქვთ. ორივე პროცესში ცენტრალური ფაქტორია მიტოქონდრიული დისფუნქცია - ენერგიის გამომუშავებაზე პასუხისმგებელი უჯრედის ორგანოების დარღვევა. ასაკთან ერთად, მიტოქონდრიული დნმ-ის (mtDNA) მუტაციები გროვდება ადამიანის ქსოვილებში და მსგავსი მუტაციები დიდი ხანია შეინიშნება კიბოს სხვადასხვა ფორმაში.¹⁹⁵

როდესაც უჯრედში მუტაცია ხდება, მას შეუძლია შეცვალოს უჯრედის ქცევა. მაგალითად, მუტირებულმა უჯრედმა შეიძლება დაიწყოს უფრო სწრაფად ზრდა და დაყოფა, წინააღმდეგობა გაუწიოს უჯრედის სიკვდილს მაშინაც კი, როდესაც ეს უნდა მოხდეს, გახდეს „უნილავი“ იმუნური სისტემისთვის ან უფრო ეფექტურად აიტანოს ჟანგბადის ან საკვები ნივთიერებების ნაკლებობა.

ასეთი მუტირებული უჯრედები იძენენ კონკურენტულ უპირატესობას ნორმალურ უჯრედებთან შედარებით, რადგან ისინი უფრო დიდხანს ცოცხლობენ, უფრო ხშირად იყოფიან, იკავებენ მზარდ სივრცეს და საბოლოოდ დომინირებენ მიმდებარე ქსოვილებში. როგორც კი ეს ანომალიური უჯრედები საკმარისი რაოდენობით დაგროვდება, შეიძლება დაიწყოს სიმსივნის ზრდა.



სურათი 74. დნმ-ის დაზიანება, რომელიც მუტაციას იწვევს

მიტოქონდრიული დაზიანების მიმართ განსაკუთრებით მგრძნობიარეა პოსტმიტოზური უჯრედები, როგორიცაა ნეირონები, კარდიომიოციტები და გარკვეული კუნთოვანი უჯრედები. რადგან ეს უჯრედები არ იყოფა, დროთა განმავლობაში დაგროვილი მუტაციები, განსაკუთრებით მიტოქონდრიულ დნმ-ში (სურ. 74), უჯრედში მთელი სიცოცხლის განმავლობაში რჩება.

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>

პოსტმიტოზური უჯრედები მეტაბოლურად უკიდურესად აქტიურია: ნეირონებს სიგნალების გადასაცემად მნიშვნელოვანი ენერგია სჭირდებათ, ხოლო გულის უჯრედები განუწყვეტლივ სისხლს ტუმბავენ. შესაბამისად, მათი მიტოქონდრიები მაქსიმალური სიმძლავრით ფუნქციონირებენ, დიდი რაოდენობით რეაქტიული ჟანგბადის სახეობებს (ROS) წარმოქმნიან. ეს რეაქტიული ჟანგბადის სახეობები მიტოქონდრიებს აზიანებს, რაც ROS-ის წარმოების გაზრდისა და შემდგომი დაზიანების ციკლს იწვევს.

დროთა განმავლობაში, ამ კუმულაციურმა დაზიანებამ შეიძლება გამოიწვიოს პათოლოგიური პროცესები, როგორიცაა ნეიროდეგენერაციული დარღვევები, გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები, კიბო და სიკვდილიც კი.

ეს მექანიზმი შეიძლება ხსნიდეს, თუ რატომ არის გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები, გულის შეტევები, ინსულტები და კიბო სიკვდილის წამყვანი მიზეზები მსოფლიოში. გარდა ამისა, ნანოპლასტიკების ტოქსიკური ზემოქმედება - რომელიც მკვეთრად გაძლიერდა ბოლო 10-20 წლის განმავლობაში - სავარაუდოდ ხსნის, თუ რატომ ხდება ეს დაავადებები ახალგაზრდა ასაკში და მიაღწია პანდემიის პროპორციებს, ყოველწლიურად ათობით მილიონი ადამიანის სიცოცხლეს იწირავს. ნანოპლასტიკები, პირველ რიგში, არღვევენ მიტოქონდრიის ფუნქციას, ხელს უწყობენ ჟანგით სტრესს და იწვევენ მუტაციებს მიტოქონდრიულ და ბირთვულ დნმ-ში.

ჰორმონალური სისტემის დარღვევა, რომელიც გამოწვეულია მრავალფუნქციური ნაერთებით

პლასტიკის წარმოებაში გამოიყენება ქიმიკატები, რომლებიც ხელს უშლიან ენდოკრინული სისტემის ფუნქციონირებას და არღვევენ ჰორმონალურ ბალანსს. ამ ქიმიკატებს შეუძლიათ მიბადონ, დაბლოკონ ან შეცვალონ ბუნებრივი ჰორმონების მოქმედება, რამაც პოტენციურად გამოიწვიოს სხვადასხვა ჯანმრთელობის პრობლემა.

ადამიანის ორგანიზმში აღმოჩენილია შეფუთვაში გამოყენებული 3000-ზე მეტი ქიმიური ნივთიერება.¹⁹⁶ ამ ქიმიკატებიდან დაახლოებით 100 კლასიფიცირებულია, როგორც ადამიანის ჯანმრთელობისთვის მაღალი საფრთხის შემცველი.

ბისფენოლი A

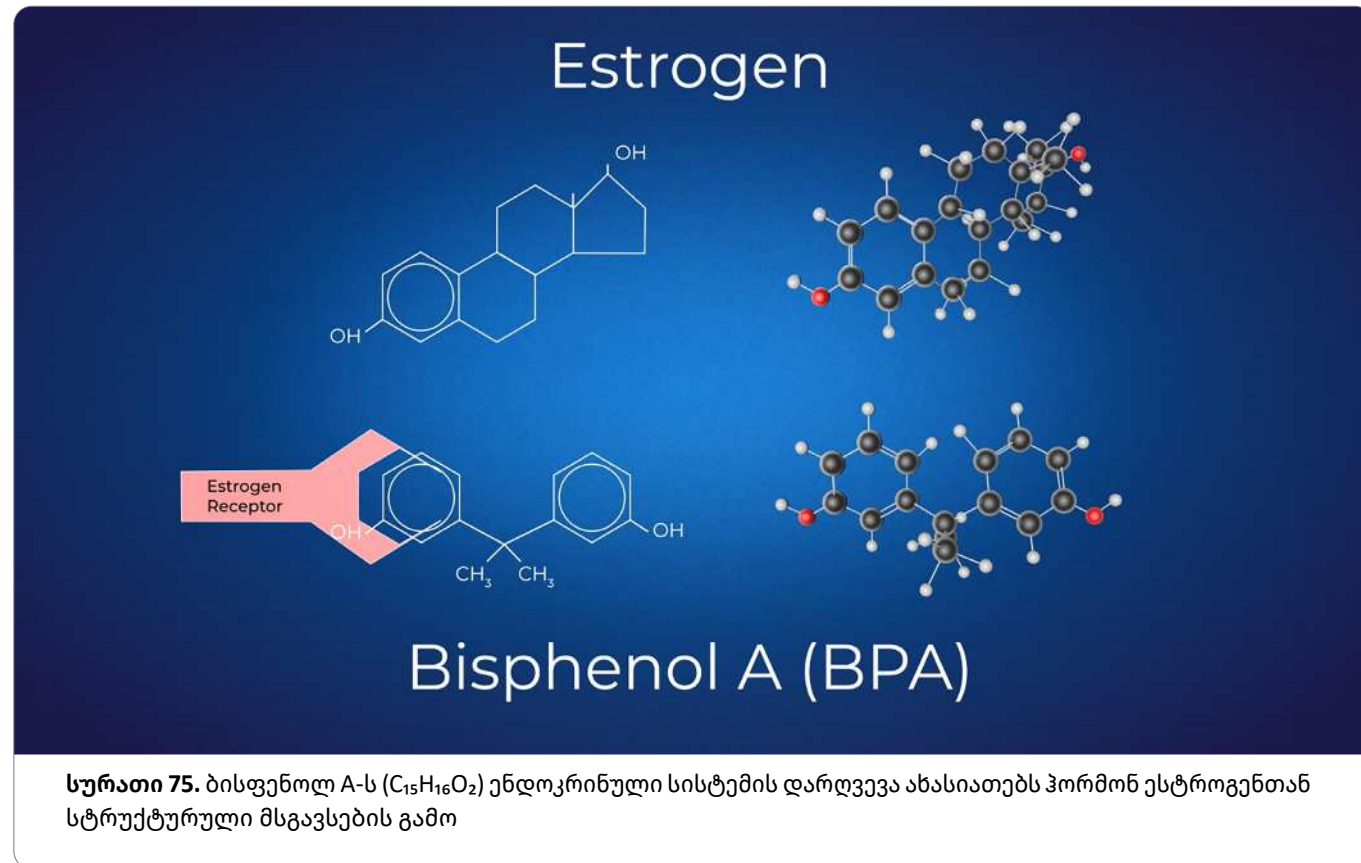
ბისფენოლი A (BPA) — ჩარის სინთეზური პლასტიზატორი, რომელიც ფართოდ გამოიყენება პოლიკარბონატის პლასტიკებში (მაგალითად, ბოთლებსა და კონტეინერებში), ეპოქსიდური ფისებში (გამოიყენება დაკონსერვებული საკვების დასაფარად) და სამედიცინო მოწყობილობებში.

გაცხელებისას, BPA გადადის საკვებსა და სასმელებში.

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

66

„BPA მოქმედებს როგორც „მომხმარებელი“ ჰორმონი, რომელიც კონკურენციას უწევს ბუნებრივ ჰორმონს, რომელიც ჩვეულებრივ მონაწილეობს ამ პროცესში“, — თქვა პროფესორმა იან რეიმ, მელბურნის უნივერსიტეტის ქიმიის სკოლის გარემოსდაცვითი ქიმიკატების ექსპერტმა (სურ. 75).¹⁹⁷



მსოფლიოში 8 მილიონ ტონაზე მეტი ბისფენოლი A იწარმოება და ყოველწლიურად დაახლოებით 100 ტონა გამოიყოფა ატმოსფეროში.¹⁹⁸

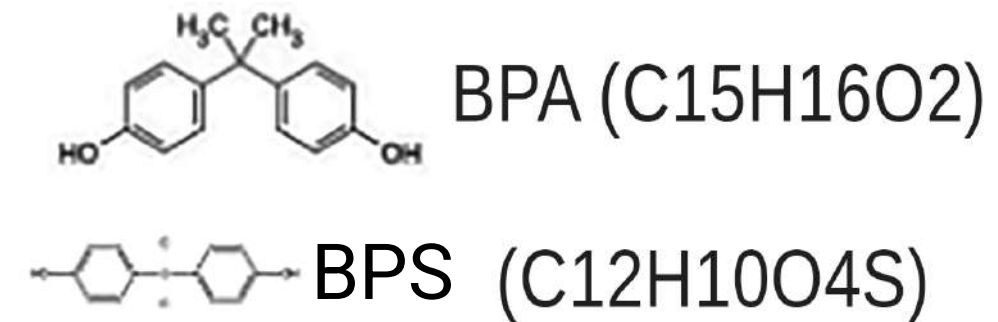
ვლევები აჩვენებს, რომ BPA და მისი შემცველი - ბისფენოლი S (BPS) - არღვევს აღმგზნები და დამთრგუნველი სიგნალების კოორდინაციას ნერვულ სისტემაში.¹⁹⁹ ორივე ნაერთი მაღალი კონცენტრაციით იწვევს მსგავს პათოლოგიურ ეფექტებს (სურ. 76). ტვინის უჯრედებზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ BPA-ს ან BPS-ის მცირე რაოდენობაც კი, ერთი თვის განმავლობაში ზემოქმედების შემთხვევაში, ცვლის სიგნალების ქიმიურ და ელექტრულ გადაცემას სინაფსების მეშვეობით.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).



სურათი 76. ბისფენოლ A-ს (BPA) და ბისფენოლ S-ის (BPS) მოლეკულური სტრუქტურები და ქიმიური ფორმულები

2023 წელს ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ყურადღების დეფიციტისა და ჰიპერაქტიურობის სინდრომის (ADHD) მქონე ბავშვებში ბისფენოლ A-ს (BPA) და ფტალატების უფრო დიდი რაოდენობა იყო, ვიდრე ამ მდგომარეობის არმქონე ბავშვებთან შედარებით.²⁰¹

მელბურნში, ნეირომეცნიერებისა და ფსიქიკური ჯანმრთელობის ფლორი ინსტიტუტის მკვლევარებმა აღმოაჩინეს, რომ ბიჭებს 11 წლის ასაკში აუტიზმის დადასტურებული დიაგნოზის დასმის 6-ჯერ მეტი ალბათობა ჰქონდათ, ვიდრე მათ, ვისი დედების დედებსაც ორსულობის დროს BPA-ს დაბალი დონე ჰქონდათ.²⁰²

66

„BPA-ს შეუძლია ხელი შეუშალოს ჰორმონებით კონტროლირებადი მამაკაცის ნაყოფის ტვინის განვითარებას რამდენიმე გზით, მათ შორის ნეიროჰორმონების კონტროლის მატარებელი ძირითადი ფერმენტის, არომატაზას, ჩახშობით, რომელიც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მამაკაცის ნაყოფის ტვინის განვითარებაში“, — თქვა პროფესორმა პონსონბიმ.

„როგორც ჩანს, ეს აუტიზმის თავსატეხის ნაწილია“.¹⁹⁷

ფერმენტ არომატაზას დათრგუნვამ შესაძლოა ახსნას აუტიზმის დიაგნოზებში სქესთა შორის არსებული უთანასწორობა: ყოველ ერთ გოგონაზე 4-დან 5-მდე ბიჭი.²⁰³ მიუხედავად იმისა, რომ აუტიზმი გოგონებში ნაკლებად არის გავრცელებული, ისინი, როგორც წესი, ამ მდგომარეობის უფრო მძიმე ფორმებს განიცდიან.²⁰⁴

ბისფენოლ A (BPA) ასევე ხელს უწყობს მე-2 ტიპის დიაბეტის განვითარებას ჰიპერგლიკემიისა და ინსულინრეზისტენტობის გამოწვევით.²⁰⁵ დიაბეტით გამოწვეული გლობალური სიკვდილიანობა სტაბილურად იზრდება (სურ. 77).

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

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

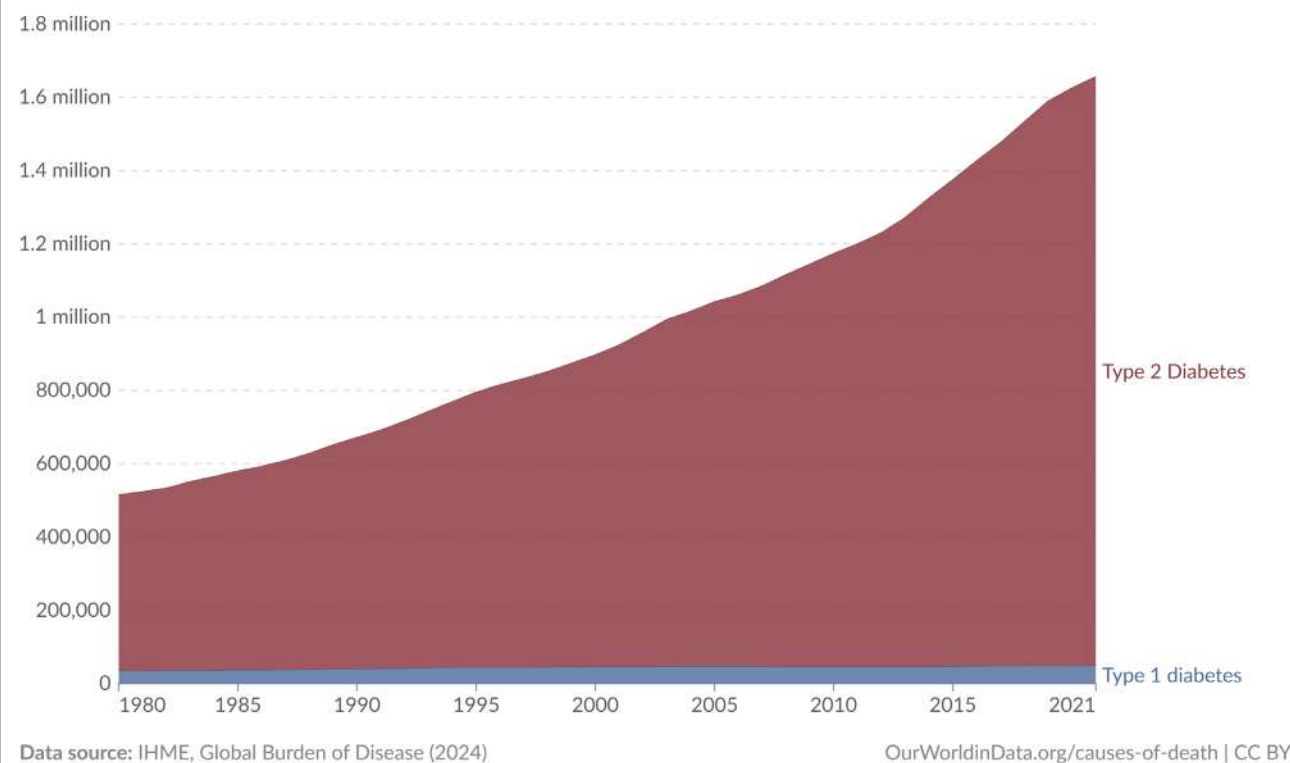
²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

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

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

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

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



დიაგრამა 77. დიაბეტით გამოწვეული სიკვდილიანობა, ტიპის მიხედვით, მსოფლიოში, 1980 წლიდან 2021 წლამდე.

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

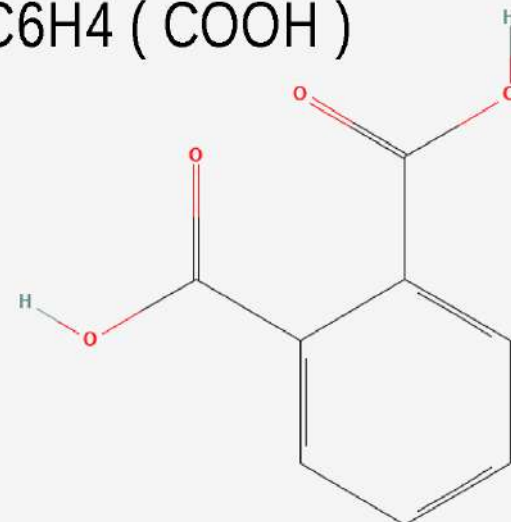
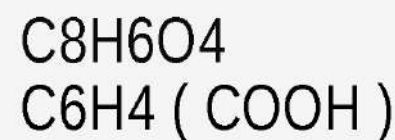
ფტალატები

ფტალატები ქიმიური ნაერთების ჯგუფია, რომლებიც ძირითადად პლასტიფიკატორებად გამოიყენება და წარმოადგენს ნივთიერებებს, რომლებიც პლასტმასებს, როგორიცაა პოლივინილქლორიდი (PVC), უფრო მოქნილს, რბილს და გამძლეს ხდის.

ფტალატები ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა ინდუსტრიასა და ყოველდღიურ ცხოვრებაში, მაგრამ მათი უნარი, ხელი შეუშალონ ენდოკრინულ სისტემას, შემოთხუთებას იწვევს.²⁰⁶

მოლეკულური ფორმულა (სურ. 78). ფტალატები თავისთავად ჰორმონები არ არის, მაგრამ მათ შეუძლიათ ანდროგენების (მაგალითად, ტესტოსტერონის) მოქმედების დათრგუნვა, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მამაკაცის განვითარებისთვის. ფტალატების ზემოქმედება დაკავშირებულია სპერმის მოძრაობის შემცირებასთან და რეპროდუქციული ორგანოების განვითარების ანომალიებთან (მაგ., ახალშობილებში კრიპტორქიზმი). ფტალატების მაღალი კონცენტრაცია აღმოჩენილია მამაკაცებში, რომლებსაც უშვილობის დიაგნოზი აქვთ.

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>



სურათი 78. ქიმიური სტრუქტურის აღწერა.

წყარო: PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (ნანახია 2025 წლის 1 მაისს).

ქალებში ფტალატებს შეუძლიათ მენსტრუალური ციკლის დარღვევა და მუცლის მოშლისა და ნაადრევი მშობიარობის რისკის გაზრდა. ორსულობის დროს ნაყოფის ფტალატებთან ზემოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს ტვინის განვითარების შეფერხება, IQ-ს დაქვეითება და შთამომავლობის ქცევითი პრობლემები.²⁰⁷

მეცნიერებმა დაამტკიცეს მიზეზობრივი კავშირი გარემოს ფტალატებსა (ტოქსიკური ქიმიკატები, რომლებიც გვხვდება ყოველდღიურ სამომხმარებლო პროდუქტებში) და საშვილოსნოს ფიბროიდების, ქალებში ყველაზე გავრცელებული სიმსივნეების, გაზრდილ ზრდას შორის.²⁰⁸

პლასტმასში არსებული ფტალატების ზემოქმედება ბავშვებში კიბოს განვითარების რისკს 20%-ით ზრდის, სამჯერ იზრდება ძვლის ავთვისებიანი სიმსივნეების შემთხვევები და ორჯერ იზრდება ლიმფომისა და ლეიკემიის შემთხვევები.²⁰⁹

5000-ზე მეტ ამერიკელ დედაზე ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ფტალატები დაკავშირებულია დაბალი წონის მქონე ბავშვების და ნაადრევი ჩვილების დაბადების რისკთან.²¹⁰ ავტორები აღნიშნავენ, რომ ეს ფაქტორები ზომიერად ზრდის ჩვილ ბავშვთა სიკვდილიანობის ალბათობას და ასევე შეიძლება გავლენა მოახდინოს ბავშვების აკადემიურ მოსწრებაზე, ასევე გაზარდოს გულის დაავადებების, დიაბეტის და ფსიქიკური აშლილობების, როგორიცაა აუტიზმი და ყურადღების დეფიციტისა და ჰიპერაქტიურობის სინდრომი, რისკი ბავშვებში.²¹¹

²⁰⁷Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. JAMA Pediatrics 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. Proceedings of the National Academy of Sciences 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

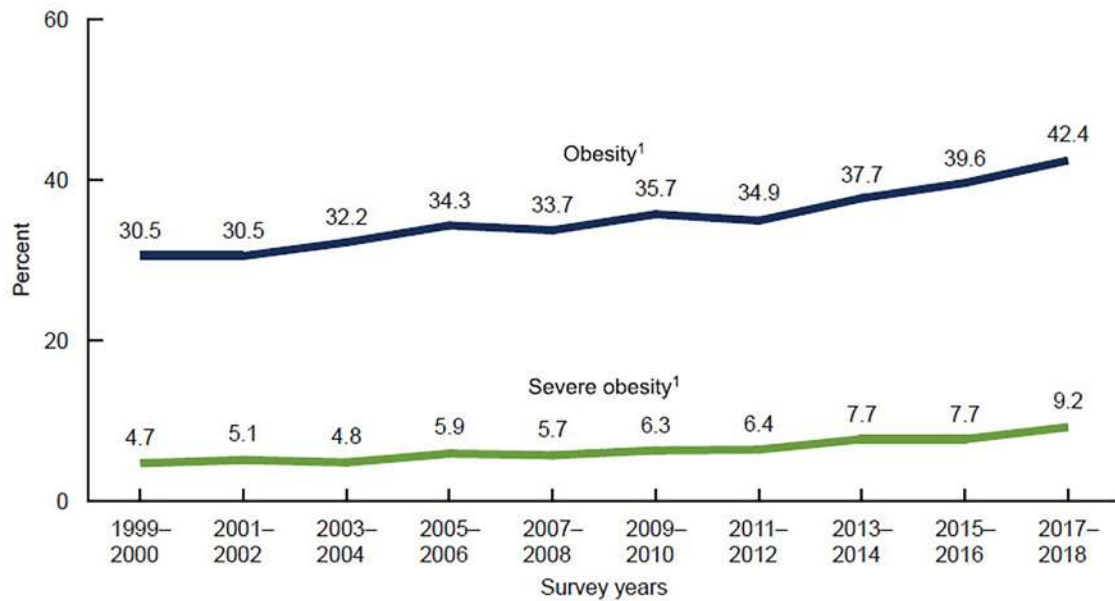
²⁰⁹Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. Environment International 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

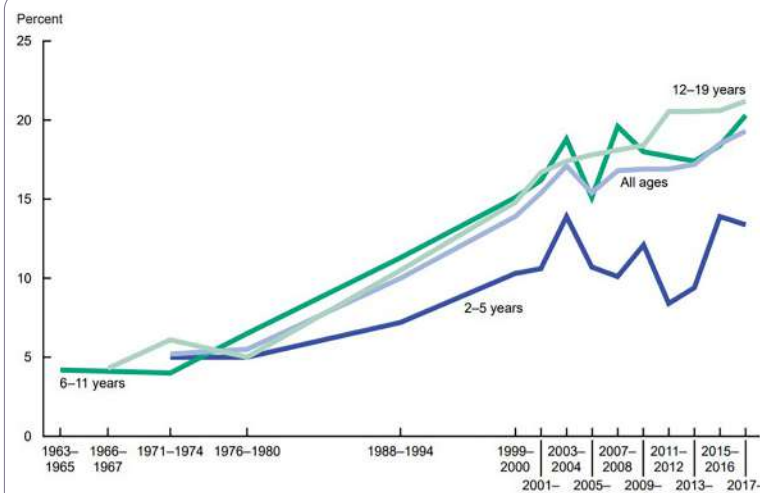
პლასტმასში არსებული ქიმიური დანამატები ხელს უწყობს სიმსუქნის განვითარებას²¹² ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის (WHO) მონაცემებით, 1990 წლიდან 2020 წლამდე, ზრდასრულთა შორის გლობალური სიმსუქნის მაჩვენებელი გაორმაგდა, ხოლო მოზარდებში ოთხჯერ გაიზარდა.²¹³

სიმსუქნის ტენდენციები ზრდასრულებსა და ახალგაზრდებში შეერთებულ შტატებში (სურ. 79–80)



დიაგრამა 79. 20 წლის და უფროსი ასაკის მოზარდებში ასაკობრივი შეზღუდვებისა და მძიმე სიმსუქნის გავრცელების ტენდენციები: ამერიკის შეერთებული შტატები, 1999–2000 წლიდან 2017–2018 წლამდე.

წყარო: 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> (ნანახია 2025 წლის 1 მაისს).



დიაგრამა 80. 2–19 წლის ბავშვებსა და მოზარდებში სიმსუქნის ტენდენციები ასაკის მიხედვით: ამერიკის შეერთებული შტატები, 1963–1965 წლებიდან 2017–2018 წლამდე.

წყარო: 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> (ნანახია 2025 წლის 1 მაისს).

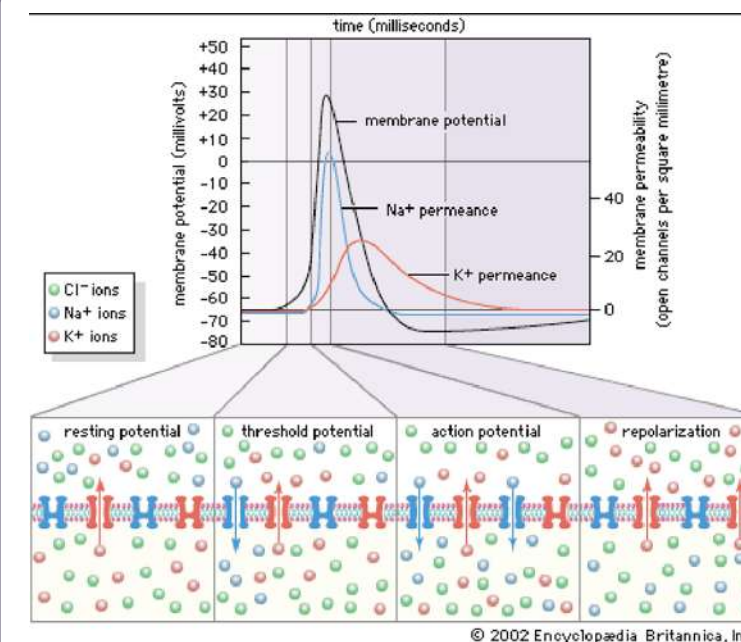
²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedø, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

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).

ნანოპლასტმასების ელექტროსტატიკური მუხტი, როგორც მათი მაღალი ტოქსიკურობის მთავარი მამოძრავებელი ფაქტორი ადამიანის ორგანიზმისთვის

ადამიანის სხეული განუწყვეტლივ გამოიმუშავებს ბიოელექტრულ ენერგიას. ყველა ფიზიოლოგიური პროცესი, გულის აქტივობიდან და სენსორული აღქმიდან დაწყებული უმაღლესი კოგნიტური ფუნქციებით დამთავრებული, განპირობებულია ქიმიური რეაქციებით, რომლებიც ინიცირებულია ელექტრული მუხტების მოძრაობით. უჯრედშიდა და უჯრედგარე სითხეები, რომლებიც შეიცავს ცილებს, ძირითადად შედგება წყლისგან, რომელსაც აქვს ელექტროპოლარული თვისებები. შესაბამისად, ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედებები, მათ შორის წყალბადის ბმები, იონური ბმები და ჰიდროფობიური შეფუთვა, გადამწყვეტ როლს თამაშობს მათი ფუნქციონირებისთვის აუცილებელი ცილოვანი სტრუქტურების ფორმირებაში და, შედეგად, ორგანიზმის სიცოცხლისუნარიანობის შესანარჩუნებლად.²¹⁴

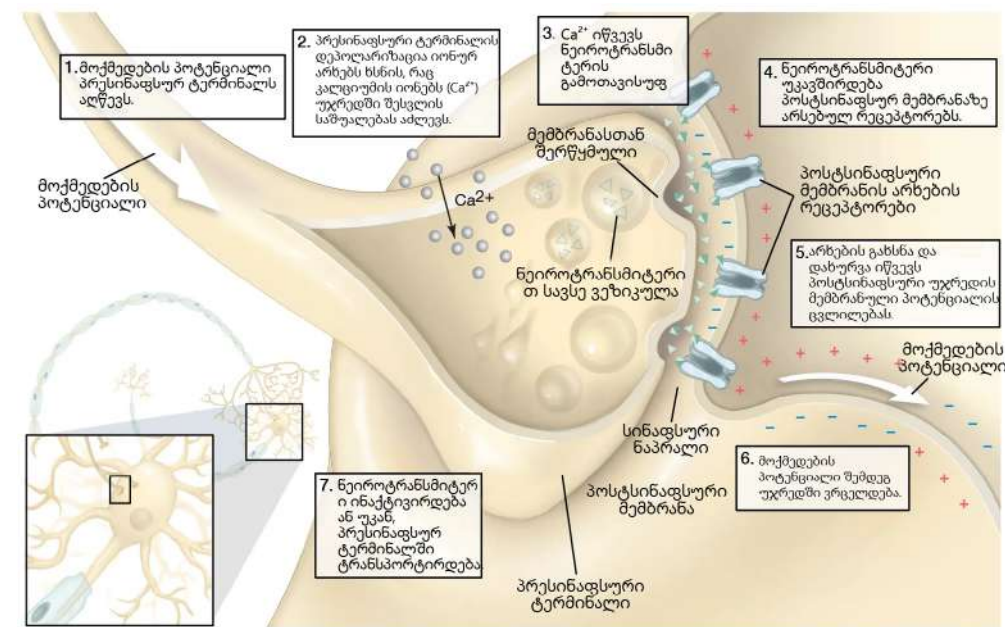
ბიოელექტროენერგია პირდაპირ გავლენას ახდენს უჯრედის ფუნქციონირებაზე იონური არხებისა და მემბრანული პოტენციალების ურთიერთქმედების გზით. თითოეული უჯრედი ინარჩუნებს ელექტრულ პოტენციალს შორის განსხვავებას მის შიდა და გარე გარემოს შორის - რომელიც ცნობილია როგორც მოსვენების მემბრანული პოტენციალი - რაც მიიღწევა იონების კონცენტრაციის სხვაობით უჯრედის შიგნით და გარეთ (სურ. 81). ადამიანის ორგანიზმში არსებული იონური არხების ძირითადი ტიპებია ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმის და ქლორიდის არხები. ეს არხები, მემბრანულ პოტენციალთან ერთად, ხელს უწყობენ სხვადასხვა ტიპის უჯრედის ძირითად ფუნქციებს (სურ. 82–83).



სურათი 81. იონური გამტარობა და მოქმედების პოტენციალი. მოქმედების პოტენციალის საფუძვლად მყოფი იონური გამტარობის ცვლილებები. ელექტრული პოტენციალი მარცხნივ მილივოლტებშია დალაგებული, მარჯვნივ კი - ღია არხების კვადრატულ მილიმეტრზე. მოსვენების პოტენციალში, მემბრანული პოტენციალი ახლოსაა E_K -სთან, K^+ -ის წონასწორობის პოტენციალთან. როდესაც ნატრიუმის არხები იხსნება, მემბრანა დეპოლარიზდება. როდესაც დეპოლარიზაცია ზღურბლის პოტენციალს აღწევს, ის მოქმედების პოტენციალს იწვევს. მოქმედების პოტენციალის გენერაცია მემბრანულ პოტენციალს E_{Na} -სთან, Na^+ -ის წონასწორობის პოტენციალთან, აახლოებს. როდესაც ნატრიუმის არხები იხურება (Na^+ გამტარობის შემცირება) და კალიუმის არხები იხსნება (K^+ გამტარობის გაზრდა), მემბრანა რეპოლარიზდება.

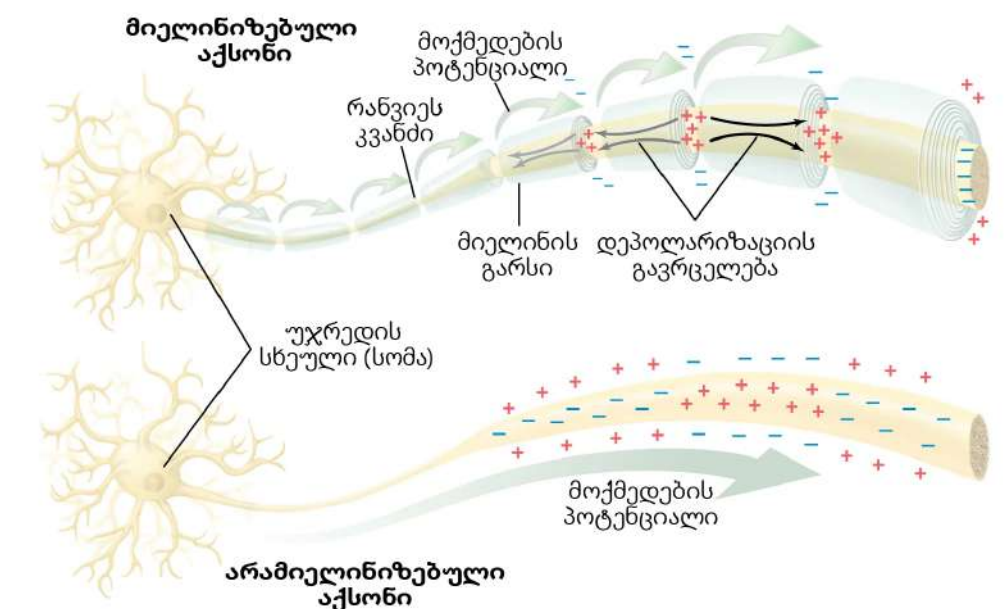
წყარო: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

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).



სურათი 82. სინაფსი: ნერვული იმპულსის ქიმიური გადაცემა სინაფსში. ნერვული იმპულსის პრესინაფსურ ტერმინალში მოხვედრა ასტიმულირებს ნეიროტრანსმიტერების გამოთავისუფლებას სინაფსურ ნაპრალში. ნეიროტრანსმიტერების შეკავშირება პოსტინაფსურ მემბრანაზე არსებულ რეცეპტორებთან ასტიმულირებს მოქმედების პოტენციალის რეგენერაციას პოსტინაფსურ ნეირონში.

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



სურათი 83. ნეირონი: მოქმედების პოტენციალის გამტარობა.

მიელინის მქონე აქსონში მიელინის გარსი ხელს უშლის ლოკალური დენის (პატარა შავი ისრები) მემბრანაზე გავლას. ეს აიძულებს დენს ნერვული ბოჭკოს გავლით იმოძრაოს რანვიეს არამიელინირებულ კვანძებამდე, რომელსაც იონური არხების მაღალი კონცენტრაცია აქვთ. სტიმულაციისას, ეს იონური არხები მოქმედების პოტენციალს (დიდი მწვანე ისრები) შემდეგ კვანძზე ავრცელებენ. ამრიგად, მოქმედების პოტენციალი ბოჭკოს გასწვრივ ხტება, რადგან ის თითოეულ კვანძში აღდგება, პროცესი, რომელსაც ნელა გამტარობა ეწოდება. არამიელინის მქონე აქსონში მოქმედების პოტენციალი მთელ მემბრანაზე ვრცელდება და ქრება, როდესაც ის მემბრანაში უკან, საწყის დეპოლარიზებულ რეგიონში დიფუზირდება.

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

ადამიანის ორგანიზმში წარმოქმნილი ბიოელექტროენერგია, მაგალითად, კუნთების შეკუმშვის ან ნერვული სიგნალის გადაცემის დროს, სრულიად ბუნებრივი და უვნებელია, რადგან ის ფიზიოლოგიური პროცესების ფუნდამენტური ნაწილია. თუმცა, როდესაც მიკრო და ნანოპლასტიკები ორგანიზმში შედიან, ისინი თან ახლავს ელექტროსტატიკურ მუხტს, რომლის შენარჩუნებაც მათ დიდი ხნის განმავლობაში შეუძლიათ. სწორედ ეს მუხტი წარმოადგენს ჯანმრთელობისთვის პოტენციურ რისკს, რადგან ხელს უშლის სასიცოცხლო ბიოლოგიურ ფუნქციებს.

ნანოპლასტიკები არის 1 მიკრომეტრზე პატარა პლასტმასის ნაწილაკები. მათი უნიკალური სტრუქტურის გამო, მათ შეუძლიათ ელექტროსტატიკური მუხტების დაგროვება, რაც მათ მეცნიერებისთვის მზარდ შემოთხუთებას იწვევს.

როდესაც მიკრო ან ნანოპლასტიკური ნაწილაკები ელექტრიფიცირდება ტრიბოელექტრული ეფექტის მეშვეობით (სხვა ზედაპირებთან კონტაქტისა და ხახუნის შედეგად), ისინი იძენენ დადებით ან უარყოფით მუხტს. ეს მუხტი მნიშვნელოვნად მოქმედებს იმაზე, თუ როგორ იქცევიან ეს ნაწილაკები როგორც ადამიანის სხეულში, ასევე გარემოში.

ნანოპლასტიკური ნაწილაკების უნიკალური სტრუქტურა საშუალებას აძლევს მათ შეიწოვონ დამაბინძურებლები, იონები და ორგანული მოლეკულები, რაც აძლიერებს მათ როლს, როგორც ტოქსინების მატარებლები ეკოსისტემებში.^{215, 216}

ნანოპლასტმასების ქიმიური შემადგენლობა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მათი ელექტროსტატიკური თვისებების განსაზღვრაში: პოლიმერები, როგორიცაა პოლისტიროლი (PS), პოლიეთილენი (PE) ან პოლიპროპილენი (PP), ხშირად შეიცავს ფუნქციურ ჯგუფებს - კარბოქსილის (-COOH), სულფატის (-SO₃H) ან ამინოს (-NH₂) - რომლებიც შეიძლება იონიზდეს გარემო პირობებიდან გამომდინარე. მაგალითად, ჟურნალ Langmuir-ში გამოქვეყნებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ კარბოქსილის ჯგუფების (PS-COOH) მქონე პოლისტიროლის ნანონაწილაკებს აქვთ უარყოფითი ზედა პოტენციალი, ხოლო ამინოჯგუფების (PS-NH₂) მქონე ნანონაწილაკებს აქვთ დადებითი - რაც ადასტურებს ფუნქციური ჯგუფების გავლენას ნანოპლასტიკური მუხტზე.²¹⁷

მუხტის დაგროვების პროცესი მხოლოდ ქიმიური თვისებებით არ შემოიფარგლება. წარმოების ან მექანიკური პროცესების დროს, როგორიცაა ხახუნი, ნანოპლასტმასები შეიძლება დაიტენოს კონტაქტური ელექტროფიკაციის გზით. პლასტმასის კონტეინერებზე ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ პოლისტიროლს შეუძლია -10 კვ-მდე მუხტის დაგროვება, რომელიც შეიძლება შენარჩუნდეს დიდი ხნის განმავლობაში და იზიდავს საპირისპიროდ დამუხტულ ნაწილაკებს, როგორიცაა მტვერი ან ბაქტერიული სპორები.²¹⁸ გარდა ამისა, პოლიმერული სტრუქტურის ვარიაციები - მაგალითად, პოლარული ჯგუფების არსებობა - საშუალებას აძლევს ნანოპლასტმასს გამოავლინოს დადებითი ან უარყოფითი მუხტი გარემოს pH-ის მიხედვით. მკვლელობაში ამინოჯგუფებმა შეიძლება მისცენ ნაწილაკებს დადებითი მუხტი, ხოლო ტუტე პირობებში კარბოქსილის ჯგუფები დომინირებენ და უარყოფით მუხტს ანიჭებენ - დასკვნები, რომლებიც დადასტურდა Arabidopsis thaliana მცენარეებთან დაკავშირებულ კვლევებში.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>

ამგვარად, ნანოპლასტიკების სტრუქტურისა და მათი ელექტროსტატიკური მახასიათებლების გაგება არა მხოლოდ მათ ფიზიკურ ბუნებას ავლენს, არამედ საფუძველს უყრის იმის ანალიზს, თუ როგორ შეუძლიათ ამ ნაწილაკებს გავლენა მოახდინონ ეკოსისტემებსა და ცოცხალ ორგანიზმებზე. ეს თემები უფრო დეტალურად იქნება შესწავლილი მათი პათოგენური მექანიზმების კონტექსტში.

მათი მაღალი დიელექტრიკული შეღწევადობის (ელექტრული მუხტის შენარჩუნების უნარის) წყალობით, ნანოპლასტიკები, ორგანიზმში მოხვედრის შემდეგ, აგრძელებენ მავნე მუხტების დაგროვებას, რომლებიც ნორმალურ პირობებში ნეიტრალიზდებოდა ან გაიფანტებოდა სხეულის ბუნებრივი გამტარი სისტემების მეშვეობით.

ეს არღვევს ორგანიზმის თვითრეგულირების პროცესებს, რაც რისკებს ქმნის უჯრედული სტრუქტურებისთვის ანომალური ელექტროსტატიკური ენერგიის ხანგრძლივი ზემოქმედების გამო.

იმისათვის, რომ გავიგოთ ნანოპლასტიკების ორგანიზმში შეღწევის საფრთხის მასშტაბები, შეგვიძლია კიდევ ერთხელ მივმართოთ ორგანიზმის ბიოელექტრულ სისტემებს - რთულ მექანიზმებს, სადაც ელექტრული იმპულსები უჯრედშორისი კომუნიკაციის ენას წარმოადგენს.

ყველა მოძრაობა და აზრი შესაძლებელი ხდება უხილავი სიგნალების მეშვეობით, რომლებიც უჯრედებს ბრძანებებს აწვდიან. ნეირონები ინფორმაციას ელექტრული იმპულსების საშუალებით ცვლიან, კუნთები ამ სიგნალების საპასუხოდ იკუმშება და ტვინი ინფორმაციას ბიოელექტრული და ქიმიური ურთიერთქმედებების კომბინაციით ამუშავებს. სუნთქვა, რეფლექსები, მხედველობა და სმენაც კი დამოკიდებულია პაწაწინა ელექტრულ განმუხტვებზე, რომლებიც არეგულირებენ ორგანოების ფუნქციონირებას.

ეს უხილავი დენები, რომლებიც მილიონობით წლის ევოლუციის განმავლობაში დაიხვეწა, ბიოელექტრულ იმპულსებს სიცოცხლის ენაზე თარგმნის. თუმცა, მათ ჰარმონიას უცხო ელემენტები არღვევენ: ნანოპლასტიკების მიკროსკოპული ნაწილაკები.

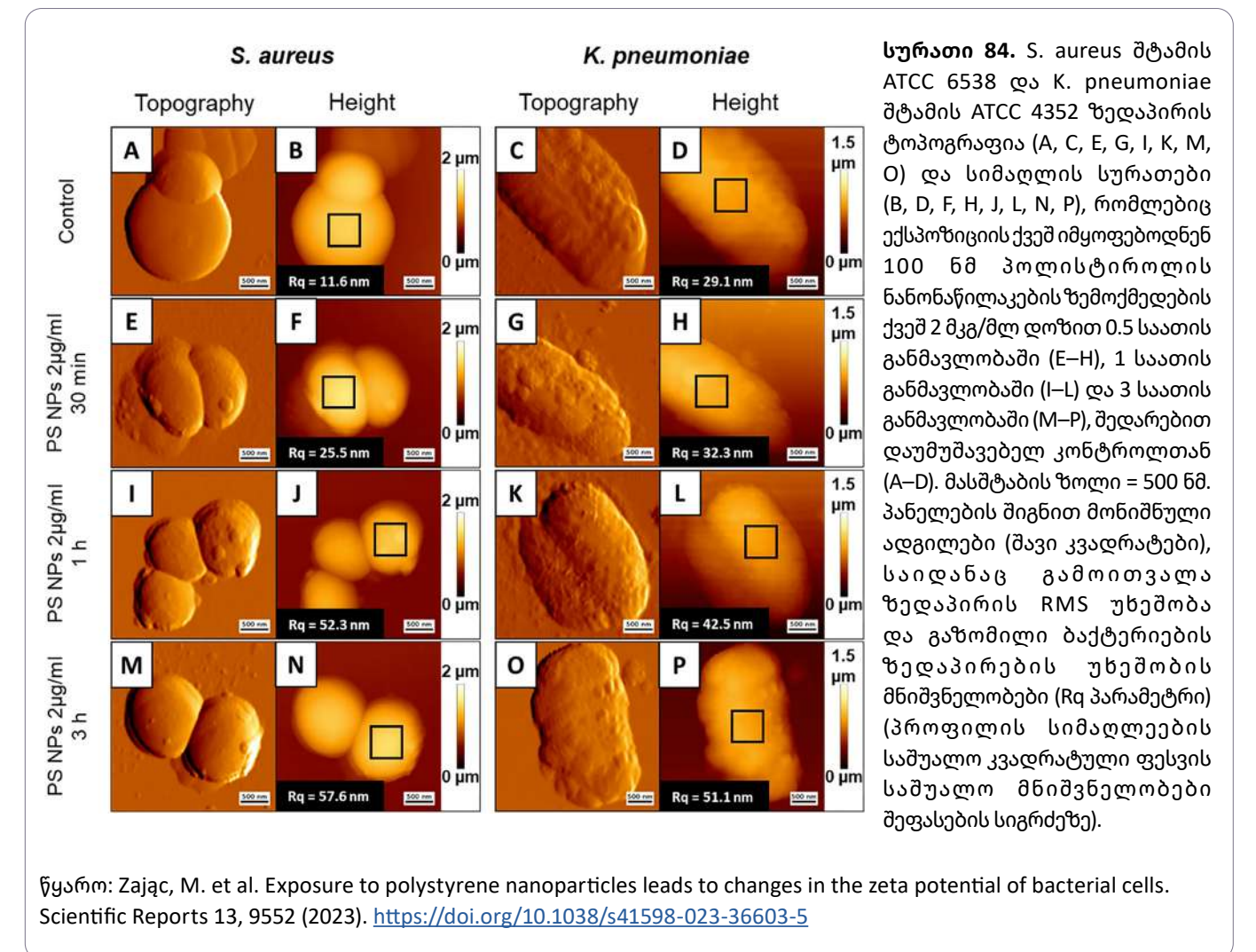
სხეულში მოხვედრის შემდეგ, ნანოპლასტიკას შეუძლია იონების ადსორბცია და პათოლოგიური ელექტროგამტარობის ზონების შექმნა, რაც არღვევს ბუნებრივ იონურ ბალანსს და უჯრედშორისი სითხეებით რეგულირებული ადგილობრივი მუხტის ნეიტრალიზაციის პროცესებს. ნანოპლასტიკების ზედაპირზე იონების ადსორბცია იწვევს ამ ნაწილაკებზე ელექტროსტატიკური მუხტის დაგროვებას. ამ ფენომენს შეუძლია გამოიწვიოს ჟანგვითი სტრესი რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების (ROS) გენერაციის გზით და ხელი შეუშალოს უჯრედებს შორის ელექტროქიმიურ კომუნიკაციას, რაც აზიანებს მათ ფუნქციას.

ეს დასტურდება კვლევით²²⁰, რომელიც აჩვენებს, რომ 100 ნმ პოლისტიროლის ნაწილაკები, ნატრიუმის იონების (Na⁺) თანაარსებობის შემთხვევაშიც კი, სტაბილური რჩებიან და ადსორბირდებიან ბაქტერიულ ზედაპირებზე მათი უარყოფითი მუხტის მიუხედავად. მაგალითად, *Staphylococcus aureus*-სა და *Klebsiella pneumoniae*-სთან ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ ნანოპლასტიკები მნიშვნელოვნად ცვლის უჯრედების ზედა პოტენციალს, რაც მათ ზედაპირებს უფრო უარყოფითად დამუხტულს ხდის და ამით არღვევს ბუნებრივ ელექტროსტატიკურ ბალანსს.

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>

დამუხტული ნანოპლასტიკური ნაწილაკები გავლენას ახდენენ უჯრედების გარშემო არსებულ ელექტრულ ველებზე, რაც ამახინჯებს სიგნალის გადაცემას. ეს რადიოკომუნიკაციაში ჩარევის მსგავსია: მკაფიო ბრძანებების ნაცვლად, არსებობს ქაოტური ხმაური, რომელიც არღვევს უჯრედების მიერ ინფორმაციის გაცვლის წესს. მიუხედავად იმისა, რომ ნერვულ უჯრედებზე პირდაპირი ზემოქმედება არ არის შესწავლილი და ადამიანის ზემოქმედების შესახებ დასკვნები წინასწარი რჩება და საჭიროებს შემდგომ კვლევას, ბაქტერიული ზედაპირის მუხტის დაკვირვებული ცვლილებები მიუთითებს, რომ ნანოპლასტიკას შეუძლია უჯრედული მემბრანების ელექტროქიმიური თვისებების შეცვლა. მაგალითად, მილილიტრზე 64 მიკროგრამზე მეტი კონცენტრაციის დროს, პოლისტიროლის ნაწილაკები იწვევენ ზედა პოტენციალის მნიშვნელოვან ცვლილებებს, რამაც შესაძლოა დააზიანოს იონური არხების ან რეცეპტორების ფუნქცია, რომლებიც კრიტიკულია უჯრედშორისი კომუნიკაციისთვის.

ნანონაწილაკების ზედაპირებზე „მიწებების“ უნარი, როგორც ეს ნაჩვენებია ზემოხსენებულ კვლევაში ატომური ძალის მიკროსკოპიის სურათებში(სურ.84),გრძელვადიანი ზემოქმედების რისკს წარმოადგენს. ქსოვილებში ჩანერგვის შემდეგ, ნაწილაკებს შეუძლიათ შექმნან მუდმივი ელექტროსტატიკური ანომალიები, რომელთა სრულად განეიტრალება ნატრიუმის და კალიუმის იონებს არ შეუძლიათ, განსაკუთრებით თუ ნანოპლასტიკი შეაღწევს უჯრედებში, უჯრედშორისი სითხის დამცავი მექანიზმების გვერდის ავლით.



ნანოპლასტიკებზე დაგროვილი პათოგენური მუხტის საფრთხე ასევე მდგომარეობს მის უნარში, შექმნას ელექტრული ჩარევა იმუნური უჯრედების გარშემო. ამას ადასტურებს კვლევა²²¹, რომელიც აჩვენებს, რომ დადებითად დამუხტული ნანოპლასტიკები (PS-NH₂) მნიშვნელოვნად ამცირებენ იმუნური უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობას და ლიზოსომური მემბრანების სტაბილურობას უარყოფითად დამუხტულ მემბრანებთან (PS-COOH) შედარებით, რაც ხაზს უსვამს ზედაპირული მუხტის კრიტიკულ როლს უჯრედებთან მათ ურთიერთქმედებაში.

ელექტროსტატიკურად დამუხტული მნკ ნაწილაკები ავლენენ უჯრედულ მემბრანებზე, ქსოვილებსა და სხვა ბიოლოგიურ ზედაპირებზე ადსორბციის გაზრდილ უნარს, სიტყვასიტყვით მიეკრონ მათ. ეს აღჭურვილია ზრდის უჯრედების როგორც მექანიკური, ასევე ქიმიური დაზიანების რისკს, არღვევს მათ სტრუქტურასა და ფუნქციას.

ასეთი მუხტები ასევე შეიძლება ხელს უწყობდეს მნკ ნაწილაკების შეღწევას რთული ბიოლოგიური ბარიერების გავლით, როგორიცაა ჰემატოენცეფალური ბარიერი ან ჰემატოენცეფალური ბარიერი. შედეგად, ტოქსინებმა შეიძლება მიაღწიონ ტვინს ან განვითარებად ნაყოფს, რაც ზრდის ნეიროტოქსიკური ეფექტების და ნაყოფის განვითარების დარღვევების რისკებს.

ნანოპლასტიკების ელექტროსტატიკური ზემოქმედება შესაძლოა ხელს უშლიდეს ცილების, იონური არხების და უჯრედული რეცეპტორების სტრუქტურასა და ფუნქციას, რაც თავის მხრივ არღვევს უჯრედულ სიგნალიზაციას, იწვევს ქანგვით სტრესს და ასუსტებს იმუნურ დაცვას.

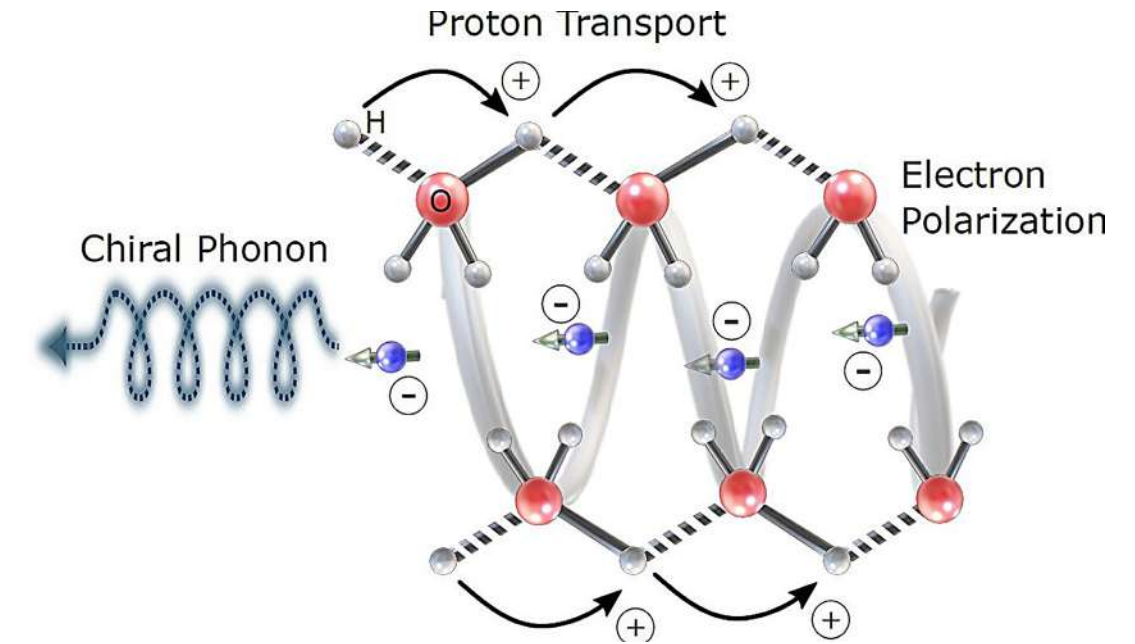
ამ დარღვევებმა შეიძლება გამოიწვიოს პათოლოგიური პროცესების კასკადი, მათ შორის ქრონიკული ანთება, ნეიროდეგენერაციული დარღვევები, ავთვისებიანი სიმსივნის წარმოქმნა და სისტემური დისფუნქცია, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის მძიმე დაავადებების რისკს.

ამრიგად, ნანოპლასტიკებზე ელექტროსტატიკური მუხტის დაგროვება არ არის მხოლოდ ფიზიკური ფენომენი - ეს არის მექანიზმი, რომელიც აძლიერებს მიკრო და ნანოპლასტიკების საფრთხეს. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმის გათვალისწინებით, რომ ელექტროსტატიკური მუხტი შეიძლება შენარჩუნდეს მნკ-ებზე დიდი ხნის განმავლობაში და რომ ეს ნაწილაკები უკიდურესად მდგრადია ადამიანის სხეულიდან გამოდევნის მიმართ.

ამ ფენომენის შესწავლა ახლა უაღრესად მნიშვნელოვანია, რადგან ის იწვევს იმის უფრო დრმა გაგებას, თუ როგორ შეიძლება ნანოპლასტიკებზე დაგროვილი პათოგენური ელექტრული მუხტები გადაიქცეს მაკროსკოპულ საფრთხედ თავად ადამიანის სახეობის გადარჩენისთვის.

ბოლო დრომდე ითვლებოდა, რომ უჯრედული ენერგიის საფუძველი - პროტონების ტრანსპორტირება - მხოლოდ ქიმიით იყო განპირობებული: ითვლებოდა, რომ პროტონები ერთი წყლის მოლეკულიდან მეორეზე „ხტებოდნენ“. თუმცა, მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის შრომებში გამოქვეყნებული ახალი კვლევა რადიკალურად ცვლის ამ შეხედულებას. ირკვევა, რომ ცოცხალ ორგანიზმებში პროტონების ტრანსპორტი დამოკიდებულია არა მხოლოდ ქიმიურ თვისებებზე, არამედ კვანტურ ფაქტორებზეც - კერძოდ, ელექტრონების სპინსა და ბიოლოგიური მოლეკულების ქირალურობაზე (სურ. 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>



სურათი 85. სქემატური სათამაშო მოდელი. პროტონების გადატანას თან ახლავს ელექტრონული პოლარიზაცია ქირალურ გარემოში. CISS ეფექტის გამო, ეს ელექტრული პოლარიზაცია იწვევს სპინის პოლარიზაციას. კუთხური იმპულსის შენარჩუნება წარმოქმნის ქირალურ ფონონებს, რომლებიც აძლიერებენ პროტონების გადატანას.

კრედიტი: 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>

ისრაელის მეცნიერების მიერ ებრაულ უნივერსიტეტში ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ისეთ ცილებში, როგორიცაა ლიზოციმი, პროტონების გადაცემა მნიშვნელოვნად აჩქარებს, როდესაც ელექტრონები „სწორი“ სპინით შემოდის და ანელებს, როდესაც სპინი საპირისპიროა. ეს განპირობებულია იმით, რომ ცოცხალ სისტემებში პროტონები და ელექტრონები მოქმედებენ როგორც კოორდინირებული კვანტური მექანიზმი. მათი სპინის ორიენტაციის მინიმალურმა ცვლილებებმაც კი შეიძლება გავლენა მოახდინოს ფუნდამენტურ ბიოლოგიურ პროცესებზე - ენერგიის წარმოებაზე, მეტაბოლიზმსა და უჯრედშიდა რეგულაციაზე.

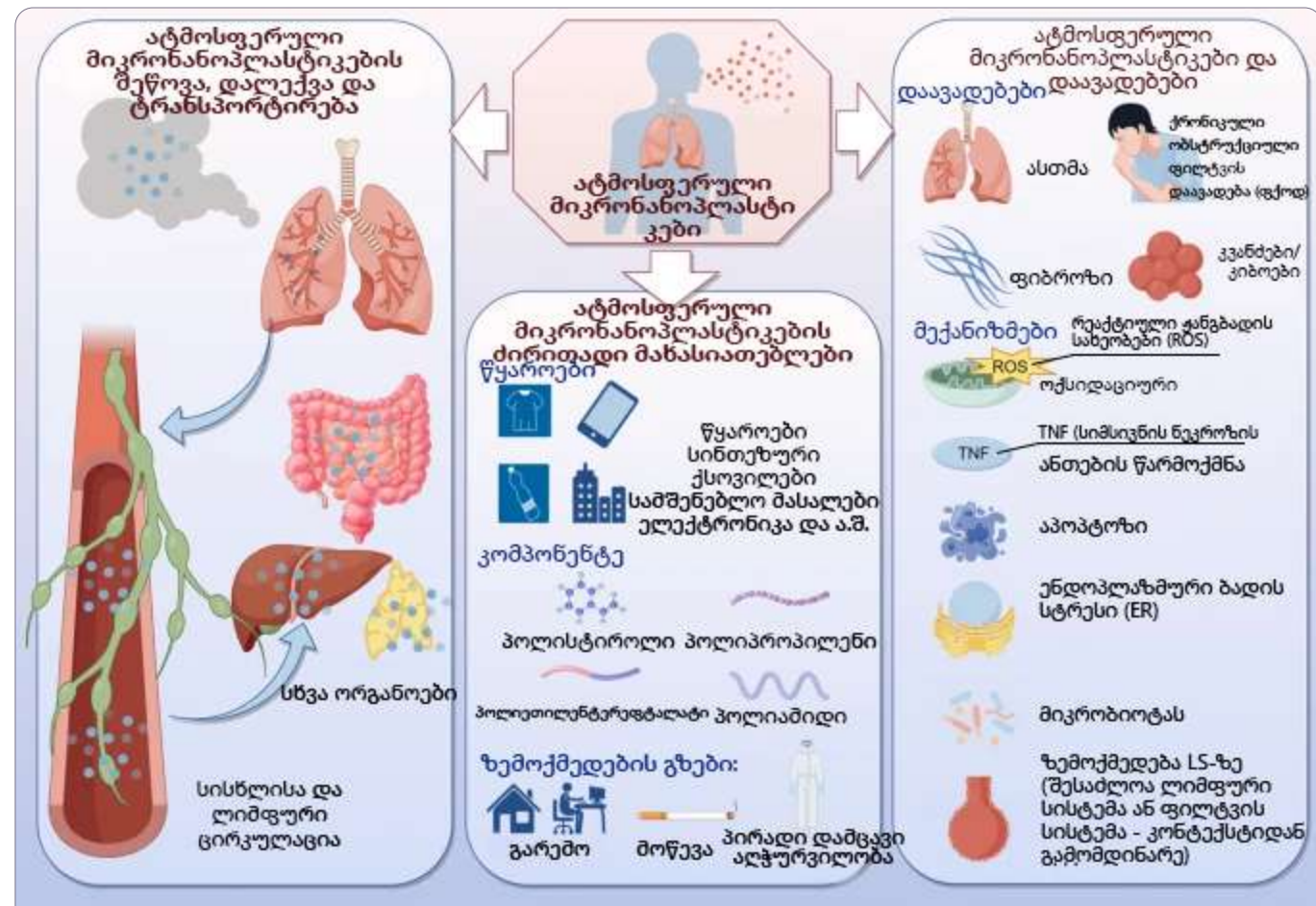
66

როგორც კვლევის წამყვანმა მკვლევარმა, ნაამა გორენმა აღნიშნა, „ჩვენი დასკვნები აჩვენებს, რომ პროტონების გადაადგილება ბიოლოგიურ სისტემებში მხოლოდ ქიმიას არ ეხება - ეს ასევე ეხება კვანტურ ფიზიკას“. ეს იმაზე მეტყველებს, რომ ელექტრული მუხტის ან მაგნიტური ორიენტაციის უმცირესმა დარღვევამაც კი შეიძლება გავლენა მოახდინოს უჯრედულ მეტაბოლიზმზე, ენერგიის წარმოებასა და ზოგად ჯანმრთელობაზე.²²²

²²²[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

მნპ-ების სისტემური ეფექტები ადამიანის ორგანოებსა და ფუნქციურ სისტემებზე

მას შემდეგ, რაც მიკრო- და ნანოპლასტიკები (მნპ) ადამიანის ორგანიზმში მოხვდება, ისინი სისხლის მიმოქცევით ცირკულირებენ და ყველა ორგანოსა და ქსოვილს აღწევენ (სურ. 86). პლასტმასის ნაწილაკები აღმოჩენილია ადამიანის სისხლში, გულსა და ძვლოვან ქსოვილში, ტვინში, პლაცენტაში, ფილტვებში, ღვიძლსა და სხვა ორგანოებში.²²³



სურათი 86. MNP-ების შესუნთქვა და მათი ტოქსიკური ეფექტები ადამიანის ორგანიზმზე.

წყარო: 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>

რესპირატორული სისტემის დაზიანება მნპ-ების შესუნთქვით

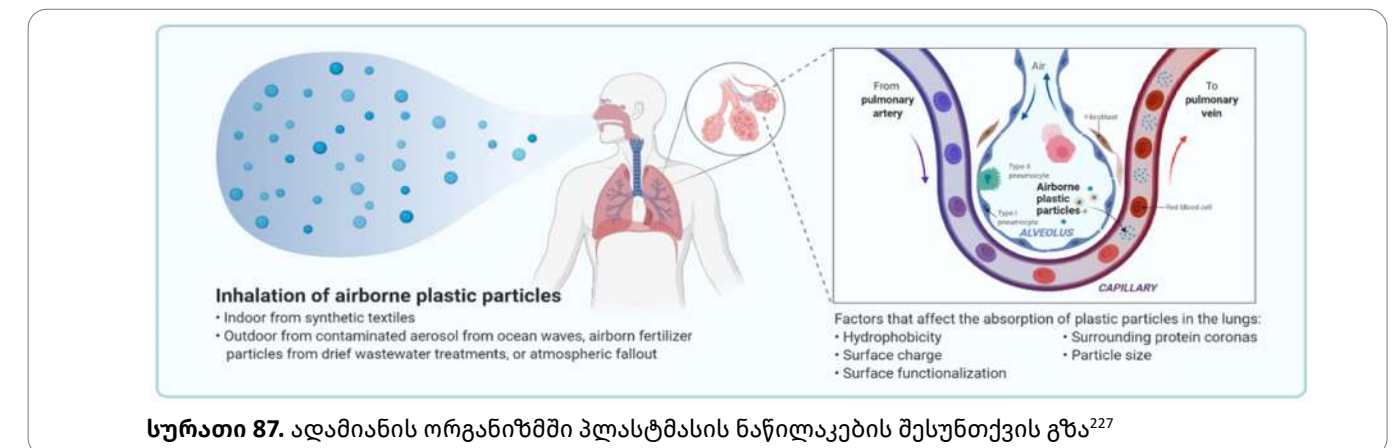
ადამიანის ორგანიზმში მიკროპლასტიკური ნაერთების მოხვედრის ერთ-ერთი ძირითადი გზა ინჰალაციაა.

ჩინელი მეცნიერების მიერ ჩატარებულმა კვლევამ²²⁴ აჩვენა, რომ ღია ცის ქვეშ აქტიური ორი საათის განმავლობაში მოზრდილები დაახლოებით 106,000 მიკროპლასტიკური ნაწილაკს შეისუნთქავენ, ხოლო ბავშვები - დაახლოებით 73,700-ს.

თერმოდინამიკური თვისებების გამო, 0.1 მიკრომეტრზე პატარა ნაწილაკებს შეუძლიათ ეფექტურად დაილექონ სასუნთქ გზებში, ზედა სასუნთქი გზებიდან ალვეოლებამდე.²²⁵

ფილტვებს აქვთ უზარმაზარი ალვეოლური ზედაპირი (დაახლოებით 150 მ²) და თხელი ქსოვილოვანი ბარიერი (1 მიკრომეტრზე ნაკლები), რაც ნანოპლასტმასს საშუალებას აძლევს ადვილად მოხვდეს სისხლში (სურ. 87).

მიკროპლასტიკა აღმოჩენილია ადამიანის ფილტვის ქსოვილის 20 ნიმუშიდან 13-ში.²²⁶



სურათი 87. ადამიანის ორგანიზმში პლასტმასის ნაწილაკების შესუნთქვის გზა²²⁷

კვლევის თანახმად, რომელშიც რესპირატორული დაავადებების მქონე 22 პაციენტი მონაწილეობდა, მიკროპლასტიკა ნახველის ყველა ნიმუშში აღმოჩნდა,²²⁸ 10 მლ-ზე 18.75-დან 91.75 ნაწილაკამდე მერყეობდა.²²⁹ ასევე დადგინდა კავშირი ალერგიულ რინიტსა და მიკროპლასტმასს შორის.²³⁰

მონაცემთა ნაერთები მჭიდრო კავშირშია სხვადასხვა რესპირატორული დაავადებების დაწყებასა და პროგრესირებასთან, მათ შორის ასთმასთან, ფილტვის ფიბროზთან, ფილტვების ქრონიკულ ობსტრუქციულ დაავადებასთან და სიმსივნეებთან.²²⁹ კვლევამ აჩვენა, რომ ავთვისებიანი ფილტვის ნიმუშების 97% შეიცავდა მიკროპლასტიკური ბოჭკოებს.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-Lorenço, 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>

²³¹Driscoll, 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>

შესაძლო მექანიზმებია ჟანგვითი სტრესი, ანთება და ფილტვის მიკრობიომის დარღვევა. მიკრო-და ნანოკლასტმასმა შეიძლება გამოიწვიოს ფილტვის ანთება.²³²

ჯანმო-ს ანგარიშის თანახმად, ქვედა სასუნთქი გზების ინფექციები მსოფლიოში ყველაზე სასიკვდილო ინფექციურ დაავადებად რჩება და სიკვდილიანობის მეხუთე წამყვან მიზეზად ითვლება. გარდა ამისა, გაიზარდა ტრაქეის, ბრონქების და ფილტვის კიბოთი გამოწვეული სიკვდილიანობა და ამჟამად სიკვდილიანობის მეექვსე წამყვან მიზეზად ითვლება.²³³

მნკ-ებით ნეიროტოქსიური ეფექტები:

ცენტრალური და პერიფერიული ნერვული სისტემების დაზიანება

კვლევები ადასტურებს, რომ ნევროლოგიური დარღვევები მსოფლიოში ფიზიკური და კოგნიტური შეზღუდული შესაძლებლობების წამყვანი მიზეზია, რომელიც ამჟამად დაახლოებით 3.4 მილიარდ ადამიანს აწუხებს. პაციენტების აბსოლუტური რაოდენობა მნიშვნელოვნად გაიზარდა ბოლო 30 წლის განმავლობაში.²³⁴ გარდა ამისა, მოსალოდნელია, რომ ქრონიკული ნეიროდეგენერაციული დაავადებების ტვირთი მომდევნო ორი ათწლეულის განმავლობაში მინიმუმ გაორმაგდება. ჯანმო-ს მონაცემებით, მსოფლიოში ყოველი რვა ადამიანიდან ერთი ფსიქიკური ჯანმრთელობის დარღვევით იტანჯება.²³⁵

ბიპოლარული აშლილობის გავრცელება მოზარდებსა და ახალგაზრდებში გლობალურად გაიზარდა 1990 წელს 100 000 ადამიანზე 79.21-დან 2019 წელს 100 000 ადამიანზე 84.97-მდე.²³⁶ ბოლო სამი ათწლეულის განმავლობაში, შემთხვევების მაჩვენებელი გაიზარდა როგორც მამაკაცებში, ასევე ქალებში (სურ. 88). ბოლოდროინდელი კვლევები ბავშვებსა და მოზარდებში ფსიქიკური ჯანმრთელობის დარღვევების ზრდაზე მიუთითებს. 2022 წლის ჯანდაცვის ხარისხისა და უთანასწორობის ეროვნული ანგარიშის თანახმად, 2016 წლიდან 2019 წლამდე, ფსიქიკურ ჯანმრთელობასთან დაკავშირებული ძირითადი დიაგნოზით გადაუდებელი დახმარების განყოფილებაში (ED) ვიზიტების მაჩვენებელი მხოლოდ 0-17 წლის ასაკობრივ ჯგუფში გაიზარდა, 100 000 მოსახლეზე 784.1-დან 869.3-მდე. გარდა ამისა, 2008 წლიდან 2020 წლამდე, 12 წლის და უფროსი ასაკის ადამიანებში თვითმკვლელობით გამოწვეული სიკვდილიანობის მაჩვენებელი საერთო ჯამში 16%-ით გაიზარდა, 100,000 მოსახლეზე 14.0-დან 16.3-მდე.²³⁷

ჯანმრთელობის დაზღვევის კომპანია „Blue Cross Blue Shield“ ანგარიში აჩვენებს, რომ კლინიკური დეპრესიის, ასევე ცნობილი როგორც მძიმე დეპრესიის, დიაგნოზები 2013 წლიდან 33%-ით გაიზარდა. ზოგიერთი წყაროები უკვე იწყებს იმის პროგნოზირებას, რომ 2030 წლისთვის დეპრესია იქნება სიცოცხლის ხანგრძლივობის ან დაკარგვის ნომერ პირველი მიზეზი. ანგარიშში აღნიშნულია, რომ დეპრესიით დაავადებულ ქალებსა და მამაკაცებს საშუალოდ შეიძლება დაკარგონ ჯანსაღი ცხოვრების 9.6 წლამდე.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).

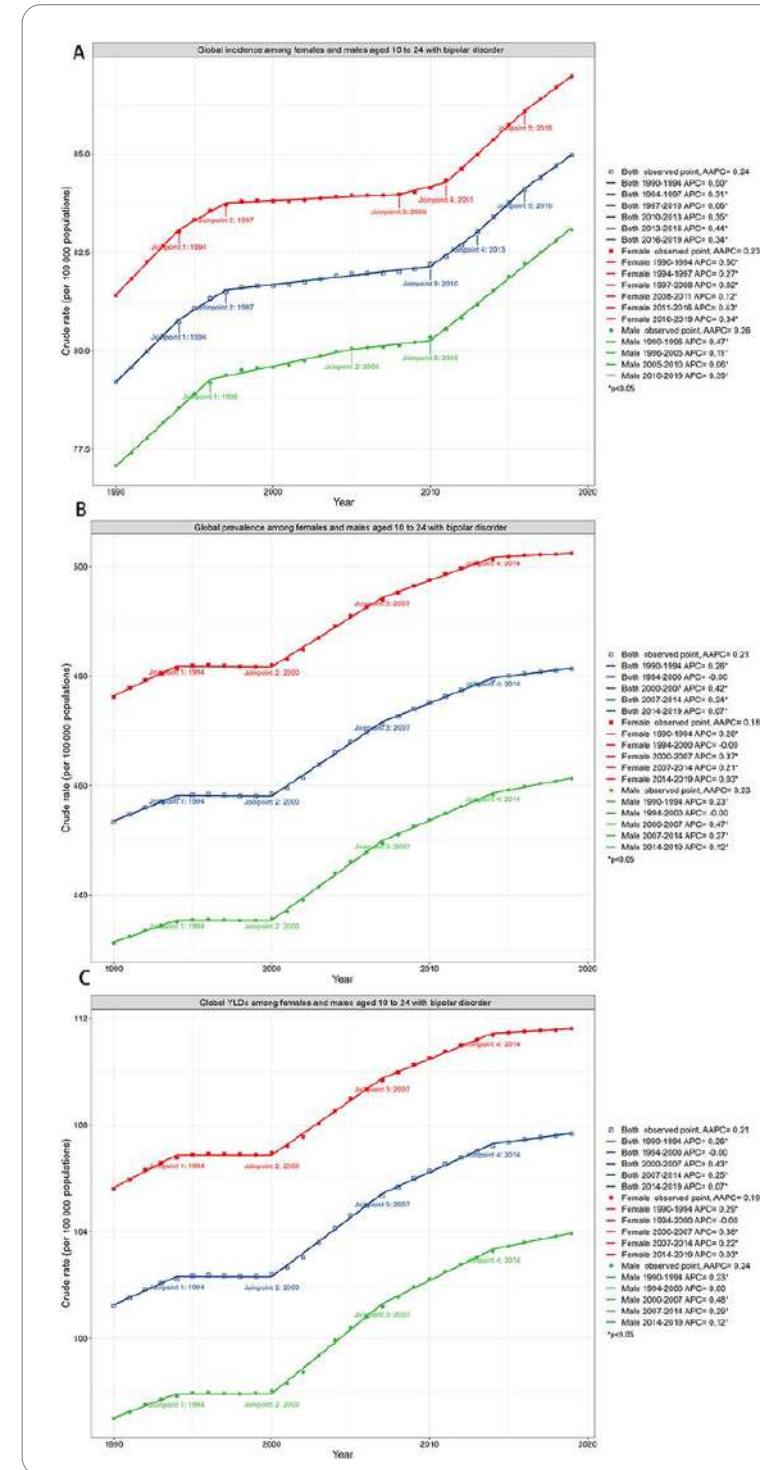
²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. Journal of Clinical Medicine 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

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>



დიაგრამა 88. 1990 წლიდან 2019 წლამდე 10-24 წლის ყველა მოზარდი და ახალგაზრდა ქალი და მამაკაცის გლობალური ბიპოლარული აშლილობის შემთხვევების, გავრცელებისა და შეზღუდული შესაძლებლობის მქონე წლების (YLDs) ერთობლივი წერტილოვანი რეგრესიული ანალიზი. * $p < 0.05$; AAPC, საშუალო წლიური პროცენტული ცვლილება; APC, წლიური პროცენტული ცვლილება; YLDs, შეზღუდული შესაძლებლობის მქონე წლების ცხოვრება.

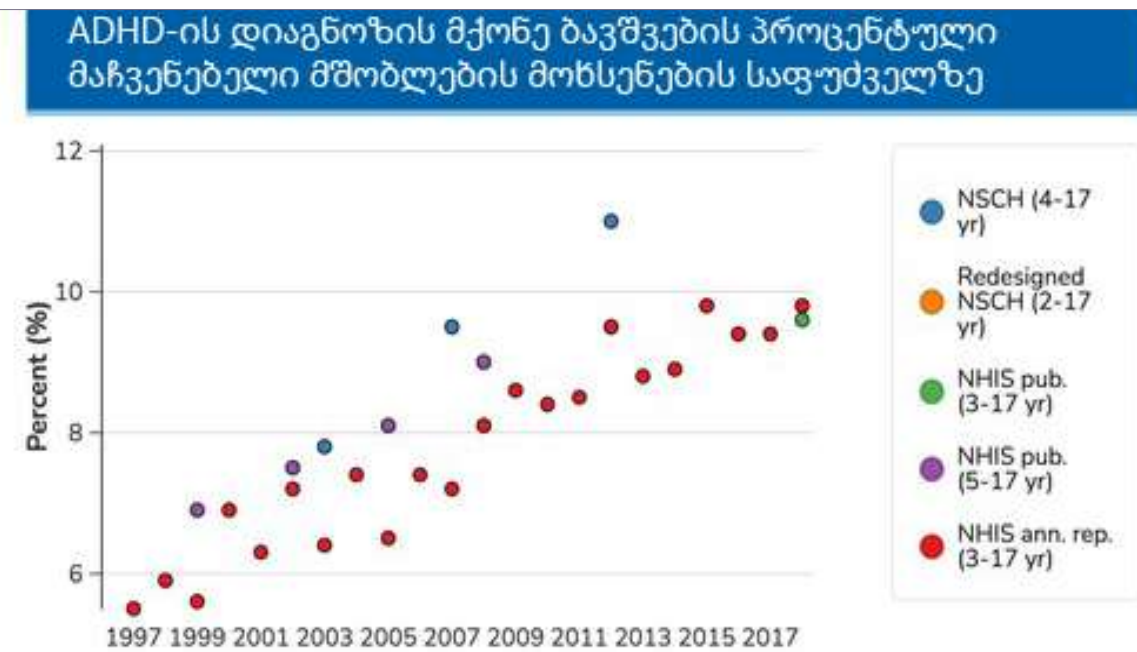
წყარო: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. Gen Psych 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, ყურადღების დეფიციტის/ჰიპერაქტიურობის დარღვევის (ADHD) დიაგნოზები სტაბილურად გაიზარდა. შეერთებულ შტატებში ეროვნული კვლევები აჩვენებს გავრცელების ზრდას 6.1%-დან 10.2%-მდე 20-წლიან პერიოდში 1997 წლიდან 2016 წლამდე (სურ. 89).²³⁹

2023 წელს ჩატარებულმა მიმოხილვამ, რომელიც 31 ქვეყანას მოიცავდა, წიგნიერებისა და არითმეტიკული უნარების შემცირება აჩვენა (სურ. 90).²⁴⁰

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

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



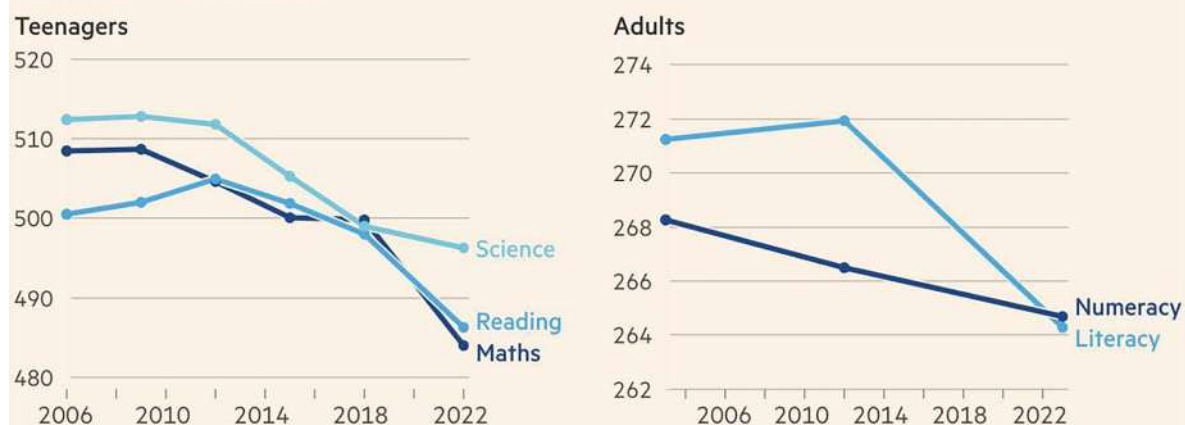
სურათი 89. ყურადღების დეფიციტისა და ჰიპერაქტიურობის სინდრომის გავრცელების ტენდენციების გრაფიკი 1997 წლიდან 2016 წლამდე.

წყარო: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018).

<https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

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



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

სურათი 90. ლოგიკისა და პრობლემების გადაჭრის ტესტებში მუშაობის ეფექტურობა მცირდება.

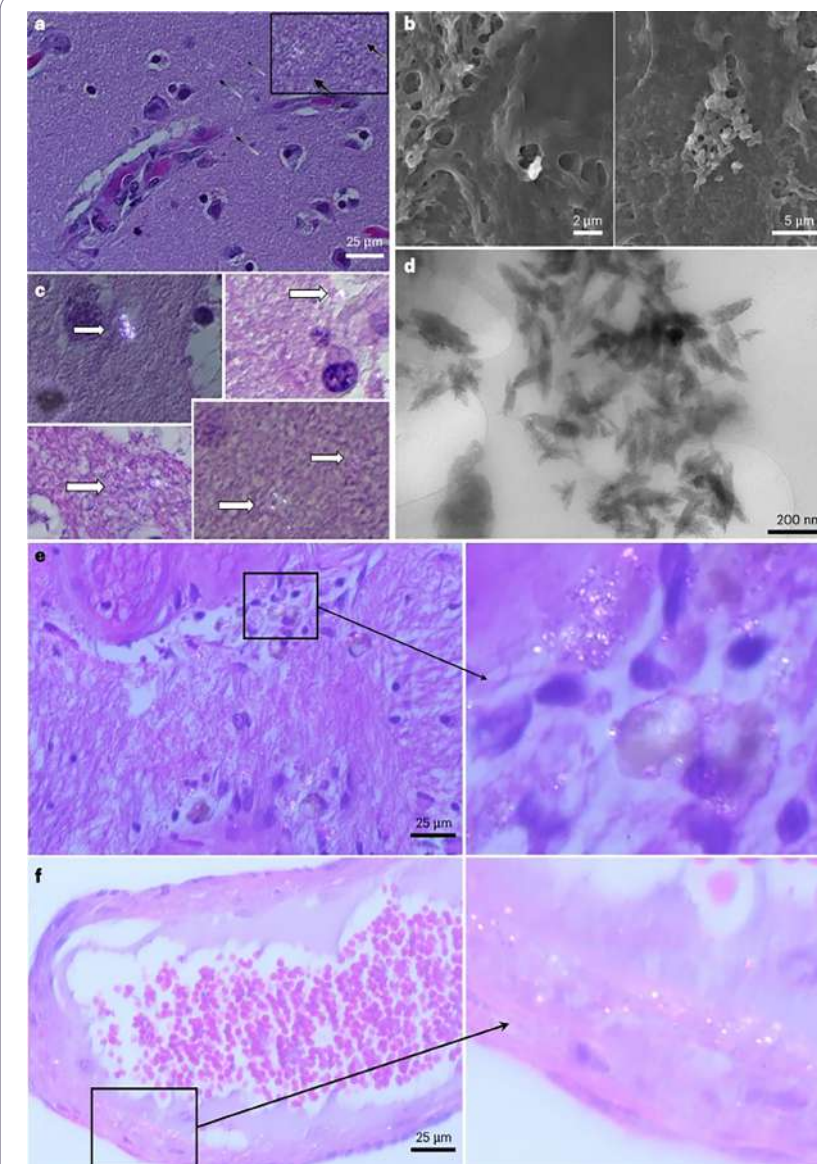
წყარო: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey

FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

ნეიროდეგენერაციული და ნეიროფსიქიატრიული დარღვევების ზრდის ტენდენციები აშკარად კორელაციაშია გარემოში პლასტმასის მზარდ არსებობასთან (სურ. 96-97).

ნანოპლასტმასის ყველაზე მაღალი კონცენტრაცია ადამიანის ტვინის ქსოვილში აღმოჩნდა - 7-დან 30-ჯერ მეტი, ვიდრე ღვიძლში ან თირკმელებში. დემენციის დიაგნოზის მქონე პირთა ტვინის ქსოვილის ნიმუშებმა აჩვენა მნპ-ის კიდევ უფრო მაღალი არსებობა - 10-ჯერ მეტი - დემენციის არმქონე პირთა ტვინის ქსოვილთან შედარებით (ნახ. 91).²⁴¹

ტვინში დომინანტური ნაწილაკები იყო პოლიეთილენის პაწაწინა ფრაგმენტები ან ფანტელები, რომელიც შეფუთვაში ერთ-ერთი ყველაზე ხშირად გამოყენებული პლასტმასია.



სურათი 91. პოლარიზაციის ტალღის მიკროსკოპია (a, შავი ისრები მიუთითებს რეფრაქტურულ ჩანართებზე; ჩანართი არის ციფრული გადიდება სიცხადისთვის) და SEM (b, მხედველობის ველებია 15.4 და 20.1 მკმ სიგანის) გამოყენებული იქნა გარდაცვლილი ადამიანის ნიმუშებიდან ტვინის მონაკვეთების სკანირებისთვის. c, დიდი (>1 მკმ) ჩანართები არ დაფიქსირებულა; პოლარიზაციის ტალღის დამატებითი მაგალითები მონიშნულია (თეთრი ისრები მონიშნულია სუბმიკრონული რეფრაქტურული ჩანართებით). ამ ტექნოლოგიების გარჩევადობის შეზღუდვებმა განაპირობა TEM-ის გამოყენება Py-GC/MS-ისთვის გამოყენებული გრანულებიდან ამონაწერების შესასწავლად. d, TEM-ის მაგალითებმა დისპერსიის შემდეგ გაშიფრა უამრავი ნატეხის ან ფანტელის მსგავსი მყარი ნაწილაკი, რომელთა ზომები ძირითადად <200 ნმ სიგრძისა და <40 ნმ სიგანისაა. e, f, პოლარიზაციის ტალღის მიკროსკოპია ავლენს მნიშვნელოვნად მეტ რეფრაქციულ ჩანართებს დემენციის შემთხვევებში, განსაკუთრებით იმ რეგიონებში, სადაც იმუნური უჯრედების დაგროვებაა (e) და სისხლძარღვთა კედლების გასწვრივ (f). ყველა სურათი შეგროვდა მონაწილეთა მცირე ჯგუფზე (n = 10 ნორმალური ტვინისთვის; n = 3 დემენციის შემთხვევებისთვის), რათა წარმოდგენილიყო ვიზუალური მტკიცებულება ანალიტიკური ქიმიის დასადასტურებლად.

წყარო: 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>

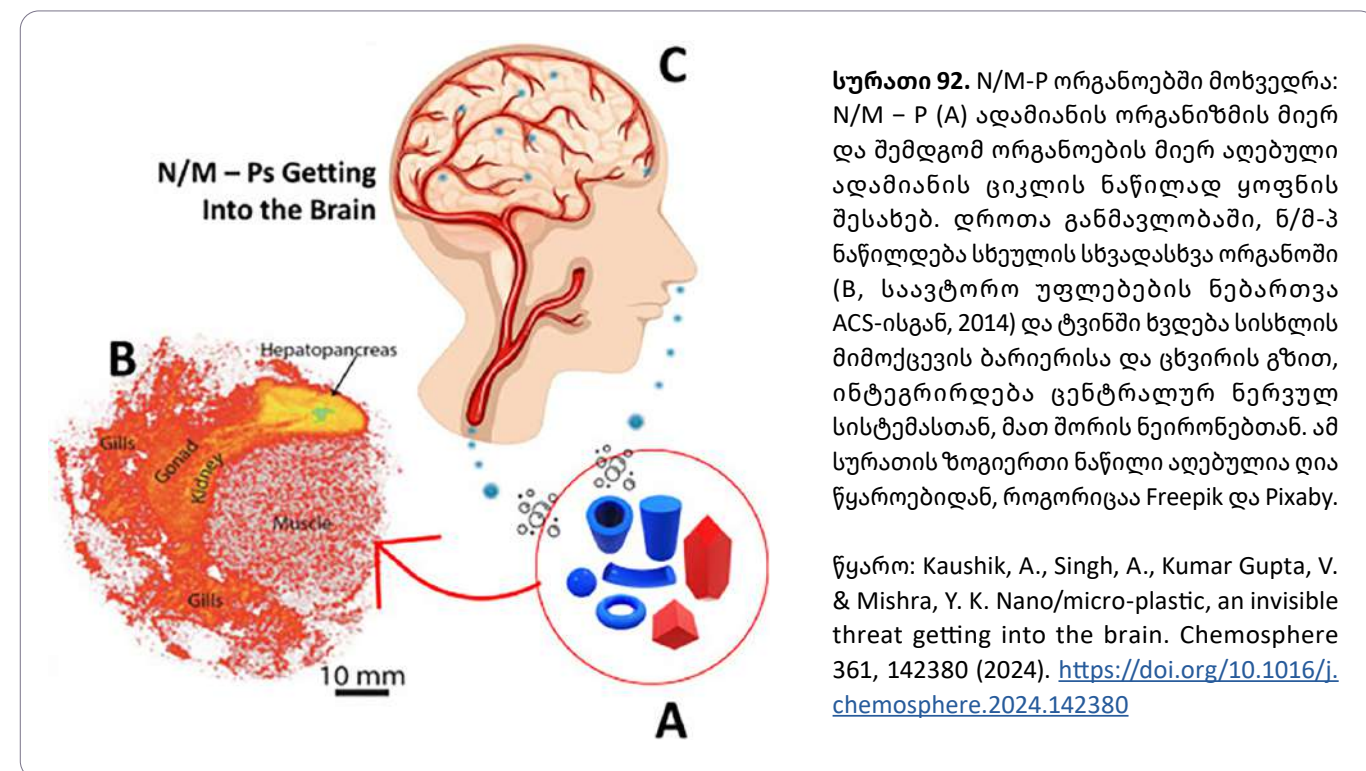
ახალი მონაცემები ადასტურებს, რომ 2016 წლიდან 2024 წლამდე, რვა წლის განმავლობაში, ადამიანის ტვინში პლასტმასის რაოდენობა 50%-ით გაიზარდა.²⁴¹

66

„ჩვეულებრივი ადამიანების ტვინის ქსოვილში, რომელთა საშუალო ასაკი დაახლოებით 45 ან 50 წელი იყო, კონცენტრაცია გრამზე 4800 მიკროგრამი იყო. ეს მთლიანი სტანდარტული პლასტმასის კოვზის ეკვივალენტია. ეს ნიშნავს, რომ ჩვენი ტვინი დღეს 99.5%-ით ტვინისგან შედგება, დანარჩენი კი პლასტმასისგან“, — თქვა კვლევის თანახელმძღვანელმა მეტიუ კამპენმა ნიუ-მექსიკოს უნივერსიტეტიდან.²⁴²

ატმოსფეროში, წყალში და საკვებში პლასტმასის ნაწილაკების პროგრესირების გათვალისწინებით, შეგვიძლია დარწმუნებით ვთქვათ, რომ ჩვენს ორგანიზმში ნანოპლასტიკის რაოდენობა მხოლოდ გაიზარდება. თუ ეს ტენდენცია გაგრძელდა, მაშინ 4 წელიწადში ტვინში პლასტმასის დონე კიდევ 50%-ით გაიზარდება.

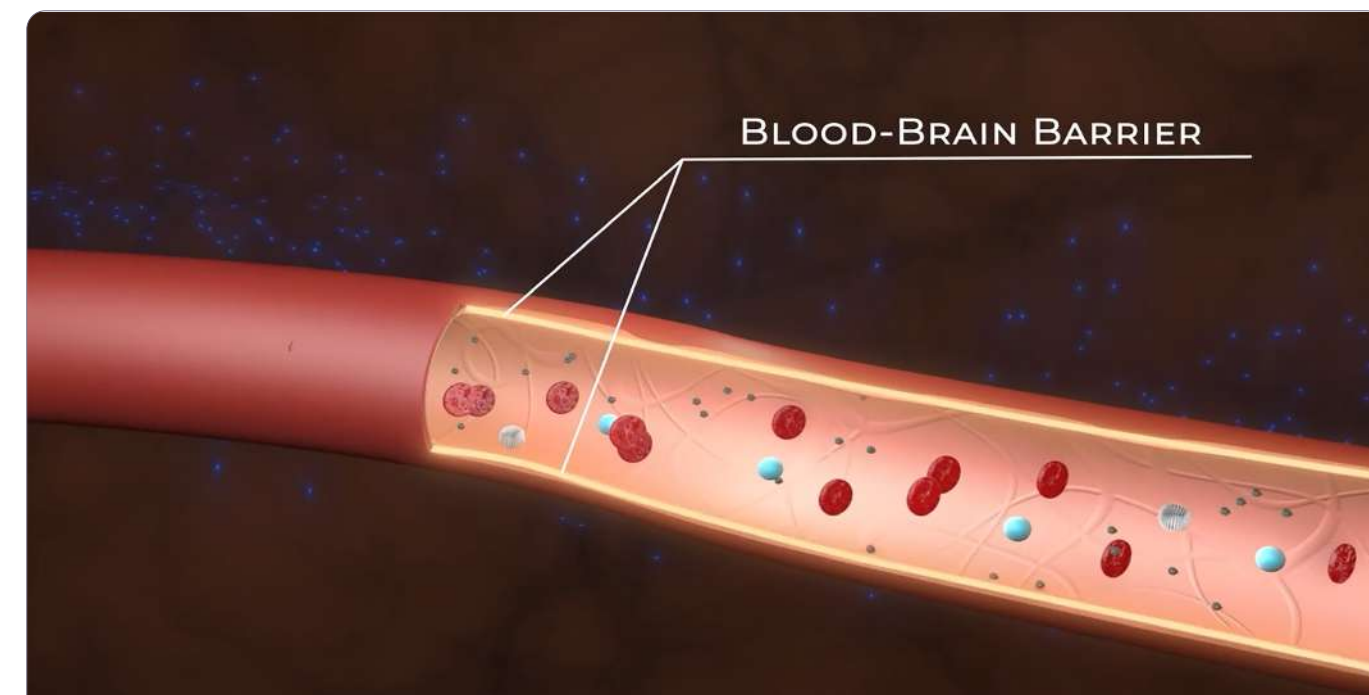
მნკ ტვინში შედის სისხლით, ჰემატოენცეფალური ბარიერის (BBB) გადალახვით და ყნოსვითი ნერვების გასწვრივ ინჰალაციის გზით (სურ. 92).



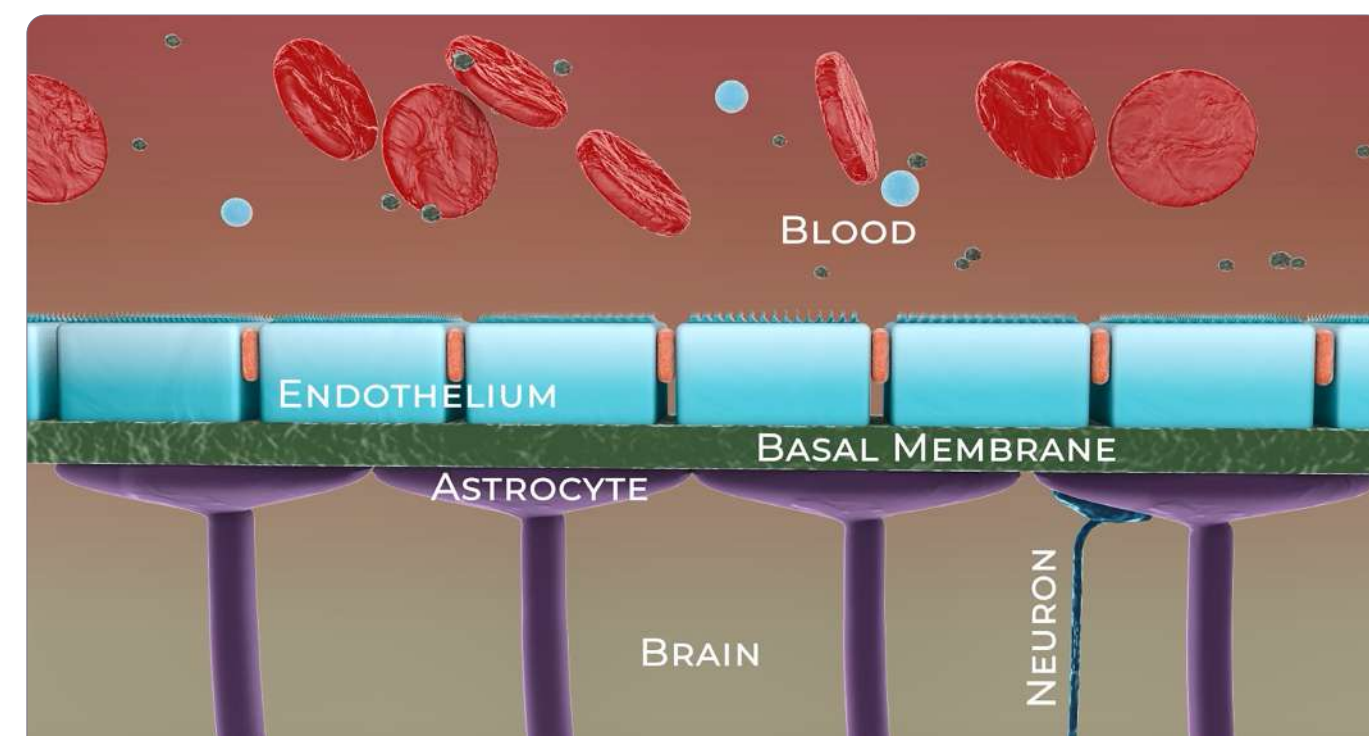
²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).

ჰემატოენცეფალური ბარიერი არის სპეციალიზებული ფიზიოლოგიური სისტემა, რომელიც არეგულირებს ნივთიერებების გადაცემას სისხლიდან ცენტრალურ ნერვულ სისტემაში (სურ. 93). ის შერჩევითად უშვებს საკვები ნივთიერებებისა და ჟანგბადის გავლას, ტოქსინებისა და პათოგენების ბლოკირებისას (სურ. 94). ეს მექანიზმი უზრუნველყოფს ტვინის კრიტიკულ დაცვას, ნეირონული გარემოს ჰომეოსტაზის შენარჩუნებით.



სურათი 93. ტვინის სისხლძარღვის სქემატური ილუსტრაცია



სურათი 94. ჰემატოენცეფალური ბარიერის სქემატური ილუსტრაცია

მათი სუბმიკრონული ზომისა და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების გამო, პლასტმასის ნანონაწილაკებს შეუძლიათ ტვინში შეღწევა ორგანიზმში შეღწევიდან სულ რაღაც ორ საათში.²⁴³

შესუნთქვისას, პლასტმასის ნანონაწილაკები ყნოსვითი ნერვების გავლით პირდაპირ ტვინის იმ რეგიონში გადაადგილდებიან, რომელიც პასუხისმგებელია სუნის დამუშავებაზე (სურ. 95).²⁴⁴ შედეგად, ისინი უფრო მოკლე და პირდაპირ გზას ირჩევენ ტვინამდე, ვიდრე სხვა ორგანოებამდე.



სურათი 95. ნანონაწილაკების შეღწევა ტვინში ყნოსვითი ნერვების მეშვეობით

ნანოპლასტმასების ტვინში შეღწევის შემდეგ, ისინი არღვევენ ტვინის უჯრედების - ნეირონების ფუნქციას. კვლევამ აჩვენა, რომ ნანონაწილაკების ზედაპირული თვისებები და ელექტრული მუხტი მნიშვნელოვნად მოქმედებს ნეირონებთან მათ ურთიერთქმედებასა და ნერვული იმპულსების გადაცემაზე.

ნანოპლასტმასების ელექტროსტატიკური მუხტი საშუალებას აძლევს მათ თავისუფლად ჩაერიონ ადამიანის სხეულის ყველა უჯრედის ფუნქციაში, შეაღწიონ უჯრედებში, გამოიწვიონ ჟანგვითი სტრესი და ქრონიკული ანთება, დააქვეითონ მიტოქონდრიის ფუნქცია და პოტენციურად გამოიწვიონ მიტოქონდრიის განადგურება და უჯრედების სიკვდილი.

კვლევამ²⁴⁵ აჩვენა, რომ უარყოფითად დამუხტულ ნანონაწილაკებს შეუძლიათ ნეირონული მემბრანების დეპოლარიზაციის გამოწვევა, რაც ცვლის მათ ელექტრულ აქტივობას.

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>

ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ უარყოფითად დამუხტული ნანოპლასტიკური ნაწილაკები მერჩევით უკავშირდებიან ნეირონებს, რომლებიც აქტიურად არიან ჩართულნი ნერვული იმპულსების გადაცემაში. ეს ნაწილაკები ეკვრის ნეირონების უჯრედების სხეულებს, დენდრიტებს და სინაფსურ ნაპრალებს, ხოლო გლიური უჯრედები, რომლებსაც არ აქვთ ელექტრული აქტივობა, არ ურთიერთქმედებენ მათთან.

ამრიგად, ნეირონების ელექტრული აქტივობა წარმოადგენს უარყოფითად დამუხტული ნანოპლასტიკების უჯრედულ მემბრანებთან შეკავშირების მთავარ ტრიგერს.

კვლევა მიუთითებს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკები, როგორც წესი, გროვდებიან ტვინის ლიპიდებით მდიდარ მიელინის გარსში, რომელიც გარს აკრავს ნეირონებს და ხელს უწყობს ნერვული სიგნალის გამტარობას.²⁴⁶ ნანოპლასტიკები იწვევენ აქსონების გარშემო მიელინის გარსის დეგრადაციას,^{247,248} რაც არღვევს ნეირონებს შორის ნერვული იმპულსების გადაცემას.

ნანოპლასტიკის ნეირონებზე ზემოქმედება

ნანოპლასტიკურ ნაწილაკებს ნეირონებზე შემდეგი მექანიზმებით შეუძლიათ ზემოქმედება:

1. ნეირონული მემბრანის პოტენციალზე ზემოქმედება

ნეირონები ფუნქციონირებენ მათ მემბრანებს შორის ელექტრული პოტენციალის სხვაობის საფუძველზე (დაახლოებით -70 mV მოსვენების მდგომარეობაში), რომელიც შენარჩუნებულია იონური გრადიენტებით (Na^+ , K^+ , Cl^- და ა.შ.) და იონური არხების აქტივობით. როდესაც დამუხტული ნანოპლასტიკური ნაწილაკი ნეირონულ მემბრანასთან ახლოსაა, მას შეუძლია შეცვალოს ელექტრული ველი და დესტაბილიზაცია მოახდინოს მემბრანის პოტენციალის. ამან შეიძლება გამოიწვიოს დეპოლარიზაცია ან ჰიპერპოლარიზაცია, ხოლო მძიმე შემთხვევებში, სპონტანური ნეირონული აქტივაცია ან სიგნალის ბლოკირება.

2. ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედება იონურ არხებთან

ნეირონულ მემბრანებში იონური არხები შეიცავს დამუხტულ ამინომჟავებს, განსაკუთრებით არხის „კარიბჭის“ რეგიონებში. ძლიერი უარყოფითი ან დადებითი მუხტის მქონე ნანოპლასტიკური ნაწილაკი შეიძლება ელექტროსტატიკურად ურთიერთქმედებდეს ამ უბნებთან, ცვლის არხის კონფიგურაციას. ამან შეიძლება გამოიწვიოს არხის ბლოკირება ან არასწორი აქტივაცია, რაც ხელს უშლის ნეირონების ნორმალურ ფუნქციონირებას.

3. სინაფსური ფუნქციის დარღვევა

სინაფსები დამოკიდებულია Ca^{2+} , Na^+ იონების, ასევე ნეიროტრანსმიტერების ზუსტ აქტივობაზე²⁴⁹ ელექტროსტატიკურად დამუხტულ ნანოპლასტიკურ ნაწილაკებს შეუძლიათ ხელი შეუშალონ ნეიროტრანსმიტერების გამოთავისუფლებას ან წარმოქმნან ცრუ სიგნალები, რაც პოტენციურად არღვევს ნერვული იმპულსების გადაცემას.

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. ჟანგვითი სტრესი და ანთება

დამუხტულ ნანოპლასტმასს შეუძლია გაზარდოს რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების დონე, რაც იწვევს ჟანგვით სტრესს. ნეირონებში ჟანგვითი სტრესი ხდება მაშინ, როდესაც რეაქტიული ჟანგბადის სახეობები აღემატება უჯრედის მათ ნეიტრალიზაციის უნარს. ეს აზიანებს დნმ-ს და უჯრედულ სტრუქტურებს, როგორიცაა მემბრანები, ცილები და მიტოქონდრიები, რაც არღვევს ნეირონების ნორმალურ ფუნქციონირებას. შედეგად, უჯრედი კარგავს ნერვული იმპულსების ეფექტურად გადაცემის უნარს, რაც იწვევს მის დეგრადაციას და საბოლოოდ სიკვდილს. რადგან ნეირონებს აქვთ შეზღუდული რეგენერაციული უნარი, ჟანგვითი სტრესით გამოწვეული დაზიანება ხშირად შეუქცევადია და შეიძლება გამოიწვიოს მეხსიერების, ყურადღების და სხვა კოგნიტური ფუნქციების პროგრესული დაქვეითება.

5. მიტოქონდრიულ ფუნქციაზე ზემოქმედება

დადებითად დამუხტულ ნანოპლასტმასს შეუძლია უჯრედებში შეღწევა და მიტოქონდრიებში დაგროვება, რაც არღვევს მათ მემბრანულ პოტენციალს. ეს აზიანებს სასუნთქ ჯაჭვს, რაც იწვევს ელექტრონების გაჟონვას, რომლებიც რეაგირებენ ჟანგბადთან და წარმოქმნიან რეაქტიულ ჟანგბადის სახეობებს, განსაკუთრებით სუპეროქსიდურ ანიონებს. მათი ჭარბი დაგროვება აძლიერებს ჟანგვით სტრესს და შეიძლება დააზიანოს უჯრედული სტრუქტურები.

6. მიტოქონდრიული მუტაციები

ნანოპლასტიკური ნაწილაკები აზიანებენ მიტოქონდრიულ დნმ-ს, არღვევენ მიტოქონდრიულ ნორმალურ ფუნქციონირებას. ეს გავლენას ახდენს კრიტიკულ უჯრედულ პროცესებზე, მათ შორის ენერგიის წარმოებაზე, ჟანგვითი სტრესის რეგულირებაზე, პროგრამირებულ უჯრედულ სიკვდილსა და მეტაბოლიზმზე. ამ სისტემებში დარღვევებმა შეიძლება შექმნას პირობები, რომლებიც ხელს უწყობს დაავადებების განვითარებას.

7. ნანოპლასტიკური ზედაპირების რეაქტიული თვისებები

ნანოპლასტიკების მაღალი სპეციფიკური ზედაპირის ფართობი ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორია, რომელიც განაპირობებს მათ ქიმიურ რეაქტიულობას და რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების გენერირების უნარს. მიკროპლასტმასებთან შედარებით, ნანონაწილაკებს აქვთ ზედაპირის ფართობი ერთეულ მასაზე, რომელიც ათობით ან თუნდაც ასობითჯერ მეტია, რაც მნიშვნელოვნად აძლიერებს მათ ურთიერთქმედებას ბიომოლეკულებთან და გარემომცველ გარემოსთან.

პლასტმასის ნაწილაკებზე ელექტროსტატიკურმა მუხტმა შეიძლება დაარღვიოს ნეირონული ფუნქცია ნერვული იმპულსების გადაცემის დაბლოკვით ან დამახინჯებით. ეს იწვევს ნერვულ სისტემაში გაუმართაობას და შეიძლება გამოიწვიოს ორგანიზმში პათოლოგიური მდგომარეობების ფართო სპექტრი. ეს ეფექტები ვლინდება სხვადასხვა ნევროლოგიური, ვეგეტატიური, კოგნიტური და ფსიქიატრიული დარღვევების სახით (ცხრილი 2).

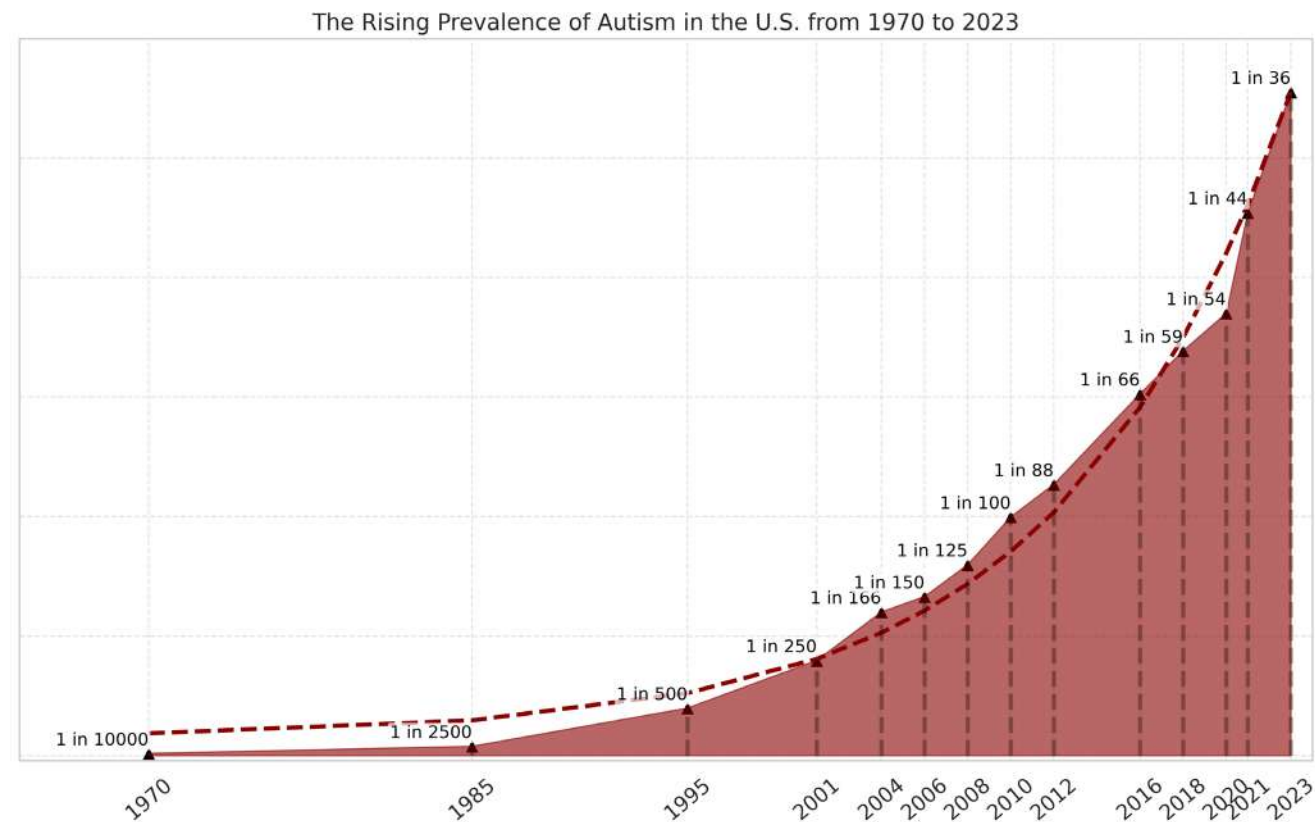
ნანოპლასტიკის ნერვულ უჯრედებზე ზემოქმედების ზემოქმედება დაკავშირებულია დარღვევების ფართო სპექტრთან, მათ შორის გაფანტულ სკლეროზთან, ამიოტროფიულ ლატერალურ სკლეროზთან, ალცჰაიმერის დაავადებასთან, პარკინსონის დაავადებასთან, აუტოიმუნურ დარღვევებთან, ეპილეფსიასთან, იშემიურ და ჰემორაგიულ ინსულტთან, დეპრესიასთან, შფოთვით და კოგნიტურ დარღვევებთან, შიზოფრენიასთან, ბიპოლარულ აშლილობასთან, აუტიზმთან და სხვა.

კატეგორია	გამოვლინება	გამომწვევი მიზეზი/მექანიზმი
მოძრაობის დარღვევები	დამბლა	მოტორული იმპულსების ცენტრალური ნერვული სისტემიდან კუნთებზე გადაცემის დარღვევა
	კრუნჩხვითი მდგომარეობები	დისბალანსი აღმგზნებ და დამთრგუნველ ნეიროსიგნალებს შორის
	მგრძნობელობის დაკარგვა	სენსორული ნერვული წრედების გაუმართაობა, რომლებიც ინფორმაციას რეცეპტორებიდან ტვინში გადასცემენ
	მოძრაობების კოორდინაციის დარღვევა	ნათხემის ან ზურგის ტვინის გზების დაზიანება
სენსორული დარღვევები	მეტყველების, მხედველობისა და სმენის დარღვევები	ტვინის სენსორულ და მოტორულ ცენტრებთან დაკავშირებული ნერვული გზების დაზიანება
ვეგეტატიური დარღვევები	სასუნთქი სისტემის, გულისცემის და საჭმლის მომნელებელი სისტემის	დისფუნქციები ვეგეტატიური (ვეგეტატიური) ნერვული სისტემის დარღვევა
	თერმორეგულაციის დარღვევები და შინაგანი ორგანოების ფუნქციის დარღვევა	ვეგეტატიური მარეგულირებელი ცენტრების დისფუნქცია
კოგნიტური დარღვევები	მეხსიერების და ყურადღების დარღვევები	თავის ტვინის ქერქის სტრუქტურული ან ფუნქციური ცვლილებები
	ცნობიერების დარღვევა, კომა	ტვინის ბადისებრი წარმონაქმნის დაზიანება, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სიფხიზლისა და ცნობიერების დონის რეგულირებაში
ფსიქოემოციური დარღვევები	შფოთვა, დეპრესია, განწყობის დარღვევები	ნეიროტრანსმიტერების დისბალანსი, ტვინის ემოციური ცენტრების დაზიანება

ცხრილი 2. ნანოპლასტიკის ნეირონებზე ზემოქმედებით გამოწვეული პათოლოგიური მდგომარეობების სპექტრი

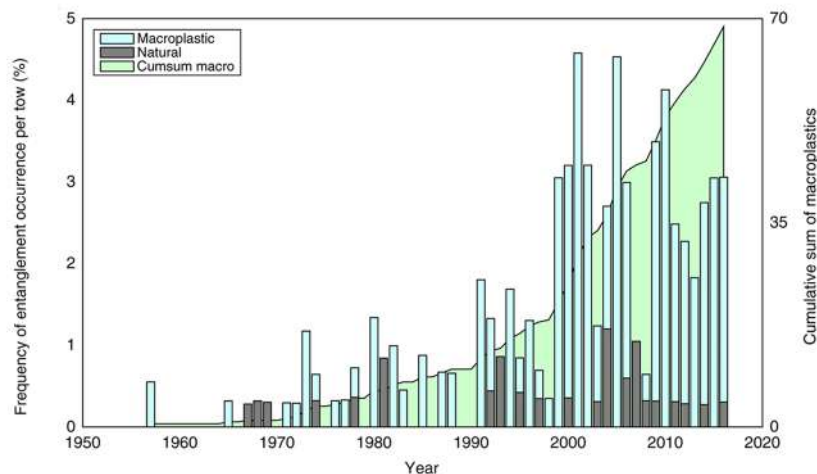
მიკრო- და ნანოპლასტიკები, როგორც აუტიზმის სპექტრის აშლილობების რისკ-ფაქტორი.

გარემოს პლასტმასის დაბინძურების ზრდასთან ერთად, გაიზარდა აუტიზმის სპექტრის აშლილობების (ასდ) გავრცელება (სურ. 96–97).



დიაგრამა 96. აუტიზმის გავრცელების ზრდა ამერიკის შეერთებულ შტატებში 1970 წლიდან 2023 წლამდე.

წყარო: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (წვდომის თარიღი: 1 მაისი 2025).



სურათი 97. ოკეანეში პლასტმასის რაოდენობის ზრდა 1957 წლიდან 2020 წლამდე.

წყარო: 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>

დაავადებათა კონტროლისა და პრევენციის ცენტრის (CDC) აუტიზმისა და განვითარების შეზღუდული შესაძლებლობების მონიტორინგის (ADDM) ქსელის მონაცემებით, 2020 წელს შეერთებულ შტატებში 36 ბავშვიდან 1-ს აუტიზმის სპექტრის აშლილობა (ASD) დაუდგინდა, რაც 2000 წლიდან შემთხვევების 317%-იან ზრდას ასახავს.^{250, 251}

ადამიანის ნერვული სისტემა ემბრიონული სტადიიდან ადრეული ბავშვობის ჩათვლით ვითარდება. კვლევები მიუთითებს მიკრო- და ნანოპლასტიკების (მნპ) ზემოქმედებასა და ASD-ის განვითარებას შორის პოტენციურ კავშირზე. კორეელი მკვლევარების ექსპერიმენტული მონაცემები აჩვენებს, რომ მნპ-ების პრენატალურ და მშობიარობის შემდგომ პერიოდში ზემოქმედებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ნეიროგანვითარების დარღვევებს.²⁵²

პოლისტიროლის ნანოპლასტიკების ადამიანის ნერვულ ღეროვან უჯრედებზე მოლეკულური ეფექტების შესახებ კვლევამ აჩვენა, რომ ნანოპლასტიკის ზემოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს ქსოვილების დაზიანება და ნეიროგანვითარების დაავადებები.²⁵³

მღრღნელებზე ჩატარებულმა კვლევამ²⁵⁴ აჩვენა, რომ ორსულობისა და ლაქტაციის პერიოდში მიკრო- და ნანოპლასტიკების დედის ზემოქმედებამ შეიძლება შეაფერხოს ჰიპოკამპის ნეიროგენეზი მთამომავლობაში და შეამციროს ტვინის სტრუქტურების მოცულობა, მათ შორის მამოძრავებელი ქერქის, ჰიპოკამპის, ჰიპოთალამუსის, მოგრძო ტვინის და ყნოსვითი ბოლქვის.

კარგად არის დადგენილი, რომ ნერვული ქსოვილის ცილების სტრუქტურასა და ფუნქციაში ცვლილებები გადამწყვეტ როლს თამაშობს მრავალი დარღვევის, მათ შორის აუტიზმის განვითარებაში.²⁵⁵

ბოლოდროინდელი კვლევები მიუთითებს, რომ ნანოპლასტიკები ცილებთან ურთიერთქმედებენ ძირითადად სუსტი ურთიერთქმედებების გზით, როგორცაა ჰიდროფობური ურთიერთქმედებები, წყალბადური ბმები, ვან დერ ვალის მიზიდულობის ძალები და ელექტროსტატიკური ძალები.²⁵⁶ ეს ურთიერთქმედებები იწვევს ცილის მოლეკულების სტრუქტურულ დეფორმაციებს, რაც არღვევს მათ ფუნქციონირებას. ნეირონული ქსელების ფორმირებასა და სინაფსურ გადაცემაში ცილების როლის გათვალისწინებით, ასეთმა ცვლილებებმა შეიძლება ხელი შეუწყოს აუტიზმის სპექტრის აშლილობის განვითარებას.

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>

გულ-სისხლძარღვთა დაავადებების პათოგენეზში მიკროპლასტიკების როლი

პლასტმასის ნაწილაკები არა მხოლოდ სისხლში ცირკულირებს, არამედ შეიძლება სისხლძარღვების კედლებზეც დაილექოს, რაც პათოლოგიური ცვლილებების კასკადს იწვევს. განსაკუთრებით შემამფოთებელია ათეროსკლეროზულ ფოლაქებში მიკროპლასტიკების აღმოჩენა.²⁵⁷ ბოლოდროინდელმა კვლევამ აჩვენა, რომ პაციენტებს, რომლებსაც საძილე არტერიებში მიკროპლასტიკა აქვთ, გულის შეტევის, ინსულტის და სიკვდილის 4.5-ჯერ მაღალი რისკი აქვთ. ეს მიუთითებს, რომ პლასტმასის ფრაგმენტები აქტიურად უწყობენ ხელს ათეროსკლეროზული ფოლაქების წარმოქმნას და დესტაბილიზაციას, რაც ხელს უწყობს მათ გახეთქვას და თრომბის წარმოქმნას.²⁵⁸ მიკროპლასტიკები ასევე არღვევენ ენდოთელიუმის მთლიანობას, სისხლძარღვების შიდა ზედაპირის ამომფენი უჯრედების კრიტიკულ ფენას, რომელიც არეგულირებს სისხლძარღვთა ტონუსს, ხელს უშლის თრომბის წარმოქმნას და ამცირებს ანთებით რეაქციებს. პლასტმასის ნაწილაკებით გამოწვეული ენდოთელიური დაზიანება იწვევს ქრონიკულ ანთებას და თრომბოზის გაზრდილ რისკს, რაც განსაკუთრებით საშიშია გულისა და ტვინის მომმარაგებელი არტერიებისთვის.²⁵⁹ მიკროპლასტიკები ურთიერთქმედებენ სისხლის კომპონენტებთან, როგორიცაა თრომბოციტები და სისხლის წითელი უჯრედები, ხელს უწყობენ თრომბოციტების აგრეგაციას და იწყებენ კოაგულაციის წარმოქმნას. გარდა ამისა, მიკროპლასტიკის ზედაპირს შეუძლია გამოიწვიოს უჯრედების მექანიკური დაზიანება და გაააქტიუროს სისხლის შედელების კასკადები, რაც პოტენციურად დროთა განმავლობაში იწვევს ქრონიკულ ჰიპერკოაგულაციას და მიკროვასკულარულ დარღვევებს.

იმუნურ უჯრედებს შეუძლიათ მიკროპლასტიკური ნაწილაკების შთანთქმა, მაგრამ არ გააჩნიათ მათი სრულად დაშლის მექანიზმები, რაც იწვევს უჯრედების დეფორმაციას და ზომის ზრდას. ამ შეცვლილი უჯრედების დაგროვება ტვინის მცირე სისხლძარღვებში ხელს უწყობს მიკროთრომბების წარმოქმნას, არღვევს ცერებრალურ სისხლის მიმოქცევას და ზრდის ინსულტის რისკს, მათ შორის ახალგაზრდა პირებში.²⁶⁰ ტვინში ჟანგბადის მიწოდების ქრონიკული შემცირება (ჰიპოქსია) იწვევს ნეირონების სიკვდილს და ნეიროდეგენერაციული ცვლილებების განვითარებას, მათ შორის ტვინის ქსოვილის ატროფიას²⁶¹ ამ პროცესების ხანგრძლივმა ზემოქმედებამ შეიძლება შეამციროს ტვინის სპეციფიკური სტრუქტურების მოცულობა.

მათი ელექტროსტატიკური მუხტის გამო, მნპ აქტიურად ურთიერთქმედებენ უჯრედულ მემბრანებთან, არღვევენ მათ ელექტრულ პოტენციალს. ეს, თავის მხრივ, გავლენას ახდენს სისხლძარღვთა მეკუმშვალობაზე, მიოციტებში სიგნალის გადაცემაზე და გულის რიტმზე. გულ-სისხლძარღვთა დაავადებებით გამოწვეული სიკვდილიანობა მთელ მსოფლიოში სტაბილურად იზრდება (სურ. 98). განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს 25–44²⁶² წლის ახალგაზრდებში უეცარი გულის სიკვდილის სინდრომს²⁶² (სურ. 99), რომელიც აღიარებულია სიკვდილის წამყვან მიზეზად შეერთებულ შტატებში. ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში შემთხვევათა რაოდენობა მკვეთრად გაიზარდა. მრავალეროვნული ნერვების მქონე პირების ფართოდ გავრცელების გათვალისწინებით, არ შეიძლება გამოირიცხოს მათი პოტენციური როლი ამ ტრაგიკულ მოვლენებში.

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>

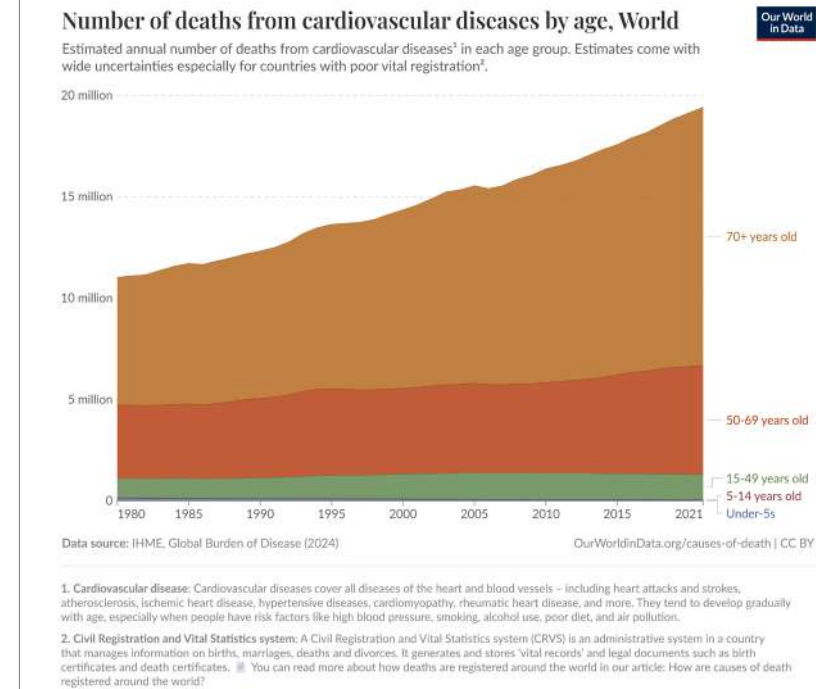
²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. N Engl J Med 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

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>

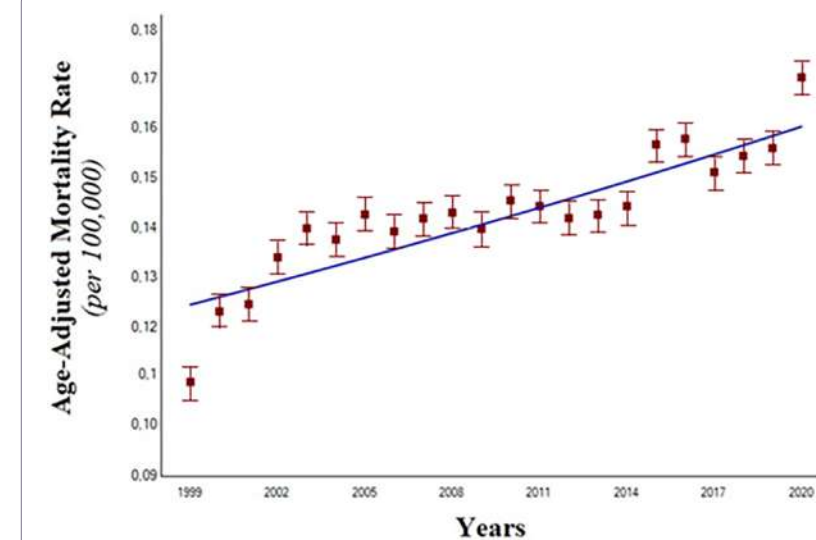
²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

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>



დიაგრამა 98. გულ-სისხლძარღვთა დაავადებებით გამოწვეული სიკვდილიანობის რაოდენობა ასაკის მიხედვით, მსოფლიო მასშტაბით.

წყარო: ჩვენი სამყარო მონაცემებში
<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>



დიაგრამა 99. უეცარი გულის სიკვდილით გამოწვეული ასაკობრივი შეზღუდვის მიხედვით სიკვდილიანობის მაჩვენებლების ტენდენციები, შესაბამისი 95%-იანი სანდოობის ინტერვალებით, აშშ-ში 25-დან 44 წლამდე ასაკის ადრულ ზრდასრულებში, 1999 წლიდან 2020 წლამდე.

წყარო: 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>

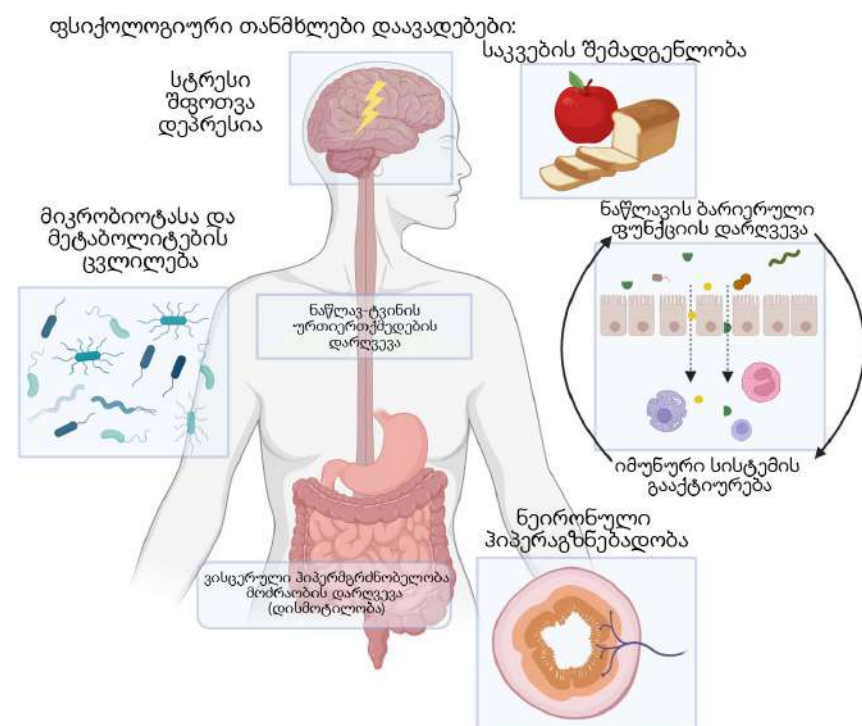
კიდევ ერთი კრიტიკული საკითხია ჩვილ ბავშვთა უეცარი სიკვდილის სინდრომის (SIDS) შემთხვევების ზრდა. მხოლოდ შეერთებულ შტატებში, 2019 წლიდან 2020 წლამდე SIDS-ის მაჩვენებელი 15%-ით გაიზარდა და ჩვილ ბავშვთა სიკვდილიანობის მეოთხე წამყვანი მიზეზიდან მესამე ადგილზე გადავიდა²⁶³ მიუხედავად იმისა, რომ SIDS-ის ზუსტი მიზეზები გაურკვეველი რჩება, ბევრი მეცნიერი ვარაუდობს, რომ ჩვილებში გულის რიტმისა და სისხლძარღვთა ტონუსის რეგულირების დარღვევის ფაქტორებს შეიძლება მნიშვნელოვანი როლი ჰქონდეს. ნანოპლასტიკებს, რომლებსაც შეუძლიათ პლაცენტის გადალახვა და განვითარებადი ნაყოფის ქსოვილებში დაგროვება, სავარაუდო რისკ-ფაქტორად ითვლება. მკვლევარები სულ უფრო მეტად თანხმდებიან იმ მოსაზრებაზე, რომ ნანოპლასტიკები შეიძლება იყოს „უხილავი მკვლელის“ როლის მთავარი კანდიდატი.

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

გული, ორგანიზმის ერთ-ერთი ყველაზე ენერგომომარებადი ორგანო, ენერგეტიკული საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად კრიტიკულად არის დამოკიდებული მიტოქონდრიების ეფექტურ ფუნქციონირებაზე. მიკროპლასტიკური ნაწილაკების ზემოქმედება არღვევს მიტოქონდრიულ პროცესებს, რაც პოტენციურად იწვევს მიოკარდიუმის ენერგიის დეფიციტს და, შესაბამისად, გულის ფუნქციის დარღვევას.

კუჭ-ნაწლავის დისფუნქცია მნვ-ის ზემოქმედებით გამოწვეული

ნაწლავი ორგანიზმის უდიდესი იმუნური ორგანოა, რომელიც იმუნური უჯრედების დაახლოებით 70%-ს, დაახლოებით 500 მილიონ ნეირონს და 100 ტრილიონზე მეტ მიკროორგანიზმს შეიცავს.²⁶⁴ ნაწლავის მიკრობიოტა სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს იმუნური ჯანმრთელობის შენარჩუნებაში და მისმა დისბალანსმა შეიძლება იმუნიტეტის შესუსტება და სხვადასხვა დაავადებების გამოწვევა გამოიწვიოს. ხშირად მას „მეორე ტვინს“ უწოდებენ მკვრივი ნეირონული ქსელისა და ცენტრალურ ნერვულ სისტემასთან კომუნიკაციის უნარის გამო,²⁶⁵ ტვინსა და ნაწლავებს შორის რთული ბიოქიმიური სიგნალების გაცვლის გამო მას ეწოდება „ნაწლავ-ტვინის ღერძი“, და მნიშვნელოვან როლს ასრულებს როგორც ფიზიკური, ასევე ფსიქო-ემოციური მდგომარეობების რეგულირებაში (სურ. 100).



სურათი 100. ნაწლავ-ტვინის ურთიერთქმედების დარღვევების პათოფიზიოლოგიური მექანიზმები.

წყარო: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Sofield, 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>

²⁶⁵Jiefang 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).

ჯანსაღი ნაწლავის ბარიერი ხელს უშლის მიკრობებისა და უცხო ნაწილაკების ნაწლავის სანათურიდან სისხლში მოხვედრას.²⁶⁵ მიკრო- და ნანოპლასტიკები აზიანებენ ამ ბარიერს, ზრდის ნაწლავის კედლის გამტარიანობას. ეს იწვევს ანთებას ნაწლავებსა და სხვა ორგანოებში, ასუსტებს იმუნიტეტს. ამავდროულად, მიკროელემენტები ცვლის ნაწლავის მიკრობიოტის შემადგენლობას, რაც იწვევს დისბალანსს სასარგებლო და პათოგენურ მიკროორგანიზმებს შორის.²⁶⁶ ეს არღვევს საჭმლის მონელებას, ამცირებს ორგანიზმის უნარს, დაშალოს საკვები ალერგენები და ზრდის საკვები ალერგიის რისკს.²⁶⁷

ეს ქმნის მანკიერ წრეს: პლასტმასი არღვევს ნაწლავის მიკრობიოტას, ზრდის ანთებას და არღვევს ნაწლავის კედლის მთლიანობას. შედეგად, ტოქსინები, ბაქტერიები და პლასტმასის ნაწილაკები იწყებენ სისხლში შეღწევას. მათი არსებობა სისხლში იწვევს იმუნურ პასუხს, რაც იწვევს ქრონიკულ ანთებას მთელ სხეულში. სისხლიდან ამ ტოქსინებს, ბაქტერიებს და ნანოპლასტმასს შეუძლია გადალახოს ჰემატოენცეფალური ბარიერი და მიაღწიოს ტვინს, სადაც ისინი იწვევენ ანთებით რეაქციებს. თავის მხრივ, ეს პროცესები კიდევ უფრო აზიანებს იმუნურ პასუხს, აძლიერებს ორგანიზმის სტრესულ რეაქციას და შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს ნაწლავის მიკრობიოტაზე ნეიროენდოკრინული მექანიზმების მეშვეობით - რითაც იზურება მანკიერი წრე „ნაწლავი-ტვინის“ ღერძის გასწვრივ.

ნაწლავის მიკრობიომასა და ცენტრალურ ნერვულ სისტემას შორის ურთიერთქმედების დარღვევა პირდაპირ კავშირშია ნევროლოგიურ დარღვევებთან. მაგალითად, აუტიზმის სპექტრის აშლილობის მქონე ბავშვებს აღენიშნებათ მნიშვნელოვანი მიკრობიოტას დისბალანსი, რაც დასტურდება მიკრობიოლოგიური ანალიზითა და საჭმლის მომნელებელი სისტემის ფუნქციის შეფასებით.²⁶⁸

ნაწლავის ანთებითი დაავადების მქონე პაციენტებზე ჩატარებული კვლევები აჩვენებს დადებით კორელაციას დაავადების სიმძიმესა და განავალში მიკროპლასტიკის კონცენტრაციას შორის. ნაწლავის ანთებითი დაავადების მქონე პაციენტებს ჯანმრთელ პირებთან შედარებით (28.0 ნაწილაკი/გ) უფრო მაღალი მიკროპლასტიკის დონე აქვთ (41.8 ნაწილაკი/გ). გარდა ამისა, ამ პაციენტებში სწორი ნაწლავის ლორწოვანი გარსის წყლულოვან დაზიანებებში მიკროპლასტიკის მნიშვნელოვანი დაგროვება დაფიქსირდა.²⁶⁹

გარდა ამისა, ნაწლავში დარჩენილი მიკროპლასტიკი ორგანიზმში პირველადი მოხვედრიდან დიდი ხნის შემდეგაც აგრძელებს მავნე ზემოქმედებას.

²⁶⁵Jiefang 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).

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>

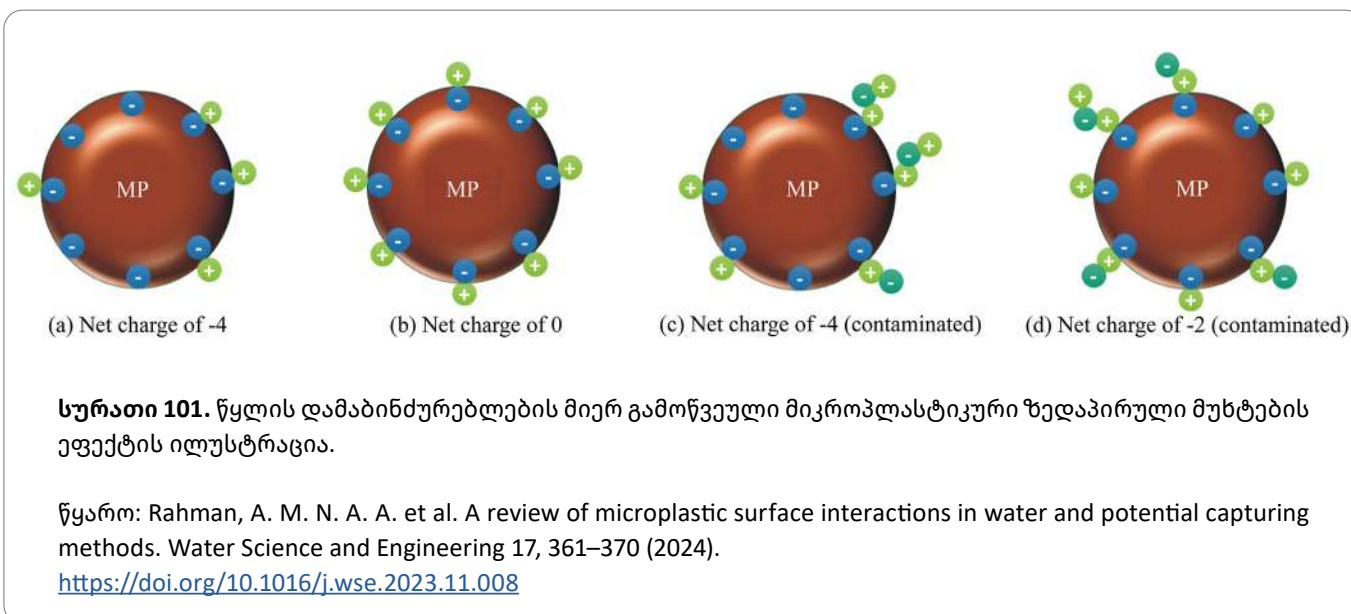
²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

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).

მნპ-ების გავლენა იმუნურ სისტემაზე

მნპ-ები არღვევენ ორგანიზმში იმუნურ პასუხს, რაც ქმნის პათოგენების გამრავლებისთვის ხელსაყრელ პირობებს. დამუხტული მიკროპლასტიკური ნანოპლასტიკები უფრო ადვილად იზიდავს სხვა მოლეკულებს, როგორცაა ტოქსინები, მძიმე მეტალების მარილები, ბაქტერიები და ვირუსები (იხ. სურ. 101). ეს მათ ტოქსიკური ნაერთების ერთგვარ „სატრანსპორტო პლატფორმად“ აქცევს, რაც აძლიერებს ამ ნივთიერებების ბიოლოგიურ აქტივობას და ტოქსიკურობას. ნანოპლასტიკებზე ელექტროსტატიკური მუხტი ასევე მოქმედებს როგორც ენერგიის წყარო ან „აკუმულატორი“, რაც ეხმარება ვირუსებსა და ბაქტერიებს უფრო ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში სიცოცხლისუნარიანობის შენარჩუნებაში.



გარდა ამისა, დამუხტული მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკები შეიძლება დიდი ხნის განმავლობაში დარჩეს წყალში და ჰაერში. ისინი უფრო ადვილად ამოდიან აეროზოლებად და ხვდებიან სასუნთქ სისტემაში, რაც ზრდის მათი ადამიანის ორგანიზმში შეწოვის ალბათობას.

მიკრობიომაზე, პათოგენებსა და იმუნურ სისტემაზე მიკროპლასტიკების კუმულაციური ზემოქმედება ჯანმრთელობისთვის რთულ რისკებს წარმოადგენს.

იმუნური უჯრედები, რომლებიც მიკროპლასტმასთან კონტაქტში შედიან, დაახლოებით სამჯერ უფრო სწრაფად იღუპებიან, ვიდრე ისინი, რომლებიც მათ არ ხვდებიან.²⁷⁰

მიკროპლასტიკური ნაწილაკები ელექტროსტატიკური და ჰიდროფობიური ურთიერთქმედების გამო ვირუსების მათ ზედაპირზე ადსორბციის უნარს აძლევს, რითაც ზრდის მათ სიცოცხლისუნარიანობას.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).

მიკროპლასტიკების ზედაპირზე არსებული ვირუსები შეიძლება აქტიური დარჩეს სამ დღემდე - საკმარისი დროა, მაგალითად, ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ნაგებობებიდან პლაჟებამდე გადასაადგილებლად.²⁷²

მიკროპლასტიკა ხელს უწყობს პათოგენების გავრცელებას და შეიძლება ხელი შეუწყოს მათ გენეტიკურ რეკომბინაციას. კვლევამ აჩვენა, რომ პლასტმასის ნაწილაკები არა მხოლოდ ამცირებენ მედიკამენტების ეფექტურობას, არამედ შეუძლიათ ანტიბიოტიკების მიმართ რეზისტენტული ბაქტერიული შტამების განვითარება.²⁷³

მიკრო- და ნანოპლასტმასის დამუხტული ნაწილაკები მიკროორგანიზმების კოლონიზაციის პლატფორმებს წარმოადგენენ.²⁷⁴ ბაქტერიები და სოკოები, ნანოპლასტმასის ელექტროსტატიკური ველების გამოყენებით, აჩქარებულ ზრდას ავლენენ. დაფინიაზე ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ნანოპლასტმასების ზემოქმედება იწვევს ჟანგვით სტრესს და 11-ჯერ ზრდის სოკოვანი ინფექციების შემთხვევებს (კერძოდ, სახეობის მეტჩნიკოვია).²⁷⁵ ეს ემთხვევა სოკოვანი დაავადებების დიაპაზონისა და რეზისტენტობის გლობალურ გაფართოებას, რომელიც ჯანმო-მ საზოგადოებრივი ჯანმრთელობისთვის მზარდ საფრთხედ განსაზღვრა.

66

„ბაქტერიული ანტიმიკრობული რეზისტენტობის პანდემიის ჩრდილიდან გამოსვლის შემდეგ, სოკოვანი ინფექციები იზრდება და სულ უფრო მდგრადია მკურნალობის მიმართ, რაც მსოფლიო მასშტაბით საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის საზრუნავად იქცევა“, — განაცხადა ჯანმო-ს ანტიმიკრობული რეზისტენტობის გენერალური დირექტორის თანამემწემ, დოქტორმა ჰანან ბალხიმ.²⁷⁶

მიკრო- და ნანოპლასტმასების თანაარსებობისას გამოყოფილი სოკოვანი მეტაბოლიტები დაკავშირებულია სიმსივნის ზრდასთან²⁷⁷ და ქრონიკულ ანთებასთან. სოკოვანი ღნმ აღმოჩენილია კიბოს კონკრეტულ ტიპებში, რაც მიუთითებს მიკრო- და ნანოპლასტმასების პოტენციურ როლზე კანცეროგენეზში.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. 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>

მნპ-ის ონკოგენური მოქმედება.

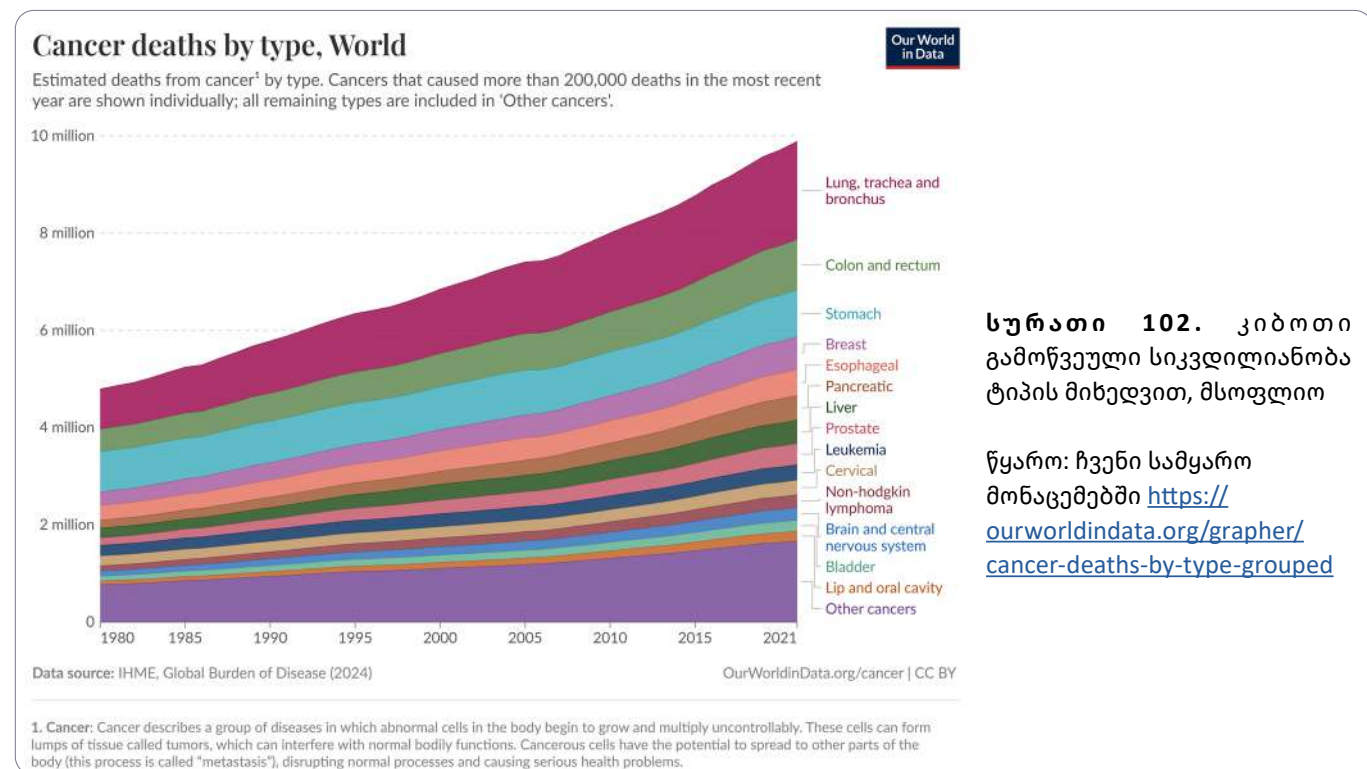
მუტაციების მექანიზმები და მეტასტაზების განვითარება

როგორც ამ ანგარიშის წინა ნაწილებში აღვნიშნეთ, მიკრო- და ნანოპლასტიკები ავთვისებიანი სიმსივნეების განვითარების მნიშვნელოვან ფაქტორებს წარმოადგენენ, მათი უარყოფითი ზემოქმედების გათვალისწინებით როგორც უჯრედულ, ასევე სისტემურ დონეზე.

კვლევები მიუთითებს, რომ მიკროპლასტიკები და ნანოპლასტიკები შეიძლება მოქმედებდნენ სიმსივნის პროგრესირების ფარული კატალიზატორების როლში, განსაკუთრებით უჯრედების მიგრაციის გაძლიერების და მეტასტაზირების ხელშეწყობის გზით.²⁷⁹ ასევე დადგინდა, რომ მნპ ნაწილაკებს შეუძლიათ უჯრედებში დიდი ხნის განმავლობაში დარჩენა და გაყოფის დროს შვილულ უჯრედებზე გადატანა.

ამჟამად, ონკოლოგიური დაავადებებით გამოწვეული სიკვდილიანობის მაჩვენებელი გლობალურად კვლავ იზრდება (სურ. 102).

პროგნოზის თანახმად, 2050 წლისთვის კიბოს ახალი შემთხვევების რაოდენობა 77%-ით გაიზრდება.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)

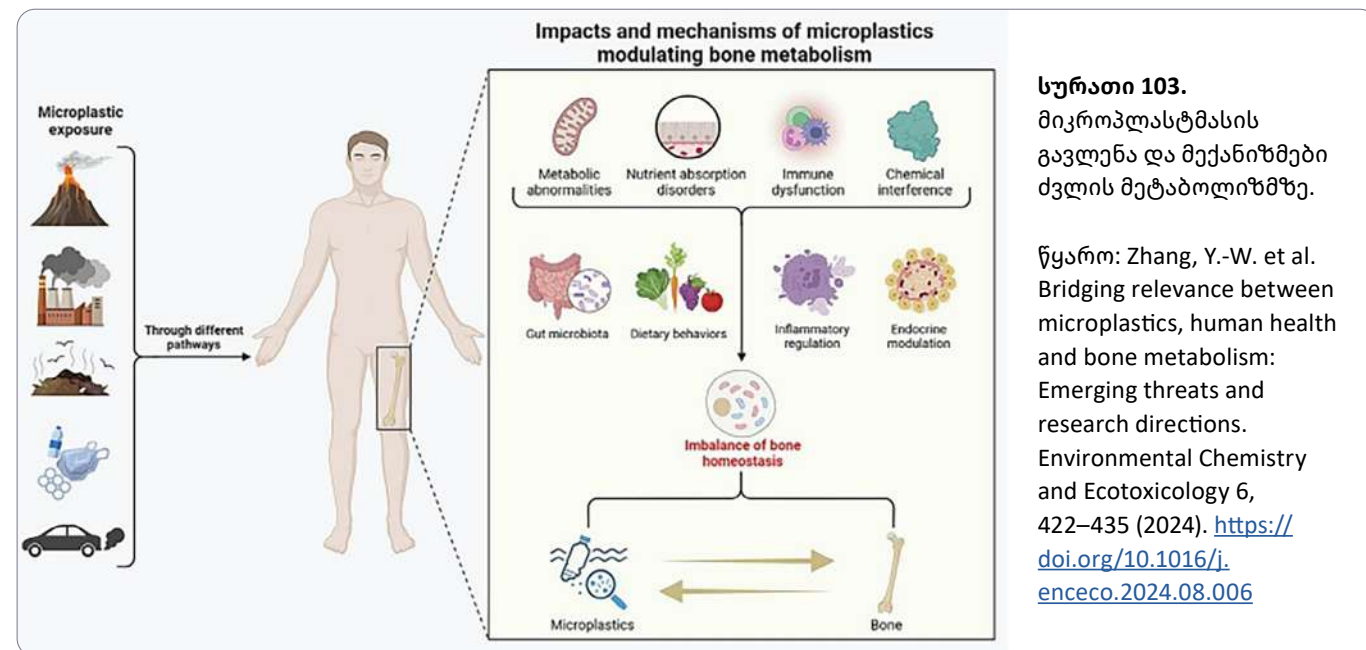
<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

მნპ-ების გავლენა კალციუმის მეტაბოლიზმსა და ძვლის სტრუქტურაზე

პლასტმასის ნაწილაკებს შეუძლიათ შეაღწიონ საყრდენ-მამოზრავებელ სისტემაშიც კი - ადამიანის ფიზიკური ფუნქციის საფუძველში (სურ. 103). იმ სფეროში, სადაც ზუსტი ბალანსი არსებობს განადგურებასა და მშენებლობას შორის, სადაც ძვლები ყოველდღიურად განახლდება, სახსრები ამცირებენ ხახუნს, ხოლო კუნთები მხარს უჭერენ მოძრაობას და სითბოს, მიკროპლასტმასს - ნაწილობრივ მათი ელექტროსტატიკური მუხტის გამო - შეუძლია ჩაანაცვლოს მოლეკულების კონსტრუქცია და დაიწყოს ნელი, დესტრუქციული პროცესები.

კვლევები აჩვენებს, რომ მიკროპლასტმასს შეუძლია შეაღწიოს ძვლოვან ქსოვილში, სადაც მათი მოლეკულური სტრუქტურა საშუალებას აძლევს მათ მიბაძონ კალციუმს და სხვა მინერალებს, რომლებიც აუცილებელია ძვლის მეტაბოლიზმისთვის. შედეგად, პლასტმასი შეიძლება ორგანიზმმა შეცდომით აღიქვას, როგორც ძვლების საშენი მასალა. სხეული სიტყვასიტყვით იწყებს ძვლების „აშენებას“ პლასტმასისგან.

მოლეკულური ამოცნობის ეს დარღვევა დაკავშირებულია ნეგატიური შედეგების მთელ რიგთან: მიკროპლასტმასს შეუძლია დააზიანოს ოსტეობლასტების და ოსტეოკლასტების ფუნქციები, დაარღვიოს კალციუმის და ფოსფორის მეტაბოლიზმი, რითაც ხელს უწყობს ოსტეოპოროზის განვითარებას. გააქტიურებულია ანთებითი კასკადები, იცვლება გენების ექსპრესია და ძვლოვანი ქსოვილი კარგავს სიმკვრივეს და სიმტკიცეს. გარდა ამისა, ნანოპლასტიკის არსებობამ შეიძლება გამოიწვიოს ქრონიკული ანთება, დააზიანოს სახსრების ხრტილი და ძვლოვანი ქსოვილი, რაც დაკავშირებულია ოსტეოართრიტის, ტკივილის სინდრომების და მოძრაობის დროს შებოჭილობის გაზრდილ რისკთან.^{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).

მდრდნელებზე ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ოსტეობლასტების რაოდენობა მნიშვნელოვნად შემცირდა პოლისტიროლის მიკროპლასტიკების ზემოქმედების ქვეშ მყოფ თაგვებში.²⁸⁰

პლასტიკის მნიშვნელოვან საფრთხეს უქმნის ჩონჩხის კუნთებსაც. კვლევები აჩვენებს, რომ ნანოპლასტიკასს შეუძლია კუნთოვანი უჯრედებში შეღწევა, რაც მიტოქონდრიის ფუნქციის დარღვევას იწვევს. ეს იწვევს ენერგიის დეფიციტს, აქტიურებს რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების აგრესიულ ფორმებს, აჩქარებს უჯრედების დაბერებას, აფერხებს კუნთების აღდგენას დატვირთვის შემდეგ და ხელს უწყობს კუნთების ატროფიას. განსაკუთრებით დაუცველები არიან ხანდაზმული ადამიანები და ქრონიკული დაავადებების მქონე პაციენტები.

მიკრო- და ნანოპლასტიკები გროვდება ძვლის ტვინში,²⁸³ რაც არღვევს დეროვანი უჯრედების (როგორც ჰემატოპოეტური, ასევე მეზენქიმული) ფორმირებას,²⁸⁴ საიდანაც წარმოიქმნება სისხლის წითელი უჯრედები, სისხლის თეთრი უჯრედები, თრომბოციტები, ოსტეოციტები, ქონდროციტები და ადიპოციტები. მათი დისფუნქცია იწვევს ორგანიზმის სისტემურ დაზიანებას.

მნპ-ის ზემოქმედებასთან დაკავშირებული რეპროდუქციული დარღვევები: უნაყოფობა და ერექციული დისფუნქცია

მობადობის შემცირება

პროგნოზები მიუთითებს, რომ 2045 წლისთვის მსოფლიო შეიძლება სრულიად უნაყოფო გახდეს.²⁸⁵

ჯერ კიდევ 2018 წელს, სტოკჰოლმში სპერმატოლოგიის XIII საერთაშორისო სიმპოზიუმზე წამყვანმა ექიმებმა და მეცნიერებმა მთავრობებს მოუწოდა, მამაკაცის ნაყოფიერების შემცირება საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის სერიოზულ პრობლემად აღიარონ და მამაკაცის რეპროდუქციული ჯანმრთელობის მნიშვნელობა ადამიანის სახეობის გადარჩენისთვის.²⁸⁶

გავრცელებული მოსაზრების საწინააღმდეგოდ, რეპროდუქციული ჯანმრთელობა მხოლოდ ჰორმონალური ბალანსით, გენეტიკითა და ცხოვრების წესით არ განისაზღვრება. სულ უფრო მეტი სამეცნიერო კვლევა მიუთითებს მიტოქონდრიების კრიტიკულ როლზე ჩასახვისა და ემბრიონის განვითარების პროცესებში. ეს პაწაწინა ორგანოები, რომლებიც პასუხისმგებელნი არიან ყველა სასიცოცხლო პროცესისთვის საჭირო ენერგიის გამომუშავებაზე, გადამწყვეტ როლს ასრულებენ როგორც მამაკაცების, ასევე ქალების ნაყოფიერებაში და მათი მნიშვნელობა ადამიანის რეპროდუქციული ფუნქციისთვის გაცილებით ღრმა აღმოჩნდება, ვიდრე ადრე იყო გაგებული.

მიტოქონდრიული აქტივობის დისფუნქციები შეიძლება იყოს უნაყოფობის მიზეზი როგორც ქალებში, ასევე მამაკაცებში. მამაკაცებში, სპერმის კუდში მდებარე მიტოქონდრიები პასუხისმგებელნი არიან განაყოფიერებისთვის აუცილებელ მოძრაობაზე. მათი ფუნქციონირების გაუმართაობა ამცირებს სპერმის მოძრაობას და შეიძლება გამოიწვიოს ანომალიები.

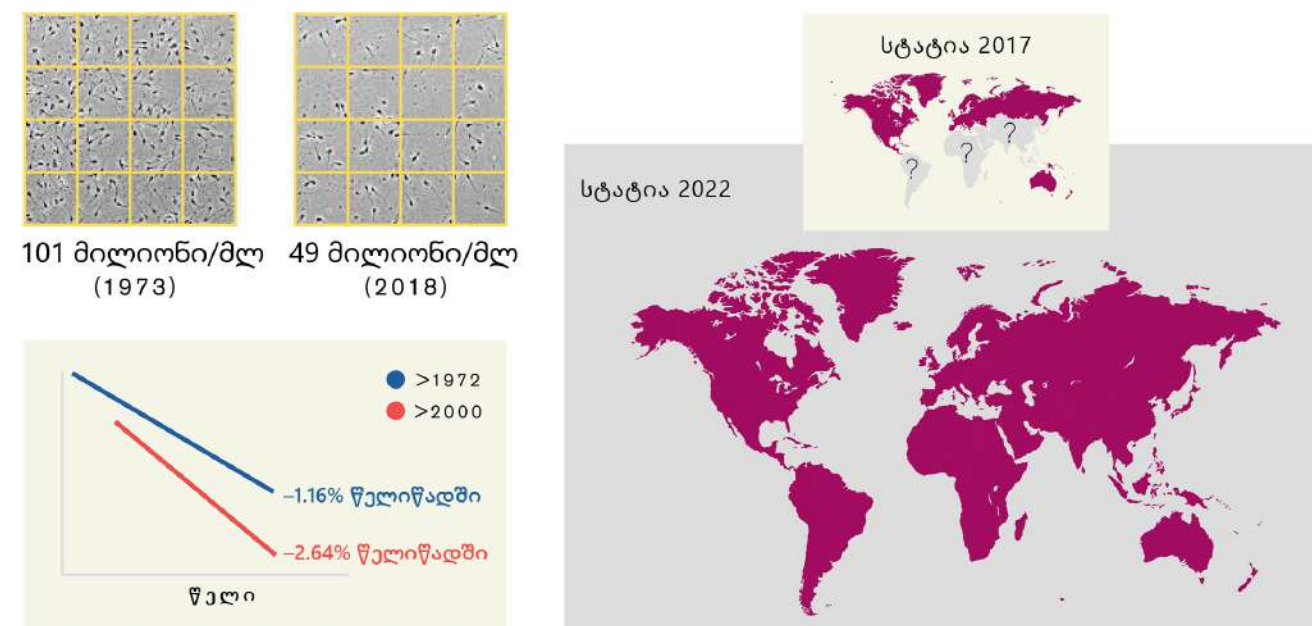
²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).
²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone 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>

ჩინელი მეცნიერების მიერ ჩატარებულმა კვლევებმა სპერმის ყველა ნიმუშში აღმოაჩინეს მიკროპლასტიკა, საშუალოდ ორი ნაწილაკი 7 მიკრომეტრამდე ზომით, ყველაზე ხშირად პოლისტიროლი.²⁸⁷ მიკროპლასტიკის არსებობა დაკავშირებულია სპერმატოზოიდების მორფოლოგიურ ანომალიებთან და დამოკლებულ ტელომერებთან.

მათი მიკროსკოპული ზომისა და მუხტის გამო, ნანოპლასტიკასს შეუძლია გადალახოს ჰემატო-სათესლე ჯირკვლის ბარიერი და შეაღწიოს რეპროდუქციულ ორგანოებში, რაც არღვევს მათ ფუნქციებს.

განსაკუთრებულ შემოფოთებას იწვევს მამაკაცებში სპერმის საერთო რაოდენობის 62.3%-ით შემცირების დაკვირვებული ტენდენცია 1973 წლიდან 2018 წლამდე²⁸⁸ (სურ. 104).

სპერმის რაოდენობა მსოფლიოში დაჩქარებული ტემპით მცირდება



სურათი 104. გრაფიკული რეზიუმე: სპერმის რაოდენობა მსოფლიო მასშტაბით დაჩქარებული ტემპით მცირდება.

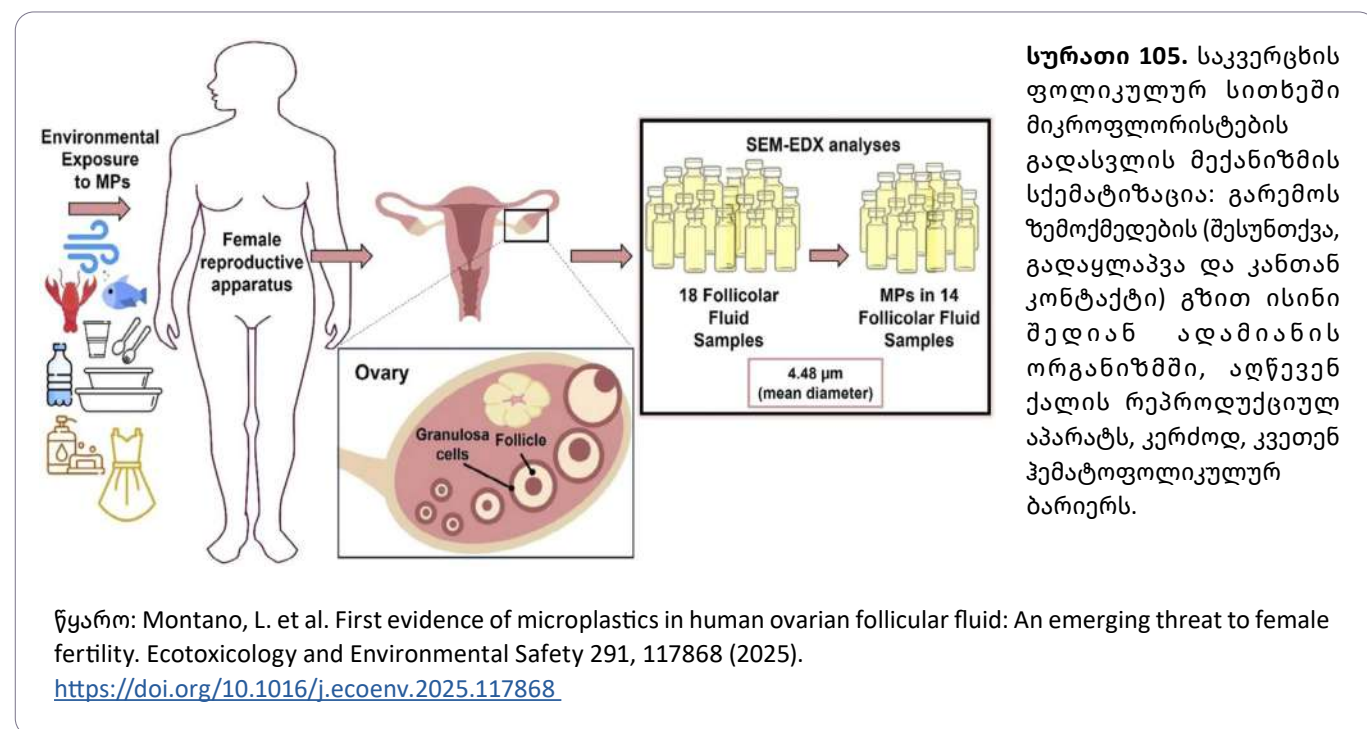
წყარო: Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

მიუხედავად იმისა, რომ ნაყოფიერებაზე მრავალი ფაქტორი მოქმედებს, მეცნიერთა მზარდი რაოდენობა იხრება იმ მოსაზრებისკენ, რომ პლასტიკაში არსებული ქიმიური ნაერთები ამ პროცესში მთავარ როლს თამაშობენ. ფტალატები, რომლებიც გამოიყენება პლასტიკის მოქნილობის მისაცემად, არღვევს ჰორმონალურ ბალანსს, ამცირებს ლიბიდოს და შეიძლება ხელი შეუწყოს ნაადრევ სქესობრივ მომწიფებას და სათესლე ჯირკვლების დისფუნქციას.

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>

ასევე საგანგაშოა ქალის ნაყოფიერებასთან დაკავშირებული სიტუაცია. 2025 წელს ჩატარებულმა კვლევამ 18 ქალიდან 14-ში საკვერცხეების ფოლიკულურ სითხეში აღმოაჩინა მიკროპლასტიკური ნაწილაკები, საშუალოდ 2000-ზე მეტი ნაწილაკი მილილიტრში, რომელთა უმეტესობა დიამეტრით 5 მიკრომეტრზე ნაკლები იყო²⁸⁹ (სურ. 105).



ეს მონაცემები მიუთითებს პლასტმასის ნაწილაკების უნარზე, გადალახონ სისხლი-ფოლიკულის ბარიერი საკვერცხეებში. უჯრედულ დონეზე, მიკრო- და ნანოპლასტმასს შეუძლია დააზიანოს დნმ, დაარღვიოს უჯრედების დაყოფა და გამოიწვიოს ანთება. დადასტურებულია მათი ჩარევა ჰორმონალურ რეგულაციაში, პლაცენტის ფუნქციების დარღვევა, ანგიოგენეზზე გავლენა და კავშირი სამვილოსნოს ფიბროიდების განვითარებასთან.

ერექციული დისფუნქცია

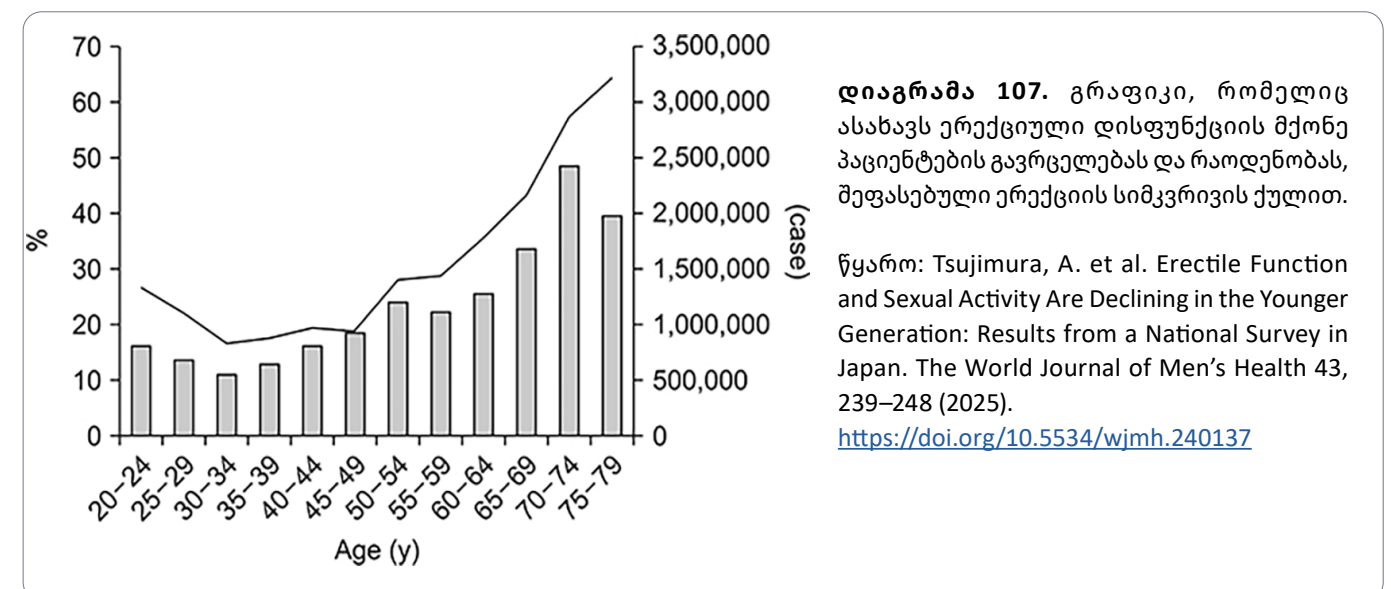
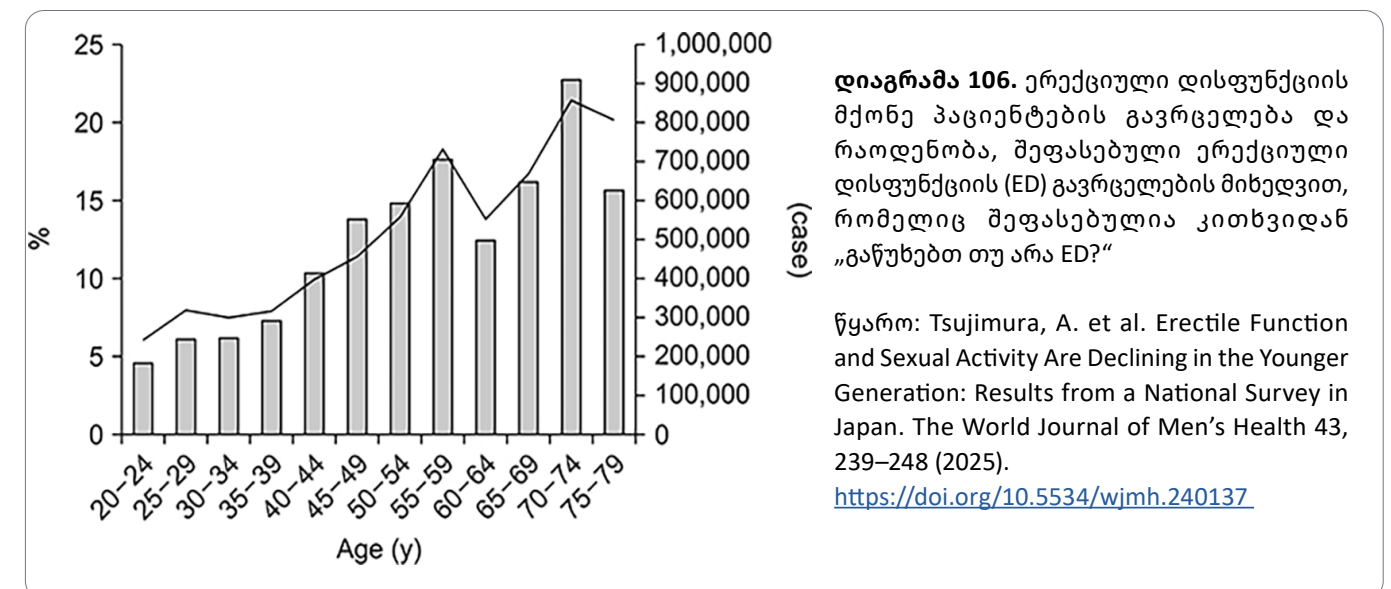
იაპონიაში ჩატარებული ეროვნული კვლევის შედეგებმა აჩვენა ერექციული ფუნქციის და სექსუალური აქტივობის დაქვეითება ახალგაზრდა თაობებში.²⁹⁰ ერექციის სიმტკიცის ქულის (EHS) საფუძველზე შეფასებამ გამოავლინა ერექციული დისფუნქციის (ED) 30.9%-იანი გავრცელება, რაც დაახლოებით 14 მილიონ მამაკაცს აწუხებს. სექსუალური სურვილი, ერექციის რიგიდობა, ორგაზმი და კმაყოფილება მოსალოდნელზე დაბალი იყო ახალგაზრდა იაპონელ მამაკაცებში, განსაკუთრებით 20-24 წლის ასაკში, თუმცა ეს ფაქტორები ასაკთან ერთად უარესდებოდა. აღსანიშნავია, რომ 20-24 წლის ასაკობრივ ჯგუფში გავრცელების მაჩვენებელი 26.6% იყო, რაც თითქმის 50-54 წლის ასაკობრივ ჯგუფში (27.8%) არსებული მაჩვენებლის ექვივალენტურია (სურ. 106, 107).

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

²⁹⁰Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

გარდა ამისა, ცალკე გლობალურმა კვლევამ აჩვენა, რომ ოთხიდან სამ მამაკაცს აღენიშნება ერექციული დისფუნქციის სიმპტომები, რაც მიუთითებს, რომ ეს მდგომარეობა იშვიათი არ არის და შეიძლება ნებისმიერი ასაკის მამაკაცებზე აისახოს. იაპონიაში სექსუალური ფუნქციის შესახებ პირველი ოფიციალური ეროვნული კვლევის თანახმად, რომელიც 1998 წელს ჩატარდა, დაახლოებით 11.3 მილიონ მამაკაცს აღენიშნებოდა საშუალო და სრული ერექციული დისფუნქცია. გარდა ამისა, იაპონიაში მამაკაცის უნაყოფობის შესახებ 1996 და 2015 წლებში ჩატარებულმა ეროვნულმა კვლევებმა გასაოცარი მონაცემები გამოავლინა. 2015 წლის კვლევაში, მამაკაცების 13.5%-ს ერექციული დისფუნქციის გამო მამაკაცის უნაყოფობა, როგორც ძირითადი მიზეზი, აწუხებდა, რაც თითქმის ოთხჯერ მეტია 1996 წელთან შედარებით.

ამჟამინდელი სამეცნიერო მტკიცებულებების ერთობლიობა მიუთითებს, რომ ორგანიზმში არსებული მიკრო- და ნანოპლასტიკები რეპროდუქციული ჯანმრთელობის გაუარესების ფარული, მაგრამ მნიშვნელოვანი მიზეზია. ეს ნაწილაკები აღწევენ რეპროდუქციულ ორგანოებში, აზიანებენ მიტოქონდრიის ფუნქციას, იწვევენ ანთებას, არღვევენ ჰორმონალურ ბალანსს და აზიანებენ დნმ-ს, რაც ამცირებს სპერმის მოძრაობას და მორფოლოგიურ ხარისხს. მათი არსებობა სპერმასა და ფოლიკულურ სითხეში მიუთითებს მათუნარზე, გადალახონ ბიოლოგიური ბარიერები და მოახდინონ ღრმა სისტემური ეფექტები. ეს საფრთხეს უქმნის არა მხოლოდ ინდივიდუალურ ჯანმრთელობას, არამედ მთლიანად კაცობრიობის მომავალ რეპროდუქციულ შესაძლებლობებს.



მნპ-ის შეღწევა პლაცენტარული ბარიერის გავლით და მისი გავლენა განვითარებად ორგანიზმზე

ნაყოფზე მიკრო- და ნანოპლასტიკების პრენატალური ზემოქმედება

ორსული ქალები განსაკუთრებით დაუცველები არიან მიკროპლასტიკების ზემოქმედების მიმართ.²⁹¹ დედის ორგანიზმში მოხვედრილ პლასტიკის ნაწილაკებს შეუძლიათ პლაცენტის გადალახვა, რაც ხელს უშლის ორსულობის მარეგულირებელი ჰორმონების სეკრეციას და ზრდის ნაადრევი მშობიარობის, მუცლის მოშლის და ნაყოფის განვითარების დარღვევების რისკს (სურ. 108). 2020 წელს, დაახლოებით 13.4 მილიონი ბავშვი (10-დან 1) დაიბადა ნაადრევად (<37 კვირაზე), რაც ჩვილ ბავშვთა სიკვდილიანობის წამყვან მიზეზად აქცევს. ნაადრევად დაბადებულ ჩვილებს სერიოზული დაავადებებისა და ქრონიკული დაავადებების მაღალი რისკი ემუქრებათ.²⁹²

ბავშვთა განვითარებადი ენდოკრინული სისტემა ძალიან მგრძნობიარეა პლასტიკის შემადგენლობაში შემავალი ქიმიკატების მიმართ, რომლებსაც შეუძლიათ ჰორმონების იმიტაცია ან დაბლოკვა²⁹³ (სურ. 109). ჩვილებთან კონტაქტი შეიძლება მოხდეს დედის რძის მეშვეობითაც კი. გარდა ამისა, ნანოპლასტიკას შეიძლება ჰქონდეს დაგვიანებული ეფექტი, რაც ხელს უშლის რეპროდუქციული უჯრედების ფორმირებას ბავშვობასა და მოზარდობაში, პოტენციურად ამცირებს ნაყოფიერებას ზრდასრულ ასაკში.

სისხლ-პლაცენტარული ბარიერი (BPB) მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დედასა და ნაყოფს შორის ნივთიერებათა ცვლის რეგულირებაში, იცავს ნაყოფს მავნე აგენტებისგან. თუმცა, კვლევები აჩვენებს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკებს შეუძლიათ BPB-ში შეღწევა.

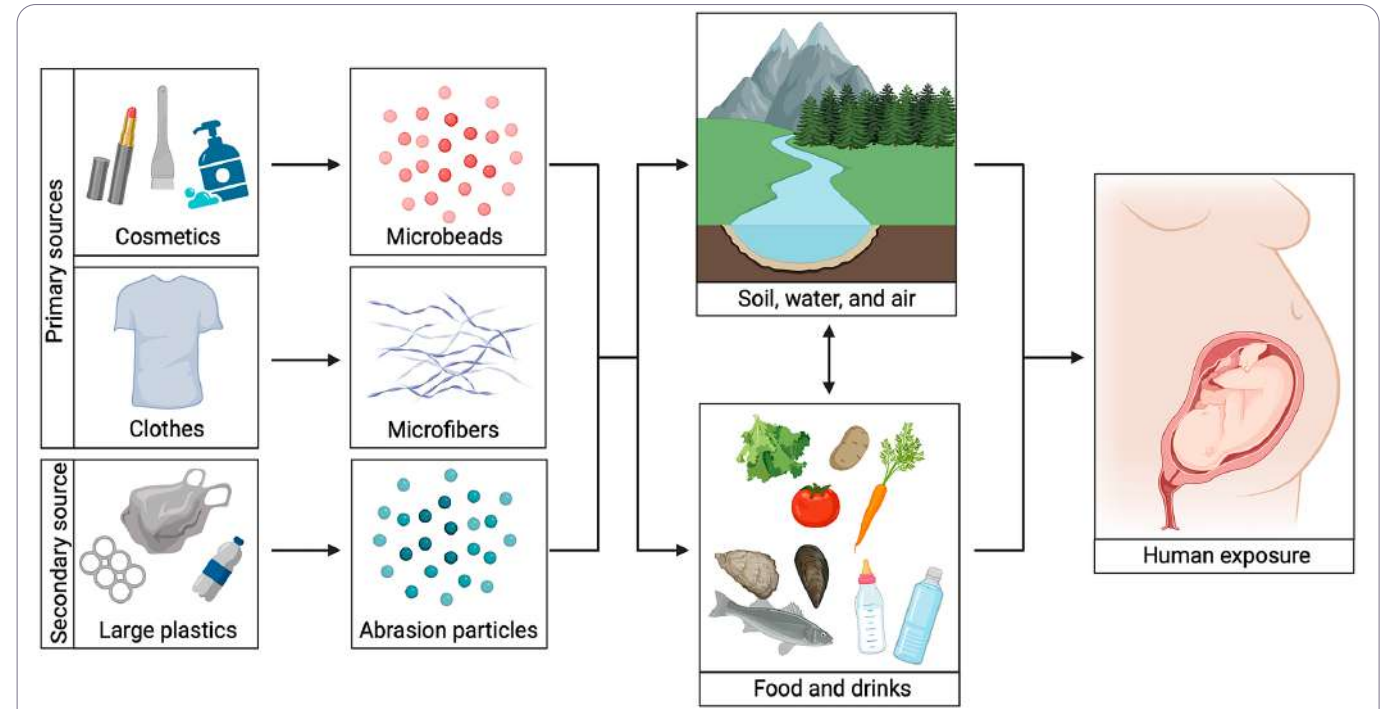
2020 წელს, ანტონიო რაგუსას ხელმძღვანელობით ჩატარებულმა კვლევამ რამანის მიკროსპექტროსკოპიის გამოყენებით (მეთოდი, რომელიც აანალიზებს სინათლის გაფანტვას მასალების ქიმიური შემადგენლობის დასადგენად) მიკროპლასტიკა აღმოაჩინა ნორმალური ორსულობის მქონე ექვსიდან ოთხი ქალის პლაცენტაში. ნიმუშები შეიცავდა 12 ნაწილაკს 5-10 მკმ დიამეტრით, მათ შორის პოლიპროპილენს და პიგმენტებს, რომლებიც გამოიყენება კოსმეტიკაში, საღებავებში, წებოვან მასალებსა და ჰიგიენურ საშუალებებში.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).

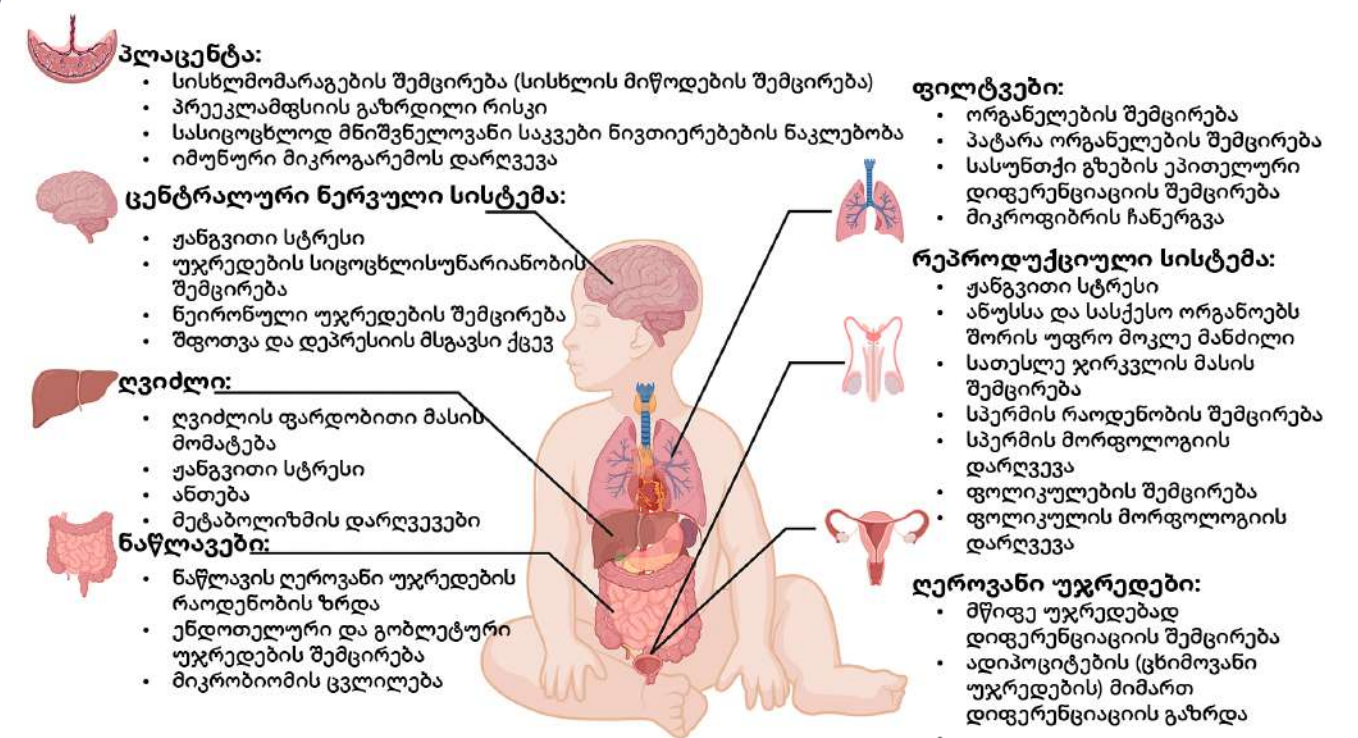
²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

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



სურათი 108. დედის მიერ მიკროპლასტიკის ზემოქმედება.

წყარო: 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>



სურათი 109. მიკროპლასტიკის გავლენა განვითარებადი ნაყოფის სხვადასხვა ორგანოებსა და ქსოვილებზე.

წყარო: 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>

ნიუ-მექსიკოს უნივერსიტეტის მიერ ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ნაადრევად დაბადებული ჩვილების პლაცენტაში მიკრო- და ნანოპლასტიკების კონცენტრაცია უფრო მაღალია, ვიდრე დროულად დაბადებული ჩვილების. 158 პლაცენტის მას-სპექტრომეტრიის გამოყენებით ანალიზმა აჩვენა, რომ ნაადრევად დაბადებულ ქალებს პლასტიკის ნაწილაკების უფრო მეტი დაგროვება ჰქონდათ.²⁹⁵

66

„როგორც ჩანს, ნანონაწილაკები არაპირდაპირ გავლენას ახდენენ საშვილოსნოში მყოფ ბავშვზე, „სისხლძარღვების ფორმირების ინჰიბირებით მაცნე ნივთიერებების მეშვეობით“, — ამბობს ბიოლოგი თინა ბურკი.²⁹⁶

ანომეტრის ზომის პოლისტიროლის ნაწილაკებმა შეიძლება გამოიწვიოს ტვინის განვითარების დარღვევები, განსაკუთრებით კოგნიტური დეფიციტი.²⁹⁷

კვლევის თანახმად, ორსულობისა და სიცოცხლის პირველი რამდენიმე თვის განმავლობაში მიკროპლასტიკის ზემოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს რეპროდუქციული ღერძისა და ცენტრალური ნერვული სისტემის მუდმივი ცვლილებები სხვადასხვა სახეობის მთამომავლობაში.²⁹⁸

ჩვილებში მიკრო- და ნანოპლასტიკების მშობიარობის შემდგომი ზემოქმედება

ახალშობილები გარემოდან მომდინარე მიკროპლასტიკების მუდმივ ზემოქმედებას განიცდიან.

2020 წელს ჩატარებულმა კვლევამ²⁹⁹ აჩვენა, რომ ჩვილებს დღეში 4.5 მილიონამდე პლასტიკის ნაწილაკის მიღება მხოლოდ პოლიპროპილენის ბოთლებით კვების შედეგად შეუძლიათ, რაც მსოფლიოში გამოყენებული ბავშვის ბოთლების უმეტესობას შეადგენს.

ჩვილებმა მიკროპლასტიკის ასევე შეიძლება დედის რძის მეშვეობით მიიღონ. 2022 წელს, 34 ჯანმრთელი ქალის დედის რძის ანალიზმა ნიმუშების 76%-ში მიკროპლასტიკის აღმოაჩინა³⁰⁰ (სურ. 110). მიკროპლასტიკებს შეიძლება ჰქონდეთ დავიანებული ეფექტი, რაც ბავშვობასა და მოზარდობაში რეპროდუქციული უჯრედების განვითარებას არღვევს, რამაც შეიძლება შეამციროს ნაყოფიერება ზრდასრულ ასაკში.

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.bjrt.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>

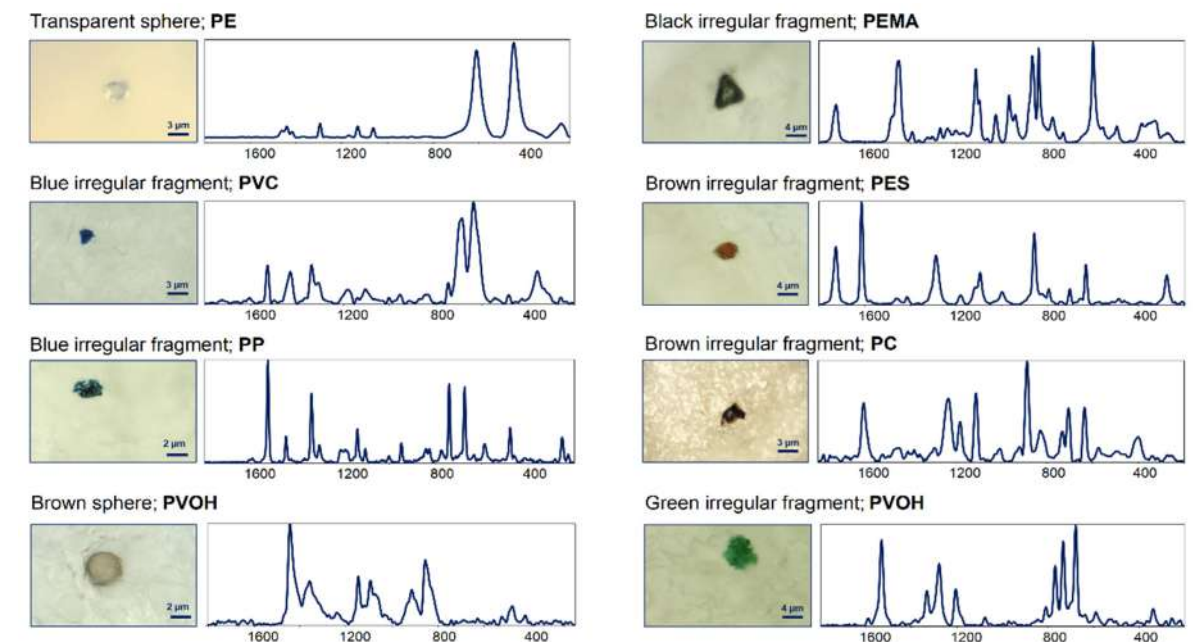
²⁹⁸ Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024).

<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>



სურათი 110. გაანალიზებულ დედის რძის ნიმუშებში აღმოჩენილი ზოგიერთი შერჩეული მიკროპლასტიკური ხსნარების მიკროფოტოები და რამანის სპექტრები (ტალღური რიცხვები, სმ⁻¹). PE: პოლიეთილენი; PVC: პოლივინილქლორიდი; PP: პოლიპროპილენი; PVOH: პოლივინილის სპირტი; PEVA: პოლი(ეთილენ-ვინილაცეტატი); PEMA: პოლი(ეთილმეტაკრილატი); PES: პოლიესტერი და PC: პოლიკარბონატი.

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

დამატებითი მონაცემები აჩვენებს, რომ ჩვილის განავალში მნპ-ის დონე 14-ჯერ მაღალია, ვიდრე მოზრდილებში.³⁰¹

ნანოპლასტიკები და მასთან დაკავშირებული ქიმიკატები არღვევენ დედის რძის მოლეკულურ სტრუქტურასა და ფუნქციონირებას. ამ ნაერთებს შეუძლიათ შეცვალონ ადამიანის დედის რძესა და ჩვილის ფორმულაში არსებული ცილები, რაც პოტენციურად იწვევს განვითარების პრობლემებს მოგვიანებით ცხოვრებაში.^{302, 303}

მნპ-ების მაღალი კონცენტრაცია კუმულაციურ ტოქსიკურ ეფექტს ახდენს განვითარებად ორგანიზმზე. ნანოპლასტიკისმა, უჯრედებში შეღწევით, შეიძლება გამოიწვიოს დნმ-ის სტრუქტურული დაზიანება და დაარღვიოს მეტაბოლური პროცესები. ეს ეფექტები ზრდის გენეტიკური მუტაციების და გრძელვადიანი პათოლოგიების რისკს, რაც საფრთხეს უქმნის მომავალი თაობების ჯანმრთელობას.

³⁰¹ 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>

³⁰² 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>

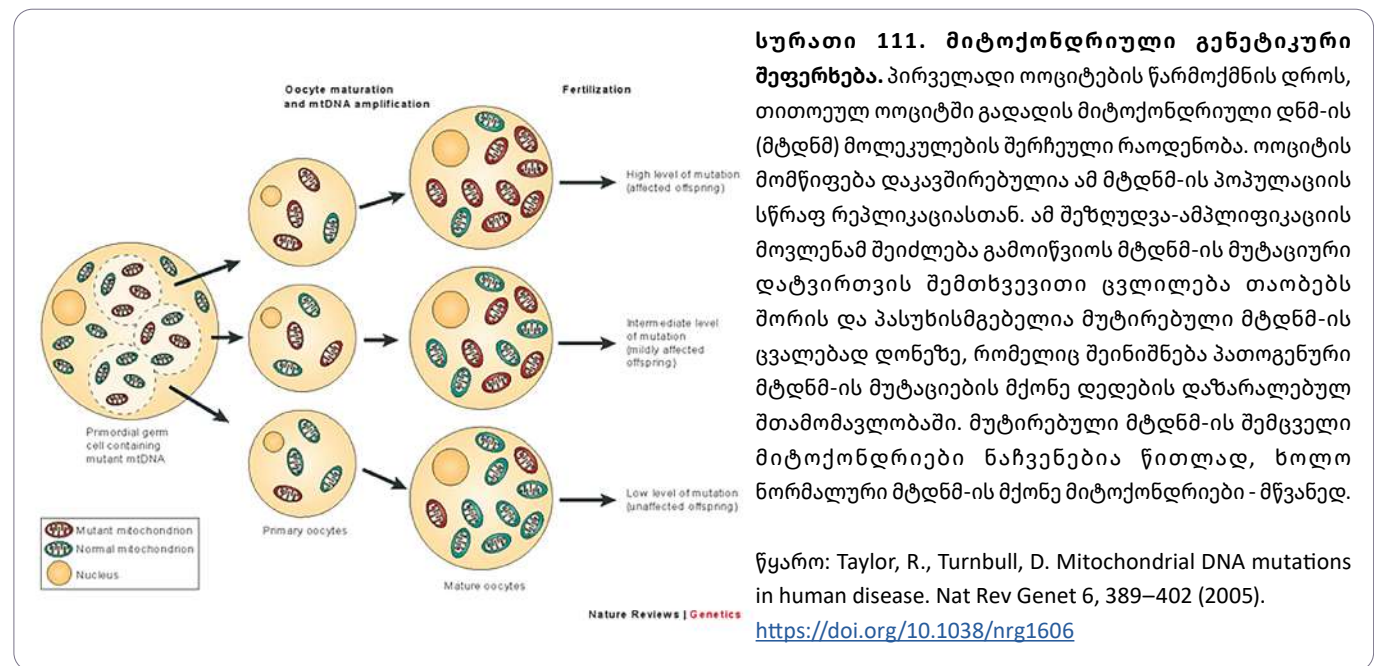
³⁰³ Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

მნკ-ების ზემოქმედების ეფექტები და მისი კავშირი თანდაყოლილ ანომალიებთან

ქსოვილებსა და უჯრედებში შეღწევის უნარის გარდა, მნკ-ებს კიდევ ერთი საშიში მახასიათებელი აქვთ: ისინი შეიძლება „მემკვიდრეობით“ გადაეცეს მომავალ თაობებს. უჯრედების დაყოფის დროს, მნკ-ების ფრაგმენტები ერთი უჯრედიდან მეორეში გადადის. მათი მცირე ზომისა და ელექტროსტატიკური მუხტის გამო, ამ ნაწილაკებს შეუძლიათ ადვილად გადალახონ ჰემატო-პლაცენტარული ბარიერი და შეაღწიონ ნაყოფის ქსოვილებსა და უჯრედებში, რაც მავნე ზემოქმედებას ახდენს განვითარებად ორგანიზმზე. როგორც ამ ანგარიშში ხაზგასმულია, მიკრო- და ნანოპლასტიკური ზემოქმედების ერთ-ერთი მთავარი შედეგია მიტოქონდრიული დისფუნქცია.

მენდელისეული რანდომიზებული კვლევის ბოლოდროინდელმა შედეგებმა მოგვაწოდა დამაჯერებელი მტკიცებულება მიტოქონდრიული ცილების ექსპრესიასა და თანდაყოლილი ანომალიების რისკს შორის მიზეზობრივი კავშირის შესახებ. კვლევაში გამოყენებული იქნა გენეტიკური ვარიანტები, როგორც ინსტრუმენტული ცვლადები, რათა შემცირებულიყო დაკვირვების მონაცემებთან დაკავშირებული მიკერძოებები. გამოკვლეული 66 მიტოქონდრიული ცილის მახასიათებელს შორის მნიშვნელოვანი ასოციაციები აღმოჩნდა გულის, ყურის, ნერვული სისტემის, სასქესო სისტემის და კიდურების განვითარების დეფექტებთან. ეს დასკვნები ადასტურებს ჰიპოთეზას, რომ მიტოქონდრიული აქტივობა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ემბრიონულ მორფოგენეზში.³⁰⁴

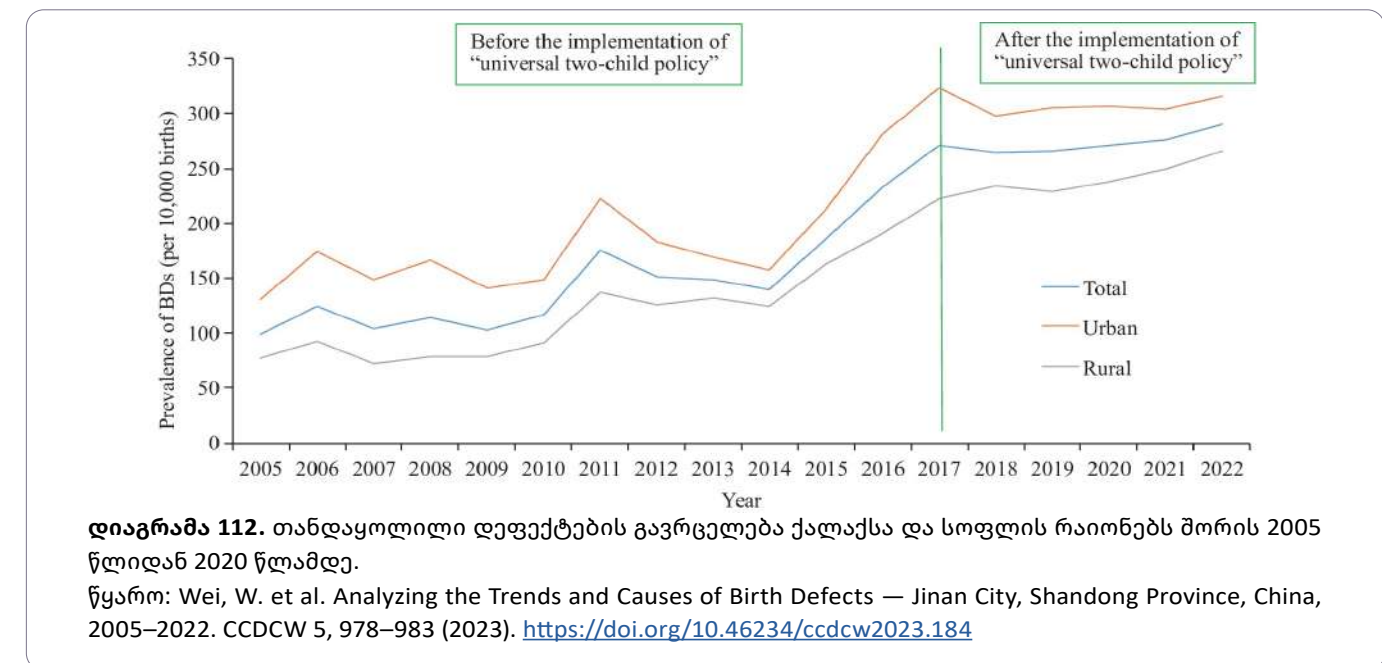
მიტოქონდრიული დნმ-ის (mtDNA) მუტაციები, მემკვიდრეობით მიღებული თუ *de novo* წარმოშობილი, პასუხისმგებელია კლინიკური სინდრომების ფართო სპექტრზე, მათ შორის MELAS, MERRF, NARP, Leigh სინდრომი და სხვა. ეს მუტაციები ძირითადად აზიანებს მაღალი ენერგეტიკული მოთხოვნილებების მქონე ორგანოებს, როგორიცაა გული, ტვინი, კუნთები და თვალეები. გადაცემა ხდება მხოლოდ დედის ხაზით, კვერცხუჯრედის მიტოქონდრიული წარმოშობის გამო (სურ. 111). ეს დარღვევები ხშირად ვლინდება სიცოცხლის ადრეულ ეტაპზე და ხასიათდება მძიმე ნევროლოგიური და მეტაბოლური დარღვევებით.



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>

მიტოქონდრიული დარღვევების მქონე ბავშვები ხშირად აწყდებიან განვითარების შეფერხებას, კუნთების სისუსტეს, კოგნიტურ დარღვევებს და კოორდინაციის პრობლემებს. ისეთმა მდგომარეობებმა, როგორიცაა კირნს-საირის სინდრომი, ბარტის სინდრომი, ალპერსის დაავადება და სხვა, შეიძლება გამოიწვიოს მძიმე შედეგები, მათ შორის ინვალიდობა ან სიკვდილიც კი.

ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში, ექიმები ახალშობილებში თანდაყოლილი დეფექტების შემამოფოთებელ ზრდას აფიქსირებენ. მხოლოდ ჩინეთში ეს მაჩვენებელი თითქმის სამჯერ გაიზარდა - 2005 წელს 10,000 დაბადებიდან 99.15-დან 2022 წელს 10,000-დან 290.27-მდე (სურ. 112).³⁰⁵ მსგავსი ტენდენციები სხვა ქვეყნებშიც შეინიშნება. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ზრდა მრავალი ფაქტორით არის განპირობებული, სამეცნიერო მტკიცებულებების მზარდი რაოდენობა მიუთითებს ახალ და სწრაფად მზარდ საფრთხეზე: მიკროპლასტმასს, განსაკუთრებით ნანოპლასტმასს, რომელსაც შეუძლია ემბრიონის ქსოვილებში შეღწევა და ორგანოებისა და ბიოლოგიური სისტემების ფორმირებაში ჩარევა.



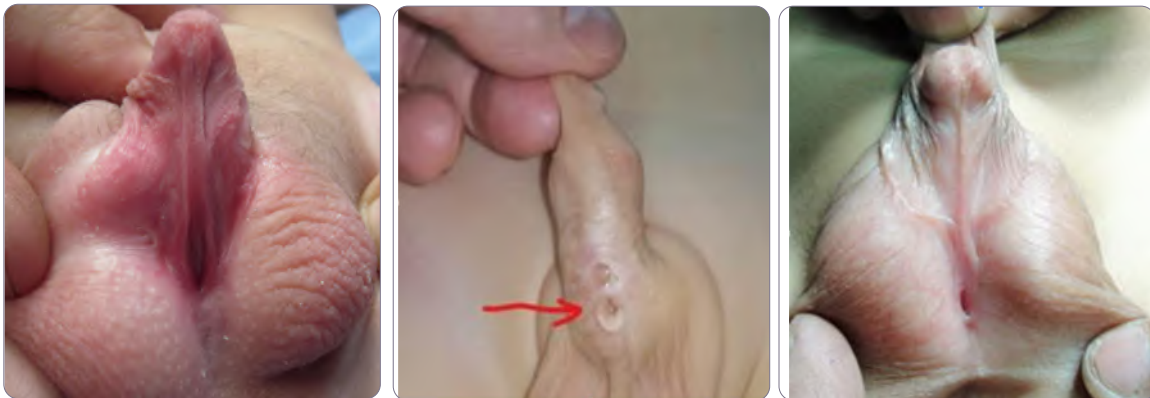
ნანოპლასტმასების მიერ გადატანილი ელექტროსტატიკური მუხტი განსაკუთრებულ საფრთხეს უქმნის ემბრიონის ქსოვილებს, სადაც ერთმა შეცდომამაც კი შეიძლება განვითარების ანომალია გამოიწვიოს. ეს ნაწილაკები ავლენენ უჯრედების ზედაპირებზე მომატებულ ადჰეზიას, მათ შორის ნერვული ქედის უჯრედებს - გულის, სისხლძარღვების და ქალა-სახის სტრუქტურების ფორმირებაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ. ქათმის ემბრიონებზე ჩატარებულ ექსპერიმენტულ კვლევებში ნანოპლასტმასმა გამოიწვია მძიმე დეფექტები, მათ შორის გულის და მსხვილი სისხლძარღვების მალფორმაციები. ერთ-ერთი ყველაზე სწრაფად მზარდი ანომალიაა გასტრომიზი - წინა მუცლის კედლის განვითარების დეფექტი, რომლის დროსაც ნაყოფის ორგანოები სხეულის გარეთ გამოდიან კანსა და კუნთში არსებული ნახვრეტიდან (სურ.113,114,115).საერთაშორისო მონაცემების თანახმად, ამ მდგომარეობის გავრცელება ბოლო სამი ათწლეულის განმავლობაში 161%-ით გაიზარდა, ხოლო 20 წლამდე ასაკის დედებში მაჩვენებლები რამდენჯერმე გაიზარდა.³⁰⁶ არსებობს ჰიპოთეზა, რომ ნანოპლასტმასები ხელს უშლიან მუცლის კედლის განვითარებას ორსულობის ადრეულ ეტაპზე (4-8 კვირა), იწვევს ანთებას და არღვევს მუცლის ღრუს კედლის დახურვას.

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>

**ნახატები 113-115. გასტრომიზი**

კიდევ ერთმა მდგომარეობამ - ჰიპოსპადიამ, თანდაყოლილმა დეფექტმა, რომლის დროსაც ბიჭებში შარდსადენი პათოლოგიურ ადგილას იხსნება³⁰⁷ - ასევე აჩვენა სტაბილური ზრდა (სურ. 116, 117, 118). მაგალითად, ამერიკის შეერთებულ შტატებში, 1997 წლიდან 2018 წლამდე, ჰიპოსპადიის შემთხვევები გაიზარდა დაახლოებით 1.06 შემთხვევით ყოველ 1000 ცოცხალ მამრობით დაბადებულზე (6.1-დან 7.16-მდე ყოველ 1000-ზე), რაც დაახლოებით 17%-იან ზრდას წარმოადგენს.³⁰⁸ ცხოველებზე ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ფტალატების - მიკროპლასტმასში ხშირად ნაპოვნი ქიმიკატების - ზემოქმედება არღვევს ტესტოსტერონის სინთეზს მამრობითი სქესის ნაყოფებში.

**ნახატები 116-118. ჰიპოსპადია**

ეს ნივთიერებები, რომლებიც ნანოპლასტმასის დამუხტულ ზედაპირს მიმაგრებულია, ადვილად გადადის სისხლში და პლაცენტაში, რაც აძლიერებს ჰორმონალურ დარღვევებს სქესობრივი დიფერენციაციის კრიტიკულ პერიოდებში. ამ ფონზე, გაიზარდა დაუნის სინდრომის, ტრისომიის, ატრიოვენტრიკულური გულის დეფექტების და სხვა სერიოზული დაავადებების შემთხვევები, 1999–2001 წლებში 10,000 ცოცხალ დაბადებაზე 12.78-დან 2016–2020 წლებში 10,000-ზე 15.55-მდე.³⁰⁹

ამავდროულად, ბავშვებში იზრდება ნეიროფსიქიატრიული პრობლემები, მათ შორის შფოთვითი აშლილობები და კოგნიტური დეფიციტი. მიუხედავად იმისა, რომ მიკროპლასტმასთან პირდაპირი მიზეზობრივი კავშირი ჯერ კიდევ კვლევის პროცესშია, ცნობილი მექანიზმები - როგორიცაა ანთება, ეპიგენეტიკური მოდულაცია და მიტოქონდრიული დისფუნქცია - იძლევა საფუძველს, ვივარაუდოთ მიკროპლასტიკა, როგორც ხელშემწყობი ფაქტორი.^{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>

დასკვნები და პერსპექტივები: შესაძლებელია

თუ არა მნპის ადამიანის ჯანმრთელობაზე ზემოქმედების შემცირება?

აგრეგირებული მონაცემების ანალიზი აჩვენებს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკები ადამიანის ჯანმრთელობისთვის მნიშვნელოვან და არასაკმარისად შეფასებულ რისკ-ფაქტორს წარმოადგენს. ამჟამინდელი სამეცნიერო მტკიცებულებები ნათლად მიუთითებს, რომ მიკრონანოპლასტიკები ადამიანის ორგანიზმზე გლობალური ტოქსიკური ტვირთის განუყოფელი ნაწილია. ბიოლოგიური ბარიერების გადალახვისა და სხვადასხვა ქსოვილებში - მათ შორის ტვინში, გულში, ფილტვებსა და პლაცენტაში - დაგროვების უნარის გამო, მიკრონანოპლასტიკები ტოქსიკურ ეფექტებს მოლეკულურ, უჯრედულ და სისტემურ დონეზე ახდენენ. ქიმიურ დანამატებთან და მათ ზედაპირზე ადსორბირებულ გარემოს დამაბინძურებლებთან ერთად, პლასტმასის ნაწილაკები ქრონიკული ანთების, ჟანგვითი სტრესის, მიტოქონდრიული დისფუნქციის და ღმ-ის მუტაციების გამომწვევი პროცესებს - საფუძვლად უდევს დაავადებათა ფართო სპექტრი, მათ შორის ნეიროდეგენერაციულ, ონკოლოგიურ, გულ-სისხლძარღვთა, ენდოკრინულ და აუტოიმუნურ დარღვევებს. განსაკუთრებით საგანგაშოა ის ფაქტი, რომ მიკრონანოპლასტიკები პრაქტიკულად არ გამოიყოფა ორგანიზმიდან, ასაკთან ერთად გროვდება ორგანიზმში და აძლიერებს მათ კუმულაციურ ზემოქმედებას.

ამჟამინდელი მტკიცებულებები ადასტურებს, რომ მიკროელემენტების ზემოქმედების თავიდან აცილება პრაქტიკულად შეუძლებელია: ისინი იმყოფებიან ჰაერში, რომელსაც ვსუნთქავთ, წყალში, რომელსაც ვსვამთ, საკვებში, რომელსაც ვჭამთ და ჩვენს მიერ მოხმარებული ცხოველებისა და მცენარეების უჯრედებშიც კი. შედეგად, ადამიანის ზემოქმედება პლასტმასის ნაწილაკებთან ყველგან და უწყვეტად ხდება, პრენატალური განვითარებიდან სიცოცხლის ბოლო ეტაპებამდე. შესუნთქვა განსაკუთრებით შემამფოთებელია, რადგან ნანონაწილაკებს შეუძლიათ ჰემატოენცეფალურ ბარიერს გვერდი აუარონ და პირდაპირ ტვინის ქსოვილში დაგროვდნენ, რაც ცენტრალურ ნერვულ სისტემას ერთ-ერთ ყველაზე დაუცველ სამიზნედ აქცევს.

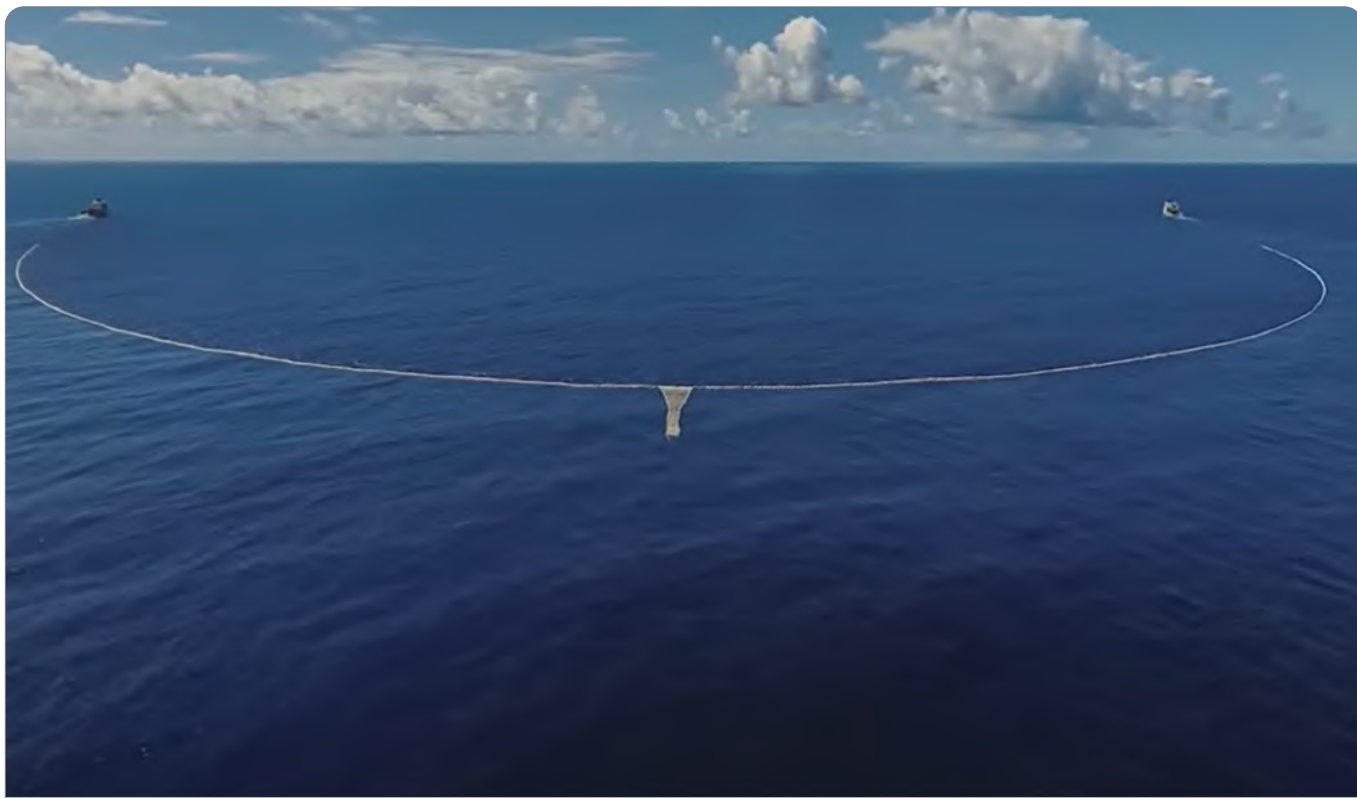
დამატებითი ბიოლოგიური რისკი გამომდინარეობს მიკროელემენტების ელექტროსტატიკური აქტივობიდან, რაც აძლიერებს მათ ურთიერთქმედებას ბიოლოგიურ სტრუქტურებთან და არღვევს უჯრედულ ჰომეოსტაზს. გარდა ამისა, მიკროელემენტებმა შეიძლება იმოქმედონ პათოგენების და ანტიბიოტიკების მიმართ რეზისტენტული მიკროორგანიზმების მატარებლებად, რაც პლასტმასის დაბინძურებას მკვეთრად ინტერდისციპლინურ განზომილებას ანიჭებს - ისეთს, რომელიც კვეთს ეკოლოგიას, ტოქსიკოლოგიას, იმუნოლოგიას, ნევროლოგიას და რეპროდუქციულ მედიცინას. ამ მხრივ, ALLATRA-ს მიერ შემოთავაზებული ერთ-ერთი სტრატეგიული მიმართულება, რომელიც ნანოპლასტმასების საფრთხის წინააღმდეგ ბრძოლის უფრო ფართო ძალისხმევის ნაწილია, არის ნანოპლასტმასების ელექტროსტატიკური მუხტის ნეიტრალიზაციის ან დაცვის მეთოდების შემუშავება. ასეთი ნაწილაკების ელექტროსტატიკური აქტივობის შემცირებამ შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს მათი მავნე ზემოქმედება და შეანელოს ორგანიზმში მათი დაგროვება. ამ ანგარიშის ავტორების აზრით, მუხტის დაცვის ან ნეიტრალიზაციის მეთოდებმა შეიძლება მინიმუმ 50%-ით შეამციროს ნანოპლასტმასებთან დაკავშირებული პოტენციური რისკები. ამან შეიძლება გადამწყვეტი დრო დაუთმოს ნანოპლასტმასების ღიაგნოსტიკის, პრევენციისა და ორგანიზმიდან ამოღების უფრო ყოვლისმომცველი სტრატეგიების შემუშავებას. ამ კონტექსტში, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი ხდება ბიოფიზიკის, ნანოტექნოლოგიისა და მოლეკულური ტოქსიკოლოგიის სფეროებში შემდგომი კვლევები.

ამ თემაზე სამეცნიერო პუბლიკაციების მზარდი რაოდენობის მიუხედავად, მრავალპროფილური ნაერთების ადამიანის ჯანმრთელობაზე გავლენა კვლავ ცუდად არის შესწავლილი და არასაკმარისად გათვალისწინებული საზოგადოებრივი ჯანმრთელობისა და გარემოს დაცვის სტრატეგიების შემუშავებისას. პლასტმასის დაბინძურების მასშტაბის, ამ ნაწილაკების ბიოლოგიური აქტივობისა და მათი ზემოქმედების პოტენციურად შეუქცევადი შედეგების გათვალისწინებით, ეს სფერო სამეცნიერო საზოგადოებისა და ჯანდაცვის ორგანოების მხრიდან სასწრაფო ყურადღებას მოითხოვს. ის ასევე მოითხოვს არსებული მონაცემების სისტემატიზაციას, სტანდარტიზებული რისკის შეფასების ჩარჩოების შემუშავებას და სამთავრობათაშორისო და საერთაშორისო სამეცნიერო თანამშრომლობის გაფართოებას.

პლასტმასით დაბინძურების შემცირების თანამედროვე სტრატეგიების ანალიზი

ტექნოლოგიები წყლის ეკოსისტემებიდან დიდი პლასტმასის ნამსხვრევების მოსაშორებლად

ოკეანის დაბინძურების შესამცირებლად მიმართული შემარბილებელი ღონისძიებები ძირითადად წყლის ზედაპირიდან ხილული, დიდი ზომის ნარჩენების მოცილებაზეა ორიენტირებული. დღემდე ერთ-ერთი ყველაზე ამბიციური პროექტია „ოკეანის დასუფთავების ინიციატივა“, რომელიც პლასტმასის და სხვა სახის მცურავი ნარჩენების შეგროვებას ისახავს მიზნად. მისი მცურავი სისტემები ზედაპირის ღონის ნარჩენებს იჭერს (სურ. 119), რომლებიც შემდეგ ხარისხდება და მზადდება გადამუშავებისთვის ან განადგურებისთვის.



სურათი 119. ეს სურათი ასახავს Ocean Cleanup ტექნოლოგიის მოქმედებას. გამძლე მასალისგან დამზადებული გრძელი, U-ფორმის მცურავი ბარიერი აგროვებს პლასტმასის ნარჩენებს ოკეანის ზედაპირზე.

წყარო: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans.
<https://theoceancleanup.com> (წვდომა 2025 წლის 1 მაისს).

მიუხედავად იმისა, რომ ეს მეთოდი იმედისმომცემია, გასათვალისწინებელია რამდენიმე კრიტიკული საკითხი:

1. **ნარჩენების შეგროვების პროცესი არ არის შერჩევითი**, რაც იმას ნიშნავს, რომ პლასტმასის ნარჩენებთან ერთად, შესაძლოა, ცოცხალი ორგანიზმებიც დაიჭირონ - როგორიცაა მიკროსკოპული წყალმცენარეები, თევზის ლარვები და მეღუბები. ამჟამად, არ არსებობს შემთხვევითი დაჭერის მოცულობის რაოდენობრივი შეფასება, მაგრამ ამ ორგანიზმების პოტენციურმა მასშტაბურმა მოცილებამ შეიძლება მავნე შედეგები მოიტანოს საზღვაო ეკოსისტემებისთვის ბუნებრივი კვებითი ჯაჭვების დარღვევით. საზღვაო სიცოცხლის დაცვისკენ მიმართული ზომების მიუხედავად, საკითხი კვლავ გადაუჭრელი რჩება.

2. აქტივისტები გულწრფელად არიან ერთგულნი ოკეანის გაწმენდის მიმართ, თუმცა **ამჟამინდელი ძალისხმევა არ არის საკმარისი მნიშვნელოვანი შედეგების მისაღწევად.**

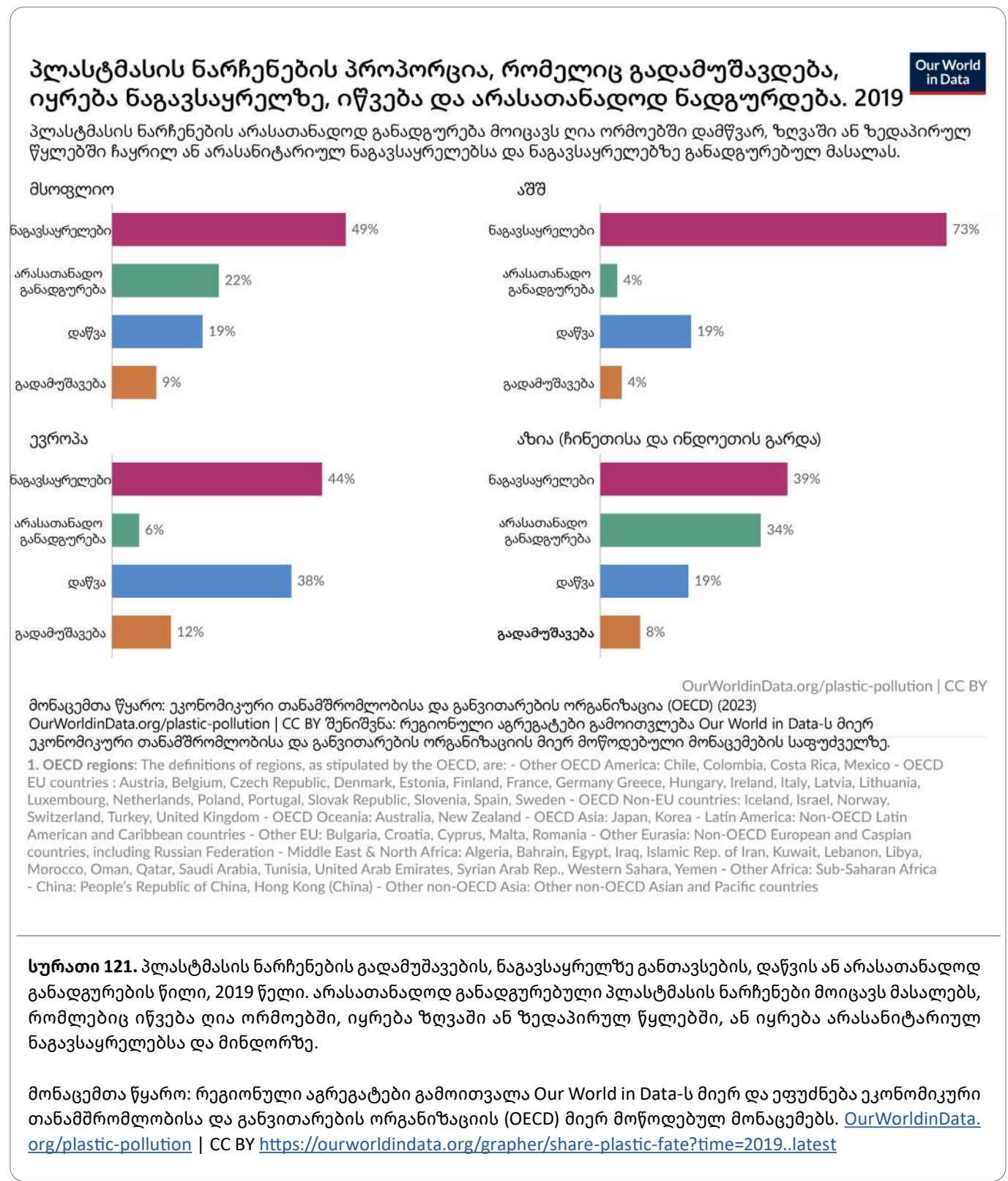
2024 წლის ნოემბრის მონაცემებით, ოკეანის დასუფთავების ინიციატივამ მსოფლიო ოკეანეებიდან დაახლოებით 20,000 ტონა პლასტმასის ნარჩენები ამოიღო. ეს უდავოდ აღსანიშნავი მიღწევაა. თუმცა, გლობალური კრიზისის ფონზე, ეს, ოკეანეს ამჟამად დაახლოებით 200 მილიონი ტონა პლასტმასის მხოლოდ 0.01%-ს შეადგენს. გარდა ამისა, მნიშვნელოვანია ახალი ნარჩენების მიმდინარე შემოდინების გათვალისწინება, რომელიც ყოველწლიურად დაახლოებით 11 მილიონ ტონას შეადგენს (სურ. 120). ეს მაჩვენებლები ხაზს უსვამს დასუფთავების ძალისხმევასა და პრობლემის მასშტაბებს შორის უზარმაზარ დისპროპორციას.



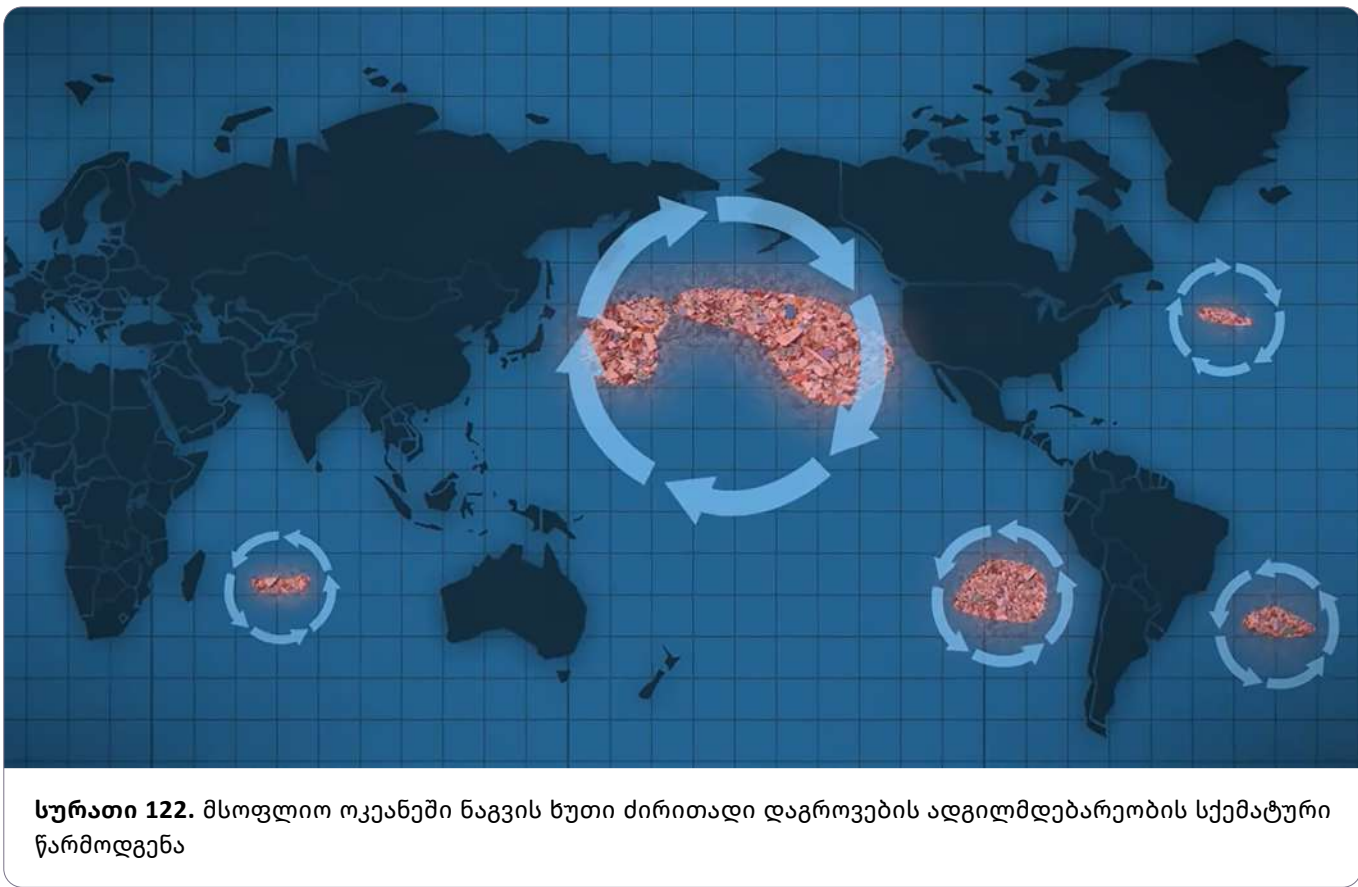
სურათი 120. გრაფიკი ადარებს ოკეანის პლასტმასით დაბინძურებასთან დაკავშირებულ სამ ძირითად მაჩვენებელს: ყოველწლიურად ოკეანეში ჩაყრილი მცურავი პლასტმასის ნარჩენების რაოდენობას და ოკეანის დასუფთავების პროგრამის მიერ ამოღებული პლასტმასის რაოდენობას.

წყარო: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (წვდომა 2025 წლის 1 მაისს).

3. მთავარ საკითხად რჩება შეროვებული პლასტმასის ბედი. პლასტმასის ნარჩენების ამჟამინდელი გლობალური გადამუშავების მაჩვენებელი 9%-ს არ აღემატება (სურ. 121). შედეგად, არსებობს დიდი ალბათობა იმისა, რომ აღდგენილი პლასტმასის მნიშვნელოვანი ნაწილი ნაგავსაყრელებზე მოხვდება, რაც გრძელვადიან პერსპექტივაში ვერ უზრუნველყოფს დაბინძურების პრობლემის მოგვარებას.

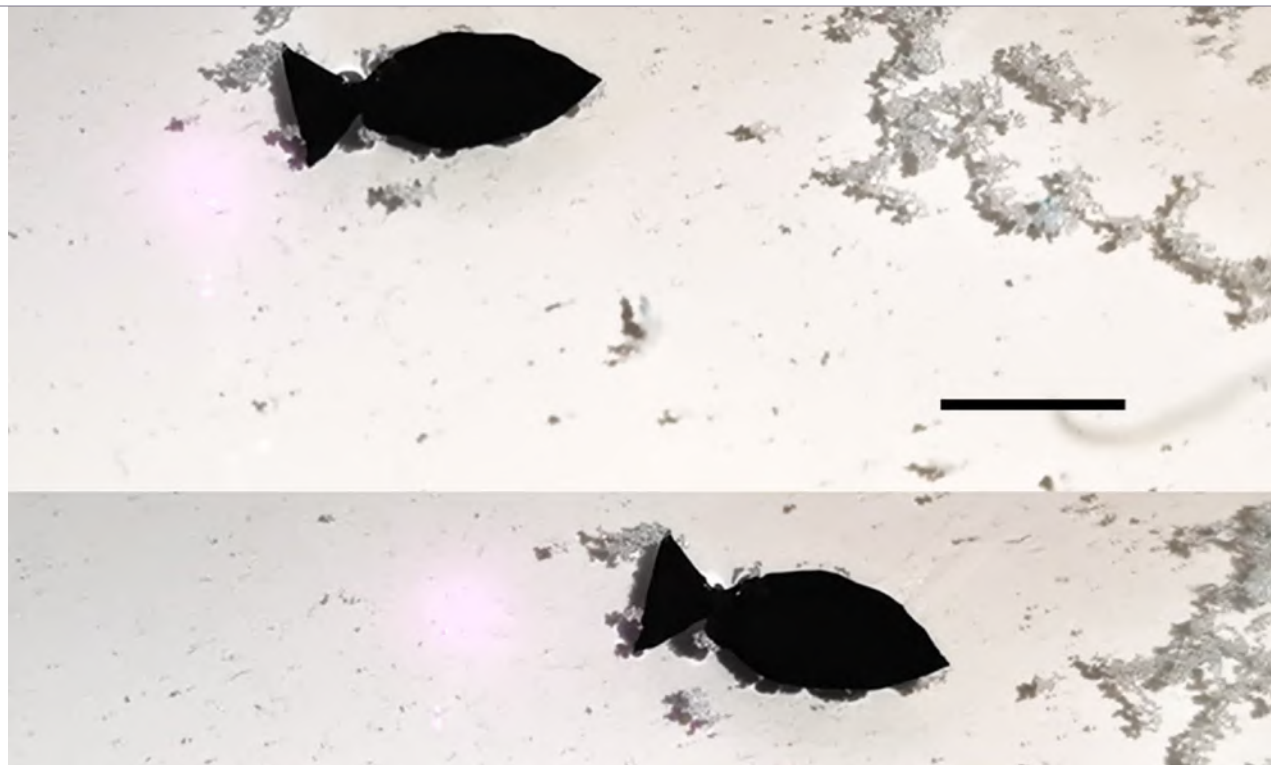


გარდა ამისა, ოკეანის გაწმენდის ოპერაციები მნიშვნელოვან ფინანსურ ხარჯებს მოიცავს. მაგალითად, დიდი წყნარი ოკეანის ნაგვის ლაქა შორს მდებარეობს რომელიმე ქვეყნის ტერიტორიული წყლებიდან, რაც ქმნის სიტუაციას, როდესაც არცერთი ცალკეული სახელმწიფო არ არის ცალსახად პასუხისმგებელი დასუფთავების სამუშაოების დაფინანსებაზე ან განხორციელებაზე. ჩარლზ მურის - ოკეანოგრაფისა და მკვლევრის, რომელმაც პირველმა აღმოაჩინა დიდი წყნარი ოკეანის ნაგვის ლაქა - ლაქას სრულმასშტაბიანი გაწმენდა „გაკოტრებას“ გამოიწვევს, რომელი ქვეყანაც ასეთ ძალისხმევას შეეცდება. ასევე მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ მსოფლიო ოკეანეებში ხუთი მსგავსი ნაგვის ლაქაა აღმოჩენილი (სურ. 122), რაც პრობლემას კიდევ უფრო ამწვავებს.



მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ დიდი ხილული ნარჩენები ოკეანეში პლასტმასის დაბინძურების უფრო ფართო პრობლემის მხოლოდ ნაწილია. ალფრედ ვეგენერის ინსტიტუტის საზღვაო ბიოლოგის, მელანი ბერგმანის თქმით, „ეს მხოლოდ ოკეანის ზედაპირზე არსებულ პლასტმასს ეხება, რომელიც ოკეანეში არსებულის მხოლოდ მცირე ნაწილს წარმოადგენს - 1%-ზე ნაკლებს.

რადგან პლასტმასი მიკრო და ნანოპლასტმასებად იშლება, ოკეანის ამ ტიპის დაბინძურებისგან გაწმენდის ამოცანა მნიშვნელოვნად უფრო რთული ხდება. წყლიდან მიკროპლასტმასის მოსაშორებლად რამდენიმე ექსპერიმენტული ტექნოლოგია უკვე არსებობს. მაგალითად, სიჩუანის უნივერსიტეტის მკვლევარებმა შექმნეს პაწაწინა რობოტი თევზი (სურ. 123), რომელსაც შეუძლია წყლის გარემოში ცურვა და მიკროპლასტმასის ახლომდებარე თავისუფლად მცურავი ნაწილაკების აღსორბცა.³¹¹ ეს 13 მილიმეტრიანი ბიონიკური რობოტი ეფექტურად აგროვებს მიკროპლასტმასს მისი სხეულის მასალებსა და მიკროპლასტიკურ კომპონენტებს შორის ძლიერი ქიმიური ბმებისა და ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედების წყალობით, როგორიცაა ორგანული საღებავები, ანტიბიოტიკები და მძიმე მეტალები.



სურათი 123. სურათზე გამოსახულია პაწაწინა რობოტული თევზი, რომელიც სიჩუანის უნივერსიტეტის მკვლევარებმა შექმნეს. ეს კომპაქტური მოწყობილობა, რომელიც ნამდვილ თევზს წააგავს, შეუძლია ცურვა და აქტიურად შთანთქავს თავისუფლად მოტივტივე მიკროპლასტმასს.

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

თუმცა, ამ ინოვაციების მიუხედავად, ასეთი ტექნოლოგიების პრაქტიკული გამოყენება გლობალური მასშტაბით ამჟამად შეზღუდულია. პაწაწინა რობოტები მიკროპლასტმასს მხოლოდ მათ უშუალო სიახლოვეს შთანთქავენ, რაც პროცესს ლოკალიზებულს ხდის. დიდი რაოდენობითაც კი, ისინი ვერ ფარავენ ოკეანის უზარმაზარ მასშტაბებს. უფრო მეტიც, ისინი შეიძლება კვებითი ჯაჭვის ნაწილი გახდნენ. ასევე არსებობს გაურკვევლობა რობოტების ფუნქციონირების უნართან დაკავშირებით ოკეანის მკაცრ პირობებში, როგორიცაა ღინებები, წნევა და მარილიანობა. ამიტომ, არსებული გადაწყვეტილებები ჯერ კიდევ არ არის საკმარისად ეფექტური და მასშტაბირების სერიოზული გამოწვევების წინაშე დგას.

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>

მიკრო- და ნანოპლასტმასების მოცილების თანამედროვე მეთოდები

იზრდება ინტერესი მიკროორგანიზმების, განსაკუთრებით ბაქტერიების, პოტენციური გამოყენების მიმართ სინთეზური პოლიმერების, განსაკუთრებით პოლიეთილენტერეფტალატის (PET) ფერმენტული დაშლისთვის. ეს ტექნოლოგია ხშირად წარმოდგენილია, როგორც ეკოლოგიურად სუფთა ალტერნატივა პლასტმასის ნარჩენების ტრადიციული განადგურების მეთოდებისა, როგორიცაა დაწვა. თუმცა, დღემდე დაგროვილი ემპირიული მონაცემები ეჭვქვეშ აყენებს მის ეფექტურობას, უსაფრთხოებას და მასშტაბირებას სამრეწველო გამოყენებისთვის.

2016 წელს, იაპონელი მეცნიერების გუნდმა შოსუკე ოდას ხელმძღვანელობით აღმოაჩინა ბაქტერია სახელწოდებით *Ideonella sakaiensis*, რომელსაც შეუძლია PET-ის დაშლა ორი ფერმენტის - PETase-ის და MHETase-ის - წარმოების გზით. ეს გარღვევა მნიშვნელოვანი მოვლენა იყო მიკრობიოლოგიაში.³¹² თუმცა, ლაბორატორიულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ დაშლის პროცესი უკიდურესად ნელია: ბაქტერიებს დაახლოებით შვიდი კვირა დასჭირდათ 20 გრამიანი პლასტმასის აკის დასაშლელად ოპტიმალურ პირობებში. ცხადია, დაშლის ეს ტემპი არ შეიძლება ჩაითვალოს დამაკმაყოფილებლად პლასტმასის დაბინძურების მასშტაბის მოსაგვარებლად. გლობალური მასშტაბით, სადაც ყოველწლიურად მილიონობით ტონა პლასტმასი ხვდება გარემოში, ასეთი ნელი ტემპი ჰგავს ოკეანის ჩაის კოვზით დაცლის მცდელობას.

მეცნიერული ძალისხმევა ფოკუსირებულია PETase ფერმენტის მოდიფიცირებაზე, რომელსაც ბაქტერიები პლასტმასის დასაშლელად იყენებენ. თუმცა, მკვლევარები აღიარებენ, რომ *Ideonella sakaiensis*-ის ფერმენტი ჯერ კიდევ ევოლუციის ადრეულ ეტაპზეა. მისი ეფექტურობა დაბალია, სტაბილურობა შეზღუდულია და რეაქციის დაჩქარებას ბუნებრივ გარემოში არ გვხვდება ტემპერატურა. გენეტიკური ინჟინერია კი ჯერ ვერ პროგნოზირებს, თუ რომელი მუტაციები გამოიწვევს რეალურად გაუმჯობესებას. როგორც აშშ-ის განახლებადი ენერგიის ეროვნული ლაბორატორიის წარმომადგენელმა ელიზაბეტ ბელმა თქვა, პროგრესი უფრო ჰგავს „ორი ნაბიჯი წინ, ერთი ნაბიჯი უკან“.

უფრო მეტიც, ფერმენტული დაშლა შორს არის უნივერსალურობისგან. თეორიულად, მხოლოდ გარკვეულ პლასტმასს, როგორიცაა PET, შეუძლია ამ გზით დაშლა. ჩვეულებრივი პლასტმასი, როგორიცაა პოლიეთილენი და პოლიპროპილენი, პრაქტიკულად არ ექვემდებარება მიკრობული დაშლას. Nature-ის მეცნიერები ამტკიცებენ: პლასტმასის უმეტესობა ძალიან ენერგომომხმარებით არის დატვირთული ბიოქიმიური საშუალებებით ეფექტურად დასაშლელად.

მაშინაც კი, თუ მაღალეფექტური მიკრობის შემუშავება შესაძლებელი იქნება, გაცილებით შემამფოთებელი კითხვა ჩნდება: შეიძლება თუ არა მისი უსაფრთხოდ გაშვება გარემოში? **ნებისმიერი გენმოდიფიცირებული ბაქტერია წარმოადგენს ეკოლოგიური კატასტროფის გამოწვევის პოტენციურ რისკს. ამჟამად, თითქმის ყველა ქვეყანა მკაცრად არეგულირებს ან მთლიანად კრძალავს ასეთი ორგანიზმების ველურ ბუნებაში გაშვებას.**

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>

მიზეზები ნათელია: უცნობია, თუ როგორ შეიძლება მოიქცნენ ეს ბაქტერიები „თავისი მისიის დასრულების“ შემდეგ. შეუძლიათ თუ არა მათ სხვა სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი ორგანული ნაერთების დაშლა? შეუძლიათ თუ არა მათ კონკურენცია გაუწიონ აუცილებელ მიკრობებს? შეუძლიათ თუ არა მათ კიდევ უფრო არაპროგნოზირებადი შედეგების მქონე მუტაციების გამოწვევა?

ამ გზით, ერთი გარემოსდაცვითი კრიზისი აღვილად შეიძლება შეიცვალოს მეორეთი - გაცილებით არაპროგნოზირებადი და დამანგრეველი.

მიუხედავად იმისა, რომ ბაქტერიული პლასტმასის დეგრადაციის ფუნდამენტურ კვლევას უდავო ღირებულება აქვს, ამ ეტაპზე ტექნოლოგია არ შეიძლება ჩაითვალოს პლასტმასის დაბინძურების პრობლემის ეფექტურ, მასშტაბირებად ან უსაფრთხო გადაწყვეტად.

კვლევა მიკროპლასტმასის მოცილებაზე მდუღარე წყლის გავლენის შესახებ: ეფექტურობა და რისკები

გუანჯოუს სამედიცინო უნივერსიტეტისა და ჯინანის უნივერსიტეტის (ჩინეთი) ბიოსამედიცინო ინჟინერიისა და მიკროპლასტიკის მკვლევრებმა ჩაატარეს კვლევა,³¹³ რომელიც იკვლევდა კალციუმის მარილის მაღალი შემცველობის მქონე მდუღარე წყლის (მაგ., ხისტი წყლის) გავლენას მიკროპლასტიკის მოცილებაზე.

მკვლევარებმა გუანჯოუს ქალაქიდან შეაგროვეს სხვადასხვა სიხისტის დონის ონკანის წყლის ნიმუშები. ნიმუშებს დაემატა სამი ტიპის პლასტმასის ნაწილაკი - პოლისტიროლი, პოლიეთილენი და პოლიპროპილენი - რომელთა ზომა 0.1-დან 150 მიკრომეტრამდე მერყეობდა. წყალი ხუთი წუთის განმავლობაში ადუღდა, შემდეგ გაცივდა და გაიზომა მიკროპლასტიკის ნარჩენის კონცენტრაცია.

დუდილის პროცესში კალციუმით მდიდარმა ხისტმა წყალმა წარმოქმნა უხსნადი კალციუმის კარბონატი (CaCO_3), რომელიც ფართოდ არის ცნობილი როგორც კირის ნალექი. მკვლევარებმა გამოთქვეს ჰიპოთეზა, რომ მიკროპლასტიკის ნაწილაკებს შეეძლოთ კალციუმის კარბონატის კრისტალებთან შეკავშირება და დალექვა, რაც შეიძლება ხსნიდეს მიკროპლასტიკის კონცენტრაციის დაკვირვებულ შემცირებას დუდილის შემდეგ.

ყველაზე მაღალი გამწმენდი ეფექტურობა დაფიქსირდა მაღალი სიხისტის წყლის ნიმუშებში (300 მგ CaCO_3 ლიტრზე), სადაც ადუღებამ მიკროპლასტმასის 90%-მდე მოხსნა. ამის საპირისპიროდ, რბილი წყლის ნიმუშებში (60 მგ CaCO_3 ლიტრზე ნაკლები) ეფექტი მნიშვნელოვნად სუსტი იყო, პლასტმასის ნაწილაკების მხოლოდ დაახლოებით 25% მოიხსნა.

თუმცა, მყარი წყლის ადუღების ზოგიერთი დადებითი ეფექტის მიუხედავად, მნიშვნელოვანი შემოფოთება ჩნდება: მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკების ჰაერში გამოყოფის პოტენციალი. წყლის დუდილისას წარმოიქმნება ორთქლი და მასთან ერთად მიკროპლასტიკური ნაწილაკები შეიძლება აეროზოლიზდეს. ამ ნაწილაკების შესუნთქვა გაცილებით სერიოზულ საფრთხეს უქმნის ჯანმრთელობას, ვიდრე საკვებით ან წყლით მიღება.

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>

კვლევები აჩვენებს, რომ შესუნთქვის შემდეგ, ნანოპლასტმასს შეუძლია ტვინში ორი საათის განმავლობაში მოხვედრა. ამის საპირისპიროდ, როდესაც მიკროპლასტმასი საჭმლის მომნელებელ სისტემაში ხვდება, მისი ნაწილი გამოიყოფა. პლასტმასის ნაწილაკების დაგროვება ტვინში დაკავშირებულია გრძელვადიან რისკებთან, რადგან მათი ტვინის ქსოვილებიდან მოცილება პრაქტიკულად შეუძლებელია.

ამგვარად, მიუხედავად იმისა, რომ ადუღებამ შესაძლოა შეამციროს მიკროპლასტიკის შემცველობა სასმელ წყალში, ის პოტენციურად ზრდის ჰაერწვეთოვანი გზით დაბინძურების რისკს, რაც უფრო დიდ საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას. ეს ხაზს უსვამს წყლის გაწმენდის უფრო უსაფრთხო და ეფექტური მეთოდების სასწრაფო აუცილებლობას.

პიროლიზი, როგორც პლასტმასის დამუშავების მეთოდი: ეფექტურობა და რისკები

პიროლიზი პლასტმასის ნარჩენების გადამუშავების ერთ-ერთი ტექნოლოგიაა, რომელიც დაფუძნებულია პლასტმასის მასალების თერმულ დაშლაზე მაღალ ტემპერატურაზე, შეზღუდული ჟანგბადის ხელმისაწვდომობის გარემოში. პროცესი, როგორც წესი, ტარდება 300-დან 800°C-მდე ტემპერატურაზე და იწვევს აირადი და თხევადი ნახშირწყალბადის ნაერთების წარმოქმნას, მყარი ნახშირბადის ნარჩენებთან ერთად.

მომატებულ ტემპერატურაზე, პლასტმასის მასალების პოლიმერული ჯაჭვები იშლება და ქმნის ნახშირწყალბადების ნარევს, რომლის გამოყენებაც საწვავად შეიძლება. თუმცა, ეს მეთოდი - პლასტმასის ტრადიციულ დაწვასთან ერთად - მნიშვნელოვან გარემოსდაცვით რისკებს შეიცავს ნანოპლასტმასის გამოყოფის გამო.

მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედებით, პლასტმასი იშლება ულტრაწვრილ ნაწილაკებად, მათ შორის ნანოპლასტმასებად (100 ნანომეტრზე პატარა ნაწილაკები). ეს ნაწილაკები იმდენად პატარაა, რომ თანამედროვე ფილტრაციის სისტემებს არ შეუძლიათ მათი სრულად დაჭერა, რაც მათ ატმოსფეროში გამოყოფას უწყობს ხელს.

პლასტმასის წვას ასევე თან ახლავს დიოქსინებისა და ფურანების გამოყოფა - მაღალტოქსიკური ნაერთები, რომლებიც ცნობილია კანცეროგენული ეფექტით.³¹⁴

ამრიგად, საწვავის წარმოებისთვის პიროლიზისა და პლასტმასის დაწვის გამოყენება ჰაერში გამონაბოლქვის მნიშვნელოვან რისკს შეიცავს, რაც საფრთხეს უქმნის არა მხოლოდ გარემოს, არამედ ადამიანის ჯანმრთელობასაც. პლასტმასის განადგურების ეს მეთოდი არ შეიძლება ჩაითვალოს გარემოს დაბინძურების კრიზისის უსაფრთხო ან მდგრად გადაწყვეტად. ასეთი საწვავის რეალური ღირებულება არის საფრთხე, რომელსაც ის უქმნის ადამიანის სიცოცხლეს და კეთილდღეობას.

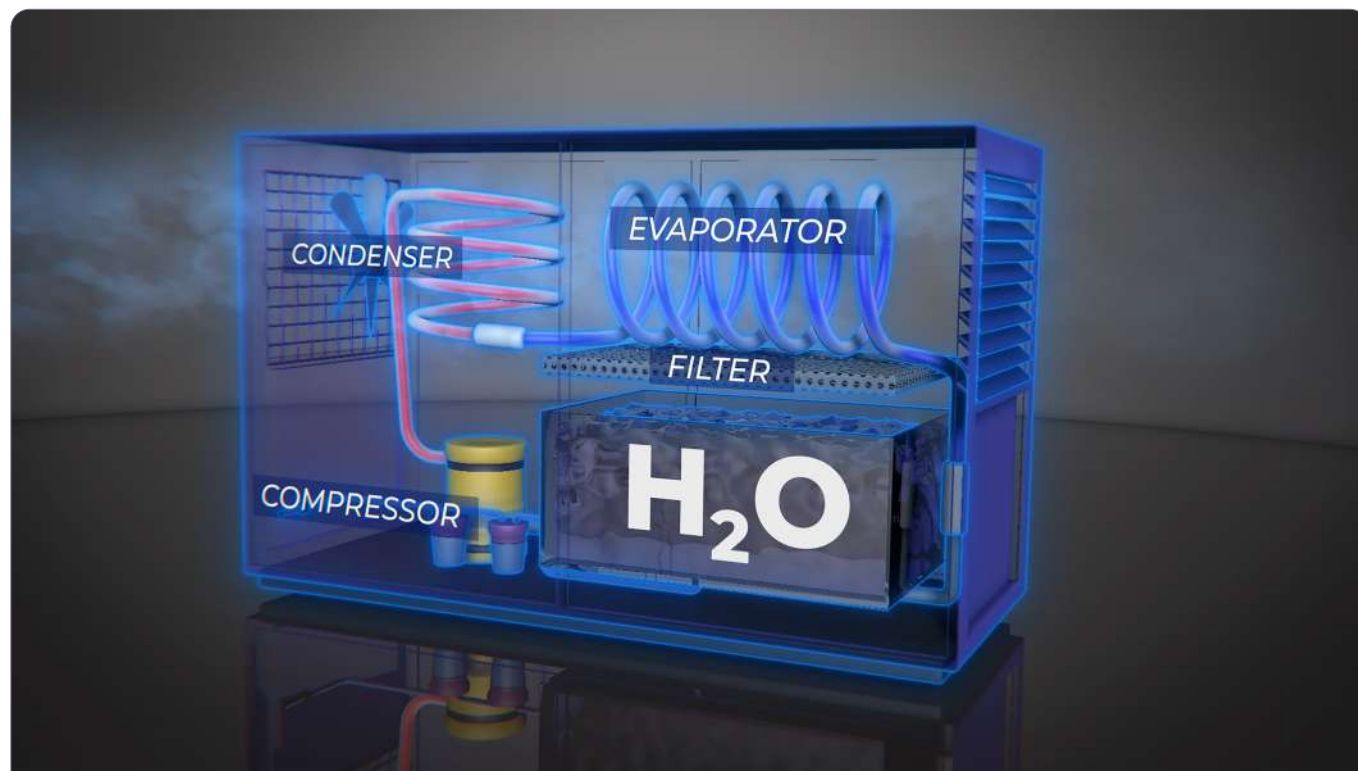
³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. Environmental Advances 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

ALLATRA-ს სამეცნიერო საზოგადოების მიდგომა მიკრო- და ნანოპლასტიკური ეპიდემიის წინააღმდეგ ბრძოლისადმი

ატმოსფერული წყლის გენერატორის (AWG) ტექნოლოგიები ოკეანის გაწმენდისთვის მნკ-ებიდან

ეკოლოგიური ბალანსის აღდგენა მოითხოვს ინოვაციური ტექნოლოგიების, როგორცაა ატმოსფერული წყლის გენერატორები (AWG), ფართოდ დანერგვას. დღესდღეობით, ეს სისტემები ხელმისაწვდომია ფართო ასორტიმენტში - საყოფაცხოვრებოდან სამრეწველო მოდულებამდე. AWG-ებს შეუძლიათ ჰაერიდან სასმელი წყლის წარმოება, ეფექტურად მოაშორონ დამაბინძურებლები, მათ შორის მიკროპლასტიკები (სურ. 124). წყლის მინერალიზაცია ასევე შესაძლებელია გემოს გასაუმჯობესებლად და ჯანმრთელობისთვის დამატებითი სარგებლის მისაღებად.

ეს გენერატორები მუშაობენ ჰაერში ბუნებრივად არსებული ტენიანობის კონდენსაციით.



სურათი 124. სურათზე ნაჩვენებია ატმოსფერული წყლის გენერატორის სქემატური გამოსახულება, რომელიც ასახავს მის კომპონენტებს და მუშაობის პრინციპს

AWG-ები ფუნქციონირებენ ორ ძირითად ტექნოლოგიაზე დაყრდნობით:

1. **კონდენსაციაზე დაფუძნებული ტექნოლოგია.** ეს მეთოდი გარემოს ჰაერს მოწყობილობაში იზიდავს და მას გაცივებულ ზედაპირზე ან გამაგრილებელ კოჭაზე ათავსებს, რაც იწვევს წყლის ორთქლის თხევად ფორმაში კონდენსაციას. პროცესი მსგავსია იმისა, თუ როგორ წარმოიქმნება კონდენსაცია საყინულედან ამოღებულ ცივ ობიექტზე. კონდენსაციაზე დაფუძნებული AWG-ები საუკეთესოდ მუშაობენ თბილ და ნოტიო გარემოში.

2. **აღსორბაციაზე დაფუძნებული ტექნოლოგია.** ეს მეთოდი იყენებს ტენიანობის შთანთქმელ მასალებს, როგორიცაა სილიციუმის გელი, ზეოლიტები ან მეტალ-ორგანული ჩარჩოები, ჰაერიდან ტენიანობის შესაგროვებლად. შთანთქმული წყალი შემდეგ გამოიყოფა მასალის გაცხელებისას.

დღესდღეობით, ასეთი სისტემები გამოიყენება ადგილობრივად სასმელი წყლით მომარაგებისთვის, მათ შორის კლიმატთან დაკავშირებული კატასტროფებით დაზარალებულ რაიონებში.

AWG-ების ფართომასშტაბიანი განლაგება, როგორც ინდუსტრიის, ასევე საზოგადოების საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად, შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს ოკეანის დაბინძურება რამდენიმე წელიწადში.

ამჟამად, საყოფაცხოვრებო წყლის წყაროები, მათ შორის სამზარეულოსთვის გამოყენებული წყალი, ხშირად მოდის რეზერვუარებიდან, რომლებიც შეიცავს მიკრო- და ნანოპლასტიკების მაღალ კონცენტრაციას. ეს დაბინძურებული წყალი ხელს უწყობს პლასტიკის დაგროვებას ადამიანის ორგანიზმში. დაბინძურებული წყაროების ნაცვლად, ჰაერიდან მიღებულ წყალზე გადასვლამ შეიძლება მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს სასმელი წყლის ხარისხი.

ეკოსისტემების აღდგენა ბუნებრივი ფილტრაციისა და ატმოსფერული წყლის გენერატორების გამოყენებით

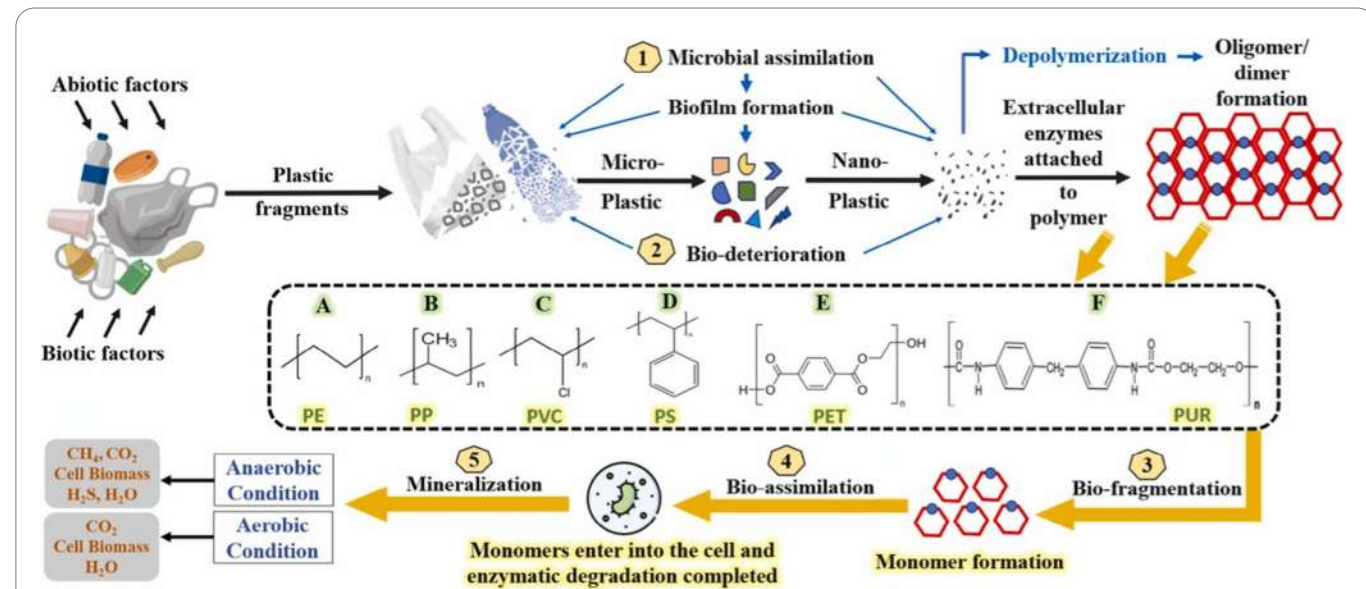
მიკროპლასტიკის გამოყენებული წყლიდან ეფექტურად მოსაშორებლად საჭიროა მოწინავე ტექნოლოგიების გამოყენება, მათ შორის თანამედროვე ფილტრაციისა და ასიმილაციის სისტემები. გარდა ამისა, ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ნაგებობები უნდა განახლდეს ისე, რომ გამოყენებული წყალი არ ჩაედინებოდეს წყლის ობიექტებში, არამედ მიმართული იყოს ნიადაგში - სადაც ბუნებრივ მიკროორგანიზმებს შეუძლიათ პლასტიკის დაშლა.³¹⁵

ეს მიკროორგანიზმები ფუნდამენტურად განსხვავდება ლაბორატორიებში შემუშავებული გენმოდიფიცირებული ან ხელოვნურად შექმნილი შტამებისგან. მათი არსებობა ეკოსისტემებში ბუნებრივია და ისინი არ ავლენენ ინვაზიური სახეობების მახასიათებლებს ამ გარემოში.

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>

კვლევები³¹⁶ აჩვენებს, რომ ნიადაგში მცხოვრები გარკვეული მიკრობები, რომლებიც ბუნებრივ გარემოში ბინადრობენ,³¹⁷ მნიშვნელოვან ეფექტურობას ავლენენ პოლიმერების,³¹⁸ როგორცაა პოლიეთილენი³¹⁹ და პოლიეთილენტერეფტალატი, დამლაში.³²⁰ მაგალითად, სოკოვანი დეგრადაციის ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი - პოლიეთილენის საშუალო მასის შემცირება $36.4 \pm 5.53\%$ -ით 16 კვირის განმავლობაში - დაფიქსირდა *Aspergillus oryzae* A5, 1 შტამში.

მიკრობების პოლიმერების ბიოდეგრადირების უნარი მდგომარეობს მათ მიერ ფერმენტების წარმოებაში, რაც მათ საშუალებას აძლევს დაშალონ პლასტიკის რთული მოლეკულური სტრუქტურები.³¹⁷



სურათი 125. მიკრო- და ნანო-პლასტიკების დამლა ბაქტერიული ფერმენტებით.

წყარო: 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>

ექსპერიმენტული დაკვირვებებით დადასტურებული ეს დასკვნები ხაზს უსვამს ბუნებრივი მიკრობული თემების პოტენციალს, შეამცირონ მიკრო და ნანოპლასტიკებით გარემოს დაბინძურება.

ინდოელი მკვლევარების მიერ ჩატარებული მიმოხილვითი კვლევის თანახმად,³¹⁸ „დღემდე არსებულ რამდენიმე რეზილიენტის ტექნიკას შორის, მიკრობული რეზილიენტია აჩვენა უკეთეს შესაძლებლობებს მზ-ების დეგრადაციის ან გარემოდან მდგრადი ამოღების შესახებ“.

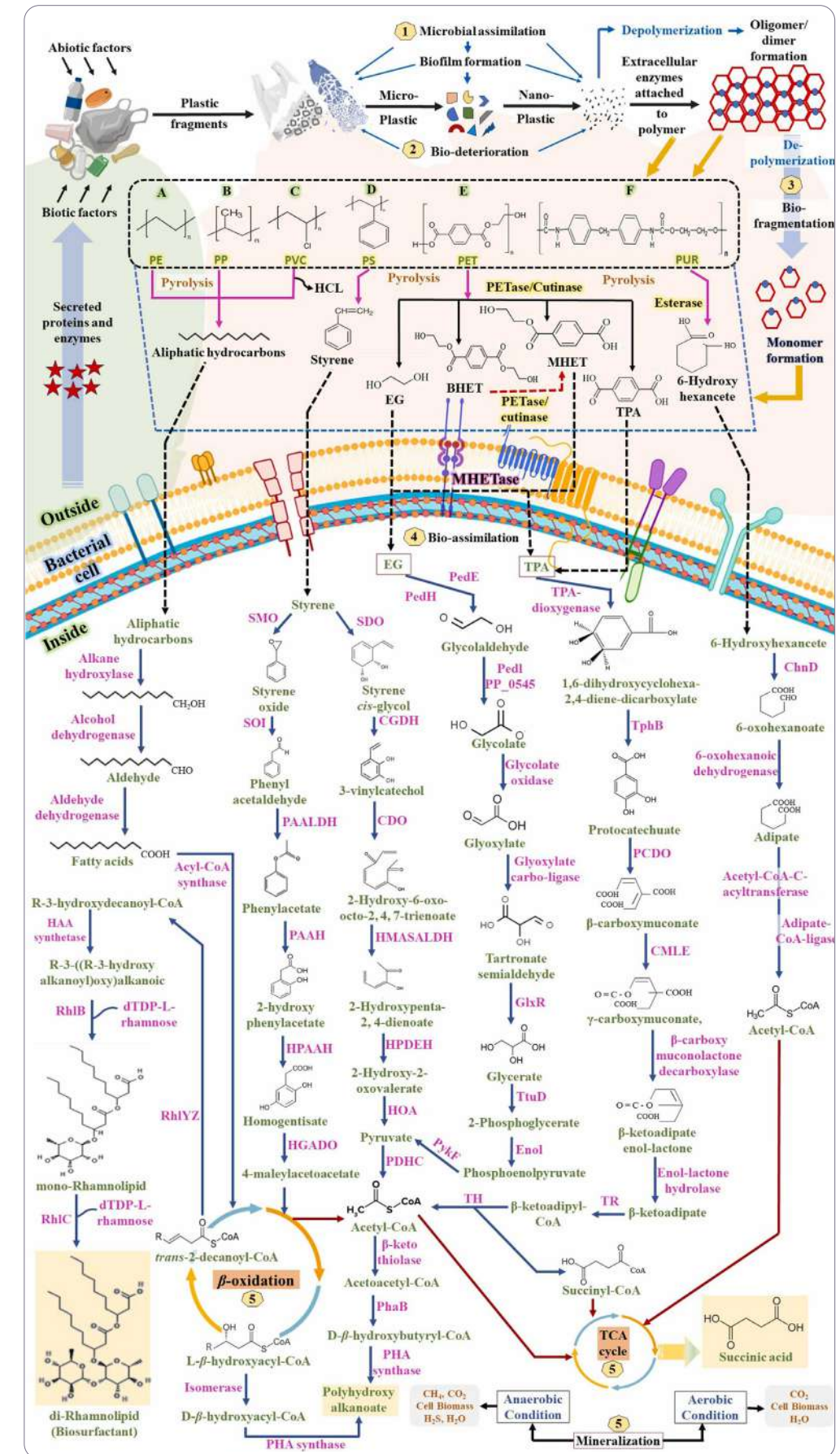
³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

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>

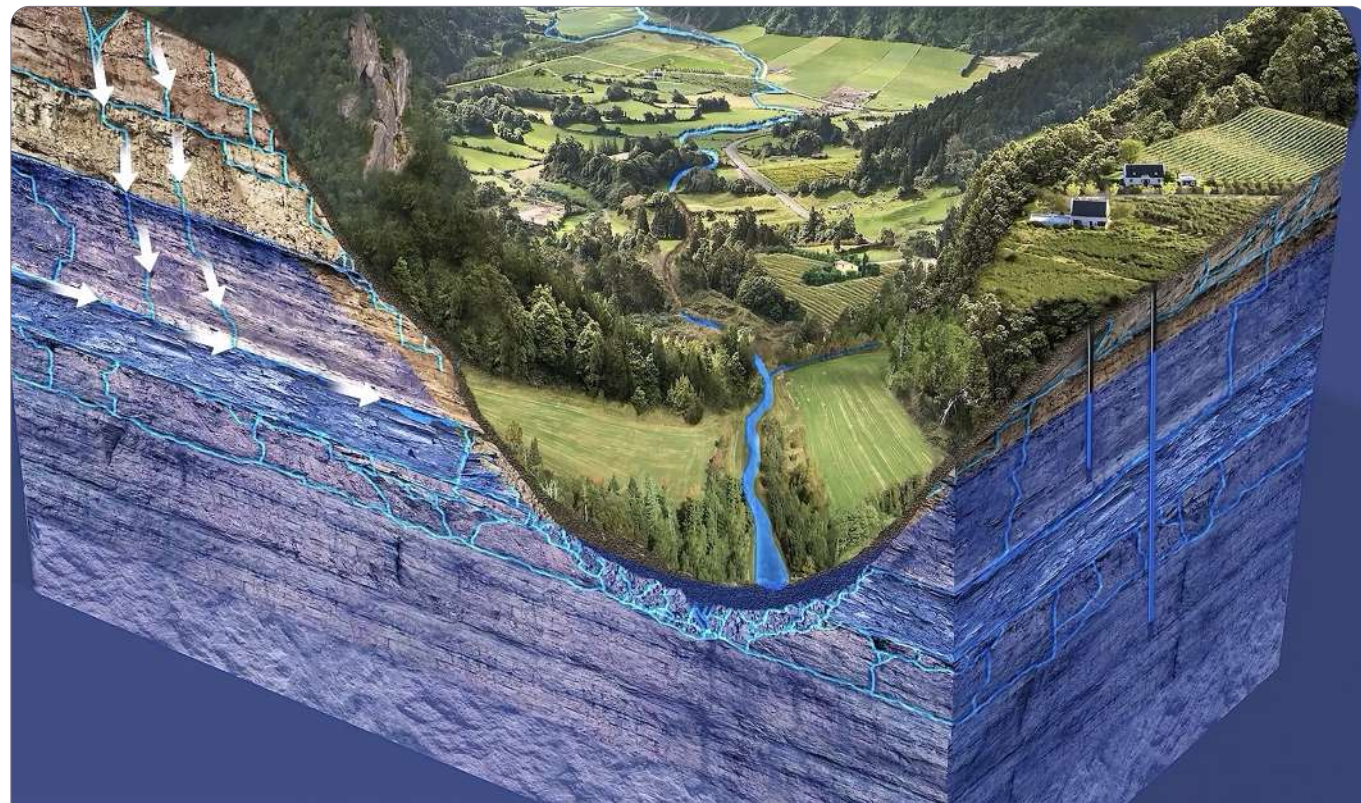


სურათი 126. სხვადასხვა აბიოტური და ბიოტური ფაქტორების გავლენის ქვეშ, გადაყრილი პლასტიკის იშლება მრავალნაწილად ნაერთებად.

წყარო: 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>

ამრიგად, ჰაერიდან მიღებული წყლის ტექნოლოგიებზე გადასვლა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს მოხმარებული წყლის ხარისხს. მიკრობული ადგენის ტექნიკასთან ერთად, ამ მიდგომას შეუძლია მნიშვნელოვნად შეამციროს გარემოში მიკრო და ნანოპლასტიკური დაბინძურება.

ნიადაგის ზედა ფენებში, ისევე როგორც წყლის ობიექტებში, პლასტმასის კონცენტრაცია გარკვეული დროის განმავლობაში მაღალი დარჩება. თუმცა, როდესაც წყალი უფრო ღრმად აღწევს მიწისქვეშეთში, ხდება ბუნებრივი თვითგამწმენდი პროცესი (სურ. 127). ნიადაგში მცხოვრები მიკროორგანიზმები ხელს უწყობენ პაწაწინა ნანოპლასტიკური ნაწილაკების დაშლას.



სურათი 127. გეოლოგიური წარმონაქმნების მეშვეობით ნიადაგში ჩაშვებული წყლის ბიოლოგიური შემდგომი დამუშავების პროცესის სქემატური წარმოდგენა. ისრებით ნაჩვენებია ჩამდინარე წყლების გზა ნიადაგისა და ქანების ფენებში, სადაც მიკროორგანიზმები და ფილტრის მასალები ამორევენ დამაბინძურებლებს. ნიადაგის ფენები მონიშნულია სხვადასხვა ფერით: ყავისფერი ნიადაგისთვის, ნაცრისფერი ქვიშისა და ხრუშისთვის

ნიადაგში მიმართული გაწმენდილი და გაფილტრული ჩამდინარე წყლების მოცულობის გაზრდა ხელს უწყობს მიკროორგანიზმების - ბაქტერიების, სოკოების და არქეების - ზრდას, რომლებიც ფუნდამენტურ როლს ასრულებენ ჯანსაღი ნიადაგის, საკვები ნივთიერებების ციკლისა და ეკოსისტემის საერთო მდგრადობის შექმნაში. დროთა განმავლობაში, ეს გაწმენდილი წყალი ღრმა ფენებში გაჟონავს და საბოლოოდ ოკეანეებში დაბრუნდება.

მშრალ რეგიონებში ატმოსფერული წყლის გენერატორების დაყენება, გამოყენებული წყლის ნიადაგში დაბრუნებასთან ერთად, წარმოადგენს პერსპექტიულ სტრატეგიას გლობალური წყლის კრიზისის მოსაგვარებლად და გაუდაბნობასთან საბრძოლველად. ეს ძალისხმევა ააქტიურებს

პროცესებს, რომლებიც ხელს უწყობს მცენარეულობისა და ეკოსისტემების აღდგენას.³²¹ AWG-ების გამოყენება ასევე გააუმჯობესებს ცხოვრების ხარისხს ადგილობრივ თემებში, სასმელი წყლის დეფიციტის პრობლემის გადაჭრის გზით.

მიკრობულ რემედიაციასთან ერთად, AWG-ების გამოყენება შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი ნაბიჯი მდგრადი წყლის მართვისა და დეგრადირებული მიწის აღდგენისკენ.

ატმოსფერული წყლის გენერატორების ტექნოლოგიაზე სრული გადასვლა გულისხმობს ატმოსფერული წყლის გამოყენებას ყველა ადამიანის საჭიროებისთვის - საყოფაცხოვრებო, სამრეწველო და სოფლის მეურნეობისთვის. ამ მიდგომის გლობალური მასშტაბით დანერგვა გაზრდის აორთქლების მაჩვენებლებს, რაც გამოიწვევს ოკეანის გაგრძელებას და ოკეანის წმენდის დაჩქარებას. გარდა ამისა, ატმოსფერული ტენიანობის ჭარბი შემცირებით, AWG-ებს შეუძლიათ შეამცირონ ექსტრემალური ნალექებისა და ქარის მოვლენების ინტენსივობა, რაც პოტენციურად შეამსუბუქებს სტიქიური უბედურებების დამანგრეველ გავლენას (დამატებითი ინფორმაციისთვის იხილეთ ფილმი „წყალი ჰაერიდან: კაცობრიობის გზა გადარჩენისკენ“).

ატმოსფერული წყლის გენერატორების გამოყენებასთან დაკავშირებული გამოწვევები და რისკები

თუმცა, AWG-ების ფართოდ გავრცელებას უარყოფითი მხარეც აქვს. ძირითადი შეშფოთება AWG-ის ადამიანის ჯანმრთელობაზე პირდაპირი ზემოქმედების არასაკმარის შეფასებაშია. მიუხედავად იმისა, რომ ტექნოლოგიას ნამდვილად შეუძლია წვლილი შეიტანოს ოკეანის წყლების გაწმენდაში და კლიმატურ სისტემაში თბოგამტარობის გაუმჯობესებაში, AWG-ების ფართომასშტაბიანმა გამოყენებამ ასევე შეიძლება გამოიწვიოს ატმოსფერული მიკროპლასტიკის კონცენტრაციების მნიშვნელოვანი ზრდა.

AWG-ის მოქმედების მექანიზმი გულისხმობს ატმოსფეროდან ტენიანობის კონდენსაციას, რომელიც შემდეგ ოკეანის წყლებიდან აორთქლების გზით აღდგება. რადგან ეს წყლები შეიცავს მიკროპლასტმასისა და ნანოპლასტმასის მაღალ კონცენტრაციას, ამ პროცესის დროს ატმოსფეროში შემავალი ორთქლი შეიძლება შეიცავდეს ულტრაწვრილ პლასტმასის ნაწილაკებს. შედეგად, რეგიონებში, სადაც AWG სისტემებია განლაგებული - მათ შორის მსხვილი მეტროპოლიტენის რაიონებში - ჰაერში ნანოპლასტიკის კონცენტრაცია, რომელსაც ადამიანები სუნთქავენ, შეიძლება გაიზარდოს სანაპირო ზონებში ამჟამად დაფიქსირებულ დონემდე. ეს სერიოზულ რისკს წარმოადგენს: ატმოსფერული ნანოპლასტიკის კონცენტრაციის ზრდა საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას. შესუნთქვით ნანოპლასტმასი შეიძლება დაგროვდეს ადამიანის სხეულში, მათ შორის ტვინში.

და ეს არის კრიტიკული წერტილი. აუცილებელია გვესმოდეს, რომ ოკეანის წყლის გასაწმენდად AWG-ების გამოყენების თავდაპირველი იდეა ALLATRA-ს მეცნიერებმა ოცი წელზე მეტი ხნის წინ შემოგვთავაზეს, იმ დროს, როდესაც ატმოსფერულ მიკროპლასტიკურ კონცენტრაციებს ჯერ

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>

კიდევ ძალიან დაბალი ჰქონდა. მაშინ ასეთი ტექნოლოგიების დანერგვას შეეძლო ხელშესახები გარემოსდაცვითი სარგებელი მოეტანა ადამიანის ჯანმრთელობისთვის სერიოზული რისკების გარეშე. თუმცა, სიტუაცია მკვეთრად შეიცვალა. ამჟამინდელ პირობებში, AWG-ების ფართომასშტაბიანი განლაგება, სავარაუდოდ, გაზრდის ჰაერში მნკ-ების კონცენტრაციას. ატმოსფერულ მნკ-ების ამჟამინდელი დონის უკვე მაღალი გათვალისწინებით, AWG-ების მეშვეობით დამატებითი მოცულობების დანერგვა შეიძლება საბედისწერო აღმოჩნდეს ადამიანის ჯანმრთელობისთვის

ამრიგად, ტექნოლოგია, რომელიც ოდესღაც პერსპექტიულად და ინოვაციურად ითვლებოდა, ახლა აქტუალობას კარგავს. როგორც გლობალურმა საზოგადოებამ, ჩვენ გამოვტოვეთ კრიტიკულად მნიშვნელოვანი ფანჯარა, რომლის დროსაც AWG-ები შეიძლებოდა სიცოცხლისუნარიანი გადაწყვეტის ფუნქციას ასრულებდნენ. კლიმატის პრობლემებისა და გარემოს დაბინძურების კონტექსტში, დროის ფაქტორი გადამწყვეტ როლს თამაშობს. ის, რასაც ორი ათწლეულის წინ შეეძლო მილიონობით ადამიანის ჯანმრთელობის შენარჩუნება და პლანეტის გაწმენდაში ნამდვილად წვლილის შეტანა, ახლა პოტენციურად სერიოზულ საფრთხეს წარმოადგენს. AWG აღარ არის მომავლის ტექნოლოგია - ეს არის ხელიდან გაშვებული შესაძლებლობის შეხსენება. ამჟამინდელ ვითარებაში, პრიორიტეტი უნდა გადავიდეს ატმოსფეროდან და ადამიანის სხეულიდან მრავალფეროვანი ნაერთების მოცილების მეთოდების შემუშავებაზე. უპირველეს ყოვლისა, ჩვენ უნდა მოვიგოთ დრო.

მიკრო- და ნანოპლასტიკების ტოქსიკურობის შემცირების ინოვაციური სამეცნიერო მიდგომა

მიკროპლასტიკების, განსაკუთრებით კი ნანოპლასტიკების, ადამიანის ჯანმრთელობაზე მრავალდონიანი და კუმულაციური ზემოქმედების შესახებ წარმოდგენილი მონაცემების გათვალისწინებით, აშკარა ხდება, რომ თანამედროვე ცივილიზაცია ეკოლოგიური და ბიოსამედიცინო გამოწვევის წინაშე დგას, რომელიც გარემოს დაბინძურების ტრადიციულ წარმოდგენებს სცილდება. ეს საკითხი გავლენას ახდენს არა მხოლოდ ინდივიდუალურ ბიოსფეროებზე, არამედ Homo sapiens-ის პოპულაციის გრძელვადიან მდგრადობაზეც.

დღემდე, ოდესმე წარმოებული პლასტმასის თითქმის მთელი რაოდენობა - 9 მილიარდ ტონაზე მეტი - აგრძელებს გარემოში დაგროვებას, განიცდის მიკრო და ნანო ზომის ნაწილაკებად ფრაგმენტაციას, რომლებიც ავლენენ მაღალ ქიმიურ და ბიოლოგიურ აქტივობას. მიკრო- და ნანოპლასტიკები აღმოჩენილია ნიადაგში, წყალში, ჰაერში და ყველა ძირითად საკვების კატეგორიაში, ბოსტნულიდან და ხილიდან დაწყებული ხორცით, თევზით, თაფლით, რძითა და მარილით დამთავრებული. ეს მიუთითებს პლასტმასის ნაწილაკების ფართოდ გავრცელებაზე კვების ჯაჭვში, რაც მნიშვნელოვნად ცვლის „უსაფრთხო“ ან „ჯანსაღი“ საკვების ტრადიციულ გაგებას.

ადამიანის ორგანიზმში ნაწილაკების შეღწევის გზა დიდწილად განსაზღვრავს მათ ბიოლოგიურ ქცევას და განაწილებას. მიუხედავად იმისა, რომ საჭმლის მომნელებელი ტრაქტიდან შემავალი პლასტმასი შეიძლება ნაწილობრივ გამოიყოფა, შესუნთქვის გზა მნიშვნელოვნად მაღალ რისკს წარმოადგენს. შესუნთქული ნანოპლასტიკები ფილტვის ქსოვილში ილექება, კვეთს ჰემატოენცეფალურ ბარიერს და შეიძლება პირდაპირ მიაღწიოს ტვინს, სადაც დროთა განმავლობაში შეიძლება დაგროვდეს. ბუნებრივი დეტოქსიკაციის მექანიზმებს (როგორიცაა ღვიძლი და თირკმელები) არ აქვთ ამ ნაწილაკების ამოცნობისა და მოცილების ეფექტური საშუალებები.

მიკროპლასტმასის ყველაზე მაღალი კონცენტრაცია გვხვდება წყლის ობიექტებთან, სანაპირო ზონებთან და ტყიან ტერიტორიებთან ახლოს, განსაკუთრებით მაღალი ტენიანობისა და ტემპერატურის პირობებში. ასეთ ლანდშაფტებში პლასტმასი უფრო დიდხანს რჩება, მონაწილეობს აეროზოლის ტრანსპორტირებაში, იწვევს ჟანგვით სტრესს მცენარეებში და ამცირებს ფოტოსინთეზური პროცესების ეფექტურობას. სანაპირო დასვენება, რომელიც ოდესღაც ჯანმრთელობის ხელშეწყობ აქტივობად ითვლებოდა, ახლა დამატებით ინჰალაციის ტვირთს ატარებს: შეფასებების თანახმად, ღია წყლის ობიექტებთან ახლოს შესუნთქული პლასტმასის მოცულობა შეიძლება ბევრჯერ აღემატებოდეს ურბანული გარემოს მაჩვენებლებს.

ეპიდემიოლოგიური კვლევები აჩვენებს თანმიმდევრულ კორელაციას მიკრო და ნანოპლასტიკური (მნკ) დაბინძურების დონესა და ქრონიკული არაგადამდები დაავადებების, მათ შორის ჰიპერტენზიის, დიაბეტის, ინსულტის, ასევე დეპრესიული და კოგნიტური დარღვევების გავრცელებას შორის. ბიოლოგიური ბარიერების გადალახვისა და სხვადასხვა ქსოვილებში, მათ შორის ტვინში, გულში, ფილტვებსა და პლაცენტაში დაგროვების უნარის გამო, მნკ -ები ახდენენ ტოქსიკურ ეფექტებს მოლეკულურ, უჯრედულ და ორგანოთა დონეზე. როდესაც პლასტმასი გროვდება სხეულში, ისინი იწვევენ იმუნოსუპრესიულ, ანთებით და გენოტოქსიკურ ეფექტებს. ამ რისკების იდენტიფიცირების პროგრესის მიუხედავად, ადამიანის სხეულიდან მნკ-ების ნეიტრალიზაციისა და მოცილების ეფექტური მექანიზმები ჯერ კიდევ არ არის შემუშავებული.

ნანოპლასტიკების ერთ-ერთი ყველაზე კრიტიკული თვისება სისტემური ბიოლოგიური შედეგებით არის მათი ელექტროსტატიკური მუხტის შენარჩუნების უნარი. ინერტული ნაწილაკებისგან განსხვავებით, ნანოპლასტიკები აქტიურად ურთიერთქმედებენ უჯრედის ზედაპირებთან, ცილებთან, რეცეპტორებთან და გენეტიკურ მასალასთანაც კი, ქმნიან სტაბილურ მოლეკულურ დონის კავშირებს. ეს თვისება არა მხოლოდ აძლიერებს ნანოპლასტიკის შეღწევას ბიოლოგიურ ბარიერებში, მათ შორის ჰემატოენცეფალურ ბარიერში, არამედ ხელს უშლის მათ ელიმინაციას, რაც იწვევს ქსოვილებში, განსაკუთრებით ტვინში, ხანგრძლივ შეკავებას. ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედებები იწვევს უჯრედული დარღვევების კასკადს, მათ შორის მემბრანის დეპოლარიზაციას, მიტოქონდრიულ დისფუნქციას, ჟანგვით სტრესს და აპოპტოზს, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის ტოქსიკურობას ნანოპლასტიკური ნაწილაკების მინიმალური კონცენტრაციის დროსაც კი.

ამ ანგარიშის ავტორები გვთავაზობენ, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკების

ელექტროსტატიკური მუხტის ნეიტრალიზაციის ან დაცვის გადაწყვეტა-შესაძლოა წარმოადგენდეს ფუნდამენტურ გარღვევას, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს ნანოპლასტიკის ბიოლოგიური აქტივობა და შეანელოს მათი დაგროვების სიჩქარე კრიტიკულ ორგანოებში. ავტორების შეფასებით, ელექტროსტატიკური მუხტისგან დაცვამ ან ნეიტრალიზაციამ შეიძლება შეამციროს მიკრო და ნანოპლასტიკის პოტენციური საფრთხე მინიმუმ 50%-ით, რაც ამ კვლევის სფეროს კრიტიკულად მნიშვნელოვანს გახდის. ამან შეიძლება სამეცნიერო საზოგადოებას მისცეს საჭირო დრო, რათა შეიმუშაოს უფრო ყოვლისმომცველი მიდგომები მნკ-თან დაკავშირებული ეფექტების ღიაგნოსტიკის, დეტოქსიკაციისა და პრევენციის

მიმართულებით. ამ მხრივ, ბიოფიზიკის, ნანომასალების მეცნიერებისა და მოლეკულური ტოქსიკოლოგიის კვლევა უმნიშვნელოვანესი იქნება. ამ საკითხის გადაჭრის შეფერხებამ შეიძლება დააჩქაროს დეგრადაციის პროცესები.

ბიოსამედიცინო გადაწყვეტილებებთან ერთად, სასწრაფოდ საჭიროა პლასტმასის ნარჩენების უსაფრთხო დამუშავების მეცნიერულად დასაბუთებული სტრატეგია. ნარჩენების განადგურების ამჟამინდელი სისტემები ვერ ახერხებენ პლასტმასის შემდგომი ფრაგმენტაციისა და ბიოსფეროში მათი მოხვედრის თავიდან აცილებას. გლობალიზაციის კონტექსტში აუცილებელია საერთაშორისო ტექნოლოგიური პლატფორმის შემუშავება პლასტმასის უსაფრთხო შეგროვებისა და გადამუშავების მეთოდების შესაქმნელად, განსახორციელებლად და მასშტაბირებისთვის. ასეთი ზომების მიღწევა შესაძლებელია მხოლოდ ინსტიტუციური მხარდაჭერით, საზღვრისპირა რეგულაციებითა და სამეცნიერო დიპლომატიით.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი გახდა სამეცნიერო საზოგადოების, ჯანდაცვის სპეციალისტებისა და ფართო საზოგადოების ცნობიერების ამაღლება. დღეისათვის, ადამიანების უმეტესობამ არ იცის მიკრო- და ნანოპლასტმასების (მნპ) ზემოქმედების სრული მასშტაბის შესახებ და უნებლიედ აგრძელებს მათ გავრცელებას.

ამრიგად, მიკრო- და ნანოპლასტმასების საკითხი აღარ წარმოადგენს პოტენციურ საფრთხეს და სისტემურ რისკ-ფაქტორად გადაიქცა. ახლა ეს სფერო მოითხოვს სამეცნიერო საზოგადოებისა და ჯანდაცვის ორგანოების პრიორიტეტულ ყურადღებას, მონაცემთა სისტემატიზაციას, რისკის შეფასების სტანდარტების შემუშავებას და სამთავრობათაშორისო და საერთაშორისო თანამშრომლობის გაძლიერებას. ეფექტური გადაწყვეტილებების შესამუშავებლად, რომლებიც უზრუნველყოფს ბიოლოგიურ უსაფრთხოებას როგორც მოკლევადიან, ასევე გრძელვადიან პერსპექტივაში, აუცილებელია ინტერდისციპლინარული მიდგომა, ინსტიტუციური აღიარება და ძალისხმევითი საერთაშორისო კოორდინაცია.

X ფაქტორი: მიკრო- და ნანოპლასტმასების როლი სტიქიური უბედურებების დინამიკაში

როგორც განხილულია თავში „მიკრო- და ნანოპლასტმასების გავლენა კლიმატზე“, მიკრო- და ნანოპლასტმასის ნაწილაკები ამცირებენ ოკეანის წყლების სითბოს გამტარ ფუნქციას, რაც იწვევს სითბოს დაგროვებას ოკეანეში და, შედეგად, ოკეანის ტემპერატურის კრიტიკულ ზრდას. თუმცა, მიკრო- და ნანოპლასტმასები თავად არ წარმოადგენენ ოკეანის გათბობის წყაროს.

2023 წლის გაზაფხულიდან და ერთ წელზე მეტი ხნის განმავლობაში, მსოფლიო ოკეანის საშუალო ზედაპირის ტემპერატურა ყოველდღიურად აახლებს ისტორიულ მაქსიმუმს, რაც დაკვირვებების ისტორიაში უპრეცედენტო ფენომენად იქცა (სურ. 128). მთელ მსოფლიოში მეცნიერები სერიოზულ შეშფოთებას გამოთქვამენ ამ ანომალიური ზრდის გამო.

66

დოქტორი ბრაიან მაკნოლდი, მაიამის უნივერსიტეტის ოკეანის მეცნიერების სკოლის უფროსი მკვლევარი, აღნიშნავს: „**საქმე არ ეხება მხოლოდ ოკეანის რეკორდულ ტემპერატურას, რომელიც მთელი წლის განმავლობაში დაფიქსირდა - მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს ახალი ჩანაწერები რამდენად აღემატება წინა რეკორდებს. ამჟამინდელი მაჩვენებლები წინა რეკორდულ მნიშვნელობებსაც კი არ უახლოვდება**“.³²²

66

ბრიტანელი საზღვაო გეოფიზიკოსი, დოქტორი რობ ლარტერი, იზიარებს ამ შეშფოთებას: „**ეს საკმაოდ საშიშია, ნაწილობრივ იმიტომ, რომ არ მესმის არცერთი მეცნიერის, რომელსაც აქვს დამაჯერებელი ახსნა იმისა, თუ რატომ გვაქვს ასეთი გადახვევა**“... „**მაგრამ ამ ეტაპზე მთაბეჭდილება იქნება, რომ ყველაფერი უფრო შორს და სწრაფად წავიდა, ვიდრე ველოდით**“.³²³

კლიმატის კვლევის მონაცემები აჩვენებს, რომ ამჟამინდელი მოდელები ოკეანის ზედაპირის ტემპერატურის თანდათანობით ზრდას პროგნოზირებენ, თუმცა დათბობის დაკვირვებული ტემპი მნიშვნელოვნად აღემატება ყველა პროგნოზს. მიუხედავად იმისა, რომ მეცნიერები ადასტურებენ, რომ ანთროპოგენური კლიმატის ცვლილება ხელშემწყობი ფაქტორია, მხოლოდ მას არ შეუძლია სრულად ახსნას ეს უპრეცედენტო ფენომენი.

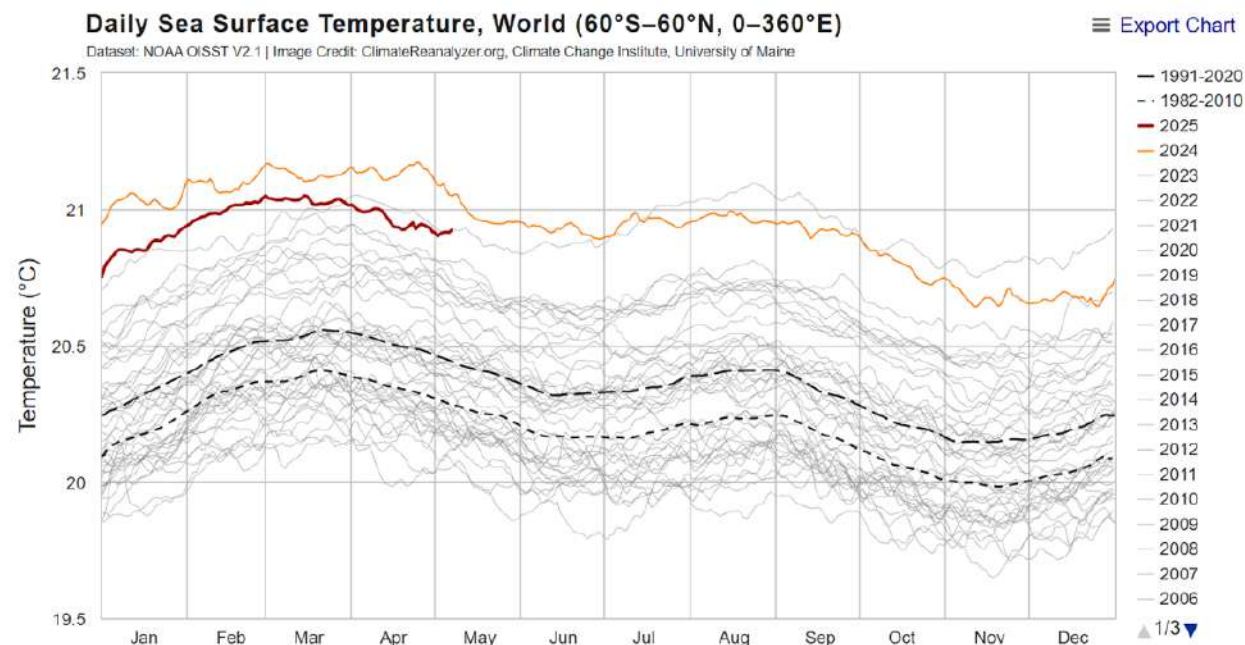
³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<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).

წმინდა თომასის უნივერსიტეტის პროფესორმა ჯონ აბრაამმა, ოკეანის ტემპერატურის კვლევების სპეციალისტმა, ივარაუდა, რომ არსებობს აქამდე უცნობი ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ოკეანის ზედაპირის ტემპერატურის გრძელვადიან ცვლილებებზე.³²² მან ხაზგასმით აღნიშნა, რომ ეს ელემენტები არ იყო გათვალისწინებული არსებულ კლიმატის მოდელებში. ამ ანგარიშის ავტორები ვარაუდობენ ე.წ. „X ფაქტორის“ არსებობას, რომელიც შეიძლება პასუხისმგებელი იყოს ოკეანისა და ატმოსფეროს დამატებით გათბობაზე.



სურათი 128. ზღვის ზედაპირის საშუალო დღიური ტემპერატურა, 1981–2025 წწ.

მონაცემთა წყარო: NOAA OISST V2.1 მონაცემთა ნაკრები | წყარო: [ClimateReanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST. https://climate.reanalyzer.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>

შეიძლება თუ არა ოკეანეში არსებული მიკრო და ნანოპლასტიკები იყოს ამოუცნობი X-ფაქტორი?

მიკრო- და ნანოპლასტიკების ოკეანის დათბობის მთავარი მამოძრავებელი ფაქტორის შესაძლებლობის ანალიზი კრიტიკულ წინააღმდეგობას ავლენს. მიუხედავად იმისა, რომ ნანოპლასტიკები აფერხებენ ოკეანის სითბოს გამოყოფის უნარს, ისინი თავად არ წარმოქმნიან თერმულ ენერგიას - ისინი უბრალოდ ხელს უშლიან მის ოკეანედან გამოსვლას.

ბოლო 60 წლის განმავლობაში, ოკეანის საშუალო სიღრმეები 15-ჯერ უფრო სწრაფად გათბა, ვიდრე წინა 10,000 წლის განმავლობაში,^{324, 325} და ეს ტენდენცია ყოველწლიურად აჩქარებს. პროგრესირების ტემპი სულ უფრო სწრაფი ხდება. თუმცა, იმ სიღრმეებში, სადაც მზის შუქი აღარ აღწევს, ტემპერატურის ასაწევად უზარმაზარი ენერგიაა საჭირო.^{326, 327}

მიკრო- და ნანოპლასტიკების მასშტაბური შემოღინება ოკეანეში შედარებით ცოტა ხნის წინ - დაახლოებით 30 წლის წინ დაიწყო. თუმცა, ოკეანის ღრმა ფენების დაჩქარებული დათბობა 60 წელზე მეტია შეინიშნება. ამრიგად, პლასტიკის ვერ ხსნის ოკეანის შუა სიღრმეების დათბობის გრძელვადიან და მზარდ ტენდენციას, რომელიც ამ დამაბინძურებლების მნიშვნელოვანი რაოდენობით ოკეანეში მოხვედრამდე დიდი ხნით ადრე დაიწყო.

მზის რადიაციაც არ იძლევა საკმარის ახსნას. მზის სხივი ოკეანეში მხოლოდ დაახლოებით 200 მეტრის სიღრმემდე აღწევს. შერევის შედეგად, მზეს შეუძლია წყლის მაქსიმალურ სიღრმემდე, დაახლოებით 700 მეტრამდე გაცხელება.³²⁸

თუმცა, გაცილებით ღრმა ფენების - სადაც მზის სხივები არ აღწევს - დათბობას უზარმაზარი ენერგია სჭირდება. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ოკეანეში დაგროვილი სითბო სხვა წყაროდან უნდა მოდიოდეს. ამასობაში, ნანოპლასტიკების არსებობა, როგორც ჩანს, ამ სითბოს იჭერს და ხელს უშლის მის ატმოსფეროში გასვლას.

ვინაიდან მზის გათბობა ვერ ხსნის ოკეანის ტემპერატურის ექსპონენციალურ ზრდას, მეცნიერებმა ივარაუდეს, რომ ოკეანის სხვადასხვა რეგიონში შეიძლება არსებობდეს სითბოს დამატებითი წყაროები.

ტემპერატურის ანომალიების ვერტიკალური განაწილება

ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში არგოს სისტემის მონაცემებზე დაყრდნობით ჩატარებულმა გლობალური ტემპერატურის რყევების ანალიზმა ოკეანის სხვადასხვა სიღრმეზე

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).

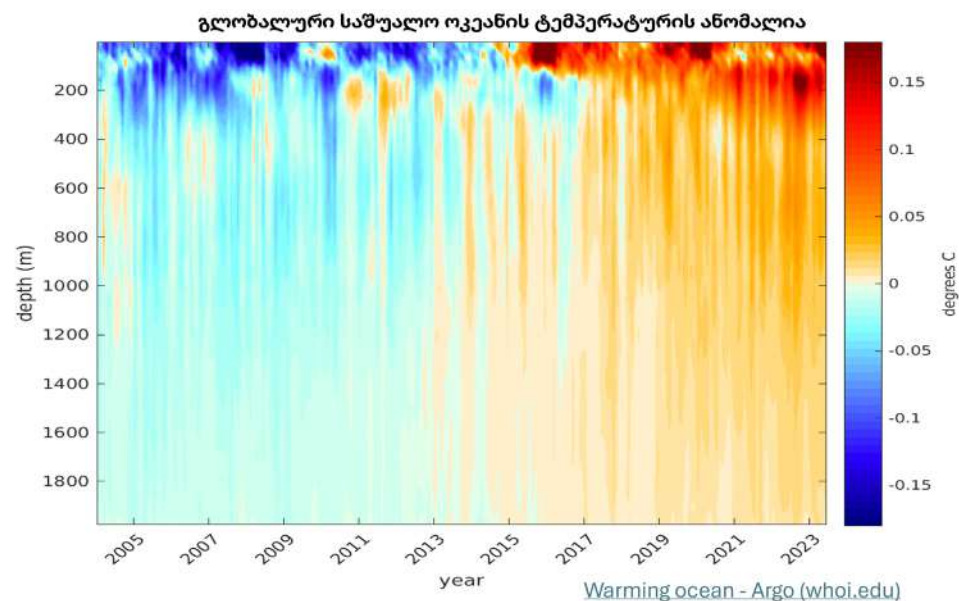
³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

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).

გამოავლინა ანომალიების სერია, რომლებიც არ ემთხვევა ზედაპირიდან ოკეანის უფრო ღრმა ფენებში ქვევით მიმართული სითბოს გადაცემის ტრადიციულ მოდელს.^{329, 330}

დოკუმენტირებულია ტემპერატურის გრადიენტის ინვერსიის სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი შემთხვევები, როდესაც შედარებით ცივი ზედაპირული ფენების ქვეშ გვხვდება უფრო თბილი წყლის მასები (სურ. 129). ასეთი ტემპერატურული სტრატეფიკაცია ფიზიკურად შეუძლებელია მხოლოდ ზედაპირიდან ქვევით მიმართული სითბოს გადაცემის გზით, რადგან ფიზიკის კანონების თანახმად, თერმული ენერგია ვერ გაივლის შუალედურ ცივ ფენას ზემოდან ქვემოდ.

ARGO-ს მონაცემები აჩვენებს ტემპერატურის ვარიაციებს სხვადასხვა სიღრმეზე ზოლო 20 წლის განმავლობაში.



სურათი 129. გლობალური ოკეანის ტემპერატურის ანომალიები 0–6,250 ფუტის (0–1,900 მეტრის) სიღრმეზე 2004 წლიდან.

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

ჩინეთის ოკეანის უნივერსიტეტის³³¹ მეცნიერების მიერ ჩატარებული ბოლოდროინდელი კვლევები ადასტურებს ოკეანის წყლის სვეტებში თერმული ანომალიების არსებობას, რომლებიც ზედაპირზე არ ჩანს. კვლევამ აჩვენა, რომ ზღვის სიღრმის ტალღების ერთი მესამედი საერთოდ არ ვლინდება ოკეანის ზედაპირზე და დაახლოებით ნახევარი არ ჩნდება მათი სასიცოცხლო ციკლის ყველა ეტაპზე. ამ მიწისქვეშა ზღვის სიღრმის ტალღების წლიური რაოდენობა მნიშვნელოვნად გაიზარდა ბოლო სამი ათწლეულის განმავლობაში ოკეანის მიმდინარე დათბობის გამო. ის ფაქტი, რომ ზღვის სიღრმის ტალღების მნიშვნელოვანი ნაწილი არ შეინიშნება ოკეანის ზედაპირზე, ნათლად მიუთითებს, რომ ისინი არ შეიძლება გამოწვეული იყოს ატმოსფეროდან წამოსული სიციხით.

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>

ოკეანის ფსკერზე სითბოს წყაროების შესწავლა

ოკეანის ფსკერზე ტემპერატურის კვლევა და უწყვეტი მონიტორინგი დღემდე უკიდურესად იშვიათი და შეზღუდულია. დიდი ხნის განმავლობაში, მეცნიერება არ ანიჭებდა პრიორიტეტს ასეთ უკიდურეს სიღრმეებზე ცვლილებების თვალყურის დევნებას. თანამედროვე მონიტორინგის სისტემები, როგორიცაა ARGO ბუების ქსელი, ამჟამად აგროვებენ მონაცემებს ოკეანის ზედაპირის მხოლოდ დაახლოებით 0.03%-დან, ხოლო ბუების უმეტესობა საშუალო ოკეანის სიღრმის მხოლოდ ნახევარამდე ეშვება - ზღვის ფსკერამდე ვერ აღწევს.³³²

დღემდე, კაცობრიობამ შეისწავლა ოკეანის ფსკერის მხოლოდ დაახლოებით 3–3.5%.³³³ ეს გამოწვეულია რამდენიმე მნიშვნელოვანი გამოწვევით. პირველ რიგში, მსოფლიო ოკეანის უმეტესი ნაწილი 3000-დან 6000 მეტრამდე სიღრმეზე მდებარეობს. ღრმაწყლოვანი სატრანსპორტო საშუალებების შემუშავება, რომლებსაც შეუძლიათ გაუძლონ უზარმაზარ წნევას 6000 მეტრამდე სიღრმეზე, მოითხოვს მნიშვნელოვან ფინანსურ და ტექნოლოგიურ რესურსებს. მეორეც, თავად ექსპედიციები უკიდურესად რთული და ძვირია; ისტორიის განმავლობაში, ამ მიზნით მხოლოდ რვა სპეციალიზებული სატრანსპორტო საშუალებაა აგებული. სწორედ ამ მიზეზით, ზოგიერთი ასპექტით, ჩვენ კოსმოსი უფრო საფუძვლიანად შევისწავლეთ, ვიდრე მსოფლიო ოკეანის ყველაზე შორეული რეგიონები.

ამავდროულად, სულ უფრო და უფრო ცხადი ხდება, რომ ოკეანის ფსკერზე მიმდინარე გეოლოგიურმა პროცესებმა შესაძლოა მნიშვნელოვანი როლი ითამაშოს კლიმატის ცვლილებასა და ოკეანის თერმული ბალანსის ფორმირებაში. ზღვის ფსკერი მილიონობით უნიკალური გეოლოგიური ობიექტის - ვულკანების, რღვევის ხაზებისა და ჰიდროთერმული ხვრელების - სამშობლოა, რომლებიც ენერგიის უზარმაზარ რაოდენობას გამოყოფენ. თუმცა, მათი მიუწვდომლობისა და შეზღუდული მონიტორინგის გამო, მათი პოტენციური ზემოქმედების სრული მასშტაბი მეცნიერებისთვის დიდწილად უცნობია.

მიუხედავად ამისა, ოკეანის ფსკერზე კვლევები გრძელდება და არაერთი კვლევა უკვე მიუთითებს ოკეანის წყლის ლოკალიზებულ გათბობაზე, რომელიც ზღვის ფსკერიდან მოდის.

მაგალითად, არგენტინის აუზის ორ ღრმა მონაკვეთში,³³⁴ 4,500 მეტრზე მეტ სიღრმეზე, დაფიქსირდა მნიშვნელოვანი დათბობის ტენდენციები: 2009 წლიდან 2019 წლამდე პერიოდში ათწლეულში $0.02^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$. ეს არის უზარმაზარი ენერგია, რომელიც საჭიროა ოკეანის ფსკერზე ასეთი დიდი მოცულობის ცივი წყლის გასათბობად.

დასავლეთ ანტარქტიდის სანაპიროსთან ახლოს, ხდება უედელის ზღვის³³⁵ ღრმა წყლების ანომალიური დათბობა. მიუხედავად იმისა, რომ წყლის ზედა 700 მეტრში დათბობა თითქმის არ შეინიშნება, უფრო ღრმა რეგიონებში ტემპერატურის თანმიმდევრული მატება შეინიშნება. ერთ მხარეს, უედელის ზღვას ესაზღვრება დასავლეთ ანტარქტიდის რიფტი, ხოლო მეორე მხარეს - წყალქვეშა ვულკანური ქედი სამხრეთ სენდვიჩის კუნძულებთან.

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>.

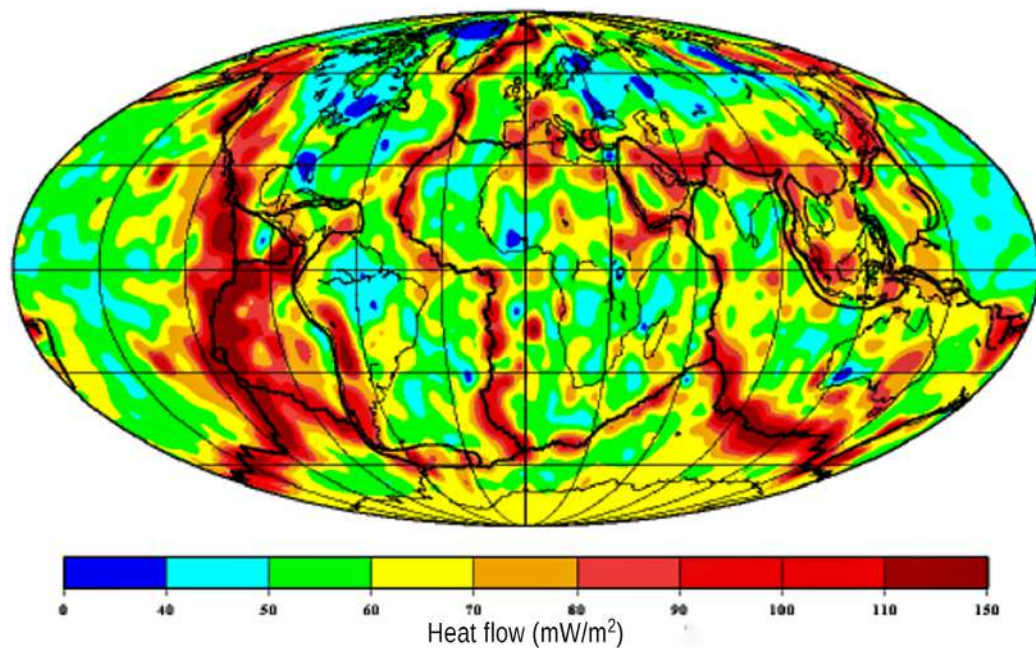
³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. Geophysical Research Letters 47, e2020GL089093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

გეოთერმული სითბოს ნაკადის, ტექტონიკური აქტივობისა და ზღვის ფსკერის ვულკანიზმის როლი

ღრმა წყლის დათბობის ანომალიების კონტექსტში, სადაც ატმოსფერული გავლენა მინიმალურია, ლოგიკურია დედამიწის წიაღიდან გეოთერმული სითბოს ნაკადი დამატებითი სითბოს პოტენციურ წყაროდ განვიხილოთ. ტრადიციულად, კლიმატის მოდელები ქვემოდან გეოთერმული სითბოს ნაკადს მუდმივად მიიჩნევენ, დაახლოებით 0.09 ვტ/მ^2 (ან 90 მვტ/მ^2)³³⁶, რაც მზის რადიაციაზე რამდენიმე რიგით დაბალია.^{337, 338}

თუმცა, სამეცნიერო მტკიცებულებების მზარდი რაოდენობა მიუთითებს სითბოს ამ არასაკმარისად შეფასებული წყაროს მნიშვნელობაზე. მასშტაბურმა გეოთერმულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ოკეანის ფსკერიდან გამომავალი სითბოს ნაკადის რაოდენობა დამოკიდებულია ოკეანის ქერქის ასაკზე: ის ყველაზე მაღალია ზღვის ფსკერის გავრცელების ახალგაზრდა ზონებში და ყველაზე დაბალია ოკეანის ძველ აუზებში³³⁹ (სურ. 130). ამ ლოკალიზებულ ანომალიებს შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ წყლის ვერტიკალურ ტემპერატურულ სტრუქტურაზე, შეასუსტონ თერმოკლინი და ხელი შეუწყონ წყლის მასების შერევას, რაც, თავის მხრივ, გავლენას ახდენს ცირკულაციაზე, ბიოლოგიურ პროდუქტიულობაზე და პოლარულ რეგიონებში მყინვარების სტაბილურობაზეც კი.



სურათი 130. სითბოს ნაკადის გლობალური წარმოდგენა.

ილუსტრაცია სტატიიდან: 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.

გეოთერმული სითბოს ნაკადი — თერმული სითბოს რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა დედამიწის წიაღიდან ზედაპირის ერთეული ფართობის გავლით ღრვის ერთეულში, იზომება მილივატებში კვადრატულ მეტრზე (მვტ/მ²).

მიუხედავად იმისა, რომ კონტინენტური რეგიონებისთვის გეოთერმული სითბოს საშუალო ნაკადი დაახლოებით $40\text{--}60 \text{ მვტ/მ}^2$ -ია, ხოლო ოკეანის ფსკერისთვის დაახლოებით 100 მვტ/მ^2 , გარკვეულ რეგიონებში ეს მაჩვენებლები რამდენჯერმე მაღალია. სითბოს ნაკადის ყველაზე მაღალი ღონეები ტექტონიკურად და ვულკანურად აქტიურ ზონებში ფიქსირდება - მაგალითად, შუა ოკეანის ქედები და აქტიური რიფტული ზონები - სადაც ნაკადი შეიძლება 200-დან 1000 მვტ/მ²-მდე აღემატებოდეს.³⁴⁰

განსაკუთრებით მაღალი სითბოს ნაკადი ჰიდროთერმულ ვენტილაციის ველებში შეინიშნება - ადგილებში, სადაც ცხელი სითხეები პირდაპირ ზღვის ფსკერზე იღვრება, წყლის ტემპერატურა კი $350\text{--}400^\circ\text{C}$ -ს აღწევს. ეს სისტემები უნიკალურ ეკოსისტემებს ქმნის და ლოკალიზებულ სითბოს ნაკადის ანომალიებს წარმოქმნის, რაც მნიშვნელოვნად მოქმედებს ფსკერის წყლების თერმულ პირობებზე.

ოკეანის ფსკერზე გეოთერმული სითბოს ნაკადის მომატების ყველაზე საფუძვლიანად შესწავლილი ადგილებია შუა ოკეანის ქედები - ზონები, სადაც ტექტონიკური ფილები იშლება და აქტიურად ყალიბდება ახალი ოკეანური ქერქი. წყალქვეშა ქედების ეს გლობალური სისტემა დაახლოებით 60,000 კილომეტრზეა გადაჭიმული,³⁴¹ პლანეტას ბეისბოლის ბურთის ნაკერებივით აკრავს გარს. შუა ოკეანის ქედები ხასიათდება ჰიდროთერმული ხვრელების, წყალქვეშა ვულკანების და აქტიური რღვევის ხაზების მაღალი კონცენტრაციით, რაც დედამიწის მანტიიდან თერმული ენერგიის მნიშვნელოვან რაოდენობას ოკეანეში შესვლის საშუალებას აძლევს.³⁴²

ამ რეგიონებში გეოთერმული სითბოს ნაკადი 10-დან 100-ჯერ მეტია, ვიდრე ზღვის ფსკერის დანარჩენი ნაწილის საშუალო მაჩვენებელი,³²⁶ რაც შუა ოკეანის ქედებს დედამიწის წიაღებსა და მსოფლიო ოკეანეს შორის სითბოს გაცვლისთვის საკვანძო ზონებად აქცევს.

მერილენდის უნივერსიტეტის პროფესორმა არტურ ვიტერიტომ 1995 წლიდან შუა ოკეანის ქედებზე მიწისძვრების აქტივობის ზრდა დააფიქსირა (სურ. 131).³⁴³ 0.7 კორელაციის კოეფიციენტით, ეს ზრდა ემთხვევა გლობალური ტემპერატურის მატებას, ტემპერატურის მატება დაახლოებით ორი წლით ჩამორჩება სეისმური აქტივობის ზრდას. სეისმურობის ეს ზრდა დაკავშირებულია მაგმის ზემოთ მოძრაობასთან, რაც ქმნის ახალ ოკეანურ ქერქს.

³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376.

<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

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

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

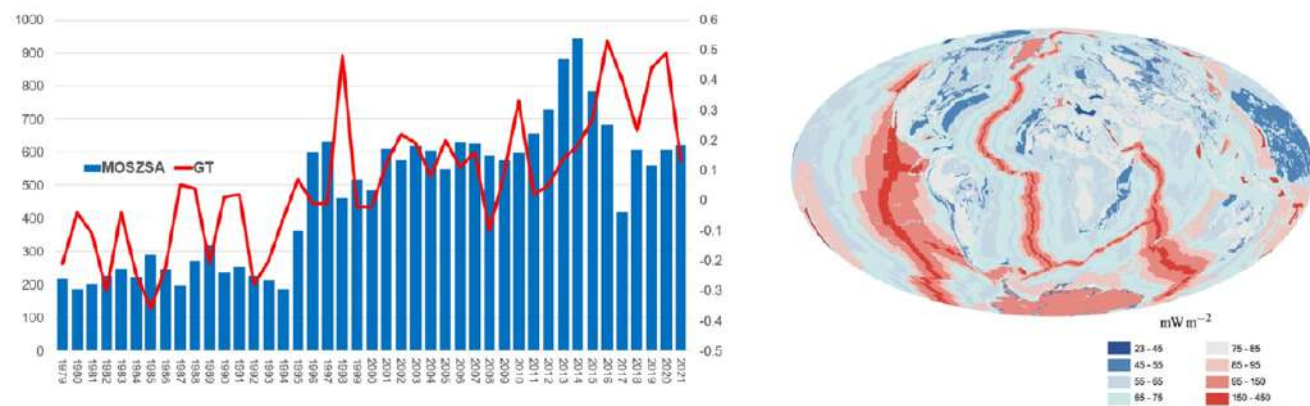
³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³⁴³Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

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>

მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა ოკეანის ფსკერზე შუაოკეანური ქედების გასწვრივ



სურათი 131. ოკეანის ფსკერის მიწისძვრების რაოდენობის (მაგნიტუდა 4.0–6.0) და გლობალური ატმოსფერული ტემპერატურის ერთდროული ზრდა.

წყარო: 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>

მიუხედავად იმისა, რომ ამომავალი მაგმის მოცულობის პირდაპირი გაზომვები არ არსებობს, გლობალური სეისმური მონიტორინგის ქსელი მეცნიერებს საშუალებას აძლევს, ირიბად შეაფასონ ამ პროცესების მასშტაბები სეისმური მოვლენების რაოდენობისა და ინტენსივობის ანალიზით, რომლებიც სეისმური მონაცემების რაოდენობის მიუხედავად იზრდება. ვიტერიტოს ჰიპოთეზის თანახმად, შუა ოკეანის ქედებზე სეისმური და ვულკანური აქტივობა იწვევს ჰიდროთერმული ვენტილაციისა და ოკეანის წყლის გათბობას, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს სათბურის გაზების გამოყოფას და ატმოსფეროს დათბობას. ამ გზით, ვიტერიტო აჩვენებს, რომ ოკეანეები თბება არა მხოლოდ ზემოდან, არამედ ქვემოდანაც, გეოლოგიური პროცესების შედეგად.

წყალქვეშა ვულკანიზმს ასევე შეიძლება მნიშვნელოვანი როლი ჰქონდეს ოკეანის ფსკერის თერმული რეჟიმის ფორმირებაში. ამჟამინდელი მონაცემები მიუთითებს, რომ დედამიწაზე ვულკანური ამოფრქვევების დაახლოებით 75% წყალქვეშ ხდება.³⁴⁴ ადრე ითვლებოდა, რომ წყალქვეშა ამოფრქვევები ლავის ნაზი ნაკადის შედეგად ხდებოდა და რომ ასაფეთქებელი ამოფრქვევები შეუძლებელი იყო წყლის სვეტის წნევის გამო. შედეგად, ითვლებოდა, რომ წყალქვეშა ვულკანებს არ შეეძლოთ წყლის სვეტის გაცხელება, რადგან ამომავალი ლავა თითქმის მაშინვე გამაგრდებოდა. თუმცა, ბოლოდროინდელმა კვლევებმა შეცვალა ჩვენი წარმოდგენა წყალქვეშა ვულკანების ამოფრქვევის მექანიზმების შესახებ.

მაგმის წნევა 10,000-დან 30,000 ბარამდე მერყეობს, ხოლო ოკეანის ყველაზე ღრმა ნაწილებში წყლის სვეტის წნევა მხოლოდ დაახლოებით 1,000 ბარია.

როდესაც მაგმა იფეთქებს, ის იწვევს წყლის მყისიერ აღუდებას და H₂O მოლეკულების დაშლას, რაც იწვევს აირადი წყლის ღრუს წარმოქმნას, რომლის წნევა ასობით ან თუნდაც ათასობით ბარს აღწევს.³⁴⁵ ეს იწვევს ძლიერ ასაფეთქებელ ამოფრქვევებს.

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>

ამ ამოფრქვევებს თან ახლავს ტეფრას და ჰიდროთერმების გამოყოფა - გადახურებული წყლის გიგანტური ქავლები, რომელთა მოცულობამ შეიძლება 40 მილიონი ოლიმპიური ზომის საცურაო აუზის ეკვივალენტს მიაღწიოს. ასეთმა გამოყოფამ შეიძლება დაარღვიოს ოკეანის თერმული ბალანსი არა მხოლოდ ადგილობრივად, არამედ გლობალური მასშტაბით.

ლიდსის უნივერსიტეტის მიერ ჩატარებულმა კვლევამ წყნარი ოკეანის ფსკერზე ვულკანური ტეფრის კილომეტრების მასშტაბის ველები გამოავლინა,³⁴⁶ რაც ძლიერი აფეთქებითი წყალქვეშა ამოფრქვევების მტკიცე მტკიცებულებას წარმოადგენს. ამ ტიპის ერთი ამოფრქვევა შეიძლება გამოყოფდეს დაახლოებით 1 ტერავატის თერმულ ენერგიას - ორჯერ მეტი, ვიდრე შეერთებული შტატების წლიური ენერგიის მოხმარება.



აფეთქებითი ამოფრქვევების წვლილს ოკეანის გათბობაში დამატებით ადასტურებს ბავარიის იულიუს-მაქსიმილიანის უნივერსიტეტის პროფესორი ბერნდ ზიმანოვსკი, რომელიც განმარტავს:³⁴⁷

„წყალქვეშა ლავის ამოფრქვევების დროს, ლავის სითბოს წყალზე გადატანას საკმაოდ დიდი დრო სჭირდება. თუმცა, აფეთქებითი ამოფრქვევების დროს მაგმა პაწაწინა ნაწილაკებად იშლება. ამან შეიძლება შექმნას ისეთი ძლიერი სითბური იმპულსები, რომ ოკეანეებში თერმული წონასწორობის დინებები ადგილობრივად ან თუნდაც გლობალურად დაირღვეს“.³⁴⁸

ამჟამინდელი შეფასებებით, ჰიდროთერმულად აქტიური წყალქვეშა წარმონაქმნების რაოდენობა 100 000-დან 10 მილიონამდე მერყეობს^{349, 350} - რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ჰიდროთერმული აქტივობის წვლილი ოკეანის სითბურ ბალანსში შესაძლოა მნიშვნელოვნად არასაკმარისად იყოს შეფასებული. აფეთქებითი მაგმის ამოფრქვევები წარმოქმნის ძლიერ თერმულ იმპულსებს, რომლებსაც შეუძლიათ ოკეანის სითბური დინებების ლოკალური მასშტაბის დარღვევა. თუმცა, ოკეანის უზარმაზარი ზომების გათვალისწინებით, ასეთი ინტენსიური წყალქვეშა ამოფრქვევებიც კი არ არის საკმარისი მისი გლობალურად გასათბობად. ვულკანები ერთგვაროვნად არ არის განაწილებული, მათი ამოფრქვევები ეპიზოდურია და გამოთავისუფლებული მთლიანი ენერგია არ არის საკმარისი მთელი ოკეანის გასათბობად. მიუხედავად ამისა, ის შეიძლება საკმარისი იყოს გარკვეულ რეგიონებში ლოკალიზებული სითბური ტალღების გამოსაწვევად.

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).

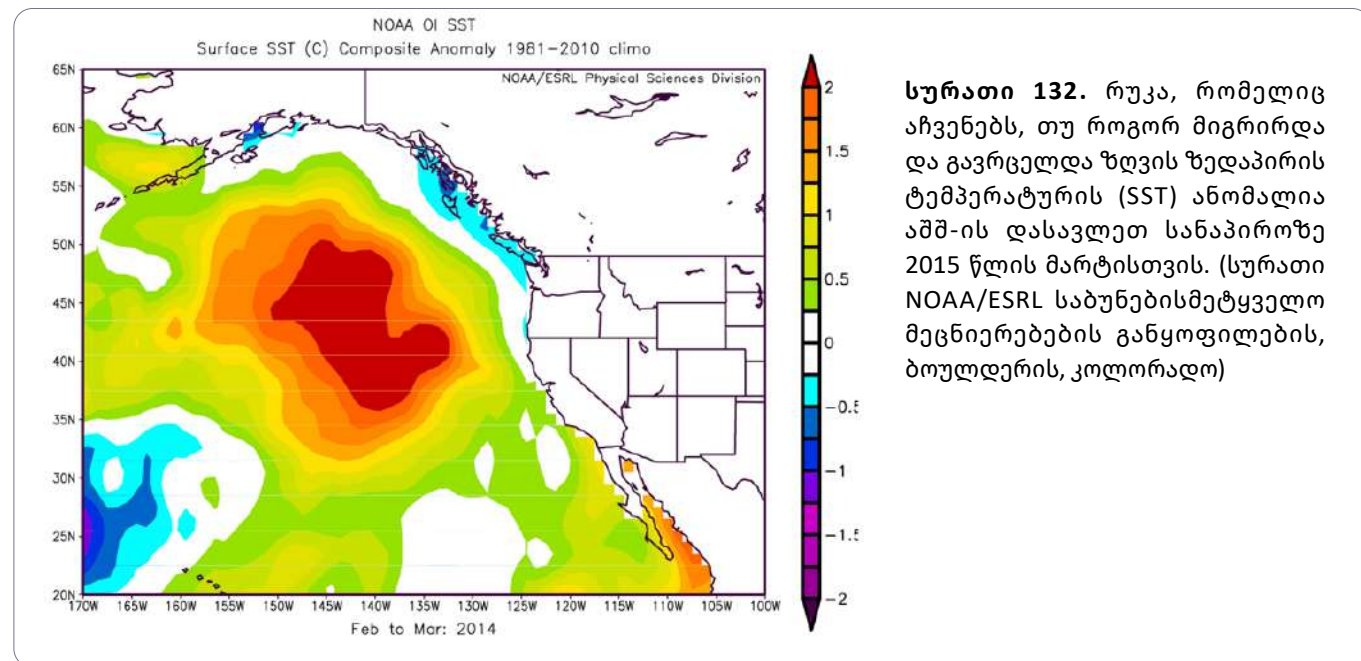
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

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)

ასეთი ლოკალიზებული თერმული ანომალიების კონკრეტული მაგალითია ფენომენი, რომელიც ცნობილია როგორც ზღვის სითბური ტალღები - ოკეანის წყლის ის ადგილები, რომლებიც დიდი ხნის განმავლობაში არანორმალურად თბილი რჩება. ამ მოვლენების კიდევ ერთი ტერმინია წვეთები: ზედაპირული წყლის მასიური წვეთები მნიშვნელოვნად მომატებული ტემპერატურით. 1995 წლიდან მოყოლებული, წვეთების რაოდენობა მკვეთრად გაიზარდა³⁵¹ და ისინი სულ უფრო ხშირად ჩნდებიან მსოფლიო ოკეანის სხვადასხვა ნაწილში, მათ შორის ახალი ზელანდიის სანაპიროებთან, სამხრეთ-დასავლეთ აფრიკასა და სამხრეთ ინდოეთის ოკეანეში.

ერთ-ერთი ყველაზე ცნობილი და ფართომასშტაბიანი წვეთი 2013 წელს ალასკის ყურეში ჩამოყალიბდა და სწრაფად გავრცელდა წყნარ ოკეანეში. ის მოიცავდა 4,000,000 კვადრატულ კილომეტრზე მეტ ფართობს - უფრო დიდი ვიდრე მთელი ინდოეთის ტერიტორია და ზოგიერთ რაიონში ზღვის ზედაპირის ტემპერატურა საშუალო მაჩვენებელს 5-6 გრადუსი ცელსიუსით აღემატებოდა (სურ. 132). წვეთი ოკეანეში სამი წლის განმავლობაში ალასკიდან მექსიკამდე გადაადგილდებოდა, რაც 2016 წლამდე გაგრძელდა. ამ ფენომენს მნიშვნელოვანი უარყოფითი გავლენა ჰქონდა რეგიონის საზღვაო ეკოსისტემასა და კლიმატზე.

წვეთის წარმოქმნის ყველაზე სავარაუდო მიზეზი იყო ალასკის სანაპიროსთან ინტენსიური ვულკანური აქტივობა და კობის მაგმის პლუმის არსებობა,³⁵² რომელმაც ოკეანის ღრმა წყლები გააცხელა, რომლებიც მოგვიანებით ზედაპირზე უზარმაზარი მოცულობით ამოვიდა.



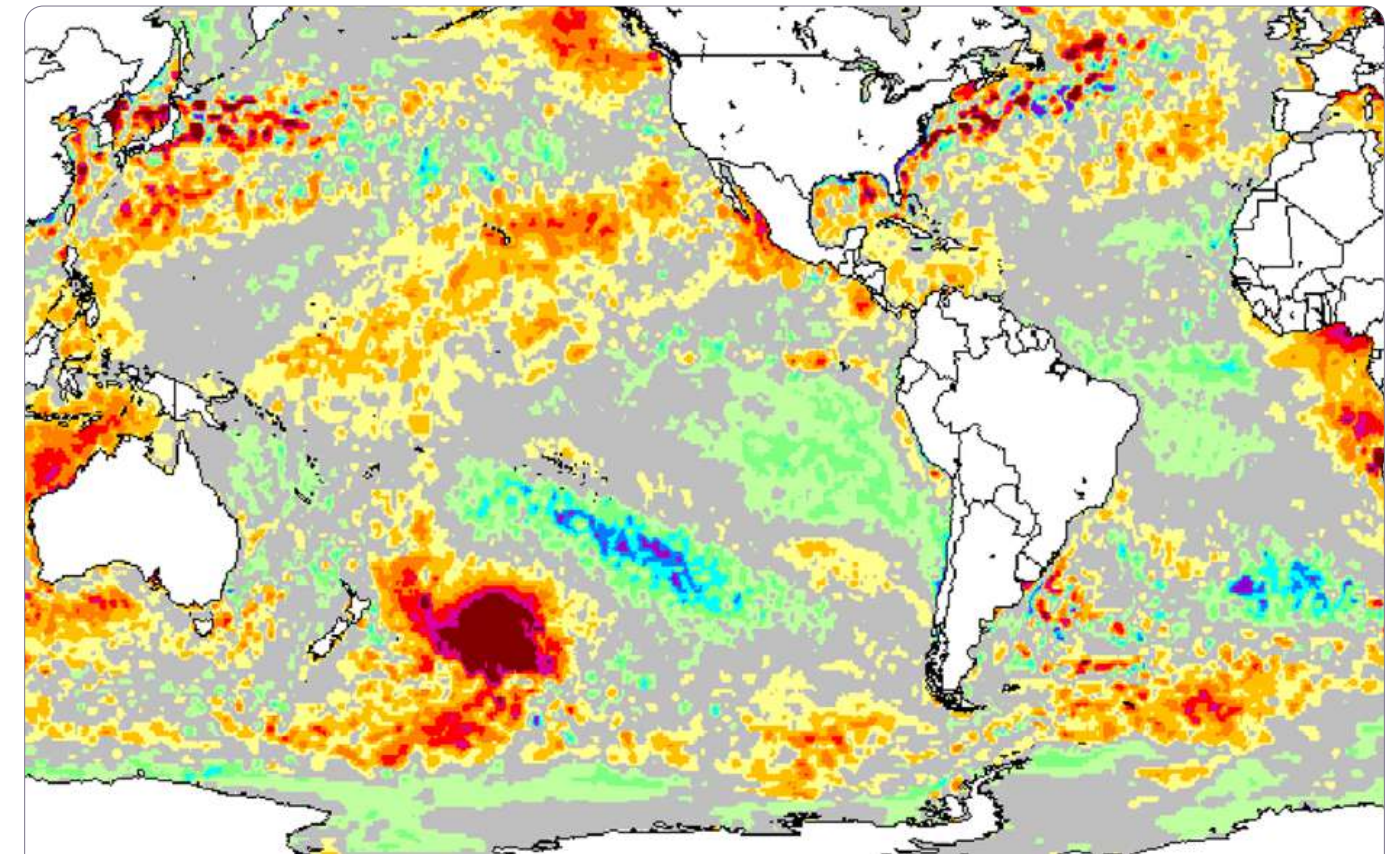
2019 წლის დეკემბერში, ახალი ზელანდიის აღმოსავლეთით, სამხრეთ წყნარ ოკეანეში, სითბური ლაქა, წვეთი, გაჩნდა, რომლის ტემპერატურაც გარკვეულ დღეებში საშუალოზე 6°C-ით მეტი იყო. წვეთმა ერთ მილიონ კვადრატულ კილომეტრზე მეტი ფართობი მოიცვა - რაც ტეხასის შტატის 1.5-ჯერ ან ახალი ზელანდიის შტატის 4-ჯერ ეკვივალენტურია (სურ. 133). იმ დროს, როგორც იტყობინებოდნენ, ეს იყო მსოფლიო ოკეანეებში ყველაზე დიდი სითბური წვეთი. უფრო მეტიც, ეს იყო ამ რეგიონში დაფიქსირებული სიდიდით მეორე მსგავსი მოვლენა.

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>
³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yagodinski, 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

ველინგტონის ვიქტორიას უნივერსიტეტის გეოგრაფიის, გარემოს დაცვისა და დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერებების სკოლის პროფესორმა, ჯეიმს რენვიკმა, აღნიშნა:

„ეს ამჟამად პლანეტაზე საშუალოზე მაღალი დათბობის ყველაზე დიდი ეტაპია. ჩვეულებრივ, იქ ტემპერატურა დაახლოებით 15°C-ია, ამჟამად კი დაახლოებით 20°C-ია“.³⁵³



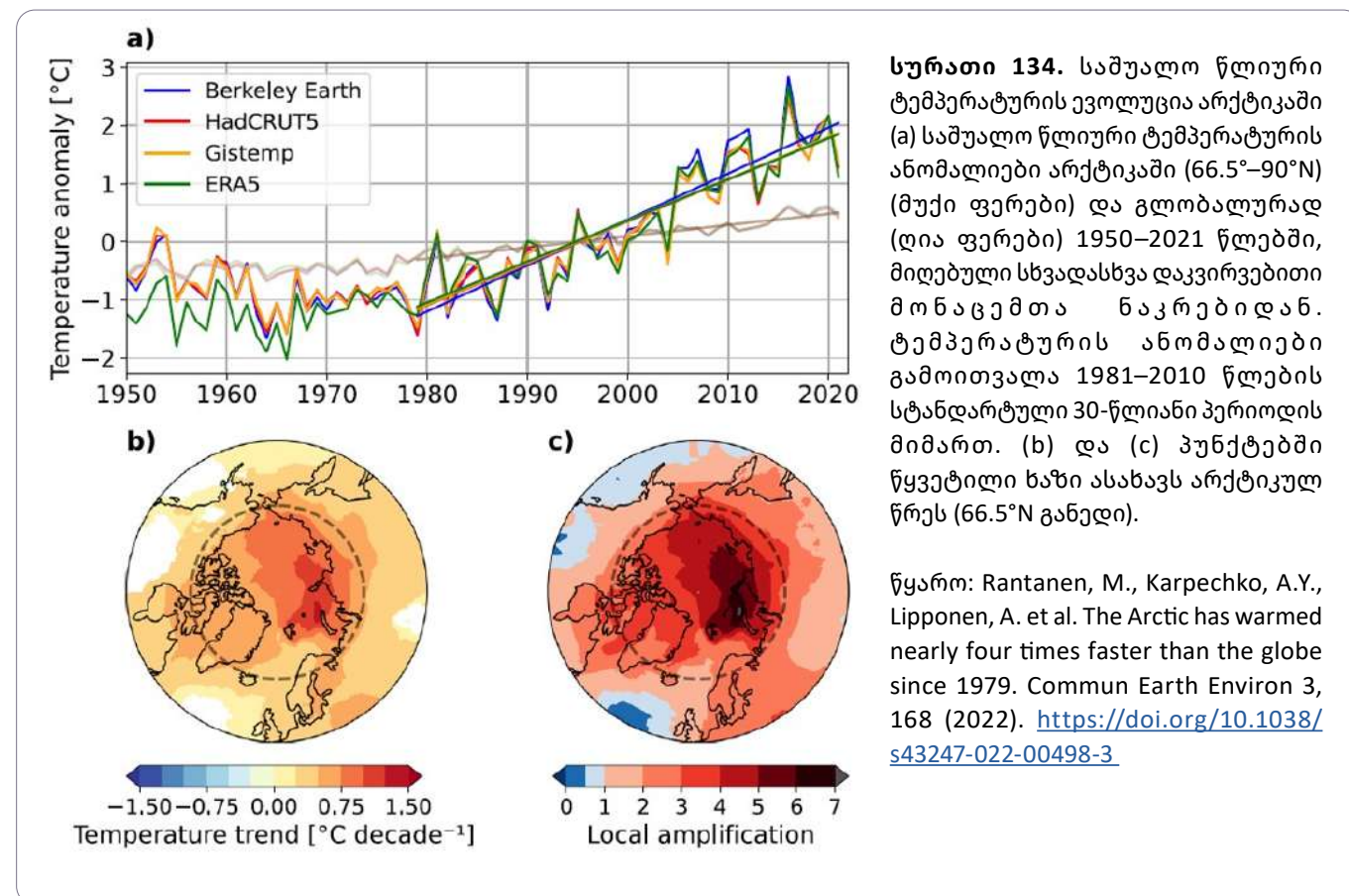
სურათი 133. ზღვის ზედაპირის ტემპერატურის ანომალია სამხრეთ წყნარ ოკეანეში, 2019 წლის 25 დეკემბერს.

წყარო: 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> (წვდომა 2025 წლის 11 მაისს)

ამ წვეთის წარმოქმნის სავარაუდო მიზეზი ახალი ზელანდიის სანაპიროსთან მდებარე უძველესი ვულკანური პლატოს აქტივობა იყო.³⁵⁴

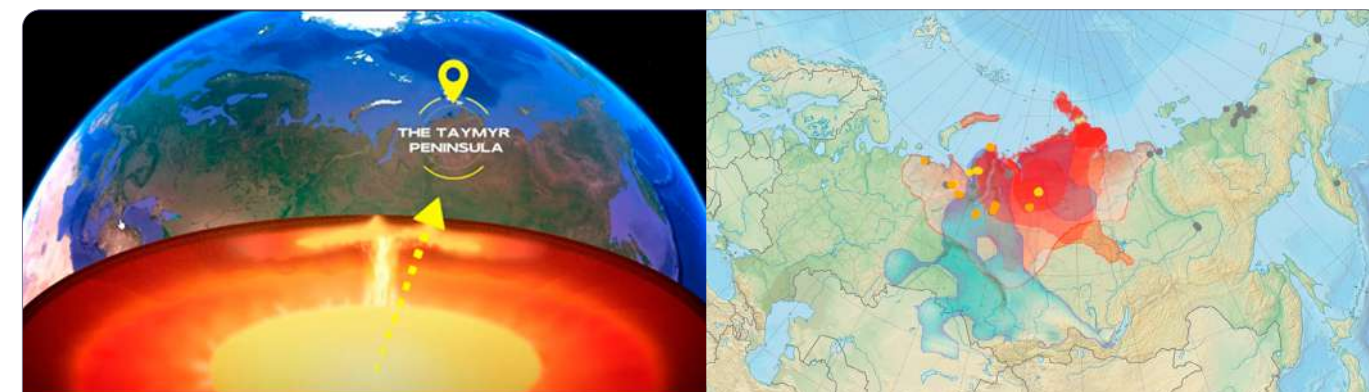
³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).
³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

კიდევ ერთი აღსანიშნავი მაგალითი იმისა, თუ როგორ უწყობს ხელს მაგმატური პროცესებიდან გეოთერმული სითბო ოკეანის დათბობას, არის ციმბირის სანაპიროს გასწვრივ არქტიკული ზღვების ანომალური გათბობა. 2022 წლის კვლევის თანახმად, ციმბირის არქტიკა თითქმის ოთხჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე გლობალური საშუალო მაჩვენებელი - ტემპი მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე ადრე კლიმატის მოდელებში იყო გათვალისწინებული, რაც მეცნიერებისთვის დიდი სიურპრიზი იყო (სურ. 134).³⁵⁵



მსოფლიოს ამ კონკრეტულ რეგიონში - ტაიმირის ნახევარკუნძულთან ახლოს - ჩვენ ვხედავთ ციმბირის მაგმატური პლუმის გააქტიურებას, რომელიც ახლა სწრაფად იზრდება იმავე ტერიტორიაზე, სადაც 250 მილიონი წლის წინ ციმბირული ბილიკები ამოიფრქვა. ამჟამინდელი მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ პლუმის თავი აქტიურად აზიანებს აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონს, მაგმა კი მისი მთელი სიგანის ქვეშ ვრცელდება (სურ. 135). წინასწარი შეფასებით, ციმბირის ქვეშ მაგმის გაფანტვის არეალი შეიძლება 2500-დან 3000 კილომეტრამდე დიამეტრის იყოს - ფართობი, რომელიც ავსტრალიის ზომას შეესაბამება.

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>



სურათი 135. სხვადასხვა სამეცნიერო კვლევის შედეგების მიხედვით, პლუმის პოზიციის ლოკალიზაცია

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ არქტიკული ზღვების ასეთი ინტენსიური დათბობა კონკრეტულად ტაიმირის ნახევარკუნძულის მიმდებარე რეგიონში ხდება. ეს ანომალია, განსაკუთრებით ციმბირის ოკეანურ ზონაში, შეიძლება აიხსნას უფრო თხელი ოკეანური ქერქით, რომელიც სითბოს უფრო ეფექტურად ატარებს და წყალი უფრო მაღალი თბოტევადობითაა ატმოსფეროსთან შედარებით. ამრიგად, ოკეანის წყალი ინტენსიურად შთანთქავს და ინარჩუნებს სითბოს აღმავალი მაგმის ნაკადიდან, მიუხედავად იმისა, რომ ნაკადი კონტინენტური ქერქის ქვეშ, სანაპირო ზოლიდან შედარებით დამოუკიდებლად აღის.



ციმბირის მაგმის ამოფრქვევის, კლიმატურ სისტემაზე მისი გავლენის, მასთან დაკავშირებული რისკებისა და პოტენციური გადაწყვეტილებების უფრო დეტალური ანალიზისთვის იხილეთ ანგარიში:

„ციმბირში მაგმის ამოფრქვევის საფრთხისა და პრობლემის მოგვარების სტრატეგიების შესახებ“

მტკიცებულებათა ერთობლიობა ნათლად მიუთითებს, რომ ოკეანის ფსკერზე მიმდინარე გეოლოგიური პროცესები გლობალური დათბობის მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს. ზღვის ფსკერზე სეისმური და ვულკანური აქტივობის ზრდა კორელაციაშია გლობალური ტემპერატურის მატებასთან, რაც შესაძლო მიზეზ-შედეგობრივ კავშირზე მიუთითებს. წყალქვეშა ამოფრქვევებს, განსაკუთრებით ასაფეთქებელი ხასიათის ამოფრქვევებს, შეუძლიათ ძლიერი თერმული იმპულსების წარმოქმნა, რომლებიც არღვევენ როგორც ადგილობრივ, ასევე გლობალურ სითბურ ბალანსს.

ჰიდროთერმული სისტემები და ვულკანური აქტივობა წარმოქმნის მასშტაბურ ანომალიებს, როგორიცაა „წვეთები“, რომლებსაც მნიშვნელოვანი გავლენა აქვთ საზღვაო ეკოსისტემებსა და კლიმატზე, ხოლო მაგმატური პროცესები პასუხისმგებელია არქტიკული ზღვების ანომალიურ დათობაზე. ამრიგად, ოკეანე თბება არა მხოლოდ ზემოდან, ატმოსფეროს გავლენით, არამედ ქვემოდანაც, დედამიწის წიაღში მიმდინარე დინამიური პროცესების გამო. ეს მოითხოვს არსებული კლიმატის მოდელების გადაფასებას და წყალქვეშა გეოლოგიური აქტივობის უფრო ღრმა შესწავლას, როგორც პლანეტის საერთო სითბური ბალანსის მნიშვნელოვან კომპონენტს.

თუმცა, არსებობს ერთი მნიშვნელოვანი კითხვა: რატომ იზრდება მაგმატური და ტექტონიკური აქტივობა დედამიწაზე ამ დროს?

დედამიწაზე კლიმატის ცვლილების გეოდინამიკური მოდელის მოკლე აღწერა მიმდინარე პერიოდში

ბოლო 30 წლის განმავლობაში დედამიწამ განიცადა უპრეცედენტო და სინქრონიზებული ესკალაცია არა მხოლოდ კლიმატის ცვლილებაში, არამედ პლანეტის ყველა ფენასა და მის გეოფიზიკურ პარამეტრებში ანომალიებშიც. ეს ცვლილებები ექსპონენციურად იზრდება. სამეცნიერო მონაცემების ყოვლისმომცველი ანალიზი მიუთითებს, რომ ძირითადი მიზეზი ასტრონომიულ ციკლებშია, რომლებიც ყოველ 12 000 წელიწადში ერთხელ მეორდება.

კოსმოსური გავლენის ჰიპოთეზას ამყარებს მსგავსი ცვლილებები, რომლებიც ერთდროულად ხდება მზის სისტემის სხვა პლანეტებსა და მთვარეებზე. მაგალითად, ქარის სიჩქარე იზრდება და ქარიშხლის ზონები ფართოვდება ურანზე,³⁵⁶ იუპიტერზე,³⁵⁷ ვენერაზე.³⁵⁸ მარსზე პოლარული ყინულის ქუდის დნობა ხდება,³⁵⁹ ხოლო ვულკანური აქტივობა იზრდება როგორც ვენერაზე,³⁶⁰ ასევე მარსზე.³⁶¹ გარდა ამისა, სეისმური აქტივობა ძლიერდება მარსზე - გეოლოგიურად „მკვდარ“ პლანეტაზე³⁶² - რაც მიუთითებს ანომალიურ შიდა პროცესებზე.

დედამიწის გეოსისტემაში კრიტიკული ცვლილებები დაახლოებით 1995 წელს დაიწყო, რაც აღინიშნა მნიშვნელოვანი გეოფიზიკური ანომალიებით, როგორიცაა პლანეტის ბრუნვის მკვეთრი აჩქარება, დედამიწის ღერძის გადაადგილება და ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის სწრაფი დრიფტის დაწყება (სურ. 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter’s Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013).

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019).

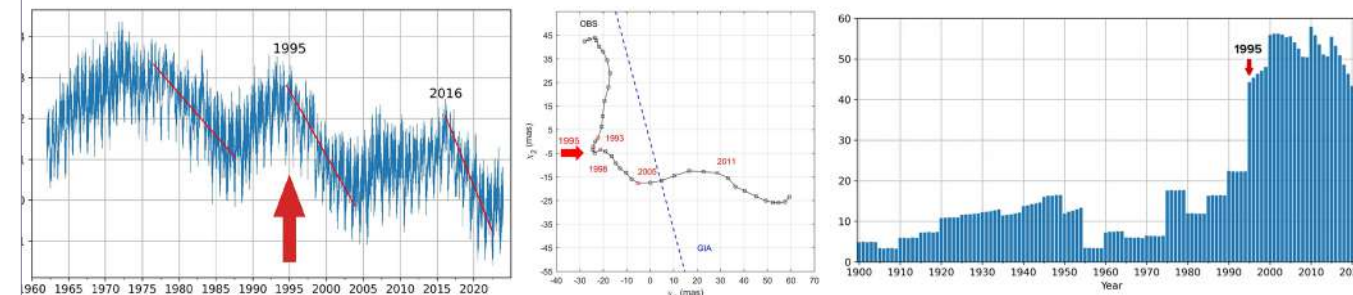
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022).

[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>



პლანეტის ბრუნვის უცარი და მკვეთრი აჩქარება, როგორც ეს პარიზის ობსერვატორიის დედამიწის ორიენტაციის ცენტრის მიერ არის დაფიქსირებული.

მონაცემთა წყარო: IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_I AU1980-LOD&id=223

დედამიწის ბრუნვის ღერძის ანომალიური ძვრები: პოლარული დრიფტის მიმართულების მკვეთრი ცვლილება და მისი სიჩქარის 17-ჯერ გაზრდა.

წყარო: 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>

ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის მოძრაობა: ადრე წელიწადში 10 კმ სიჩქარით იცვლებოდა, ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსი მოულოდნელად აჩქარდა წელიწადში 55 კმ-მდე და შეიცვალა ტრაექტორია ციმბირში, ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ.

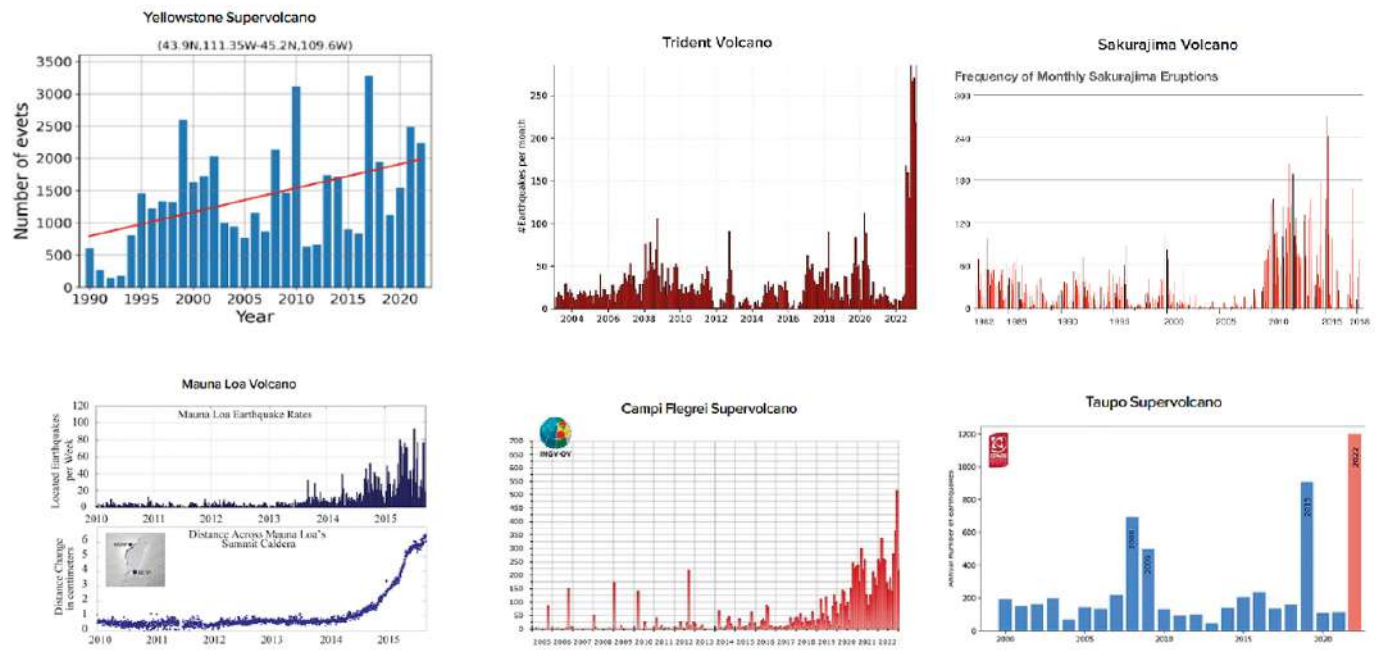
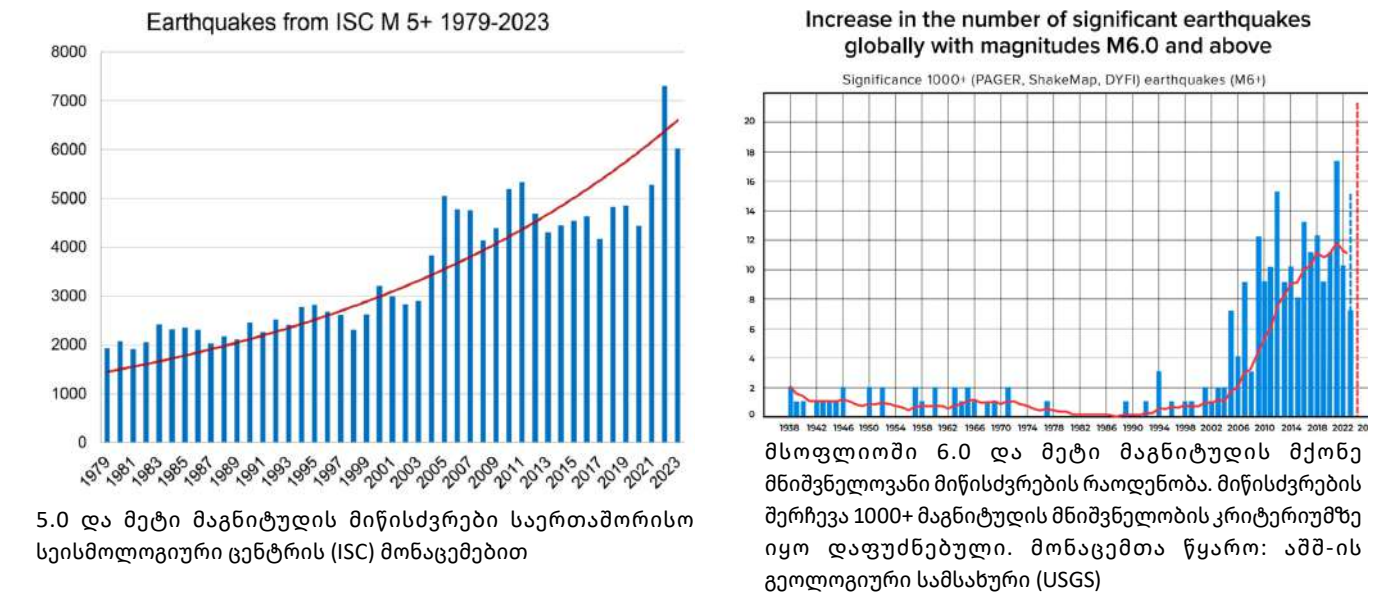
მონაცემთა წყარო: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

სურათი 136. დედამიწის გეოფიზიკური პარამეტრების ცვლილებები 1995 წელს

ეს ანომალიები მიუთითებს დედამიწის ბირთვში ღრმა ცვლილებებზე, რაც მოითხოვს კვადრილიონჯერ მეტ ენერგიას, ვიდრე კაცობრიობამ გამოიმუშავა ცივილიზაციის მთელი ისტორიის განმავლობაში. მიზეზი არის გარე კოსმოსური გავლენა, რომელიც გავლენას ახდენს დედამიწის ბირთვზე, ასევე მზის სისტემის სხვა პლანეტების ბირთვებზე. ეს გარე ძალა აძლიერებს მანტიის დნობას, რაც იწვევს მის ზედაპირთან მიახლოებას. შედეგად, იწყება ჯაჭვური რეაქცია: ძლიერდება ვულკანური და სეისმური აქტივობა, იზრდება დედამიწის წიაღიდან გათბობა და იზრდება სტიქიური კატასტროფების სიხშირე მთელ მსოფლიოში.

1995 წლიდან შეინიშნება სეისმური აქტივობის შესამჩნევი ზრდა, რომელიც ხასიათდება მიწისძვრების უფრო მაღალი სიხშირით, მაგნიტუდით და ენერგიით. ეს ტენდენცია ჩანს როგორც ხმელეთზე, ასევე ოკეანეებში, მათ შორის იმ რეგიონებში, სადაც სეისმური აქტივობა ადრე თითქმის არ არსებობდა. ეს ყველაფერი მიუთითებს ამ ცვლილებების გლობალურ მასშტაბზე. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ 5.0 ან მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების ზრდა არ არის დაკავშირებული სენსორული ქსელების ან მგრძნობელობის ზრდასთან, არამედ ნამდვილად ასახავს დედამიწის გეოდინამიკის ცვლილებებს. საერთაშორისო სეისმოლოგიური ცენტრის მონაცემების თანახმად, ბოლო 25 წლის განმავლობაში ასეთი მიწისძვრების რაოდენობა მნიშვნელოვნად გაიზარდა და კვლავაც იზრდება (სურ. 137).

გარდა ამისა, სეისმური აქტივობა იზრდება ვულკანების მახლობლად, მათ შორის ისეთი სუპერვულკანების მახლობლად, როგორიცაა იელოუსტონი აშშ-ში, ფლეგრეის ველები იტალიაში,³⁶³ და ტაუპო ახალ ზელანდიაში,³⁶⁴ - ასევე სხვა ვულკანების მახლობლად, რომლებიც წინა 12,000-წლიანი ციკლების დროს ამოიფრქვნენ (სურ. 137).



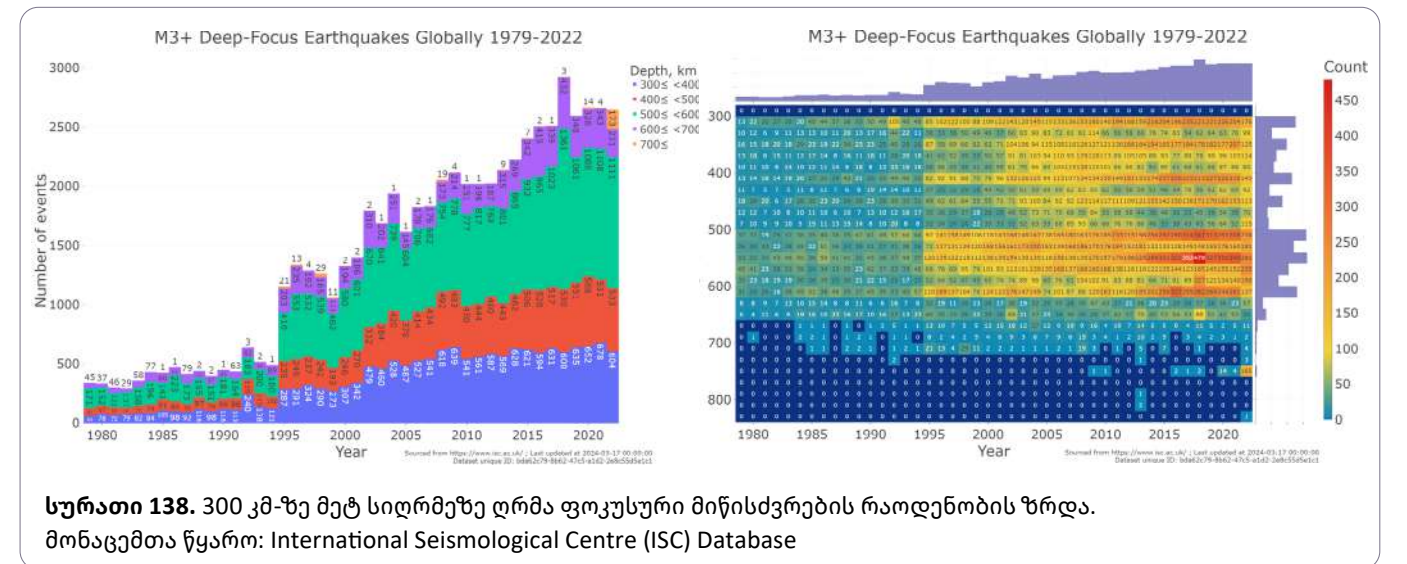
სურათი 137. სეისმური აქტივობის ზრდა მთელ მსოფლიოში, ასევე ვულკანებისა და სუპერვულკანების მახლობლად

ყოველწლიურად სულ უფრო მეტი დღეა ვულკანური ამოფრქვევებით აღსავსე, სადაც გამოტყორცნილი ლავა ხშირად ავლენს ანომალიურ თვისებებს, როგორიცაა გადახურება და პლანეტის უფრო ღრმა მანტიის ფენებიდან წარმოშობილი მაგმისთვის დამახასიათებელი უნიკალური ქიმიური შემადგენლობა.

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/yabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

განსაკუთრებით შემამოფოთებელი მოვლენაა ღრმა ფოკუსის მქონე მიწისძვრების მზარდი სიხშირე, რომლებიც ხდება 300 კილომეტრზე მეტ სიღრმეზე - ზოგჯერ დედამიწის ზედაპირიდან 750 კილომეტრამდე სიღრმეზე ვრცელდება. დედამიწის ქერქში მომხდარი ტიპური მიწისძვრებისგან განსხვავებით, ეს ფენომენები მანტიაში წარმოიქმნება, სადაც მასალა, როგორც წესი, დრეკადია, დეფორმირდება როგორც პლასტიკური და არა მსხვრევადი. ეს ამ მიწისძვრების ბუნებას ძალიან უჩვეულოს ხდის. იმის გათვალისწინებით, რომ ეს ღრმა ფოკუსის მქონე მიწისძვრები ხდება ექსტრემალური წნევისა და ტემპერატურის პირობებში, ისინი, სავარაუდოდ, ძლიერი მანტიის აფეთქებების შედეგია. მათი ენერგია შედარებადია დედამიწის მანტიაში მრავალი ბირთვული ბომბის ერთდროულ აფეთქებასთან.

გარდა ამისა, ღრმა ფოკუსის მქონე მიწისძვრებს ხშირად შეუძლიათ ძლიერი სეისმური მოვლენების გამოწვევა დედამიწის ქერქში, რაც აძლიერებს მათ დამანგრეველ ზემოქმედებას. 1995 წლიდან მოყოლებული, ასეთი ღრმა მიწისძვრების რიცხვი მკვეთრად გაიზარდა (სურ. 138), რაც ემთხვევა იმავე პერიოდში დაწყებულ სხვა გეოდინამიკურ ანომალიებს. მანტიაშიდა აფეთქებების სიხშირის ზრდა დედამიწის წიაღში ენერგეტიკული აქტივობის გაზრდასა და მანტიის დნობის დაჩქარებაზე მიუთითებს, რამაც პოტენციურად შეიძლება ფართომასშტაბიანი ვულკანური ამოფრქვევები გამოიწვიოს.

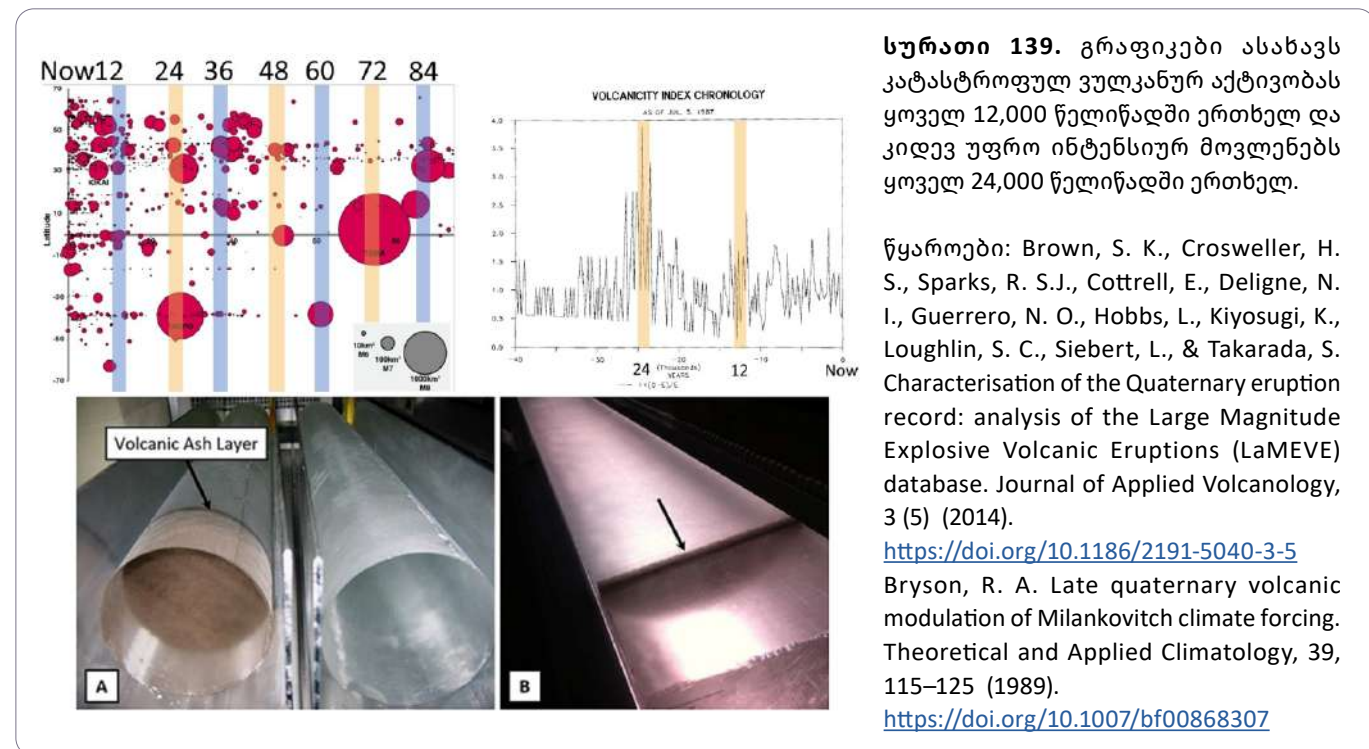


1995 წლიდან, ცენტრიდანული ძალების ზემოქმედებით, დედამიწის მანტიაში გამდნარი მაგმა უფრო აქტიურად იწყებს ზედაპირისკენ აწევას, რაც ლითოსფეროს შიგნიდან ჩვეულებრივზე უფრო ინტენსიურად ეროზიას და გაცხელებას იწვევს. მაგმის ეს აღმავალი მოძრაობა ზრდის დედამიწის შიგნიდან გამომავალ გეოთერმულ სითბოს ნაკადს და ააქტიურებს მაგმის ნაკადებს დასავლეთ ანტარქტიდის, ცენტრალური გრენლანდიისა და ციმბირის მყინვარების ქვეშ. შედეგად, მყინვარები და მუდმივი ყინული ქვემოდან დაჩქარებული ტემპით დნება.^{365, 366, 367}

ამრიგად, ოკეანის დათბობის ერთ-ერთი მთავარი მიზეზი მაგმის აწევაა, რომელიც განსაკუთრებით მოქმედებს ოკეანის ქერქზე - უფრო თხელ და დაუცველზე, ვიდრე კონტინენტური

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>

ქერქი - ქვემოდან გაცხელებით. გეოლოგიური ფენებისა და ყინულის ბირთვების ისტორიული ჩანაწერები მიუთითებს, რომ დედამიწას მსგავსი კატასტროფული ციკლები დაახლოებით ყოველ 12,000 წელიწადში ერთხელ განუცდია. უფრო მეტიც, ყოველ მეორე ციკლში - დაახლოებით ყოველ 24,000 წელიწადში ერთხელ - ეს პლანეტარული კატასტროფები კიდევ უფრო ინტენსიური იყო (სურ. 139).



დედამიწა ამჟამად ამ ციკლებიდან ერთ-ერთში შედის. თუმცა, ამჯერად, ოკეანის მიკრო- და ნანოპლასტიკებით ანთროპოგენური დაბინძურების გამო, მანტიაში თერმული დისბალანსი გაძლიერდა. ამან გამოიწვია ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა, ახალი მაგმის საკნების ფორმირება და პლანეტის ზოგადი დესტაბილიზაცია. შედეგად, კატაკლიზმები გაცილებით სწრაფად და მკვეთრად აჩქარებს, ვიდრე წინა ციკლებში. სინამდვილეში, ოკეანის დაბინძურება გახდა ერთ-ერთი მთავარი მიზეზი, რის გამოც დედამიწამ შეიძლება ვერ გაუძლოს ამ ციკლს. მნიშვნელოვანია გვესმოდეს, რომ მიკრო- და ნანოპლასტიკებით ოკეანის დაბინძურების წინააღმდეგ ბრძოლამ შეიძლება შეანელოს ამ კატაკლიზმების პროგრესირება, მაგრამ ეს მათ არ შეაჩერებს.



დედამიწის შიდა ნაწილის მიმდინარე გეოდინამიკური აქტივაციის, კატაკლიზმების 12 000-წლიანი ციკლისა და ამ საკითხის შესაძლო გადაწყვეტილებების შესახებ უფრო დეტალური ინფორმაცია შეგიძლიათ იხილოთ ანგარიშში

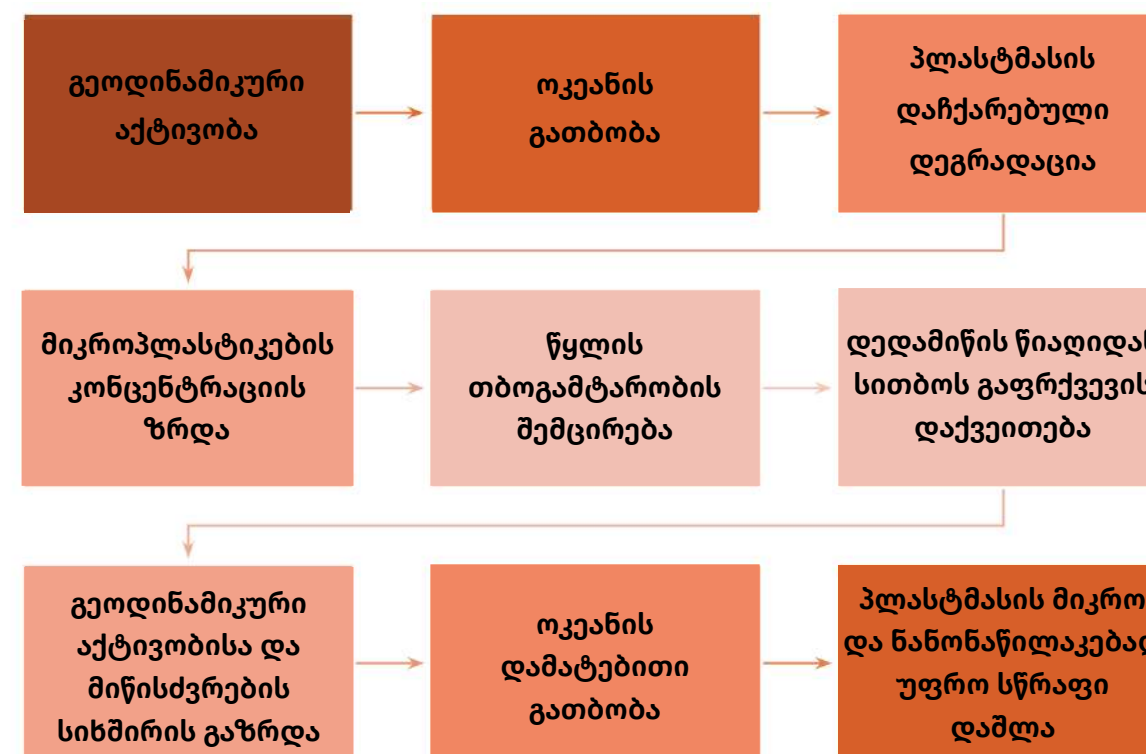
„დედამიწაზე კლიმატის კატაკლიზმების პროგრესირებისა და მათი კატასტროფული შედეგების შესახებ“

როგორც 12,000-წლიანი ციკლის განმავლობაში გეოდინამიკური ცვლილებების მრავალწლიანი ინტერდისციპლინარული კვლევა აჩვენებს, ოკეანის დათბობის ძირითადი მიზეზი მაგმის აწევაა, რომელსაც განსაკუთრებით ძლიერი გავლენა აქვს ოკეანის ქერქზე მისი უფრო თხელი და დაუცველი სტრუქტურის გამო კონტინენტურ ქერქთან შედარებით. მსოფლიო ოკეანის პლასტმასით დაბინძურება და მიკრო და ნანოპლასტიკური ნაწილაკების დაგროვება ოკეანის თერმოფიზიკური თვისებების შეცვლის კრიტიკულ ფაქტორად იქცა. ამ სინთეზური ნაწილაკების არსებობა ოკეანის წყალში მნიშვნელოვნად ამცირებს მის სითბოს გატარების უნარს, რაც არღვევს ბუნებრივი სითბოს გაცვლის პროცესებს ოკეანის ღრმა ფენებსა და ზედაპირს შორის. კიდევ უფრო კრიტიკულად, ის ხელს უშლის სითბოს გაფრქვევას ლითოსფერული ფირფიტებიდან. 12,000-წლიანი ციკლის განმავლობაში გეოდინამიკური აქტივობის გაზრდის პირობებში, ოკეანის წყლის თბოგამტარობის ფუნქციის ეს კრიტიკული დარღვევა არა მხოლოდ აძლიერებს ოკეანისა და ატმოსფეროს გათბობას, არამედ ზრდის მიწისძვრემა გათბობასაც. შედეგად, მანტიის დნობა აჩქარებს, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს გეოდინამიკურ აქტივობას.

ეს იწვევს დედამიწის წიაღში ჭარბი ენერგიის დაგროვებას, რაც იწვევს ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების ზრდას და ახალი მაგმის საკნების დაჩქარებულ ფორმირებას. თავის მხრივ, ეს პროცესები კიდევ უფრო ამძაფრებს პლანეტის არასტაბილურობას და აჩქარებს ოკეანის გათბობას.

იწყება სახიფათო უკუკავშირის მარყუქის ფორმირება:

გეოდინამიკური აქტივობა ათბობს ოკეანეს → სითბო აჩქარებს პლასტმასის დეგრადაციას → მიკროპლასტმასის მზარდი კონცენტრაციები ამცირებს ზღვის წყლის თბოგამტარობას → ეს არღვევს სითბოს გაფრქვევას დედამიწის წიაღიდან → რაც კიდევ უფრო აძლიერებს გეოდინამიკურ აქტივობას და ზრდის მიწისძვრების სიხშირეს → რაც იწვევს ოკეანის კიდევ უფრო მეტად გათბობას, რაც თავის მხრივ აჩქარებს პლასტმასის დაშლას მიკრო და ნანონაწილაკებად.



ეს ხელს უწყობს ექსტრემალური ამინდის მოვლენებისა და სტიქიური უბედურებების, როგორიცაა წყალდიდობები, ქარიშხლები და ტროპიკული ციკლონები, სიხშირისა და ინტენსივობის ზრდას, რომლებიც ახლა უფრო ინტენსიურად ხდება, ვიდრე ოდესმე.

ამრიგად, ოკეანის მიკრო და ნანოპლასტიკური დაბინძურება არა მხოლოდ დამანგრეველ გავლენას ახდენს ადამიანის ჯანმრთელობაზე, ეკოსისტემებზე, ბიოსფეროსა და კლიმატურ სისტემაზე, ოკეანის დათბობის გაძლიერებით - ის ასევე მოქმედებს როგორც გამაძლიერებელი ფაქტორი 24,000-წლიან ციკლთან დაკავშირებული ისედაც ექსტრემალური კატასტროფებისთვის, რომელშიც დედამიწა ახლა შევიდა. ეს ქმნის უპრეცედენტო რისკებს არა მხოლოდ კაცობრიობის გადარჩენისთვის, არამედ თავად პლანეტისთვისაც.

გლობალური გარემოსდაცვითი, კლიმატური და გეოდინამიკური კრიზისის მოგვარება მოითხოვს საერთაშორისო თანამშრომლობას სხვადასხვა დისციპლინის მეცნიერებს შორის, რათა სასწრაფოდ შეიმუშაონ და განახორციელონ ყოვლისმომცველი გადაწყვეტილებები. ეს უნდა მოიცავდეს ოკეანის მიკრო და ნანოპლასტიკებით დეკონტამინაციას, ადამიანის ორგანიზმზე მათი მავნე ზემოქმედების შემცირებას და გეოდინამიკურ საფრთხეებზე ფუნდამენტურ რეაგირებას.

შემოთავაზებული გადაწყვეტილებები შეგიძლიათ იხილოთ შესაბამის ანგარიშებში:



ანგარიში

**„დედამიწაზე კლიმატური
კატასტროფების მიმდინარეობისა
და მათი კატასტროფული
შედეგების შესახებ“**



ანგარიში

**„ციმბირში მაგმის ამოფრქვევის
საფრთხისა და პრობლემის მოგვარების
სტრატეგიების შესახებ“**

დასკვნები: ნანოპლასტიკები წარმოადგენს გამოწვევას, რომლის იგნორირებაც არ შეიძლება

პლასტიკის დაბინძურების, განსაკუთრებით მიკრო და ნანოპლასტიკების (მნპ) პრობლემა გასცდა ლოკალიზებული გარემოსდაცვითი ზიანის ფარგლებს და რთულ გლობალურ საფრთხედ გადაიქცა. ბოლოდროინდელი კვლევები ადასტურებს მნპ-ების როგორც პირდაპირ, ასევე ირიბ გავლენას კლიმატურ სისტემაზე, ეკოსისტემის მდგრადობასა და ადამიანის ჯანმრთელობაზე. მიკროპლასტიკური ნაწილაკები ცოცხალ ორგანიზმებში შეღწევას, ანთებითი რეაქციების გამოწვევას, ჰორმონალური ბალანსის დარღვევას, იმუნური და რეპროდუქციული ფუნქციების დარღვევას და გარემოს ფიზიკური და ქიმიური თვისებების შეცვლას, ოკეანის წყლიდან ატმოსფეროში.

ათ წელზე მეტი ხნის წინ, ALLATRA-ს საერთაშორისო სამეცნიერო საზოგადოების წარმომადგენლებმა წამოაყენეს ჰიპოთეზა, რომ პლასტიკის დაბინძურება სულ უფრო მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენდა კლიმატის ანომალიებზე და გაამწვავებდა საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის პრობლემებს. დღეს ეს ჰიპოთეზები დადასტურებულია წამყვანი სამეცნიერო ინსტიტუტების მიერ ჩატარებული დამოუკიდებელი კვლევებით. მრავალპროფილური ნანოპლასტიკების გარემოსდაცვითი და ბიოლოგიური ეფექტების შესახებ მონაცემების სწრაფი დაგროვება ანალიზის ახალ გზებს ხსნის, მათ შორის კლიმატის ნიმუშების ტრანსფორმაციას, ჰიდროსფეროში ცვლილებებს და მდგრადი განვითარებისთვის სისტემური რისკების ესკალაციას.

განსაკუთრებულ შემოფოტებას იწვევს აღმოჩენა, რომ ნანოპლასტიკის მიკროსკოპული კონცენტრაციებიც კი შეიძლება კასკადური ეფექტების ინიცირებას მოახდენდეს მთელ ბიოსფეროსა და კლიმატურ სისტემაში. პლასტიკი ადარ არის მხოლოდ მყარი ნარჩენები: ის ტრანსფორმაციის აქტიური აგენტი გახდა, რომელიც გავლენას ახდენს როგორც გარემოზე, ასევე ადამიანის ორგანიზმზე. მისი შედეგები უკვე აშკარა ხდება. მრავალპროფილური ნანოპლასტიკის კრიზისი სცილდება ეკოლოგიასა და მედიცინას; ის ასევე უნდა იქნას გაგებული ეროვნული უსაფრთხოების, მაკროეკონომიკისა და საერთაშორისო ურთიერთობების კონტექსტში.

ამ საფრთხის წინააღმდეგ ბრძოლის სტრატეგიის ფარგლებში, ALLATRA მოძრაობამ შემოგვთავაზა ორი ძირითადი მიმართულება, როგორც პრაქტიკული გამოყენებით, ასევე პროგნოზირების პოტენციალით. პირველი გულისხმობს ატმოსფერული წყლის გენერაციის (AWG) ტექნოლოგიების ფართომასშტაბიან დანერგვას, რომლებსაც ერთდროულად შეუძლიათ მტკნარი წყლის დეფიციტის მოგვარება და ატმოსფეროდან და ოკეანეებიდან მიკროპლასტიკური ნაწილაკების მოცილებაში წვლილის შეტანა. თუმცა, AWG ტექნოლოგიების დანერგვა ასევე უნდა ითვალისწინებდეს პოტენციურ რისკებს: კერძოდ, ჰაერში მნპ-ების გაზრდილი კონცენტრაცია და ადამიანებში შესუნთქვის შედეგად ზემოქმედების გაძლიერება. ეს ხაზს უსვამს მაღალეფექტური ფილტრაციისა და დამცავი სისტემების პარალელური განვითარების გადაუდებელ აუცილებლობას.

ALLATRA-ს მიერ შემოთავაზებული მეორე სტრატეგიული მიმართულება გულისხმობს ნანოპლასტიკების ელექტროსტატიკური მუხტის ნეიტრალიზაციის ან დაფარვის მეთოდების შემუშავებას - მათი ტოქსიკურობის ხელშემწყობი ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორი. დამუხტული ნანოპლასტიკური ნაწილაკები აქტიურად ურთიერთქმედებენ უჯრედის მემბრანებთან, ცილებთან და გენეტიკურ მასალასთან, ქმნიან სტაბილურ მოლეკულურ ბმებს. ამ ნაწილაკებს შეუძლიათ შეაღწიონ ბიოლოგიურ ბარიერებში, მათ შორის ჰემატოენცეფალურ ბარიერში, დაგროვდნენ ქსოვილებში და გამოიწვიონ უჯრედული დარღვევების კასკადი - ჟანგვითი სტრესიდან აპოპტოზამდე. მიკრო- და ნანოპლასტიკების ელექტროსტატიკური აქტივობის შემცირებამ შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს მათი მავნე ზემოქმედება და შეანელოს მათი დაგროვება ადამიანის ორგანიზმში.

ანგარიშის ავტორების თქმით, მრავალნახშირბადიანი ნაერთების ელექტროსტატიკური მუხტის დაცვა ან ნეიტრალიზაცია მათ პოტენციურ საფრთხეს მინიმუმ 50%-ით ამცირებს, რაც კვლევის ამ სფეროს კრიტიკულად მნიშვნელოვანს ხდის. ასეთი ზომები აუცილებელ დროს შექმნის უფრო ყოვლისმომცველი სტრატეგიების შესამუშავებლად მრავალნახშირბადიანი ნაერთების ადამიანის ორგანიზმიდან დიაგნოსტიკის, პრევენციისა და მოცილების, ასევე ბიოსფეროს გაწმენდის მიზნით. ამ კონტექსტში, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბიოფიზიკის, ნანოტექნოლოგიისა და მოლეკულური ტოქსიკოლოგიის სფეროებში კვლევა.

ამგვარად, მრავალეროვნული ნაერთების მიერ შექმნილ საფრთხეზე ეფექტური რეაგირება მოითხოვს არა იზოლირებულ ზომებს, არამედ გლობალურ და ინტერდისციპლინურ მიდგომას. საჭიროა კოორდინირებული ძალისხმევა სამეცნიერო კვლევის, ტექნოლოგიური ინოვაციების, მარეგულირებელი ჩარჩოებისა და საერთაშორისო თანამშრომლობის ფარგლებში. პლასტიკის დაბინძურება არ უნდა განიხილებოდეს, როგორც ვიწრო გარემოსდაცვითი საკითხი, არამედ როგორც სისტემური გამოწვევა, რომელიც გავლენას ახდენს საზოგადოებრივ ჯანმრთელობაზე, უსაფრთხოებაზე, რესურსების უსაფრთხოებასა და სოციალური ინფრასტრუქტურის მდგრადობაზე.

ამ ანგარიშს უნიკალურს ხდის მისი ყოვლისმომცველი, ინტერდისციპლინარული მიდგომა, რომელიც აერთიანებს ფიზიკის, ქიმიის, ბიოლოგიისა და მედიცინის მონაცემებს. ეს სინთეზი საშუალებას იძლევა, მრავალპროფილური ნაშრომების საკითხი განვიხილოთ, როგორც ცივილიზაციური გამოწვევა, რომელიც მოითხოვს გადაწყვეტილებებს მრავალ დონეზე. გლობალური საზოგადოება მხოლოდ ახლა იწყებს ამ საფრთხის რეალური მასშტაბის გააზრებას. მიუხედავად იმისა, რომ ამჟამად უნივერსალური გადაწყვეტა არ არსებობს, სწორედ ასეთი გადაწყვეტის ძიებამ და სამეცნიერო თანამშრომლობის წინსვლამ შეიძლება გაუხსნას გზა კრიზისის დაძლევისკენ. მთავარი გამოწვევა არ არის გადაწყვეტის არარსებობა, არამედ მისი იდენტიფიცირების უნარი კრიტიკულ გარდამტეხ წერტილამდე მიღწევამდე.

წყაროები

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 რობერტა სიმმონა <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.jpuro.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles–Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Accessed May 1, 2025).
- Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807-3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025).

- Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>
- Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Accessed May 1, 2025).
- Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 µm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>
- Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>
- Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Accessed May 1, 2025)
- European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 2025).
- [Fanpage.it](https://www.fanpage.it). At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).
- Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).
- Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. *Birth Defects Research* 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>
- Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>
- Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 2025).
- Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329-340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

- Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>
- Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>
- Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>
- Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Accessed May 1, 2025)
- Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>
- GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).
- Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>
- Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>
- Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>
- Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>
- Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Accessed May 1, 2025).
- Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>
- Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Accessed May 1, 2025)
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>
- Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>
- How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Accessed May 1, 2025)
- Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>
- Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>
- Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Accessed May 1, 2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Accessed May 1, 2025).

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

Irigoién, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

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

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8y-jNFxkALjIC&pg=PA192>

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

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

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

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Accessed May 1, 2025).

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

Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

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

Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Accessed May 1, 2025)

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

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

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

Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.

Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in The Encyclopedia of Volcanoes (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs’ lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10
- Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>
- Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>
- Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to ‘White Pollution’. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>
- Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>
- Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
- Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Accessed May 1, 2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

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

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

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

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

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

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (Accessed May 1, 2025).

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

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Accessed May 1, 2025).

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Accessed May 1, 2025).

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 10, 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 1, 2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Accessed May 1, 2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Accessed May 1, 2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

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

Nippon.com. Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 2025).

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

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

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 2025).

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

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

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

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

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

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

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

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

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Accessed May 1, 2025).

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

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

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

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Accessed May 10, 2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingrassia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Accessed May 1, 2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 1, 2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).

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

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

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Accessed May 1, 2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 2025).

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

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

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

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

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Accessed May 1, 2025).

Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Accessed May 10, 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Accessed May 10, 2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Accessed May 1, 2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Accessed May 1, 2025).

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

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

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

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Accessed May 1, 2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Accessed May 1, 2025).

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

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Accessed May 1, 2025).

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

United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025)

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

United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Accessed May 1, 2025)

United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Accessed May 1, 2025)

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

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Accessed May 1, 2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025)

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Accessed May 1, 2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUF.pdf> (Accessed May 1, 2025)
- Van Schependom, J. & D’haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>
- Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>
- Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

- Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>
- Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>
- Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics’ Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>
- Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>
- Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
- Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter’s Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>
- Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Accessed May 1, 2025).
- World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).
- World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early-with-major-impacts-on-health-and-survival> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Accessed May 1, 2025).

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Accessed May 1, 2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Accessed May 1, 2025).

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

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Accessed May 1, 2025).

Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. *Science of The Total Environment* 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

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

Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. *Cambridge Prisms: Plastics* 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

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

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

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

Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

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

Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enccco.2024.08.006>

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

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

Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>