

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 2
Pages 40-52
ISSN: 2252-0449

The Global Challenge of Microplastics: Environmental Impacts and Solutions

Ziba Shirini and Fatemeh Rafiemanzelat*

Polymer Chemistry Research Lab, Department of Chemistry, University of Isfahan,

Postal Code 73441-81746, Isfahan, Iran

Received: 5 November 2024, Accepted: 13 April 2025

Abstract

Microplastic pollution is a pervasive global issue that affects terrestrial and aquatic ecosystems, and poses significant environmental challenges for human populations. Defined as particles ranging from 1 μm to 5 mm in size, microplastics arise from the improper disposal and use of plastics through industrial products such as including cleaners, cosmetics, packaging materials, and pharmaceuticals. Furthermore, they can also originate from the degradation of larger plastic items and enter the environment through various pathways such as drinking water sources, sea salts, and ingestion by marine organisms, and subsequently infiltrate the food chain. Their diminutive size enables them to escape conventional wastewater treatment processes, leading to their widespread dispersion in the environment. Due to their high surface area-to-volume ratio, microplastics serve as carriers of organic pollutants, heavy metals, toxins, and potentially harmful pathogens, posing risks to ecosystems. Recognized for their persistence, stability, and adverse health effects, microplastics have emerged as a pressing environmental concern, encouraging extensive research efforts towards large-scale ocean cleaning initiatives, reduced synthetic plastic utilization, and the development of biodegradable alternatives. The purpose of this article is to raise scientific awareness and provide existing solutions for the proper use of polymers and their waste management, in order to draw the attention of the polymer scientific community to the need to accelerate research in joining the global strategy for improving the environment by providing effective solutions for recycling and replacing more environmentally friendly polymers

Key Words

microplastic,
polymer,
toxicity,
environmental pollutant,
human health risk

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: frafiemanzelat@chem.ui.ac.ir

چالش جهانی میکروپلاستیک‌ها: آثار زیست‌محیطی و راه‌حل‌ها

بسپارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۲،
صفحه ۵۲-۴۰، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

زیبا شیرینی و فاطمه رفیع‌منزلت*

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده شیمی، آزمایشگاه پژوهشی گروه شیمی پلیمر،

کد پستی ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۴

چکیده



زیبا شیرینی



فاطمه رفیع‌منزلت

آلودگی میکروپلاستیک‌ها مسئله فراگیر جهانی است که بر بوم‌سازگان زمینی و آبی اثر می‌گذارد و چالش‌های زیست‌محیطی درخور توجهی را برای جمعیت‌های انسانی ایجاد می‌کند. ابعاد میکروپلاستیک‌ها $1\text{ }\mu\text{m}$ تا 5 mm است که در اثر استفاده یا دفع نادرست پلاستیک‌ها و از طریق تولیدات صنعتی مانند پاک‌کننده‌ها، لوازم آرایشی، داروها و بسته‌بندی ایجاد می‌شوند. افزون‌براین، آن‌ها می‌توانند از تخریب اقلام پلاستیکی بزرگ‌تر، ایجاد و از طریق مسیرهایی مانند منابع آب آشامیدنی، نمک‌های دریایی و بلع توسط موجودات دریایی وارد محیط‌زیست شوند و در پی آن به زنجیره غذایی نفوذ کنند. اندازه کوچک میکروپلاستیک‌ها به آن‌ها امکان گریز از فرایندهای تصفیه فاضلاب معمول را می‌دهد. آن‌ها به دلیل نسبت زیاد سطح به حجم، به عنوان حامل آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین، سموم و عوامل بیماری‌زای بالقوه مضر عمل کرده و خطرهایی را برای سامانه‌های بوم‌سازگان ایجاد می‌کنند. میکروپلاستیک‌ها به دلیل پایایی، پایداری و آثار نامطلوب بر سلامتی به عنوان نگرانی زیست‌محیطی شناخته شده و پژوهش‌های بسیاری برای یافتن راه‌حل‌های پاک‌سازی اقیانوس‌ها در مقیاس گسترده، کاهش استفاده از پلاستیک‌های سنتزی و توسعه جایگزین‌های زیست‌تخریب‌پذیر سازگار با محیط‌زیست، مطالعات دقیق‌تر آثار آن بر بدن انسان و استفاده از فناوری‌های اصلاحی برای کاهش آلودگی پلاستیکی در بوم‌سازگان‌های مختلف و نیز وضع مقررات جهانی در حال انجام است. هدف از تدوین این مقاله، آگاهی‌بخشی علمی و ارائه راهکارهای موجود برای مصرف صحیح پلیمرها و مدیریت پسماند آن‌هاست تا توجه جامعه علمی پلیمری به لزوم شتاب‌دهی پژوهش‌ها در پیوستن به راهبرد جهانی برای بهبود محیط‌زیست با ارائه راهکارهای مؤثر بازیافت و جایگزینی پلیمرها سازگار با محیط‌زیست بیشتر جلب شود.

واژگان کلیدی

میکروپلاستیک،
پلیمر،
سمیت،
آلاینده محیط‌زیست،
خطر سلامتی انسان

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
frafiemanzelat@chem.ui.ac.ir

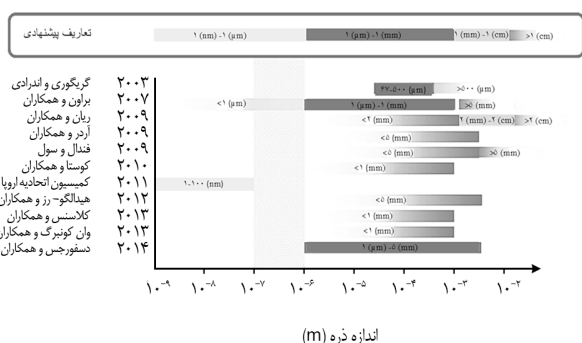
مقدمه

پلاستیک‌ها از دهه ۱۹۵۰ به یکی از اجزای مهم زندگی مدرن تبدیل شده و تا سال ۲۰۲۰ تولید آن‌ها به بیش از ۳۶۷ Mt/yr رسیده است [۱]. با وجود نقش حیاتی پلیمرها در فناوری و زندگی روزمره، بحران زباله‌های پلاستیکی و طولانی بودن زمان تجزیه آن‌ها، موجب بروز ذرات کوچکی به نام میکروپلاستیک در محیط‌زیست شده است. این ذرات حتی در نقاط دوردستی چون قله اورست و اقیانوس‌ها نیز یافت می‌شوند. این وضعیت نیازمند راهکارهای سازگار با محیط‌زیست در تولید و مصرف پلاستیک‌ها و بازنگری در مقررات مدیریت پسماند است. از دهه ۱۹۷۰، میکروپلاستیک‌ها در سراسر جهان شناسایی شده و آثار آن‌ها بر محیط‌زیست و سلامت همچنان مورد بحث است [۲].

در سال ۲۰۰۴، تامپسون و همکاران اصطلاح میکروپلاستیک را برای توصیف ذرات پلاستیکی کوچک‌تر از ۵ mm معرفی کردند و از آن زمان به موضوعی مهم در پژوهش‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است. اخیراً واژه نانوپلاستیک برای ذراتی کوچک‌تر از ۱۰۰ nm نیز مطرح شده است. باین‌حال، اختلافاتی درباره محدوده اندازه و آثار میکروپلاستیک‌ها وجود داشته که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد (شکل ۱) [۳]. میکروپلاستیک‌ها قطعات کوچک پلاستیکی هستند که از تخریب یا حین تولید قطعات پلاستیکی بزرگ‌تر به وجود می‌آیند. آن‌ها به دو نوع اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند و در محیط‌زیست، به‌ویژه آب‌ها و زندگی دریایی، آلودگی ایجاد می‌کنند. امروزه میکروپلاستیک‌ها در تمام زیستگاه‌های آبی، از اقیانوس‌های آزاد تا رودخانه‌ها و رسوبات، یافت می‌شوند و وارد چرخه غذایی و سایر بوم‌زادگان می‌شوند. این ذرات می‌توانند دارای مواد شیمیایی سمی و ریزاندامگان بیماری‌زا باشند که برای سلامت انسان‌ها و حیوانات خطرناک هستند. تعیین توزیع و کمیت این ذرات به دلیل نبود روش‌های نمونه‌برداری و تحلیل دقیق، چالشی اساسی است. میکروپلاستیک‌ها حتی در قطرات باران نیز یافت می‌شوند و می‌توانند آب را آلوده کنند. امروزه راهکارهایی چون زیست‌فناوری و ابزارهای مهندسی برای حذف آن‌ها در حال توسعه هستند، هرچند این راهکارها در مراحل اولیه قرار دارند [۴].

طبقه‌بندی میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها را می‌توان براساس منبع، شیمی و شکل‌شناسی آن‌ها طبقه‌بندی کرد. میکروپلاستیک‌ها از منابع مختلف تولید می‌شوند که در یک گروه ناهمگن از ذرات با قطر، الگو، شکل‌گیری شیمیایی و چگالی نسبی یا وزن مخصوص در محیط باقی می‌مانند.



شکل ۱- تعریف پیشنهادی پلاستیک براساس اندازه توسط نویسندگان مختلف [۳].

درواقع، میکروپلاستیک‌ها را می‌توان بسته به ویژگی‌های یادشده به گروه‌های زیادی تقسیم کرد که شامل طیف گسترده‌ای از انواع پلیمرها، اندازه ذرات، اشکال (از کره تا الیاف) و فرمول‌های شیمیایی (هزاران نوع مختلف) می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها براساس منشأ به دو دسته اصلی میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه طبقه‌بندی می‌شوند که منشأ آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است [۶].

میکروپلاستیک‌های اولیه

میکروپلاستیک‌های اولیه رایج‌ترین شکل پلاستیک‌های تولیدشده در ابعاد کوچک هستند و به‌عنوان ذرات پلاستیکی ریز به‌طورمستقیم وارد محیط می‌شوند. تخمین زده می‌شود، حدود ۱۵٪ تا ۳۱٪ از میکروپلاستیک‌ها در اقیانوس‌ها هستند. آن‌ها بیشتر از طریق تخلیه فاضلاب با عبور از سامانه‌های تصفیه با حجمی معادل ۶۵ Mt روزانه وارد محیط‌های آبی مانند اقیانوس‌ها، دریاچه‌های آب شیرین و رودخانه‌ها می‌شوند. ورود میکروپلاستیک‌های اولیه به آب‌ها، که ناشی از اثر درخور توجه فعالیت‌های انسانی است، به‌عمد یا به‌طور تصادفی در اثر تولید، حمل‌ونقل، استفاده یا دفع پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط‌زیست انجام می‌شود.

برخی میکروپلاستیک‌های اولیه عبارتند از:

الف- ذرات ریزی که برای استفاده در محصولات مختلف مانند لایه‌بردارهای صورت، خمیردندان، شوینده‌ها و غیره تولید می‌شوند.
ب- پودرهای پلاستیکی که در رنگ‌ها، چسب‌ها، مواد شیمیایی و پرکننده‌ها استفاده می‌شوند.

پ- گرانول‌هایی که به‌عنوان مواد اولیه در تولید محصولات پلاستیکی حجم‌تر به‌کار می‌روند.

ت- الیافی که از لباس‌های مصنوعی، فرش، پتو و سایر اقلام جداشده و به محیط‌زیست راه پیدا می‌کنند.

جدول ۱- منشأ اثبات شده میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه [۵].

میکروپلاستیک‌های ثانویه	میکروپلاستیک‌های اولیه
- تکه مواد پلاستیکی بزرگ‌تر - راهبردهای نابخردانه دفع زباله‌های پلاستیکی و مدیریت نامناسب محل‌های دفن زباله - پسماندها یا زباله‌های بادآورده با تأسیسات بازیافت بیشتر از بین می‌روند. - درصد زیادی از پلاستیک‌های تولیدی برای بسته‌بندی استفاده می‌شود. - بلایای طبیعی مانند طوفان، سونامی و امواج قوی دریا و سیل ناگهانی - از رگه‌های پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE) در مقیاس وسیع برای حفظ محصولات کشاورزی، مهار علف‌های هرز، افزایش دما و حفظ آب در خاک استفاده می‌شود که به آن مالچ پلاستیکی می‌گویند. - الیاف پلی‌استرن ۵ mm تا ۱۵ mm در باغبانی به‌عنوان افزودنی کمپوست استفاده می‌شود.	- منسوجات مصنوعی، تکه‌های الیاف را آزاد می‌کنند. - سایش ناشی از لاستیک خودرو - اجزای محصولات پلاستیکی تولیدی (پلاستیک‌های پیش‌تولید) - پسماندهای کارخانه‌های فراوری پلاستیک و گرانول تولیدی طی بازیافت پلاستیک - محصولات نظافت و مراقبت شخصی مانند لوازم آرایشی، لایه‌بردارها، شوینده صورت و بدن، ژل دوش، خمیر دندان و غیره؛ کاربردهای پزشکی، مانند پولیش دندان دندانپزشکی و عوامل حامل مواد دارویی - خروج سیالات حفاری در اثر عملیات اکتشاف نفت و گاز و در ساینده‌های صنعتی - محصولات بهداشتی در انواع مختلف نیز تکه‌هایی از الیاف را آزاد می‌کنند. - چمن مصنوعی در زمین فوتبال

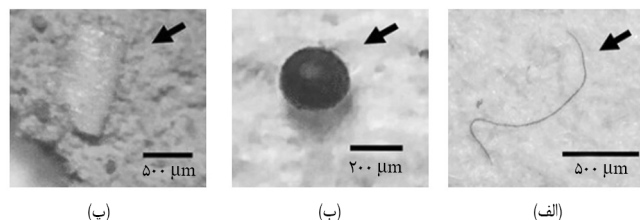
فرسایش خاک یا رواناب سطحی (surface runoff) به محیط‌های آبی وارد شوند. همچنین فعالیت‌های انسانی مانند زباله‌ریزی طی فرایندهای جمع‌آوری و دفع زباله‌های جامد شهری به آلودگی میکروپلاستیک از منابع ثانویه کمک می‌کند [۵].

شکل‌شناسی و شیمی میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها در شکل‌شناسی‌های مختلف مانند الیاف، قطعات و دانه‌تسبیجی (شکل ۲) با ترکیبات شیمیایی مختلف مانند پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌پروپیلن و غیره یافت می‌شوند (جدول ۲). الیاف از فرسودگی و پارگی پارچه‌های مصنوعی و وسایل ماهیگیری به‌وجود می‌آیند. قطعات کوچک‌تر زباله‌های پلاستیکی، معمولاً به شکل نامنظم و از اجسام شکسته حاصل می‌شوند. ذرات گرد اغلب به‌عنوان پرکننده در محصولات مصرفی استفاده شده یا در نتیجه هوازدگی ایجاد می‌شوند [۸].

خواص میکروپلاستیک‌ها

خواص فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی میکروپلاستیک‌ها عوامل بسیار مهمی هستند که بر رفتار، توزیع و آثار محیطی آن‌ها



شکل ۲- شکل‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها در طبیعت: (الف) لیفی، (ب) دانه‌تسبیجی و (پ) قطعه‌ای [۸].

ث- گلوله‌های پلاستیکی که در تیراندازی، شکار، ماهی‌گیری و سایر سرگرمی‌ها به‌کار می‌روند [۵].

میکروپلاستیک‌های ثانویه

قطعات کوچک پلاستیکی هستند که از تخریب فیزیکی، شیمیایی یا زیستی پلاستیک‌های بزرگ‌تر به‌وجود می‌آیند. این تخریب می‌تواند تحت تأثیر عوامل محیطی چون نور خورشید، دما، اکسیژن، امواج، باد، باران و موجودات زنده به‌صورت شیمیایی یا مکانیکی باشد [۵]. تخریب شیمیایی پلاستیک‌ها، فرایند پیچیده‌ای است که به شکستن پیوندهای شیمیایی در ساختار آن‌ها منجر می‌شود. تخریب نوری ناشی از جذب تابش فرابنفش خورشید، باعث شکنندگی و تغییر رنگ پلاستیک‌ها و ایجاد رادیکال‌های آزاد در پلیمرها می‌شود. همچنین در تخریب گرمایی به‌واسطه افزایش دما، پیوندهای شیمیایی شکسته شده و موجب اکسایش و کاهش وزن مولکولی پلیمرها می‌شود. اکسیژن موجود در هوا نیز با پلاستیک‌ها واکنش می‌دهد و باعث تخریب اکسایشی و تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود. آب‌کافت، به‌ویژه در پلیمرهای حساس به آب، باعث شکستن پیوندهای استری یا آمیدی و کاهش استحکام آن‌ها می‌شود. دما و نور خورشید به‌عنوان عوامل کلیدی، سرعت فرایندهای تخریب شیمیایی پلاستیک‌ها را به‌طور درخور توجه افزایش می‌دهند. افزایش دما، انرژی لازم برای شکستن پیوندها را فراهم می‌کند و واکنش‌های تخریب را شتاب می‌دهد. تابش فرابنفش خورشید با ایجاد تخریب نوری، باعث شکنندگی و تغییر رنگ پلاستیک‌ها می‌شود. درنهایت، این فرایندهای تخریب شیمیایی موجب تولید میکروپلاستیک‌های ثانویه و آلودگی محیط‌زیست می‌شوند [۷]. قطعات تخریب شده پلاستیک‌ها ممکن است در اثر پراکندگی باد،

جدول ۲- چند ویژگی از رایج ترین پلاستیک های یافت شده در میکروپلاستیک ها [۳].

نام	محصولات	چگالی (g/mL)	طول عمر (y)
پلی اتیلن ترفتالات (PET)	بطری های آب	۱/۳۷ - ۱/۴۵	۲۰
پلی استر (PES)	لباس های پلی استری	۱/۳۹	۲۰ <
پلی اتیلن کم چگالی (LDPE)	کیسه های پلاستیکی و بطری های فشرده	۰/۹۱۷ - ۰/۹۳۰	
پلی اتیلن پر چگالی (HDPE)	بطری های مواد شوینده	۰/۹۳ - ۰/۹۷	۲۸ <
پلی وینیل کلرید (PVC)	لوله ها، کابل های برق و لباس	۱/۲۰ - ۱/۴۵	۱۴۰
پلی پروپیلن (PP)	لباس و درپوش	۰/۸۹ - ۰/۹۴	۱۰۰ <
پلی آمید (PA)	پارچه (ناپلون) و مسواک	۱/۱۳ - ۱/۳۵ / ۱/۴۱	۲۰ <
پلی استیرن (PS)	غذای آماده	۱/۰۴ - ۱/۱۱	۵۰
آکریلونیتریل-بوتادیان-استیرن (ABS)	سامانه های لوله و آلات موسیقی	۱/۰۴ - ۱/۰۶	
پلی تترافلوئورو اتیلن (PTFE)	بلبرینگ های ساده، چرخ دنده ها، صفحات کشویی، درزگیرها، واشرها و عایق ها	۲/۱۰ - ۲/۳۰	۱۴۰ <

اثرگذارند که در ادامه به هریک از آن ها پرداخته می شود.

خواص فیزیکی میکروپلاستیک ها

خواص فیزیکی میکروپلاستیک ها شامل اندازه ذرات، شکل، مساحت سطح، بلورینگی و چگالی است که بر فرایند تخریب اثرگذارند. از طرفی، فرایندهای تخریب میکروپلاستیک ها از طرق مختلف مانند هوازدهی، اکسایش، نور خورشید، رشد زیست فیلم و هوازدهی-پیرش گرمایی تغییراتی در این ویژگی ها ایجاد می کند. فرایند تخریب، ذرات پلاستیک را به ذرات میکرو تا نانو می شکند و ورود آن ها را به سامانه های زیستی آسان می کند [۹]. تغییرات سطح میکروپلاستیک ها می تواند به اندازه ذرات مرتبط باشد. شکل و سطح ذرات بر برهم کنش سامانه زیستی و ذرات پلیمری در محیط تأثیر می گذارد. فرسایش سطحی به تکه تکه شدن میکروپلاستیک ها منجر می شود. رفتارهای نفوذپذیری و جذب میکروپلاستیک ها تحت تأثیر اندازه و مساحت ذرات قرار می گیرد. فرایندهای مختلف اکسایش مانند اکسایش نوری و گرمایی باعث افزایش بلورینگی می شوند. قارچ ها، جلبک ها و باکتری ها در محیط های آبی روی میکروپلاستیک ها، زیست فیلم تشکیل می دهند [۱۰].

خواص شیمیایی میکروپلاستیک ها

رایج ترین انواع میکروپلاستیک ها در بوم سازگان آبی، پلی اتیلن (۲۵٪)، پلی اتیلن ترفتالات (۱۶/۵٪)، پلی آمید (۱۲٪)، پلی پروپیلن (۱۴٪)، پلی استیرن (۸/۵٪)، پلی وینیل الکل (۶٪) و پلی وینیل کلرید (۲٪) هستند [۳]. ۱۷ نوع پلیمر میکروپلاستیکی

در فاضلاب شهری یافت شده اند. این پلیمرها شامل آکریلات ها، زیست پلیمرها، پلی اتیلن پرچگالی، پلی اتیلن کم چگالی، ملامین، پلی پروپیلن، پلی استیرن، پلی یورتان، پلی وینیل الکل، لاستیک، پلی (تترافلوئورو اتیلن) و برخی دیگر هستند [۹]. ارتباط میان تولید و مصرف پلیمرها با آلودگی میکروپلاستیکی، نوعی ارتباط مستقیم و علت و معلولی است. افزایش تولید و مصرف پلاستیک، به طور مستقیم به افزایش زباله های پلاستیکی، تجزیه آن ها و در نهایت افزایش آلودگی میکروپلاستیکی منجر می شود [۱۱].

خواص زیست تخریب پذیری میکروپلاستیک ها

به طور کلی، زیست تخریب پلاستیک ها چالش برانگیز است. اخیراً دانشمندان دریافته اند، فعالیت انواع ریزاندامگان از جمله باکتری ها و قارچ ها به تجزیه پلاستیک ها کمک می کند. شرایط خاک عامل مهمی در زیست تخریب پلاستیک ها است، زیرا ریزاندامگان درگیر در تخریب، شرایط رشد بهینه متفاوتی در خاک دارند. افزون بر این انواع ریزاندامگان، روش پیش عمل آوری، ویژگی های پلیمر (مانند تحرک، سمیت، بلورینگی، وزن مولکولی، نوع گروه های عاملی و مواد افزودنی) و شرایط زیستی و غیرزیستی نیز از عوامل مهم در فرایند تخریب هستند [۹، ۱۱].

فراوانی و توزیع جهانی میکروپلاستیک ها

میکروپلاستیک ها معمولاً در تمام بخش های محیط مانند آب های شیرین، مصب رودها، اقیانوس ها، خطوط ساحلی، رسوبات، سواحل و خاک ها یافت می شوند. باین حال، فراوانی و توزیع

میکروپلاستیک‌ها تحت تأثیر متغیرهای انسانی و محیطی قرار می‌گیرند که بسته به منطقه، شرایط هیدرودینامیکی، فشار محیط و زمان متفاوت است. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و زباله‌های دریایی ناشی از دفع بی‌رویه زباله، منبع میکروپلاستیک‌ها در زیستگاه‌های آبی از جمله صخره‌های مرجانی در بوم‌سازگان دریایی هستند [۱۲]. میکروپلاستیک‌ها در محیط خشکی نیز تا حد زیادی یافت شده‌اند. Gautam و Fuller مقدار 67500 mg/kg میکروپلاستیک در خاک نزدیک به یک محل صنعتی در سیدنی استرالیا مشاهده کردند [۱۳]. Tiwari و همکاران در بمبئی هند 220 ماده به ازای هر کیلوگرم میکروپلاستیک در خاک ساحل یافتند. توزیع میکروپلاستیک‌ها به‌طور عمده به عوامل محیطی مانند باد، جریان‌ها، جزرومد و هیدرودینامیک رودخانه و در درجه دوم به فعالیت‌های انسانی مانند بهره‌برداری شیلات، ترافیک دریایی و گردشگری بستگی دارد. میکروپلاستیک‌ها در همه جای زمین از پرمجمعیت‌ترین مناطق چون چین یا هند تا مناطق بکر مانند قطب جنوب یافت می‌شوند [۱۴].

منابع و راه‌های ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط زیست، به‌ویژه آب

میکروپلاستیک‌ها از منابع مختلف وارد محیط می‌شوند. این منابع شامل فعالیت‌های شهری، کشاورزی و تفریحی، دورریزی بدون تمایز (بطری‌های پلاستیکی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل) و رهایش صنعتی (شامل صید ماهی و محصولات آرایشی) است [۹، ۱۵].

روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها در آب و موجودات

مطالعه و بررسی آثار منفی میکروپلاستیک‌ها، نیازمند روش‌های دقیق و کارآمد برای شناسایی و اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها در زیستگاه‌هاست. این روش‌ها شامل مراحل متعددی چون نمونه‌برداری، جداسازی و پاک‌سازی، شناسایی، کمی‌سازی و تأیید یافته‌هاست [۳، ۱۶].

نمونه‌برداری

روش مناسب نمونه‌برداری، اولین قدم جمع‌آوری نمونه‌های زیستگاه‌هاست. انتخاب روش نمونه‌برداری به نوع محیط و اهداف مطالعه بستگی دارد. مشکلات اصلی در نمونه‌برداری، نمایندگی و یکپارچگی است. میکروپلاستیک‌ها بسته به ویژگی‌های آن‌ها (چگالی، شکل و اندازه) و متغیرهای محیطی (نوع آب، رودخانه‌ها و امواج) به‌طور همگن در ستون آب توزیع نمی‌شوند. بنابراین، نمای میکروپلاستیک‌ها به روش نمونه‌برداری وابسته است. معمولاً سه

روش توری، غربال یا پمپ برای نمونه‌برداری در دریاها و آب‌های سطحی استفاده می‌شود [۱۶].

مداول‌ترین روش سطحی با توری‌های Neuston است. مقایسه دستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری براساس توری‌های با اندازه مش مختلف از جمله توری‌های Bongo ($500 \mu\text{m}$)، Manta ($300 \mu\text{m}$) و plankton ($400 \mu\text{m}$ < اندازه $200 \mu\text{m}$) با روش صافش ($0/45 \mu\text{m}$) نشان داد، غلظت میکروپلاستیک‌ها با استفاده از توری سه مرتبه کمتر از روش صافش است. اندازه مش یک نقطه بحرانی است که حداقل اندازه و تعداد میکروپلاستیک‌های شناسایی شده را تعیین می‌کند. افزون‌براین، الیاف و ذرات با ابعاد کمتر از $25 \mu\text{m}$ به راحتی این دستگاه‌ها را دور می‌زنند. نمونه‌برداری در ستون آب با صافش مستقیم آب با پمپ‌های تفنون شناور، تهیه نمونه‌های دسته‌ای یا شبکه‌های plankton یا Bongo انجام می‌شود [۱۷]. نمونه‌برداری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با دستگاه‌های تصفیه پمپ، نمونه‌های دسته‌ای یا نمونه‌های مرکب 24 h انجام می‌شود. یک دستگاه نمونه‌برداری خانگی با حجم زیاد در محل با استفاده از اندازه‌های مش مختلف قابلیت پردازش حجم زیادی از چند نوع آب را دارد (نمونه‌های اسمز معکوس تا 200 L و پساب اولیه بین 16 L تا 100 L). به هر حال روش یا دستورکار استاندارد برای نمونه‌برداری از آب وجود ندارد، به‌ویژه استفاده از مش‌های مختلف، مقایسه داده‌های نظارتی را دشوار می‌کند. میکروپلاستیک‌های جدا شده در توری‌ها و الک‌ها معمولاً با استفاده از آب به بطری‌های شیشه‌ای منتقل می‌شوند (نمونه کاهش‌یافته) که نیاز به عملیات بیشتری برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها دارند [۱۸].

جداسازی و پاک‌سازی

میکروپلاستیک‌ها پس از نمونه‌برداری باید از سایر مواد موجود در نمونه جدا شوند. فنون جداسازی رایج عبارت از جداسازی با چگالی، صافش، مرکزگریزی، شناورسازی و مرتب‌سازی چشمی هستند. تراکم و رنگ در مرتب‌سازی چشمی ملاک است که نتیجه زمان‌بر و با دقت کمتر را ارائه می‌دهد. تغییر خواص پلیمر به دلیل هوازدهی، طبقه‌بندی چشمی میکروپلاستیک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گام بعدی تشخیص میکروپلاستیک‌ها از سایر تداخلات بالقوه مانند مواد آلی است که می‌تواند با اکسایش مواد آلی یا جداسازی با چگالی انجام شود. همچنین، جداسازی میکروپلاستیک‌ها از آب و سایر مواد با حل‌پذیری متفاوت از طریق شناورسازی با استفاده از نمک یا سایر مواد شیمیایی انجام می‌شود. از روش مرکزگریزی نیز برای جداسازی با چگالی استفاده می‌شود [۱۹].

شناسایی، کمی سازی و تأیید یافته‌ها

آلودگی میکروپلاستیک‌ها به دلیل استفاده تصادفی و مدیریت ضعیف بسیاری از کالاهای پلاستیکی در حال افزایش است. افزون بر این، از میکروپلاستیک‌ها در برخی از صنایع خاص از جمله نساجی، کود، داروسازی، آرایشی و بهداشتی و غیره به عنوان عنصر کلیدی استفاده می‌شود. صنعت داروسازی از میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های دارورسانی هدفمند و پوشش قرص‌ها برای رهاسازی کنترل شده دارو بهره می‌برد. در صنعت آرایشی و بهداشتی، میکروپلاستیک‌ها به عنوان مواد لایه بردار، پرکننده و تثبیت کننده در محصولات مختلف استفاده می‌شوند. همچنین، میکروپلاستیک‌ها در صنایع دیگری مانند نساجی، رنگ، چسب و درزگیر و مواد شوینده به عنوان افزودنی کاربرد دارند [۲۰]. قیمت کم، خواص ویژه و تولید آسان از دلایل اصلی استفاده از میکروپلاستیک‌ها در صنایع مختلف به شمار می‌روند. با این حال، استفاده گسترده از میکروپلاستیک‌ها نگرانی‌های جدی درباره آلودگی زیست محیطی و خطرات احتمالی برای سلامتی ایجاد کرده است. بنابراین، پژوهشگران باید رویکردهایی شامل راهبردهای مدیریت پایدار و فناوری‌های مقرون به صرفه برای شناسایی و حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط را معرفی کنند. با توجه به اینکه میکروپلاستیک‌های مختلف از انواع پلیمرها تشکیل شده‌اند یا با سایر مواد اشتباه گرفته می‌شوند، کمی سازی آن‌ها به شناسایی این پلیمرها و فنون جداسازی و کمی متفاوتی نیاز دارد [۱۹].

روش‌های مختلفی برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها وجود دارد. Renner و همکاران طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ روش‌های شناسایی میکروپلاستیک‌ها را مطالعه کردند. تشخیص، شناسایی، طبقه بندی اندازه و تعیین کمیت میکروپلاستیک‌ها در ۷۹٪ از موارد با تصویربرداری (با چشم غیر مسلح یا میکروسکوپ) انجام می‌شود. میکروپلاستیک‌ها با رنگ غیرطبیعی (مثل آبی روشن و چندرنگ) یا شکل غیرطبیعی (مانند قطعات با لبه‌های تیز و کاملاً کروی) شناسایی می‌شوند. با این حال، حتی اگر پاک سازی برای حذف مواد آلی انجام شود، میکروپلاستیک‌ها با ذرات کروی ساخت دست بشر (خاکستر بادی، ذرات موجود در رنگ جاده، دود فلز، فلس ماهی، تکه‌های سرامیکی و غیره) اشتباه گرفته می‌شوند. چند آزمایش شیمی-فیزیکی مانند گرمادهی میکروپلاستیک‌ها در بیش از ۱۰۰ °C می‌تواند به بازرسی چشمی کمک کند. همچنین فنون تصویربرداری برای مشاهده میکروپلاستیک‌ها با اندازه کوچک تر، حاصل کاربرد توری‌های با اندازه‌های کوچک ارتقا یافته‌اند [۲۱].

آزمون‌های زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)، رامان و نسخه‌های

میکروسکوپی آن‌ها (میکرو FTIR یا میکرو Raman) کاربردی ترین روش‌ها بوده‌اند. روش بازتاب کلی تضعیف شده (ATR) نسبت به FTIR برای نمونه‌های ضخیم کارآمدتر است، اما برای تشخیص میکروپلاستیک‌ها با اندازه کوچک چندان کارایی ندارد. طیف‌های FTIR و ATR به دست آمده برای هر ذره، مانند یک اثر انگشت شیمیایی عمل می‌کند. هر نوع پلاستیک (مانند پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استیرن، پلی وینیل کلرید و غیره) دارای طیف زیرقرمز منحصر به فردی است. با مقایسه طیف حاصل از نمونه با طیف‌های مرجع موجود در پایگاه‌های داده، پژوهشگران می‌توانند نوع پلیمر موجود در نمونه را شناسایی کنند. به عنوان مثال، اگر طیف نمونه با طیف پلی اتیلن مطابقت داشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت، ذره مدنظر از پلی اتیلن ساخته شده است [۲۲]. برای شناسایی دقیق تر، ممکن است از فنون تکمیلی مانند میکروسکوپ نوری یا رامان نیز در کنار FTIR استفاده شود.

در فن رامان با تاباندن لیزر به ذره، نور پراکنده شده تحلیل می‌شود. طیف رامان به دست آمده، الگوهای ارتعاشی مولکولی خاصی را نشان می‌دهد که با طیف‌های مرجع پلیمرها مقایسه می‌شود. بدین ترتیب، نوع پلاستیک ذره، مثلاً پلی اتیلن ترفتالات (PET) یا پلی پروپیلن (PP) شناسایی می‌شود [۲۲]. تفکات-سوانگاری گازی-طیف سنجی جرمی (Py-GC-MS) یا تجزیه گرماوزن سنجی (TGA) همراه با گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) برای شناسایی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، پژوهشگران نمونه‌ای از خاک آلوده به میکروپلاستیک را در دستگاه TGA قرار می‌دهند. نمونه به تدریج تا دمای زیاد گرم می‌شود و در این میان، وزن نمونه به طور مداوم اندازه گیری می‌شود. کاهش وزن در دماهای خاص، نشانگر تجزیه پلیمرهای پلاستیکی است. با بررسی نمودار کاهش وزن و دمای تجزیه، نوع پلیمرهای موجود در نمونه شناسایی می‌شود. به عنوان مثال، تجزیه در دمای ۳۰۰ °C تا ۴۰۰ °C می‌تواند نشان دهنده وجود پلی اتیلن باشد. در همین زمان، DSC تغییرات گرما را در نمونه ثبت می‌کند، پیک‌های گرماگیر یا گرمازا در گرمانگاشت DSC، دماهای ذوب یا انتقال شیشه‌ای پلیمرها را نشان می‌دهد. با مقایسه داده‌های TGA (دمای تجزیه) و DSC (دمای ذوب-انتقال)، نوع میکروپلاستیک‌ها با دقت بیشتری شناسایی می‌شوند [۲۳].

برخی از سایر روش‌ها عبارت از طیف بینی پرتو ایکس انرژی پاشنده (EDS)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، استریومیکروسکوپ و غیره هستند. برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها، ابتدا با استریومیکروسکوپ ذرات مشکوک

مانند خاک در نمونه‌های محیطی بررسی می‌شوند. سپس SEM با بزرگ‌نمایی زیاد، شکل و اندازه دقیق ذرات را نشان می‌دهد و EDS، ترکیب عنصری آن‌ها را مشخص می‌کند. برای بررسی ساختار داخلی و لایه‌های نازک‌تر از TEM استفاده می‌شود. در نهایت، AFM می‌تواند خواص سطحی مانند زبری و چسبندگی ذرات را ارزیابی کند. به عنوان مثال، اگر در نمونه خاک ذراتی با شکل نامنظم و حاوی کربن و اکسیژن شناسایی شوند، احتمال وجود میکروپلاستیک‌ها بالا می‌رود [۲۴].

آزمون طیف‌بینی فوتوالکترونی پرتو ایکس (XPS) با بررسی لایه‌های سطحی مواد، امکان شناسایی میکروپلاستیک‌ها را فراهم می‌کند. در این آزمون با تاباندن پرتو ایکس به سطح این ذرات، الکترون‌ها از اتم‌های سطح جدا می‌شوند. سپس با تحلیل انرژی جنبشی این الکترون‌ها، می‌توان عناصر سازنده و پیوندهای شیمیایی موجود در سطح ذرات را شناسایی کرد. با مقایسه این اطلاعات با طیف‌های مرجع مواد پلاستیکی، می‌توان وجود و نوع میکروپلاستیک‌ها را در نمونه تأیید کرد. بدین ترتیب، XPS به عنوان ابزار قدرتمندی در شناسایی و تعیین مشخصات میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های مختلف عمل می‌کند [۲۵].

آثار میکروپلاستیک‌ها بر محیط زیست

میکروپلاستیک‌ها در تمام ماتریس‌های محیطی مانند آب‌های سطحی، رسوبات، سواحل، اقیانوس‌های عمیق، یخ‌های قطب، آب شیرین، خاک و حتی در رژیم غذایی، آب آشامیدنی، نمک دریایی و گردوغبار داخل خانه شناسایی شده‌اند. همچنین، وجود این ذرات در بدن انواع جانوران از پلانکتون‌ها تا شکارچیان بزرگ مانند ماهی‌ها، پرندگان و پستانداران، نشانگر آثار منفی میکروپلاستیک‌ها بر بوم‌سازگان است [۹]. از طرفی، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند آلاینده‌های آلی را جذب و به عنوان حامل آلاینده‌ها و ناقل برای عوامل بیماری‌زا عمل کنند و به طور بالقوه موجودات زنده از جمله انسان را در معرض مواد شیمیایی و میکروب‌های مضر قرار دهند. از طرف دیگر با تجزیه میکروپلاستیک‌ها به ذرات کوچک‌تر، زیست‌فراهمی افزودنی‌ها و مونومرهای سمی افزایش می‌یابد و قابلیت بالقوه تجمع زیستی در موجودات را افزایش می‌دهد [۲۶].

محیط آبی

میکروپلاستیک‌ها توسط انواع گونه‌های آبی مانند گونه‌های دریامیانی (pelagic) و گونه‌های اعماق دریا بلعیده می‌شوند. حرکت میکروپلاستیک‌ها پس از مصرف در سراسر زنجیره غذایی و

افزایش قابلیت بالقوه جذب آلاینده‌های سمی از آب و انتقال به سایر سطوح تغذیه، عامل ایجاد تهدید است. ماهی‌ها ممکن است میکروپلاستیک‌ها را به طور مستقیم یا از طریق شبکه غذایی بخورند. میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر در جلبک‌ها و بافت صدف و در نتیجه برای شکارچیان آن‌ها قابلیت بالقوه ایجاد سمیت دارد. خوردن میکروپلاستیک‌ها موجب آسیب فیزیکی، انسداد در سامانه گوارش، کاهش بازده تغذیه و سمیت احتمالی ناشی از مواد شیمیایی جذب شده و در نهایت تجمع زیستی افزودنی‌ها و آلاینده‌ها می‌شود که بر چرخه مواد مغذی، تعاملات گونه‌ها و سلامت کلی بوم‌سازگان و تنوع زیستی اثر دارد [۲۶].

بوم‌سازگان خاکی

آثار بالقوه میکروپلاستیک‌ها در محیط خاکی، کمتر از آب شناخته شده است. با این حال، به دلیل نور و اکسیژن کم در خاک، میکروپلاستیک‌ها ممکن است بیش از ۱۰۰ سال باقی بمانند. چند فرایند مانند تأمین آب، فرسایش، بارش، زباله‌ریزی، رواناب خیابانی و مالچ‌پاشی به عنوان علل ریش‌های وجود میکروپلاستیک‌ها در خاک در نظر گرفته می‌شوند. افزون‌براین، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با جانوران مختلف خاک تعامل داشته باشند. به عنوان مثال، دم‌فنی‌ها (springtails) یا پادمان‌ها (نوعی حشره بی‌بال) و کرم‌های خاکی قادر به انتقال میکروپلاستیک‌ها به درون خاک هستند [۲۷]. مطالعات مقطعی نشان داد، ۹۴٪ از ۱۷ پرندۀ خشکی‌زی مرده در چین، ۲۷٪ از ۲۳۰ بز و ۵۰٪ از ۱۸۵ گوسفند، در دستگاه گوارش خود میکروپلاستیک‌ها را حمل می‌کردند. میکروپلاستیک‌های کم‌چگالی (LDMP)، بیشترین فراوانی را در خاک زمینه‌ای کشاورزی دارند و مسئول کاهش ظرفیت نگهداری آب خاک هستند. بنابراین، میکروپلاستیک‌ها موانعی را بر سر عملکردهای ضروری ریزندامگان مختلف در خاک ایجاد می‌کنند [۹، ۲۷].

میکروپلاستیک‌ها و سلامت انسان

طبق نظر Sharma و Chatterjee در سال ۲۰۱۷، میکروپلاستیک‌های اولیه از منابع مختلف مانند خمیردندان، محصولات پاک‌کننده و لوازم آرایشی به عنوان منابع مواجهه انسانی در نظر گرفته می‌شوند [۲۸]. در سال ۲۰۱۸، ۹ نوع مختلف از میکروپلاستیک‌ها در نمونه مدفوع هشت شرکت‌کننده از ژاپن، روسیه و اروپا با اندازه ۵۰ μm تا ۵۰۰ μm عمدتاً پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات شناسایی شد. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن بود که انسان‌ها ممکن است

از طریق زنجیره غذایی با انواع مختلفی از میکروپلاستیک‌ها در تماس باشند. میکروپلاستیک‌ها در غذاهای دریایی روزبه‌روز در حال افزایش‌اند. افزون‌براین، گیاهان، میوه‌ها و سبزیجات مختلف میکروپلاستیک‌ها را از خاک جذب می‌کنند. در نتیجه، انسان تقریباً 80 mg/day میکروپلاستیک از طریق زنجیره غذایی مصرف می‌کند. طبق گزارش انجمن شیمی آمریکا (ACS) در سال ۲۰۲۰، میکروپلاستیک‌ها قابلیت تجمع در اندام‌های انسانی را یافته‌اند. پژوهشگران ۴۷ نمونه از چهار اندام (ریه، کبد، طحال و کلیه) را با استفاده از طیف‌سنجی میکرورامان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، این ذرات می‌توانند به‌عنوان مختل‌کننده غدد درون‌ریز عمل کرده و با سامانه هورمونی انسان تداخل کنند. میکروپلاستیک‌ها می‌توانند شبیه هورمون‌هایی مانند استروژن و کورتیزول عمل کنند و موجب مشکلاتی مانند افزایش وزن، اختلالات ساخت‌وسازی و باروری شوند. در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای در دانشگاه ناپل نشان داد، آثار منفی میکروپلاستیک‌ها در مردان بالغ شامل افزایش وزن، اختلال نعوظ و ناباروری است. همچنین مطالعات اخیر نشان داده است، میکروپلاستیک‌ها در بافت جفت و مکنونیوم انسان نیز وجود دارند و اثر شبه‌کورتیزول آن‌ها ممکن است به تنش مزمن و افزایش ذخیره چربی منجر شود [۲۹].

سازوکارهای سمیت برای پیامدهای نامطلوب میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با چند سازوکار سمیت بر سلامت انسان و محیط‌زیست اثر بگذارند. یکی از این سازوکارها تنش اکسایشی است. سطوح فعال میکروپلاستیک‌ها و آلودگی‌های همراه آن‌ها می‌توانند به‌عنوان کاتالیزگر عمل کرده و واکنش‌های شیمیایی تولیدکننده گونه‌های فعال اکسیژنی (ROS) را آسان کنند. این واکنش‌ها شامل انتقال الکترون و تولید رادیکال‌های آزاد مانند سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و هیدروکسیل است. این ROS‌ها با حمله به لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA، باعث پیش‌اکسایش لیپیدها، اکسایش پروتئین‌ها و آسیب به DNA می‌شوند. در نهایت این آسیب‌ها به اختلال در عملکرد یاخته و بافت منجر می‌شود. از آنجاکه سامانه‌های ضد اکسند بدن قادر به خنثی‌سازی کامل این ROS‌ها نیستند، عدم تعادل ایجاد شده باعث تنش اکسایشی و آسیب‌های ناشی از آن می‌شود. این فرایند سبب التهاب، بافت‌مردگی (necrosis)، خزان یاخته‌ای (apoptosis) یا مرگ برنامه‌ریزی شده یاخته یا سرطان می‌شود. سازوکار دیگر، واکنش‌های التهابی است که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با سامانه ایمنی بدن تعامل کنند و باعث تحریک یاخته‌های ایمنی، تولید سیتوکین‌ها و افزایش عوامل التهابی

شوند. این واکنش‌ها باعث تحریک سامانه عصبی مرکزی، اختلال در عملکرد کبد و کلیه یا بیماری‌های مزمن مانند آسم، دیابت یا بیماری‌های قلبی-عروقی می‌شوند [۲۹]. اختلالات ساخت‌وسازی، سازوکار دیگری است که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با تغییر در فعالیت آنزیم‌ها، هورمون‌ها یا ژن‌های مرتبط با ساخت‌وساز، باعث ایجاد اختلال در تنظیم گلوکوز، چربی یا انرژی شوند. این اختلالات می‌توانند موجب افزایش وزن و اختلالات تیروئید شوند. این سازوکارهای سمیت ممکن است بسته به نوع، اندازه، شکل، ترکیب و مقدار میکروپلاستیک‌ها، مسیر ورودی و زمان تماس با آن‌ها متفاوت باشند. بنابراین لازم است تا برای ارزیابی دقیق خطرات میکروپلاستیک‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست، مطالعات بیشتری انجام شود [۳۰].

میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان ناقل آلاینده‌های شیمیایی

علت خطر اصلی میکروپلاستیک‌ها، پایداری و ماندگاری آن‌ها در محیط در شرایط مختلف محیطی است. افزون‌براین، در جایی که میکروپلاستیک‌ها با آلاینده‌های آب‌گریز آغشته شده و از طریق بلع به بدن اندامگان منتقل می‌شود، خطر دیگری ایجاد می‌کند. ظاهر فیزیکی و مواد شیمیایی سمی آن‌ها ممکن است آثار نامطلوبی بر اندامگان پس از فرایند بلع داشته باشد. از نظر فیزیکی وجود میکروپلاستیک‌ها با سایدگی و زخم داخلی باعث تهدید فیزیکی می‌شود و هم‌زمان مواد شیمیایی سمی نیز باعث ایجاد آثار مضر در موجودات می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها به‌دلیل داشتن سطح ویژه نسبتاً گسترده می‌توانند چند آلاینده آلی و معدنی را جذب کنند که به سمیت غیرمستقیم منجر می‌شود. افزون‌براین، انواع مختلفی از پلیمرها میل ترکیبی با آلاینده‌های مختلف مانند هیدروکربن آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، آلاینده‌های آلی دیرپا (POPs)، مولکول‌های بی‌فنیل پلی‌کلر (PCBs)، دی‌کلرودی‌فنیل تری‌کلرواتان (DDT)، آفت‌کش‌های آلی هالوژن‌دار، نونیل فنول و دی‌اکسین‌ها دارند [۲۰، ۳۰].

چالش‌های کنترل و حذف آلودگی میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها به‌دلیل آثار منفی بر جانداران دریایی و آب شیرین، نگرانی جهانی ایجاد کرده‌اند. تشخیص ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های آبی چالش‌برانگیز است، زیرا به‌راحتی می‌توان آن‌ها را با سایر مواد اشتباه گرفت. تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها نیز به‌دلیل پراکندگی و اندازه کوچک آن‌ها دشوار است. انواع روش‌ها برای حذف میکروپلاستیک‌ها، از جمله ابزارهای

زیست فناوری و مهندسی، توسعه یافته است. زیست واکنشگاه‌های غشایی بیشترین کارایی را دارند، درحالی‌که روش‌های زیست تخریب کمترین کارایی را داشته و نیاز به بهبود دارند [۳۱].

ایجاد راهبرد استاندارد برای حذف میکروپلاستیک‌ها ضروری بوده، اما هنوز پژوهش‌های زیادی لازم است. آلودگی میکروپلاستیک‌ها به سرعت قابل کنترل نیست و مشکل عدم مالکیت روشن اقیانوس‌ها نیز به این چالش می‌افزاید. همکاری جهانی برای کاهش این آلودگی ضروری است، اما ابتکارات فعلی باعث عدم توسعه رویکردهای منسجم و نظارت مؤثر بر سطح ملی و بین‌المللی، نتوانسته‌اند به‌طور مؤثر آلودگی را کنترل کنند [۹].

آلودگی میکروپلاستیک‌ها به علت ویژگی‌های دینامیکی آن‌ها، از جمله تغییرات مکانی و فصلی در توزیع، ترکیب و کمیت، چالش برانگیز است. همچنین جریان زباله‌های جاری، رشد جمعیت شهری و الگوهای استفاده از پلاستیک‌ها منابع جدیدی را به این مشکل اضافه می‌کنند. میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های پایدار و مقاوم شناخته می‌شوند که زمان ماند طولانی، قابلیت تکه‌تکه شدن و جذب سایر آلاینده‌ها را دارند. بنابراین، شناسایی انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها از نظر شکل و شکل‌شناسی برای حذف مؤثر آن‌ها ضروری است. باوجود افزایش پژوهش‌ها در این زمینه، هنوز روش‌های تحلیلی مناسب و معتبر برای شناسایی و کمی‌سازی میکرو و نانوپلاستیک‌ها وجود ندارد. همچنین، ناهمگنی خواص شیمی-فیزیکی این ذرات چالش‌های جدی برای ارزیابی‌های سم‌شناسی ایجاد می‌کند. فرایندهای تحلیل میکروپلاستیک‌ها، شامل استخراج، جداسازی، شناسایی و کمی‌سازی، همگی وقت‌گیر و پرهزینه هستند. افزون‌براین، کمبود آگاهی عمومی به عنوان مانعی برای کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها عمل می‌کند [۳۱].

راهکارهای راهبردی کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها

توسعه سیاست‌ها برای برطرف‌سازی آلودگی میکروپلاستیک‌ها

کنترل آلودگی پلاستیکی با چالش‌های زیادی مواجه است. در سال ۱۹۶۷، جامعه جهانی برای رسیدگی به مشکلات دریاها و اقیانوس‌ها فراخوانده شدند و مجمع محیط‌زیست سازمان ملل در سال ۲۰۱۷ نیز به آلودگی پلاستیکی پرداخت. بااین حال، هنوز اطلاعات جهانی کافی درباره سرنوشت نهایی پلاستیک‌ها پس از استفاده وجود ندارد. پژوهش‌ها و سیاست‌های جهانی نیاز به اقداماتی مانند ممنوعیت استفاده از کیسه‌های پلاستیکی و ریزدانه‌ها در محصولات مصرفی دارد. بسیاری از کشورها قانون مالیات بر کیسه‌های پلاستیکی و برخی موارد ممنوعیت آن‌ها را تصویب کرده‌اند، اما پیش‌بینی

می‌شود که میزان پلاستیک ورودی به اقیانوس‌ها تا سال ۲۰۲۵، دو برابر شود. ازاین‌رو، یک رویکرد چندبعدی کل‌نگر این است که در کنار کنترل و اصلاح تولید محصولات پلاستیکی به عنوان منبع تولید میکروپلاستیک‌ها باید بر تولید پلیمرهای سازگار با محیط‌زیست و توسعه روش‌های بازیافت کامل همه انواع پلاستیک‌ها و افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان برای کاهش استفاده از پلاستیک‌ها و بازیافت کامل آن‌ها تمرکز شود [۳۲].

سیاست‌ها و راهبردها با هدف کنترل آلودگی میکروپلاستیک باید بر دو حوزه کلیدی کنترل منبع آلودگی و اصلاح و پاک‌سازی آلاینده‌های میکروپلاستیک تمرکز کنند. این موارد به‌طور محدود در چند کشور اجرایی شده است، از جمله قوانین آب بدون ریزدانه‌های (۲۰۰۵) دولت ایالات متحده، ممنوعیت فروش محصولات مراقبت شخصی حاوی میکرودانه‌ها در سال ۲۰۱۷، ترویج استفاده از پلی‌لاکتید (PLA) و پلی‌هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHA) در پلیمرهای پلاستیکی مرسوم هستند [۲۶].

توسعه و جهانی شدن روش‌هایی مانند افزایش بازیافت پلاستیک‌ها، بهبود استفاده از پلاستیک به عنوان منبع انرژی و مواد خام مصنوعی، تقویت و بهبود تأسیسات تصفیه فاضلاب برای جداسازی و جلوگیری از ورود میکروپلاستیک‌ها به رودخانه‌ها و اقیانوس‌ها و تحقیق و توسعه فناوری‌های زیست‌پالایی مانند تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها با استفاده از میکروب‌ها می‌تواند امیدوارکننده باشد [۳۰]. استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب شامل صافی‌های صفحه‌ای (DF) و شنی سریع (RSF)، شناورسازی هوای محلول (DAF) و زیست واکنش‌های غشایی (MBR) در حذف بیش از ۹۵٪ میکروپلاستیک‌ها (بیش از ۲۰ mm) از پساب‌ها مؤثر هستند.

در کشور چین، آلودگی پلاستیک تحت عنوان زباله‌های جامد طبقه‌بندی می‌شود و با قانون پیشگیری و کنترل آلودگی محیط‌زیست به وسیله زباله‌های جامد مدیریت می‌شود که مکان‌های دفع زباله را نظارت می‌کند. ریختن پلاستیک در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن را ممنوع کرده و اقتصاد چرخه‌ای را ترویج می‌کند. با وجود ممنوعیت، این محصولات در کشورهایمانند ایالات متحده، کانادا، نیوزلند، هلند و ایرلند، هنوز مجاز هستند [۹، ۳۲].

مالیات بر کیسه‌های پلاستیکی یک‌بارمصرف به‌تنهایی نمی‌تواند رفتار مصرف‌کننده را تغییر دهد، به‌ویژه که این مقررات تنها در برخی مناطق کشورها اعمال می‌شود و صنایع پلاستیک نیز در برابر اجرای مالیات یا ممنوعیت‌ها مقاومت می‌کنند. توافق‌نامه‌های بین‌المللی در این زمینه ضعیف بوده و به سامانه‌های حکومتی ناکارآمد منجر

شده است. مجمع محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEA)، سه جلسه درباره آلودگی پلاستیک برگزار کرد و کمیته‌ای برای توسعه راهبردهای واکنشی از طریق سیاست‌های دولتی و گزینه‌های داوطلبانه تشکیل داد. با این حال، این اقدامات بر علل آلودگی و اجرای سیاست‌هایی که به طور جامع به مشکلات مرتبط با تولید و آثار پلاستیک پرداخته باشند، تأکید نکرده‌اند [۲۶]. برای مبارزه با آلودگی میکروپلاستیک، مشارکت پیشگیرانه میان بخشی مورد نیاز است. ذهنیت جهانی و اقدام محلی برای کاهش تهدید بسیار مهم است. قوانین و آموزش درباره آثار زیست محیطی میکروپلاستیک‌ها برای مهار خطر آلودگی پلاستیک لازم است. محصولات حاوی میکروپلاستیک‌ها باید برچسب گذاری شوند و مصرف کنندگان باید از جایگزین‌های سازگار با محیط زیست و پایدار آگاه شوند. کمپین‌هایی برای توقف استفاده از ریزدانه‌ها به وسیله برندهای بزرگ لوازم آرایشی و بهداشتی اجرا شده و محصولات غیرپلاستیکی زیستی معرفی شده‌اند. همچنین، برخی شرکت‌ها برنامه‌های موبایل را توسعه داده‌اند که اطلاعاتی درباره محصولات حاوی دانه‌های میکروپلاستیک ارائه می‌دهند تا به مصرف کنندگان در انتخاب آگاهانه کمک کنند.

مالزی با ۱۳۰۰ صنعت تولیدکننده پلاستیک، در میان ۱۰ کشور برتر دارای زباله‌های پلاستیکی با مدیریت ضعیف در رتبه هشتم قرار دارد. در سال ۲۰۱۸، دولت مالزی نقشه راهی برای مدیریت پلاستیک ارائه کرد که شامل اقداماتی مانند ایجاد نهادهای قوی، برنامه‌های آموزشی و آگاهی عمومی، استفاده از کیسه‌های زیستی، مالیات بر پلاستیک و همکاری‌های منطقه‌ای در زمینه زباله‌های دریایی است. با این حال، اقدامات مزبور با چالش‌هایی چون آگاهی ضعیف، سرعت بازیافت کم، هزینه زیاد محصولات غیرپلاستیکی و نیاز به رویکرد یکپارچه مدیریت زباله مواجه است [۲۶].

در سال ۲۰۲۰، استرالیا لایحه بازیافت و کاهش ضایعات را معرفی کرد که قانون نظارت بر محصولات موجود از سال ۲۰۱۱ را دربرمی‌گیرد. این قانون نوعی نمودار جریان از مدیریت و بازیافت زباله در داخل و قانون صادرات مواد زائد از جمله پلاستیک، کاغذ و شیشه را ممنوع می‌کند و مسئولیت پسماند آن را برعهده می‌گیرد. به طور کلی، راهبردهای حل مشکل آلودگی میکروپلاستیک‌ها باید بر موارد زیر تمرکز کنند:

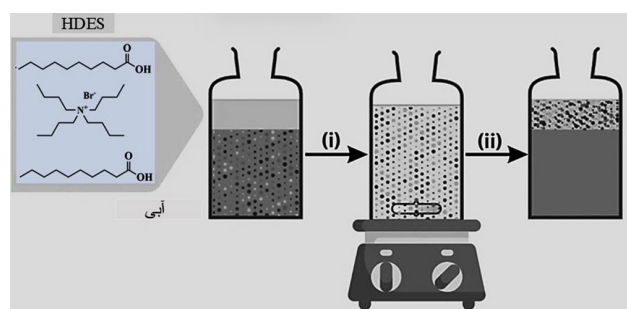
- ۱- کنترل منبع که معمولاً با قانون گذاری و برنامه‌های افزایش آگاهی به دست می‌آید؛
- ۲- اصلاح و پاک سازی برای از بین بردن میکروپلاستیک‌های موجود. میکروپلاستیک‌های موجود در لوازم آرایشی، منبع اصلی

میکروپلاستیک‌های اولیه در محیط زیست هستند. برای کاهش پلاستیک‌های یکبار مصرف، تلاش‌های درخور توجهی در حال انجام است. طبق برنامه‌های جدید، تمام بسته بندی‌های پلاستیکی در بازار اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۳۰ باید بازیافت پذیر باشند و مصرف پلاستیک‌های یکبار مصرف کاهش یابد. این رویکرد ترکیبی شامل مالیات، محدودیت استفاده از کیسه‌های پلاستیکی و تلاش‌های آموزشی است. محدودیت در تولید و استفاده از میکروپلاستیک‌ها همزمان با پاک سازی اقیانوس‌ها و به کارگیری فناوری‌های اصلاح برای کاهش آلودگی در بوم‌زادگان‌های آبی انجام می‌شود. انتظار می‌رود، نیمی از پلاستیک موجود در اقیانوس آرام ظرف پنج سال حذف شود [۳۳].

فناوری‌های اصلاح و جایگاه متخصصان علوم پلیمر

فناوری‌های اصلاح را می‌توان به (۱) ابزارهای مهندسی، (۲) استفاده از پلیمرهای برپایه زیست مواد یا زیست تخریب پذیر و (۳) ابزارهای زیست فناوری تقسیم کرد. اولین مورد شامل فناوری پیشرفته تصفیه فاضلاب و آب آشامیدنی است. مورد دوم شامل استفاده از باکتری‌ها برای تجزیه زیستی پلاستیک‌های موجود در محیط است.

استفاده از ریزاندامگان دارای قابلیت تخریب پلاستیک از زمینه‌هایی است که بررسی می‌شوند، به ویژه آن‌ها که از مناطق سرد قطب جنوب به دست می‌آیند. دانشمندان دانشگاه میزوری با استفاده از نوعی حلال طبیعی، موفق به حذف بیش از ۹۸٪ نانوپلاستیک‌ها از آب شدند (شکل ۳). این پژوهشگران روش پایدار و ایمنی برای پاک سازی آب از میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ارائه کرده‌اند تا از نفوذ آن‌ها به بدن و مغز جلوگیری کنند. آن‌ها توانستند با استفاده از ترکیبات مایع طبیعی با سمیت کم، حدود ۹۸٪ از ذرات نانوسکوپی پلی استیرن را در آب‌های شیرین و شور حذف کنند. حلال طراحی شده روی سطح آب شناور می‌ماند و به سرعت با آب مخلوط می‌شود. سپس، ذرات



شکل ۳- فناوری دومرحله‌ای استخراج ذرات نانوپلاستیک از آب [۳۴].

پلاستیکی را جمع‌آوری می‌کند و به سطح می‌آورد. در آزمایش آب شور، ۹۹/۸٪ از آلودگی‌های پلی‌استیرن حذف شد. این فن می‌تواند پس از پژوهش‌های بیشتر، برای پاک‌سازی آب از سایر آلاینده‌ها نیز مفید باشد [۳۴]. گروهی از پژوهشگران در چین با جوشاندن آب لوله‌کشی توانستند تا ۹۰٪ از نانوپلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها را از آب آشامیدنی حذف کنند. این راهبرد می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی ساده به‌کار رود، اما برای حجم‌های زیاد آب آلوده، کارآمد نیست [۳۵].

اقدامات عمومی انجام‌پذیر می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- ۱- استفاده از صافی‌های آبی که برای حذف میکروپلاستیک‌ها از آب لوله‌کشی طراحی شده‌اند و پارچه‌های صافی آب در یخچال برای کاهش بیشتر مصرف روزانه به‌منظور اجتناب از این ذرات مضر؛
- ۲- عدم استفاده از بطری‌های پلاستیکی برای نوشیدنی‌های خود و جایگزینی با بطری‌های شیشه‌ای یا از جنس فولاد ضدزنگ؛
- ۳- استفاده از ظروف شیشه‌ای یا سرامیکی برای نگهداری و قرارگیری مواد غذایی در ماکروویو؛
- ۴- استفاده از پارچه‌های طبیعی، لباس‌های ساخته‌شده از پنبه، بامبو یا سایر الیاف طبیعی؛
- ۵- توجه به محصولات زیبایی و بهداشتی شامل شامپو، لوسیون و مواد آرایشی برای عاری بودن از پارابن و فتالات؛
- ۶- پخت و پز آگاهانه با عدم استفاده از ظروف نچسب حاوی تفلون و سایر مواد شیمیایی مضر [۳۵].

نتیجه‌گیری

در برهه اخیر، کاهش اندازه میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های

آبی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. زباله‌های دریایی موجود به‌عنوان منبع پنهان میکروپلاستیک‌ها عمل می‌کنند و می‌توانند آثار بدخیمی بر محیط‌های آبی و خشکی بگذارند. این پلاستیک‌ها، نه تنها بر محیط‌زیست و موجودات آبی اثر می‌گذارند، بلکه در نهایت به مواد غذایی برای مصرف انسان تبدیل می‌شوند که تهدید بالقوه‌ای برای ایمنی و امنیت غذایی و کل بوم‌زادگان است. جامعه جهانی، دانشمندان و پژوهشگران و دولت‌ها باید در ارائه راهبرد عملی برای به‌حداقل رساندن کاربردهای میکروپلاستیک‌ها با یکدیگر همکاری کنند. پیشرفت‌های زیادی در چند سال گذشته در درک منابع، حمل‌ونقل، سرنوشت و آثار زیست‌شناختی میکروپلاستیک‌ها در بوم‌زادگان‌های مختلف انجام گرفته است. با این حال، هنوز دانش کمی درباره اثر بر گونه‌های مختلف و همچنین آثار چند نوع پلاستیک با ترکیبات شیمیایی و اشکال مختلف وجود دارد. مهم‌تر اینکه برای حل مشکل میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان یک مشکل جهانی لازم است، همه کشورها قوانین اجباری درباره استفاده از پلاستیک‌های بزرگ و ریزدانه تعیین کنند و ضمن آگاهی عمومی، صنایع را وادار کنند به‌جای مواد تجزیه‌ناپذیر از مواد زیست‌تخریب‌پذیر استفاده کنند. در این میان، آموزش و آگاهی‌بخشی عمومی درباره نحوه مصرف و بازیافت پلاستیک‌ها بسیار اهمیت دارد. از همه مهم‌تر، نقش متخصصان علوم پلیمر است که باید هرچه سریع‌تر راه‌حلی برای جایگزینی پلاستیک‌ها، زیست‌تخریب‌پذیرسازی، بازیافت کامل انواع پلیمرها، جایگزینی افزودنی‌های سبز، روش‌های حذف و جمع‌آوری و اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها پیشنهاد کنند.

مراجع

1. Da Costa J.P., Mouneyrac C., Costa M., Duarte A.C., and Rocha-Santos T., The Role of Legislation, Regulatory Initiatives and Guidelines on the Control of Plastic Pollution, *Front. Environ. Sci.*, **8**, 104, 2020.
2. Cole M., Lindeque P., Halsband C., and Galloway T.S., Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review, *Mar. Pollut. Bull.*, **62**, 2588-2597, 2011.
3. Picó Y. and Barceló D., Analysis and Prevention of Microplastics Pollution in Water: Current Perspectives and Future Directions, *ACS Omega*, **4**, 6709-6719, 2019.
4. Ziani K., Ioniță-Mîndrican C.B., Mititelu M. et al., A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review, *Nutrients*, **15**, 617, 2023.
5. Anik A.H., Hossain S., Alam M., Sultan M.B., Hasnine M.T., and Rahman M.M., Microplastics Pollution: A Comprehensive Review on the Sources, Fates, Effects, and Potential Remediation, *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, **16**, 100530, 2021.
6. Tirkey A. and Upadhyay L.S.B., Microplastics: An Overview on Separation, Identification and Characterization of Microplastics, *Mar. Pollut. Bull.*, **170**, 112604, 2021.
7. Dimassi S.N., Hahladakis J.N., Yahia M.N.D., Ahmad M.I.,

- Sayadi S., and Al-Ghouthi M.A., Degradation-Fragmentation of Marine Plastic Waste and their Environmental Implications: A Critical Review, *Arab. J. Chem.*, **15**, 104262, 2022.
8. Casagrande N., Verones F., Sobral P., and Martinho G., Physical Properties of Microplastics Affecting the Aquatic Biota: A Review, *Environ. Adv.*, 100566, 2024.
9. Ashrafy A., Liza A.A., Islam M.N. et al., Microplastics Pollution: A Brief Review of Its Source and Abundance in Different Aquatic Ecosystems, *J. Hazard. Mater. Adv.*, **9**, 100215, 2023.
10. Schwarzer M., Brehm J., Vollmer M. et al., Shape, Size, and Polymer Dependent Effects of Microplastics on *Daphnia Magna*, *J. Hazard. Mater.*, **426**, 128136, 2022.
11. Behera S. and Das S., Environmental Impacts of Microplastic and Role of Plasticsphere Microbes in the Biodegradation and Upcycling of Microplastic, *Chemosphere*, **334**, 138928, 2023.
12. Mutuku J., Yanotti M., Tock M., and Hatton MacDonald D., The Abundance of Microplastics in the World's Oceans: A Systematic Review, *Oceans*, **5**, 398-428, 2024.
13. Raza M., Lee J.Y., and Cha J., Microplastics in Soil and Freshwater: Understanding Sources, Distribution, Potential Impacts, and Regulations for Management, *Sci. Prog.*, **105**, 00368504221126676, 2022.
14. Yan Y.C. and Yang Z.F., Sources, Distribution, Behavior, and Detection Techniques of Microplastics in Soil: A Review, *China Geol.*, **6**, 695-715, 2023.
15. Akbari A., Taghavi K., and Jaafari J., Sources of Microplastics in the Environment and Human Exposure Routes: A Review, *Caspian J. Health Res.*, **9**, 163-176, 2024.
16. Plastic Analysis: Focus on Remediation Technologies and Occurrence in Freshwater Ecosystems, *Trends Anal. Chem.*, **113**, 409-425, 2018.
17. Green D.S., Kregting L., Boots B. et al., A Comparison of Sampling Methods for Seawater Microplastics and a First Report of The Microplastic Litter in Coastal Waters of Ascension and Falkland Islands, *Mar. Pollut. Bull.*, **137**, 695-701, 2018.
18. Mendoza L.M.R. and Balcer M., Microplastics in Freshwater Environments: A Review of Quantification Assessment, *TrAC Trends Anal. Chem.*, **113**, 402-408, 2019.
19. Renner G., Schmidt T.C., and Schram J., Analytical Methodologies for Monitoring Micro (Nano) Plastics: Which are Fit for Purpose?, *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, **1**, 55-61, 2018.
20. Patil P.M., Mahamuni-Badiger P., Ingavale R.R., Patel P.R., and Dhanavade M.J., Usage of Microplastic Beads in Pharmaceuticals and Cosmetics Industry: A Review, *Microplast. Pollut.*, 51-72, 2024.
21. Sadia M., Mahmood A., Ibrahim M. et al., Microplastics Pollution from Wastewater Treatment Plants: A Critical Review on Challenges, Detection, Sustainable Removal Techniques and Circular Economy, *Environ. Technol. Innov.*, **28**, 102946, 2022.
22. Tan A., Zhao J., Zhao Y., Li X., and Su H., Determination of Microplastics by FTIR Spectroscopy Based on Quaternion Parallel Feature Fusion and Support Vector Machine, *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, **243**, 105018, 2023.
23. Hernández Fernández J., Cano H., Guerra Y. et al., Identification and Quantification of Microplastics in Effluents of Wastewater Treatment Plant by Differential Scanning Calorimetry (DSC), *Sustainability*, **14**, 4920, 2022.
24. Silva A.B., Bastos A.S., Justino C.I., da Costa J.P., Duarte A.C., and Rocha-Santos T.A., Microplastics in the Environment: Challenges in Analytical Chemistry-A Review, *Anal. Chim. Acta*, **1017**, 1-19, 2018.
25. Melo-Agustín P., Kozak E.R., de Jesús Perea-Flores M., and Mendoza-Pérez J.A., Identification of Microplastics and Associated Contaminants Using Ultra High Resolution Microscopic and Spectroscopic Techniques, *Sci. Total Environ.*, **828**, 154434, 2022.
26. Usman S., Abdull Razis A.F., Shaari K. et al., Microplastics Pollution as an Invisible Potential Threat to Food Safety and Security, Policy Challenges and the Way Forward, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **17**, 9591, 2020.
27. Möller J.N., Löder M.G., and Laforsch C., Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 2078-2090, 2020.
28. Chatterjee S. and Sharma S., Microplastics in Our Oceans and Marine Health, *Field Actions Sci. Rep.*, **19**, 54-61, 2019.
29. Lee Y., Cho J., Sohn J., and Kim C., Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea, *Yonsei Med. J.*, **64**, 301, 2023.
30. Das A., The Emerging Role of Microplastics in Systemic Toxicity: Involvement of Reactive Oxygen Species (ROS), *Sci. Total Environ.*, 165076, 2023.
31. Yu Y., Mo W.Y., and Luukkonen T., Adsorption Behaviour and Interaction of Organic Micropollutants with Nano and Microplastics—A Review, *Sci. Total Environ.*, **797**, 149140, 2021.
32. Xanthos D. and Walker T.R., International Policies to Reduce Plastic Marine Pollution from Single-Use Plastics (Plastic Bags and Microbeads): A Review, *Mar. Pollut. Bull.*, **118**, 17-26, 2017.
33. Hettiarachchi H. and Meegoda J.N., Microplastic Pollution Prevention: The Need for Robust Policy Interventions to Close the Loopholes in Current Waste Management Practices, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **20**, 6434, 2023.
34. Ishtaweera P., Ray C.L., Filley W., Cobb G., and Baker G.A., Nanoplastics Extraction from Water by Hydrophobic Deep Eutectic Solvents, *ACS Appl. Eng. Mater.*, **2**, 1460-1466, 2024.
35. Kaushik A., Singh A., Gupta V.K., and Mishra Y.K., Nano/ Micro-Plastic, An Invisible Threat Getting into the Brain, *Chemosphere*, **361**, 142380, 2024.